

第5章 同步发电机的自动调频调载控制

根据船舶电力系统及其用电设备的要求,交流发电机投入正常运行时,要求拖动交流发电机的原动机保持恒定转速,电网频率的波动范围不超过额定频率的 $\pm 1\%$ 。由于船舶负载的不断变化,会造成电网频率变化和并联运行发电机间的有功功率分配发生改变。为保证船舶电站供电可靠、参数稳定、运行经济、使用安全,必须对单机或多台并联运行的船舶同步发电机组的频率、有功功率进行实时调节。

5.1 概述

5.1.1 发电机频率变化的原因

发电机输出的有功功率是由原动机的机械功率转化而来的,电力系统的有功负载变化(例如电动机的起动、停机等),引起发电机组转速的变化,从而使电网频率发生变化。其原因分析如下:

简单拖动系统的运动规律可用如下的运动方程来描述,即:

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中: T 是原动机的拖动力矩, T_L 是发电机的输出电磁转矩,机械角速度 $\Omega = 2\pi n/60$,

$J [kg \cdot m^2]$ 为系统转动惯量, $GD^2 [N \cdot m^2]$ 为系统的飞轮矩,这两者之间的关系为

$J = GD^2/4g$, 重力加速度常数 $g = 9.81 [m/s^2]$ 。

当 $T = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 系统以不变的转速稳定运行; 只要 $T \neq T_L$, 则 $dn/dt \neq 0$, 从而使系统处于加速或减速的变化状态。

由于电网频率 f 与发电机组转速 n 有如下关系式: $f = \frac{pn}{60}$ 。因此, 当发电机的有功负载变化时, 必定引起发电机组转速以及频率的变化。

5.1.2 发电机频率变化的危害

频率变化的危害主要有:

1. 当电网频率降低时, 会使异步电动机的转速下降, 轴上输出功率和效率降低。在电动机电压不变的情况下, 磁通以及定子电流的增加会引起铁芯和绕组发热; 当频率高于额定值时, 电动机转速升高, 其输出功率增加, 也会使电动机过载。
2. 由于原动机是按额定转速发出最大功率和最高效率设计的, 当转速变化时, 就会使原动机效率降低并使其零件磨损加剧。
3. 发电机并联运行时, 频率波动会引起各机组间有功功率分配不均匀, 各机组稳定运行的平衡状态受到破坏, 使运行不经济, 严重时还会造成有的机组过载, 或有的机组逆功, 直至整个系统崩溃。

为了保证船舶电力系统运行的可靠性和经济性,对运行中的原动机转速即发电机频率进行实时调整是十分必要的。

5.1.3 调速器及其调速特性

维持频率的稳定是保证电网供电质量的主要措施之一。在船舶电力系统中,频率的调整及有功功率分配依赖于原动机调速器的调节。调速器的作用是通过执行机构改变油量调节机构位置,进而改变供油量,将柴油机的转速调节到规定转速范围,维持柴油机转速稳定。

在自动化电站中,设置自动调频调载控制功能(简称频载调节器)。

当发电机组单机或并联运行时,随着电网有功负载的变化,依靠柴油机调速器的固有特性自动改变油门的开度,实现频率与机组间功率的分配及平衡的过程称为频率的一次调节;通过手动或自动频载调节器,控制伺服电动机的正反转,改变调速器弹簧的预紧力,使调速特性上下平移,实现频率和机组功率分配的调节过程,称二次调节。

调速器的种类主要有机械式、液压式和电子式,但无论哪种型式,其工作

原理大都是根据转速偏差的大小和极性去调节原动机,使原动机的转速维持在规定的范围内。

5.1.3.1 调速器的结构和工作原理

现以柴油机常用的离心式调速器为例来说明其工作原理及特性。它是基于离心力的原理制成的,其结构原理如图5-1所示。

调速器的竖轴1通过齿轮传动装置与柴油机9的轴连接。当柴油机转动时,轴1带动球状的(或其它形状的)离心飞锤2一起转动。飞锤2与杠杆系统连接器3连接在一起,穿过连接器的套筒4把弹簧5压在连接器上。控制伺服电动机11正反转,通过蜗轮蜗杆10,可以改变套筒4的上下位置,就改变了弹簧5的长度,相当于调节弹簧对连接器的预紧压力,套筒和弹簧是一个转速整定装置。在套筒位置不变及弹簧预紧压力一定的情况下,柴油机转速越高,飞锤的离心力越大,连接器的位置越高;反之,转速越低,连接器位置就越低。因此,柴油机的转

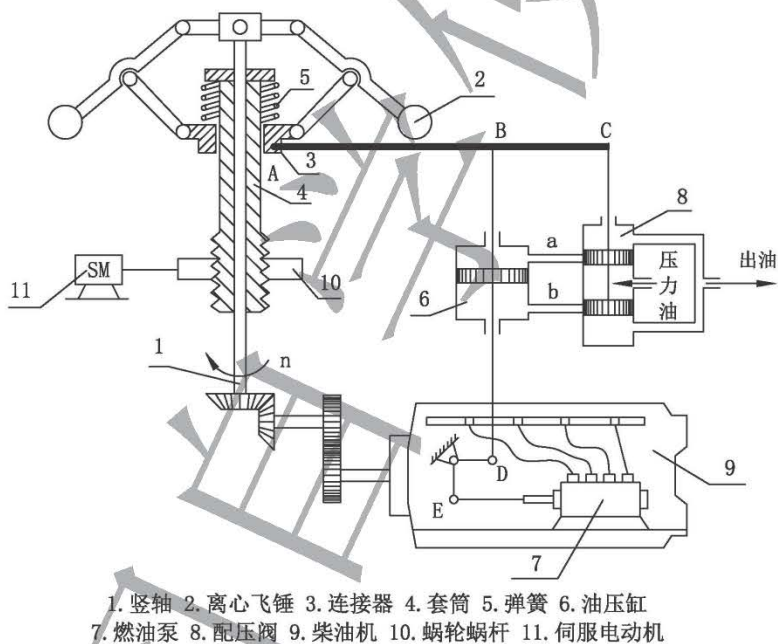


图 5-1 离心式调速器结构原理图

速与连接器3的上下位置是一一对应的。

连接器3上固定着滑动杠杆 ABC ，杠杆的 B 端接在油压缸6的活塞上，活塞的另一头，通过直角杠杆 DE 接到控制燃油泵7的油门拉杆上， ABC 杠杆的另一头 C 与配压阀8的活塞相接。当柴油机转速不变时，配压阀的活塞堵住管 a 和管 b 的通道，因此压力油不能进入油压缸6，油压缸活塞不会移动，柴油机燃油的输入量不会改变。可以看出，只要配压阀活塞（即 C 点）保持不变，柴油机就能在给定的转速下运行。

假设柴油机的工作负载为 P_1 时，调速器杠杆的位置为 $A_1B_1C_1$ ，如图5-2的位置①。当负载由 P_1 增加到 $P_2 = P_1 + \Delta P$ 时，由于柴油机输入能量小于负载需要能量，则柴油机转速降低，飞锤的离心力减小，连接器的位置从 A_1 点下降到 A'_1 点。由于油的不可压缩性，此时杠杆的 B_1 点是不动的，而配压阀活塞上移， C_1 点提升到 C'_1 点的位置（图5-2的位置②），由此打开配压阀上的管 a 和 b 管的通道。具有一定压力的油从 a 管流入油压缸6

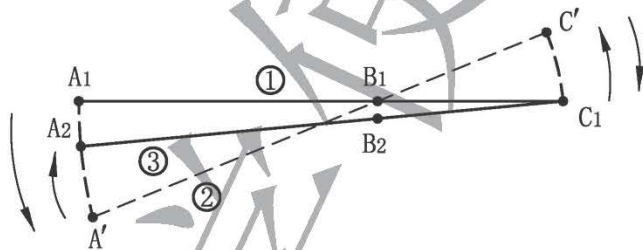


图5-2 调速器杠杆动作过程图

活塞的上部，活塞下部的油通过 b 管便从配压阀排出，活塞在油压的作用下向下移动，一方面使杠杆 B 点下降，另一方面带动直角杠杆 DE ，拉动燃油泵的拉杆左移，使油门加大。此时，进入柴油机气缸的燃油增加，柴油机的转速开始升高，连接器上升，即 A'_1 点上升，但由于这时 B_1 点在下降，因此使配压阀的 C'_1 点向下运动。当配压阀的活塞完全回到原来位置 C_1 点时， a 、 b 两管又被堵住，油压缸活塞停止运动，于是调速器工作在新的稳定平衡状态。此时 C_1 点位置与原来位置没有变化，而 B_1 点移到 B_2 点， A_1 则移到 A_2 点，杠杆处于新的平衡位置 $A_2B_2C_1$ （图5-2中③的位置）。

由上述分析不难看出，在新的稳定平衡状态下，柴油机承担负载增大，进油量也增加，但转速却下降了。所以这种调速器的调速性能是有差的。

同理，当柴油机负载减少时，调速器的动作过程与此相反。

上述分析的过程是调速器的动态调节，也称为一次调节，其调速性能是有差的。为了使原动机带载后能保持额定频率，需要对调速器进行二次调节，如图5-1所示，控制伺服电动机SM的正反转，可以改变调速器弹簧预紧力，使调速特性上下平移，实现频率的二次调节，二次调节可以改善调速器的静态特性。

5.1.3.2 调速器的调速特性分析

柴油机转速 n （或者频率 f ）与柴油机输出功率 P 的关系称为调速特性。如果转速（或频率）与输出功率的大小无关，则称为无差调速特性（图5-3曲线1）。若转速（或频率）随柴油机输出功率增加而降低，则称为有差调速特性（图5-3曲线2）。

图5-1中套筒4通过蜗轮蜗杆由伺服电动机SM进行控制，控制伺服电动机SM的正反转，可以改变套筒4的上下位置，改变调速器弹簧预紧力，使调速特性上下平移（图5-4的曲线1、2、3）。

如果柴油机负载 P_1 保持不变，对应的转速为 n_1 （调速特性曲线1），若需要提高转速时，

可接通伺服电动机SM的电源,使它朝一个方向转动(设此时为正向),它便通过蜗轮蜗杆使套筒下移,弹簧预紧力增大,A点下移,C点上升,油压缸活塞下移,油门增大。但由于负载不变,油门的增大使柴油机的转速升高,飞锤离心力增加,A点又上移,C点又回到原来位置。这时A点与B点比原来都下移了一些,柴油机工作在新的稳定平衡状态。上述的动作过程使整个调速特性也相应上移,即从曲线1移到曲线2,负载 P_1 对应的转速为 n_2 。

相反,为了降低发电机组的转速(或频率),则接通伺服电动机SM,使它朝另一方向转动(与升速时相反),使套筒4向上移动,减少弹簧预紧力,调速特性向下移动,即从曲线1移到曲线3,负载 P_1 对应的转速为 n_3 。

伺服电动机SM的控制,可以采用手动,也可以采用自动来实现,也即通过自动调频调载装置来实现。

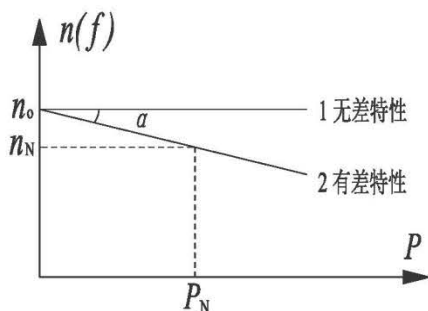


图5-3 调速特性

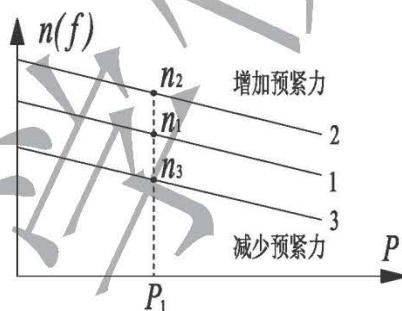


图5-4 弹簧预紧力改变使调速特性平移

5.1.4 频率及有功功率的调整

1. 频率(即转速)的调整

改变各台发电机原动机的油门的大小(对柴油发电机组),即单位时间内进入气缸的燃油量,可以改变特定负载下发电机组的转速,也就是改变了发电机的频率。

2. 并联运行同步发电机的有功功率分配(调载)

对并联运行的发电机,改变发电机间的有功功率分配,也是通过改变各原动机油门的大小(对柴油发电机组),即单位时间内进入气缸的燃油量来实现的。柴油机喷油量的大小,关系到柴油机在一定转速下的输出功率。换句话说,单机运行时,发电机的某一转速(频率)对应输出某一有功功率;对并联运行的发电机,某一频率对应着各发电机输出的功率。所以,并联机组有功功率分配与频率调整密切相关。

同容量、同型号发电机并联运行时,应将电网总负荷(包括有功功率和无功功率)平均分配给参与运行的各台机组;当不同容量的发电机并联运行时,则应将电网总负荷按各台发电机容量成比例地分配给运行的发电机,以增强并联运行的稳定性和经济性。

在船舶电力系统中,频率的调整及有功功率分配依赖于原动机调速器的调节。在各原动机调速特性相差较大或者不稳定时,为了减轻船员的劳动强度,提高供电的质量,可增加自动调频调载装置(简称频载调节器)。

我国《钢质海船入级规范》中规定:并联运行的交流发电机组,当负载在总额定功率的20%~100%范围内变化时,应能稳定运行,其有功功率分配的误差应符合下列要求:各发电

机实际承担的有功功率与按发电机额定功率分配比例的计算值之差，在发电机额定功率相同时应不超过发电机额定功率的 $\pm 15\%$ ，在发电机额定功率不同时应不超过最大发电机额定功率的 $\pm 15\%$ 和最小发电机额定功率的 $\pm 25\%$ （取其较小者）。

5.2 自动调频调载装置

船舶同步发电机并联运行时，其调速特性为有差特性，当负载变化时，虽然有调速器，但电网的频率仍会发生变化。而且，由于两机组的调速特性不可能做到完全一致，两机组的有功功率分配也不均匀。因此要维持频率恒定和有功功率按比例分配，必须进行二次调节。

自动调频调载装置是协助原动机调速器对电网电压的频率和有功功率进行二次调整的装置。其作用是，在并联运行时使电网总的有功功率按并联运行机组容量成比例进行分配，并且保持电网频率恒定；在接到解列指令时，能自动进行负载转移，然后才使解列的发电机脱离电网。自动调频调载装置是船舶电站自动化不可缺少的部分。自动调频调载装置主要有模拟式、数字式两种方式。

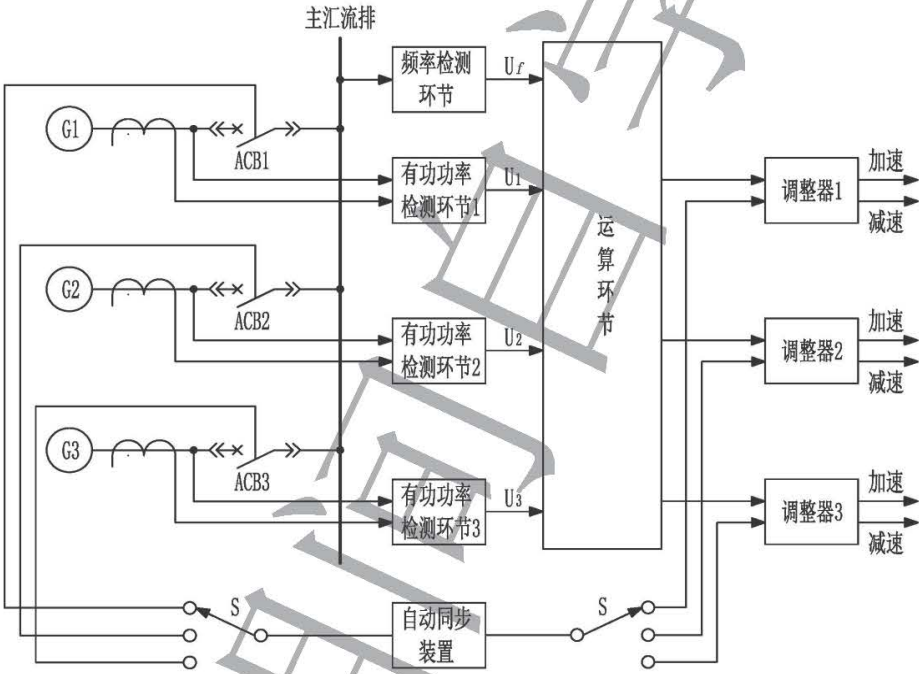


图 5-5 模拟式自动调频调载方框图

5.2.1 模拟式自动调频调载装置

5.2.1.1 基本组成

调整原动机转速及并联运行机组的有功功率，需要根据转速（频率）和负载（功率）的信号来实现调节。尽管目前自动调频调载装置的品牌很多，并且还在不断地更新换代。但基本环节都是由频率变换器、有功功率变换器、有功功率分配器和调整器等组成。

模拟式自动调频调载的电路很多,可用图5-5方框图来描述。其基本原理都是通过频率检测环节和有功功率检测环节,把汇流排的频率及各机组承担的有功功率转换成电压(或电流)信号,并送入到运算环节进行运算,根据频率偏差和有功功率分配的偏差而向调整器发出信号,控制执行机构,自动调节原动机油门,从而使电网频率维持在额定值和各机组间有功功率均匀或按发电机容量比例进行分配。

1. 频率变换器

频率变换器又称频率检测装置。它用来检测电网电压 u 的实际频率 f , 并与额定频率 f_N 进行比较得出偏差:

$$\Delta f = f - f_N$$

频率变换器将 Δf 变换为相应的与频差成正比的直流电压信号 $U_{\Delta f}$, 送到调整器进行综合比较。由于并联运行时电网频率是共同的, 因此, 每一套自动调频调载装置只需设置一个频率变换器。其方框图及所要求的输入-输出特性如图 5-6 所示。

频率变换器通常采用谐振式和基于波形变换的方式。如图 5-7 (a) 所示是基于波形变换的频率变换器的原理图。

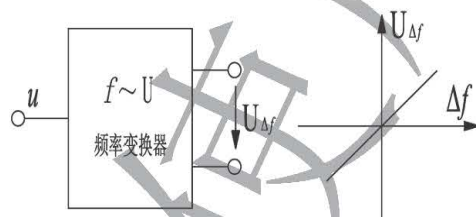


图 5-6 频率变换器及其特性

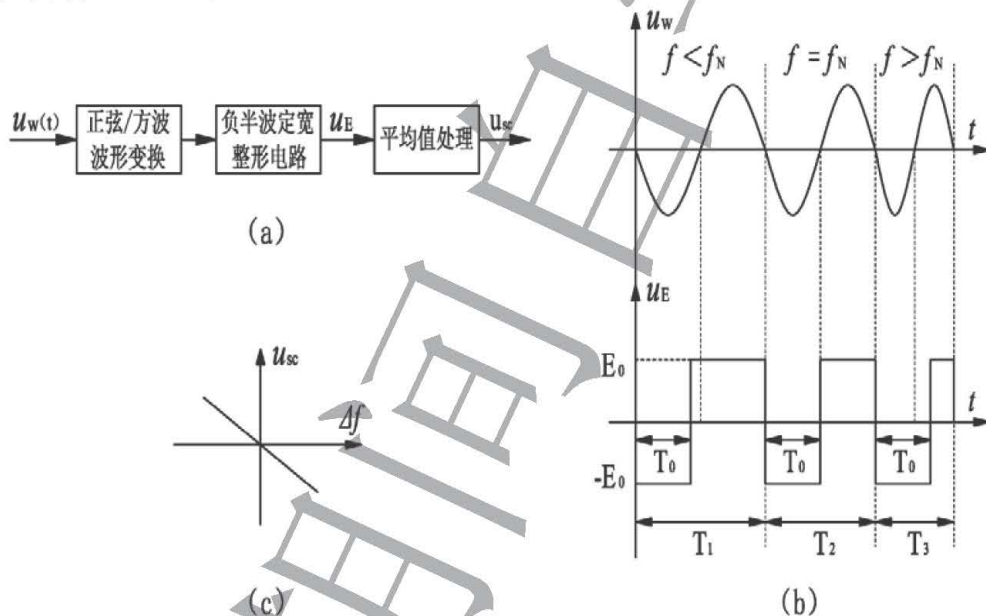


图 5-7 基于波形变换的频率变换器的原理图

这种频率变换器的工作原理如下：频率为 f 的正弦波电压 $u_w(t)$ 首先经“波形变换”单元变为和正弦波频率相同的方波，即其周期 $T = 1/f$ 。方波的幅值固定为 E_0 ；然后经“整流电路”，波形作负半周定宽整形处理，该方波负半波宽度恒为：

$$T_0 = \frac{1}{2f_N} = \frac{1}{2}T_N$$

式中, f_N 为额定频率, T_N 为额定周期。

如图 5-7 (b) 所示, $f < f_N$ 时, 整形后的正半周宽度大于 T_0 , 整个周期的平均值为正; $f > f_N$ 时, 整形后正半周宽度小于 T_0 , 整个周期的平均值为负; $f = f_N$ 时, 整形后的正半周宽度等于 T_0 , 整个周期的平均值为零。

“平均值处理”单元则对变换后的矩形波求取平均值, 得到输出电压与频率的关系如图 5-7 (c) 所示。设输入信号的频率为 f , 则平均值电路的输出为:

$$U_{sc} = \frac{1}{f} [-E_0 T_0 + E_0 (\frac{1}{f} - T_0)]$$

将 $T_0 = \frac{1}{2f_N}$ 代入上式, 整理后得:

$$U_{sc} = \frac{-E_0}{f_N} \cdot \Delta f$$

由上式可见, 变换后输出电压与电网电压的频率偏差值成正比, 而与电网电压的大小无关。

2. 有功功率变换器

有功功率变换器是用来测量每一台发电机输出的有功功率 P , 并转换成与之成正比的直流电压 U_p 。即:

$$U_p = K_p \cdot P$$

式中, U_p 为有功功率变换器的输出电压,

与 P 成正比; K_p 为功率变换系数 (伏/千瓦)。

其方框图与输入输出特性如图 5-8 所示, 由

于功率变换器需要测量每台发电机的有功功率, 因此, 每台发电机都需要一个功率变换器。

有功功率变换器的类型较多, 图 5-9 为单相功率变换器原理图。发电机电压经电压互感器 TP 接桥式二极管开关电路。发电机的电流通过电流互感器 TC 副边输出电流, 流入与 TC 并联的电阻 R_2 , 产生与电流成比例的电压信号 u_i , u_i 经二极管连接到取平均值电路。

在电压 u_v 的正半波, 四个桥式二极管均导通, 将 u_i 与平均值电路接通, 若忽略二极管压降, 则图中 1、2 两点等电位, 故 $u_p = u_i$; 在电压 u_v 的负半波, 四个桥式二极管均截止, 相当于 1、2 点间的开关断开, $u_p = 0$ 。

以电压为参考相位, 电流落后于电压 φ 角度, 即:

$$u_v = \sqrt{2}U_v \sin \omega t \text{ 和 } i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$$

$$u_p = u_i = K \cdot i = K\sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$$

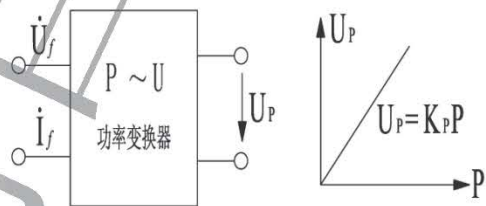


图 5-8 功率变换器及其特性

式中 K 为比例系数, 等于电流互感器的变比与电阻 R_2 的乘积。取电压 u_i 正半周波形在一个周期中的平均值, 则有:

$$U_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_p d\omega t = K \frac{\sqrt{2}}{2\pi} I \int_0^\pi \sin(\omega t - \varphi) d\omega t = K \frac{\sqrt{2}}{\pi} I \cos \varphi = K_p I \cos \varphi \propto P$$

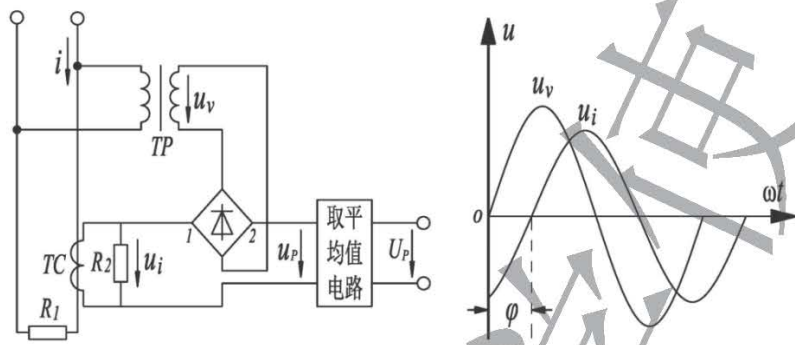


图 5-9 单相功率变换器原理电路

根据上述分析可知, 该电路检测的是发电机的有功电流。因为电网电压基本恒定, 故 U_p 与发电机的有功功率 P 成正比。电压 u_v 只用做参考相位信号, 控制二极管的导通和截止。为测量的准确性和避免在 u_v 的正半波期间和 u_i 的共同作用下出现二极管截止的情况, 应使 $u_v \gg u_i$ 。

实际船上所用的这类功率变送器采用两个单相变送器测量三相电功率, 即用两瓦特表法测三相电功率的接线原理。

3. 有功功率分配器

有功功率分配器是一种有功分配运算电路, 为实现按比例或均匀分配有功功率而设置的。运算环节主要由比较放大器和加法器组成, 它的作用是根据电网总的负载功率, 计算每台发电机应承担功率以及各台发电机实际承担的功率值与平均值之差。

并联运行机组的平均输出功率值为:

$$P_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$$

式中, n 为并联运行的机组数; p_i 为第 i 台机组的输出功率, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

各台发电机实际功率与平均值之差为:

$$\Delta P_i = P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$$

将上述功率分配偏差信号 ΔP_i 通过功率变换器转换为与之成正比的直流电压 $U_{\Delta p}$ 。即:

$$U_{\Delta p} = K_p \Delta P_i = K_p (P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)$$

有功功率分配器根据 $U_{\Delta p}$ 的大小和方向发出相应的调节信号。

4. 调整器

调整器接受频差和功差信号, 并根据频差和功差信号的大小和极性, 输出相应脉冲调整

信号,控制伺服电动机正转或反转,调节原动机的油门开度,使有功功率按比例分配,并保持电网的频率恒定。调整器的方框图如图 5-10 所示。

$$\text{图中: } U_{sr} = U_{\Delta f} + U_{\Delta P} = K_f \Delta f + K_p \Delta P_i$$

$U_{sr} < 0$ 时,调整器输出加速脉冲;

$U_{sr} > 0$ 时,调整器输出减速脉冲;

$U_{sr} = 0$ 时,停止调节。

由于要调整每台发电机组油门的大小,每台发电机组需配置一个调整器。

据上所述,调整器一般应具有如下功能:

(1) 判别综合信号的极性,决定调速方向,根据综合信号的大小,决定调速信号脉冲的周期(当脉冲宽度一定时)或者调速脉冲的宽度(当调速脉冲周期一定时)。

(2) 使每个调节过程的第一个调整信号有适当(如 5 秒左右)的延时,避开动态过程。

(3) 应有一定的不灵敏区。当输入未超过不灵敏区时,调整器不工作,这有利于防止系统过于频繁的工作。

5.2.1.2 自动调频调载方法

频载自动调节按工作原理分为:有差调节法、虚有差调节法、主导发电机法和积差调整法等。

1. 有差调节法

有差调节法是由调差系数相近的有差调速特性来恒定频率和负载分配的方法。这种方法没有外加自动调频调载装置作二次调节,各机组只由具有有差特性的调速器来控制,因此不能很好地维持频率恒定,负载分配一般也不均匀。

2. 主导发电机法

在并联运行的发电机中选择一台做为“主调发电机”,其任务是,当电网的负载变动出现频差时,由它做二次调节改变油门,调整电网的频率维持在额定值,并承担电网负载的变化量。其余的机组则总是保持运行于额定负载,称为基载发电机。

3. 虚有差调节

在并联运行的各机组上分别安装功率变换器和调整器,整套装置只装一台频率变换器。在其控制下,保持电网的频率为额定值,负载按给定比例进行机组间的合理分配。每台发电机组所装置的调速器仍是有差特性,但不影响达到无差特性的调整效果。

4. 积差调整法

按频差 Δf 对时间的积分 $\Delta F = K \int \Delta f dt$ 来进行调频的方法称为积差调整法,同时引入与各机组实际功率成正比的功率信号进行比较来校正负载分配,调整完毕时,总是保持恒频和按比例分配负载。

5.2.1.3 典型自动频载调整原理(虚有差法)

图 5-11 所示是包括 3 台发电机虚有差调节的频载调节系统方框原理图,图中, P 是功率变换器, f 是频率变换器, T 是调整器, R 是均功率电阻。为简化分析,设各台发电机功率相同,3 台功率变换器的系数 K_p 相等。各功率变换器 P 输出端“1”接成一点,称为“均功点”。频率变换器 f 的一端接于各均功电阻 R 的一端“2”点,另一端接于各调整器的一个输入端“3”点。整个装置共有三个公用点,故称为三点式网络。



图 5-10 调整器方框图

由于各均功电阻相等, 故:

$$n \cdot U = -\sum_{i=1}^n U_{Pi}$$

即:

$$U = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Pi}$$

各均功电阻上的电压为:

$$\begin{aligned} U_{Ri} &= I_i R = U + U_{Pi} \\ &= U_{Pi} + U = U_{Pi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Pi} = K_P (P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i) = K_P \cdot \Delta P_i \end{aligned}$$

由此可见, 每个均功电阻上的电压信号正好等于功率差信号。

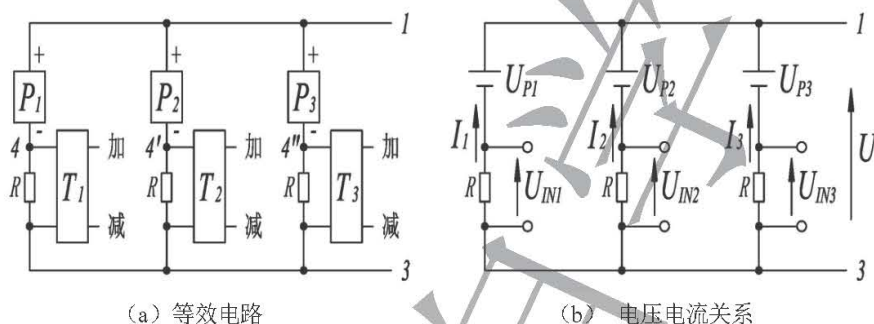


图 5-13 “恒频”时系统的等效电路

假设, 1 号发电机的输出功率 P_1 大于参与并联运行机组的平均功率 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$, 则与功率变换器串联的均功电阻 R 上将有信号电压 U_{IN1} :

$$U_{IN1} = U_{R1} = K_P (P_1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i) > 0$$

这个信号加于调整器 T_1 的输入端, 将使 1 号机减小油门, 1 号机承担的负载减少。这必然使其它机组均功电阻上的信号电压 $U_{INi} < 0$, 使其它机组调整器 T_i 发出加速脉冲, 加大油门使其承担负载增加, 一直到各机组的负载值都相等时才结束, 此时:

$$\Delta P_i = P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = 0$$

各均功电阻上的信号电压均为:

$$U_{INi} = U_{Ri} = 0$$

3. 综合调整

在实际中, 随着功率的变化, 电网的频率也会发生变化, 反之亦然。所以, 上述恒频和均功两种调节是同时进行的, 即调整器同时接受“频率差”和“功率差”信号的综合信号。即:

$$U_{INi} = K_f \Delta f + K_P \Delta P_i = K_f \Delta f + K_P (P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)$$

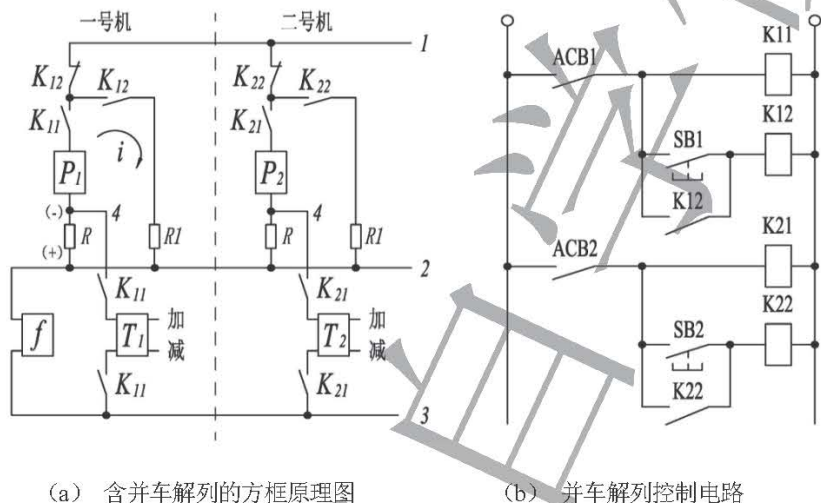
各机组的调整器按 U_{INi} 进行调整, 直到 U_{INi} 均为零, 调整才结束。

因此, 这一调整系统不论对于频率恒定, 还是对于有功功率的平均分配, 在理论上都能实现无差调整, 尽管调速器本身是有差特性。因此, 这种调节方式为“虚有差”法。

4. 发电机组的解列

图 5-14 是在并联运行时, 需要解列一台机组的自动调节。其具体过程分析如下:

若使 1 号机解列, 只要按下按钮 SB1, 使解列继电器 K12 得电, K12 常闭接点断开而常开接点闭合, 使 1 号机功率变换器脱离均功点 1, 并经解列电阻 R1 和均功电阻 R 自成一回路, 使 1 号机组不再参与功率分配的调整。但因 1 号机仍承担着负载, P_1 的输出端仍有信号电压, 它在解列回路中产生电流 i , 并在均功电阻 R 上形成一个下正上负的电电压, 这一电压经频率变换器 f (此时其输出为 0) 加入调整器 T_1 的输入端, 使 T_1 的输入端形成下正上负的电电压信号, 将发出减速信号即 1 号机卸载。



(a) 含并网解列的方框原理图

(b) 并网解列控制电路

图 5-14 解列时的调节过程

此时 2 号机还没有加大油门, 系统的频率将下降, 频率变换器输出一个上正下负的电电压信号, 它通过 2 号机的均功电阻 R 后加于 T_2 , 使 T_2 的输入端形成上正下负的电电压信号, 使 2 号机加速即加载, 力图维持系统额定频率下的功率平衡。另一方面, 频率变换器的输出电压信号与解列电路产生的电压信号 (作用在 T_1 的输入端) 极性相反, 从而减缓了 1 号机卸载的速度, 以保证电力系统能在不太大的频率偏差下, 均匀缓慢地实现负载转移。1 号机的全部负载逐渐转移到 2 号机, 电网的频率仍维持恒定。

图 5-14 中, 继电器 K11、K21 是受 1 号、2 号机主开关辅助触点 ACB1、ACB2 控制的继电器。设 1 号机已在网运行, 其主开关 ACB1 常开触点闭合, K11 得电, 1 号机将被控, 运行于额定频率。若 2 号机投入并联, ACB2 使 K21 得电, 其常开触点闭合。此时, 系统将在频载自动调整器的作用下实现均功率及恒频率运行。

5.2.2 数字式调频调载装置

目前在船舶电站自动控制系统中, 大多采用 PLC 或单片机控制, 调频调载的控制大多也是通过程序实现。控制程序主要包括单机运行时的频率调节和并联运行时的频率及有功功率的自动调节 (本节以同容量双机并联运行为例进行分析)。

1. 单机稳频程序

船舶电站处于单机供电时,如果负载发生变化则会引起电网频率产生波动。图 5-15 是单机运行时频率调节流程图,PLC 根据船舶电网的频率变化去控制加减油门,使频率维持在规定的范围内即可。

系统启动后,控制器首先判断在网机组是否为单机在网。如果是,则运行单机频率检测程序,否则程序返回。如果检测到的频率范围稳定在 $50\pm 0.25\text{Hz}$ 之间,则程序返回。如果检测到的频率值低于 49.75Hz ,则 PLC 会发出机组加速调节信号,进行加速操作;若频率值高于 50.25Hz ,则 PLC 会发出机组减速调节信号,控制发电机减速运行;直到电网频率范围稳定在 $50\pm 0.25\text{Hz}$ 之间。

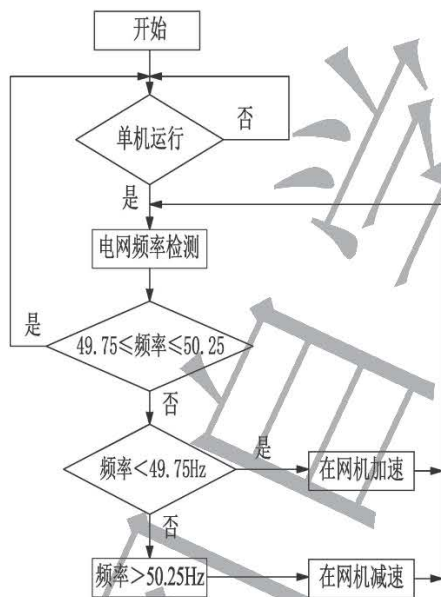


图 5-15 单机稳频流程图

2. 并联运行时调频调载程序

图 5-16 是双机并联运行时自动调频调载程序流程图。程序开始执行后,控制器首先判定在网运行机组是否是双机并联,若不是,系统将进行单机稳频调节程序。若系统判断在网运行机组是双机并联,则程序对电网频率以及两台发电机组的有功功率进行采集。PLC 能够根据电网的频率及两台发电机组有功功率之差完成对机组调速逻辑判断,并输出相应地调速信号,使电网频率最终稳定在额定值并且把电网负载平均分配给每台发电机组。

(1) 当电网频率在 $50\pm 0.25\text{Hz}$ 之间,若两台发电机的有功功率差不在允许范围内,PLC 会向实际功率高的发电机发出减速信号,同时向实际功率低的发电机发出加速信号,最终使两台发电机实际输出的功率大致相近,在允许范围内,实现了有功功率的平均分配;若两台发电机的有功功率差在允许范围内,则不做调节,程序返回。

(2) 当电网频率大于 50.25Hz ,若两台发电机的有功功率差不在允许范围内,PLC 会

向实际功率高的发电机发出减速信号；若两台发电机的有功功率差在允许范围内，PLC 会同时向并联机组发出减速信号，控制两台机组一起减速，来调节电网频率使其稳定在 $50 \pm 0.25\text{Hz}$ 之间。

(3) 当电网频率小于 49.75Hz ，若两台发电机的有功功率差不在允许范围内，PLC 会向实际功率低的发电机发出加速信号；若两台发电机的有功功率差在允许范围内，PLC 会同时向并联机组发出加速信号，控制两台机组一起加速，来调节电网频率使其稳定在 $50 \pm 0.25\text{Hz}$ 之间。

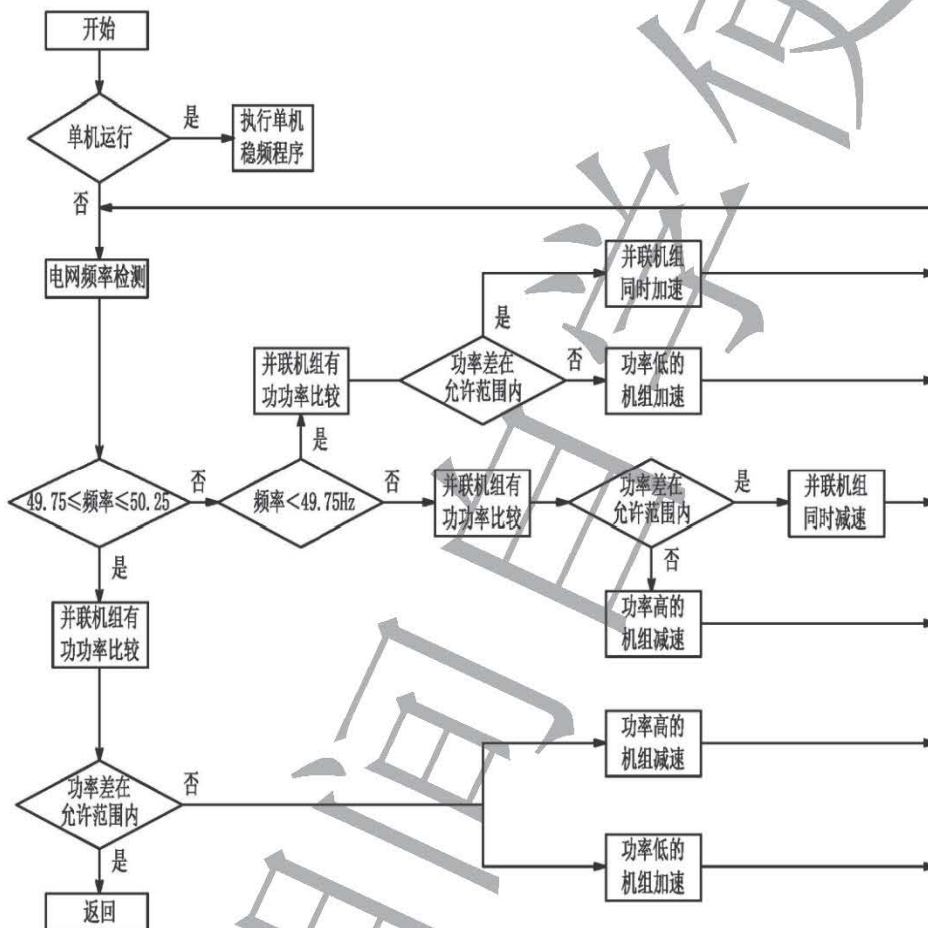


图 5-16 双机并联运行自动调频调载流程图

3. 解列与停机程序

图 5-17 是解列与停机流程图。当出现下列情况时 PLC 会发出解列、停机的信号。

(1) 当在网运行机组为单机运行时，该机组出现一般性故障（如滑油压力、冷却水温度报警等信号），PLC 先控制备用机组启动，控制备用机组与在网运行机组完成并车操作，然后 PLC 向故障机组发出减速信号，同时向留用机组发出加速信号，将故障机组的负载转移给留用机组。当故障机组的实际输出功率减小到其额定功率的 5% 时，PLC 向故障机组发出主

开关分闸信号。主开关分闸后，延时 10s 后 PLC 发出停机指令使故障机组停机。

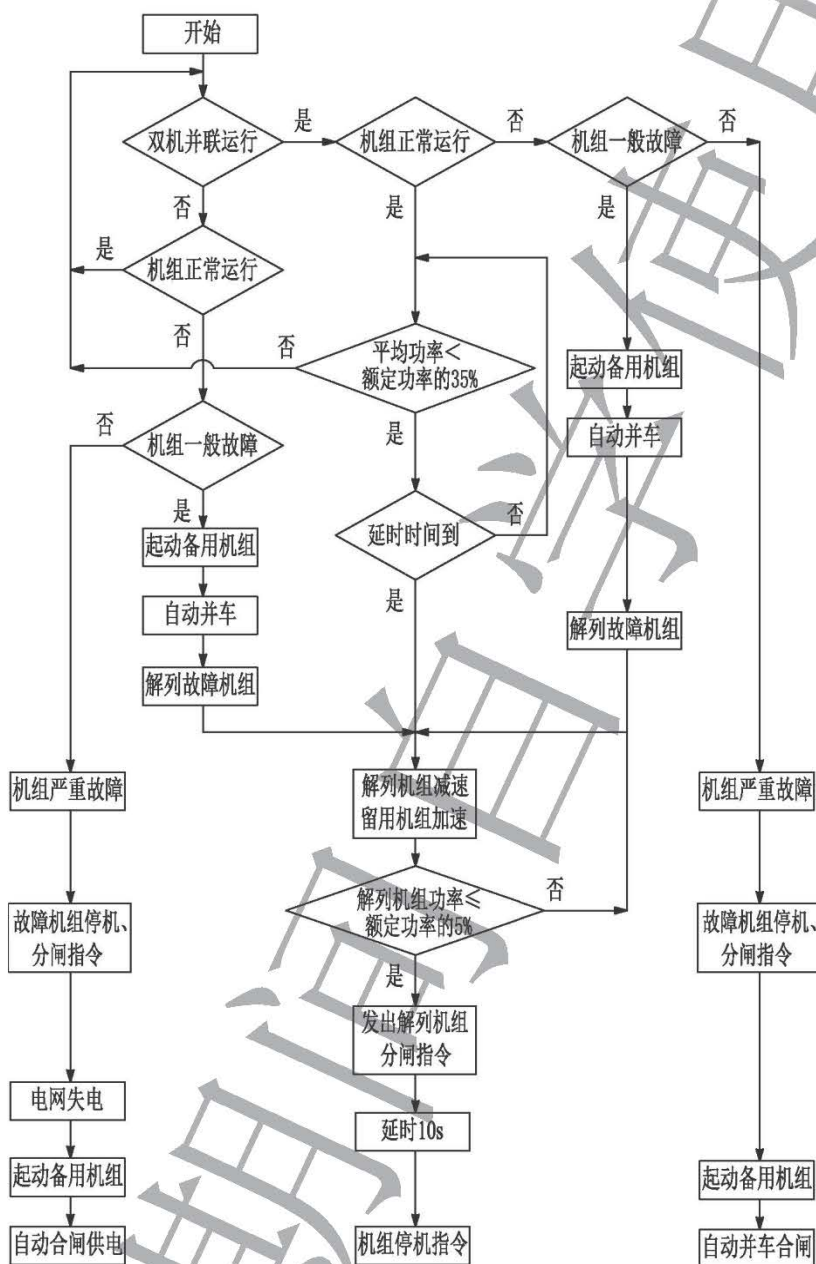


图 5-17 解列与停机流程图

(2) 当在网运行机组为单机运行时，如果该机组发生严重故障（如滑油压力、冷却水温度、超速停机信号），PLC 向故障机组发出停机及分闸信号直接使故障机组脱离电网。此类情况，在备用机组正常起动供电之前，电网会出现短时的失电。

(3) 当两台机组同时在网供电时, 如果每台机组的实际输出功率的平均值低于额定功率的 35%, 则经延时确认后 PLC 向解列机组发出减速信号, 同时向留用机组发出加速信号, 将解列机组的负载转移给留用机组。当需要解列机组的输出功率减小到其额定功率的 5% 时, PLC 向需要解列机组发出主开关分闸指令。主开关分闸后, 延时 10s 后发出停机信号, 将已解列机组停机。

(4) 当在网机组为双机并联运行时, 如果出现一般性故障, PLC 先控制备用机组启动, 控制备用机组与在网运行机组完成并车操作, 然后 PLC 向故障机组发出减速信号, 同时向留用机组发出加速信号, 将故障机组的负载转移给留用机组。当故障机组实际输出的有功功率减小到其额定功率的 5% 时, PLC 向故障机组发出主开关分闸指令。主开关分闸后, 延时 10s 后 PLC 发出停机指令, 使故障机组停机。

(5) 当在网机组为双机并联运行时, 如果出现严重故障, PLC 则直接发出故障机组的停机及分闸指令。此类情况, 留用机组可能会出现过载。

本章小结

本章讲述的主要内容有：发电机频率变化的原因及危害；发电机单机运行时频率的调整；并联运行同步发电机的有功功率分配与调速特性的关系；模拟式自动调频调载装置的基本组成；数字式调频调载装置的程序流程分析。

本章的重点内容如下：

1. 发电机频率变化的原因。
2. 调速器的一次调节、二次调节的概念。
3. 并联运行同步发电机的有功功率分配与调速特性的关系。
4. 自动调频调载装置的作用。

复习思考题

- 5-1 简述发电机频率变化的原因。
- 5-2 什么是调速器的一次调节、二次调节？
- 5-3 如图 5-2 所示是调速器杠杆动作过程图，假设柴油机的原工作负载为 P_1 ，当负载增加时，叙述其调整过程。
- 5-4 简述自动调频调载装置的作用。
- 5-5 简述模拟式自动调频调载装置的基本环节。
- 5-6 如图 5-15 所示是单机运行时频率调节流程图，叙述其工作过程。
- 5-7 简述数字式调频调载装置中的双机并联运行自动调频调载工作原理。
- 5-8 在数字式调频调载装置中，当在网运行机组为单机运行时，如果该机组出现一般性故障，叙述其工作过程。
- 5-9 在数字式调频调载装置中，当在网运行机组为单机运行时，如果该机组发生严重故障，叙述其工作过程。
- 5-10 在数字式调频调载装置中，当两台机组同时在网供电时，如果每台机组的实际输出功率的平均值低于额定功率的 35%，叙述其工作过程。
- 5-11 在数字式调频调载装置中，当在网机组为双机并联运行时，如果出现一般性故障，叙述其工作过程。
- 5-12 在数字式调频调载装置中，当在网机组为双机并联运行时，如果出现严重故障，叙述其工作过程。

第6章 船舶同步发电机电压及无功功率的自动调整

当船舶电网负载变化（主要是电动机的起停）时，由于电枢反应的去磁效应的变化，会直接影响到船舶电源（发电机）的各种参数（电压、电流、频率和功率等），而电源的参数变化又直接影响到用电设备的运行状态。当实际电压偏离额定值时，用电设备的效率会降低，偏离值过大时，运行会恶化，甚至会导致设备的损坏。如果电网电压下降过多，会使某些电器误动作，发生发电机主开关跳闸甚至全船停电等严重事故。

发电机组并联运行时，为保证并联运行的稳定性，各发电机间无功功率必须合理分配。

电压自动调整装置的作用就是保证发电机电压维持在一定的允许范围之内，且能在发电机组并联运行时对发电机间无功功率进行合理分配。

6.1 发电机电压变化的原因、危害及调整措施

6.1.1 发电机电压变化的原因

引起电网电压波动的主要原因是负载变化。负载电流大小变化或负载功率因数变化都将引起发电机的电枢反应发生变化，从而引起发电机端电压变化。船舶大多是感性负载，且变化无规律。如图 6-1 所示是发电机带感性负载时的简化相量图，忽略发电机电枢内阻，电压平衡方程式为：

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_s \dot{I}$$

式中： \dot{U} 为发电机端电压； \dot{E}_0 为发电机空载电动势； \dot{I} 为发电机电枢电流； X_s 为发电机同步电抗。

可见，当 \dot{E}_0 不变而 \dot{I} 变化，即电流大小或性质变化时，都将引起电压 \dot{U} 变化。在感性负载时，负载电流主要起去磁作用， \dot{E}_0 还会变小，发电机输出电压更小。

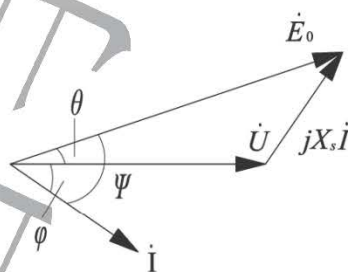


图 6-1 发电机简化相量图

6.1.2 发电机电压变化的危害

1. 对电动机的影响

当船舶发电机实际输出电压偏离额定值时，用电设备的效率就会降低，偏离额定值过大时，运行状态就会恶化，甚至会导致设备的损坏。例如：当电动机的端电压较其额定电压低 10% 时，由于其转矩与其端电压平方成正比，因此其转矩将只有额定转矩的 81%，而负载电流将增大 5%~10% 以上，温升将增高 10%~15% 以上，绝缘老化程度将比规定增加一倍以上，这将明显地缩短电动机的使用寿命。同时由于转矩减小，转速下降，不仅会降低生产效率，而且还会影响运行质量，甚至造成危害；当其端电压较其额定电压偏高时，负载电流和温升也将增加，绝缘相应受损，对电动机也是不利的，也会缩短使用寿命。

2. 对电光源的影响

电压变化对白炽灯的影响最为显著。当白炽灯的端电压降低 10% 时，灯泡的使用寿命将延长 2~3 倍，但发光效率将下降 30% 以上，灯光明显变暗，照度降低，严重影响人的视力健康，降低工作效率，还可能发生事故；当其端电压升高 10% 时，发光效率将提高 1/3，但其使用寿命将大大缩短，只有原来的 1/3。

电压变化对日光灯及其他气体放电灯的影响不像白炽灯那么明显,但当其端电压偏低时,灯管不易启辉。如果多次反复启辉,则灯管寿命将大受影响。而且电压降低时,照度下降,影响视力及工作;当其电压偏高时,灯管寿命又要缩短。

3. 对电网的影响

电压变化对电网的影响主要表现在给全船用电所带来的危害,而这种危害可能是致命的。船舶电网电压深度下降时,将可能导致保护电器动作,造成发电机跳闸,甚至出现电网崩溃全船停电的严重事故。所以,船舶交流电网的电压必须保持恒定,其电压偏差不应超出规定的范围。

6.1.3 发电机电压变化后的调整措施

维持电压的稳定是保证电网供电质量的主要措施之一。当电压波动时,通常是靠调节发电机励磁电流的大小来进行恒压控制的。

由发电机的电压方程式 $\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_s \dot{I}$ 可知,当负载电流 \dot{I} 变化时,要想保持发电机端电压 \dot{U} 一定,唯有随之相应改变发电机的空载电动势 \dot{E}_0 。根据前面分析的空载电动势的有效值公式 $E_0 = 4.44kNf\phi_m$,当发电机频率不变时, $E_0 \propto \phi_m$,要改变 E_0 ,只有改变 ϕ_m 。而 ϕ_m 是由励磁电流 I_f 产生的,在磁路未饱和时磁通与励磁电流成正比,即 $\phi_m \propto I_f$ 。如图 6-2 所示是自励同步发电机单线原理图。

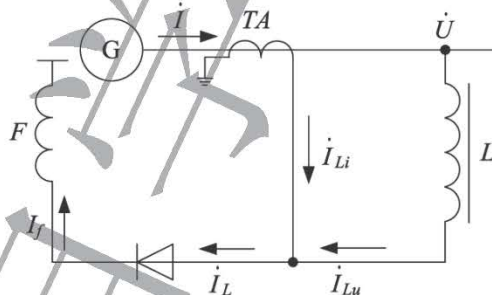


图 6-2 自励同步发电机单线原理图

由上述关系可以看出: E_0 与励磁电流 I_f 存在对应关系,改变励磁电流 I_f 的大小可以改变发电机空载电动势 E_0 。因此,当负载电流 \dot{I} 变化时,要保持电压恒定,必须相应调整发电机的励磁电流 I_f 。也就是说,要使 I_f 随负载电流的大小和功率因数的变化而改变,以补偿电枢反应去磁作用的影响。如图 6-3 所示是发电机的外特性,图 6-4 所示是发电机的调整特性。

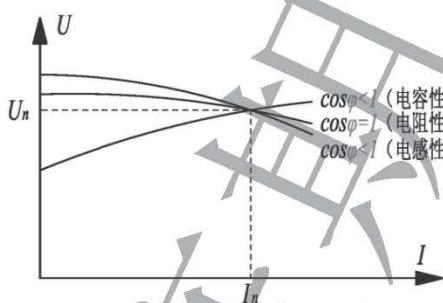


图 6-3 发电机的外特性

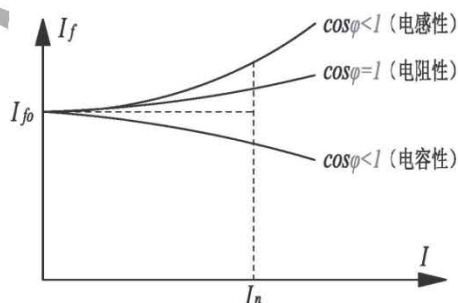


图 6-4 发电机的调整特性

电压自动调整装置实质上是励磁电流自动调整装置(简称调压器、励磁系统或自励恒压

装置)。发电机单机运行时,调整励磁电流可以对电压进行调整。发电机并联运行时,调整励磁电流还可以改变发电机之间无功功率的分配。

6.2 自励恒压装置的作用、技术指标、分类及调压原理

自励恒压装置是发电机的重要组成部分,它的主要任务是根据发电机的各种运行状态,向发电机的励磁绕组提供一个可调的直流电流,以稳定发电机的输出电压。性能优良、可靠性高的自励恒压装置是保证发电机安全发电,提高电力系统稳定性所必须的。

6.2.1 自励恒压装置的作用

发电机端电压是由励磁电流产生的,为了维持发电机的端电压几乎不变,发电机的励磁电流必须适时地做相应调整。

为了提高船舶供电的可靠性和经济性,船舶电站应根据不同工况,合理地进行发电机组的并联运行。为使发电机组并联运行稳定,各发电机间无功功率必须进行合理分配。

在船舶电网发生短路故障时,为提高发电机并联工作的稳定性和相关保护电器动作的可靠性,需要励磁系统适时地进行强行励磁。

综上所述,自励恒压装置的主要作用可归纳为:

1. 在船舶电力系统正常运行工况下,维持电网电压在允许范围内。
2. 在船舶发电机并联运行时,使发电机间无功功率分配合理。

3. 具有一定的强行励磁能力,在船舶电网短路故障时,提高电力系统并联运行的稳定性和保护装置动作的可靠性。

6.2.2 自励恒压装置的技术指标

在电网负载变化时,自励恒压装置维持发电机端电压的恒定存在一个调整过程,如图 6-5 所示。

图中,在 t_0 时突加感性负载,因去磁作用使电压瞬时下降到 U'_{min} 。由于调压器的作用,使端电压在 t_F 时恢复到接近额定电压 U_N 的数值 U_{min} 稳定工作;此后,在 t'_0 时突卸负载,因去磁作用减小使电压瞬时上升到 U'_{max} 。由于调压器的作用,在 t'_F 时电压恢复到 U_{max} 稳定工作。

为了保证供电质量,电压调整必须满足两个基本技术指标:静态(稳态)指标、动态(瞬态)指标。

1. 发电机稳态电压变化率

我国《钢制海船入级规范》中对稳态指标规定为:交流发电机连同其励磁系统,应能在负载自空载至额定负载范围内,且其功率因数为额定值情况下,保持其稳态电压的变化值在额定电压的 $\pm 2.5\%$ 以内。应急发电机可允许为 $\pm 3.5\%$ 以内。

发电机稳态电压变化率可按式计算:

$$\Delta U\% = \frac{U_{\max}(\text{或}U_{\min}) - U_N}{U_N} \times 100\%$$

式中, U_{\max} : 在规定的负载变化范围内, 发电机输出端的最大稳态电压; U_{\min} : 在规定的负载变化范围内, 发电机输出端的最小稳态电压; U_N : 发电机的额定电压。

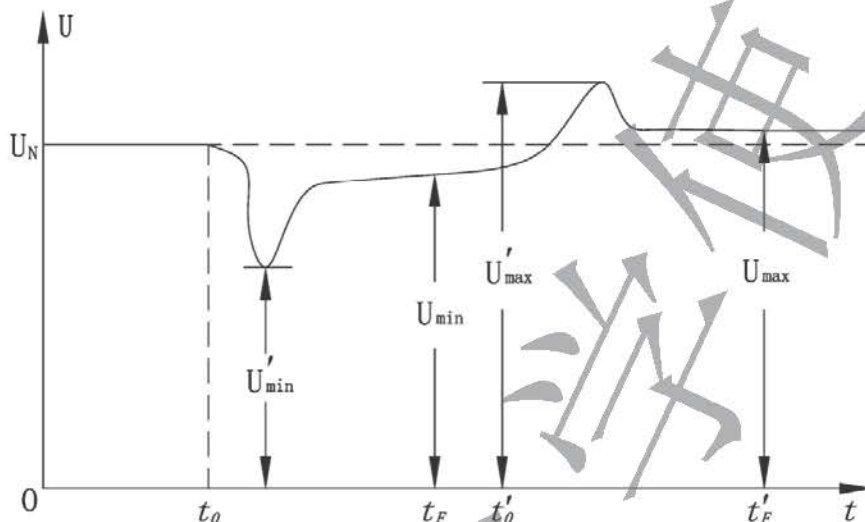


图 6-5 电压调整过程曲线

2. 发电机动态特性

动态特性有两个指标：其一是当电网负载突变后，对应的电压最大波动值，称为动态电压调整率（动态电压变化率）；另一个是指自负载突变时，从电压发生波动开始到电压恢复到稳定值的一定容许差值范围内所需要的时间，叫做电压波动恢复时间。

《钢制海船入级规范》对动态指标的规定是：交流发电机在负载为空载、转速为额定转速、电压接近额定值的状态下，突加和突卸 60% 额定电流及功率因数不超过 0.4（滞后）的对称负载时，当电压跌落时，其瞬态电压值应不低于额定电压的 85%；当电压上升时，其瞬态电压值应不超过额定电压的 120%，而电压恢复到与最后稳定值相差 3% 以内所需的时间，则不应超过 1.5s。

发电机动态电压变化率可按下式计算：

$$\Delta U_d\% = \frac{U'_{\max}(\text{或}U'_{\min}) - U_N}{U_N} \times 100\%$$

式中, U'_{\max} : 动态过程中的最大电压; U'_{\min} : 动态过程中的最小电压; U_N : 额定电压。

6.2.3 自励恒压装置的分类及调压原理

同步发电机自励恒压装置种类较多，其发展大致经历了带直流励磁机的励磁系统、不带励磁机的相复励恒压励磁系统、晶闸管励磁以及具有交流励磁机的无刷励磁系统等几个阶段。

目前船用发电机采用自励方式，依靠剩磁起压，其直流励磁电流由自身定子绕组输出的交流电经过整流后获得。各类装置的基本调压原理都是通过对发电机端电压，或者负载电流

的大小及功率因数的变化来调整励磁电流, 从而实现输出端电压的恒定。

按照被检测量, 自励恒压装置主要分为三大类:

1. 按发电机电压偏差 ΔU 调节 (可控自励恒压装置)

按发电机电压偏差调节的系统, 其被测量是发电机的端电压 U , 被调量也是端电压 U , 这样的自动调节系统称为“闭环系统” (也称为可控系统), 图 6-6 是其原理框图。发电机电端电压 U 在扰动的作用下偏离给定的范围, 给定单元的给定值 U_g 与测量单元测得的 U_f 相比较, 得出偏差量 ΔU , 经放大后为 $K\Delta U$, 经信号变换单元处理, 输出调节发电机电压的控制信号 I_{f1} , 使发电机电压 U 恢复到给定的范围内。

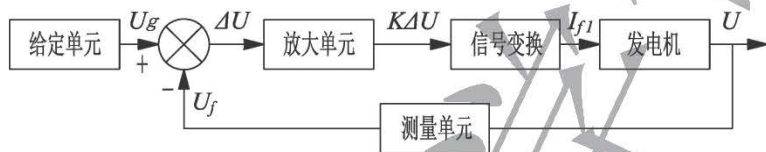


图 6-6 按电压偏差调节的原理框图

按偏差调节的系统, 调节作用只与电压偏差有关, 而与产生扰动的原因无关, 其静态特性即调整精度较好; 而动态过程是一个周期性的振荡过程, 动态特性较差。

2. 按负载电流大小 I 及功率因数 $\cos\varphi$ 调节 (不可控相复励自励恒压装置)

由于引起电压变化的主要原因是负载电流大小及相位的变化, 只要预先找出发电机电端电压随负载电流大小及相位变化的规律, 并按此规律调节补偿发电机所需的励磁电流, 就可以维持发电机电端电压在一定水平上。图 6-7 是按负载电流大小及相位调节的原理框图, 当负载变化引起电压变化时, 测量出励磁电流的电压分量 I_{Lu} 和电流分量 I_{Li} , 合成后经信号变换单元,

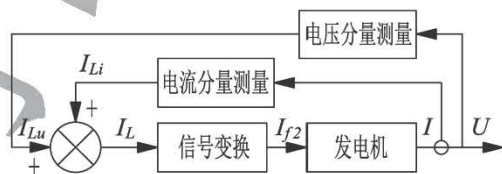


图 6-7 按电流调节的原理框图

输出调节发电机电压的控制信号 I_{f2} , 使发电机电压 U 恢复到给定的范围内。

发电机的励磁电流是按负载电流大小 I 及功率因数 $\cos\varphi$ 调节的, 由两个分量叠加合成, 称为“相复励”系统。

相复励调节系统的被调量是发电机电压 U , 而被测量是负载电流大小 I 和相对发电机电压 U 的相位。每一个负载电流的大小和相位都有一个既定的输出电压 U 与之对应。这种调节系统的被调量 (电压) 没有反馈到输入端, 是一个开环系统 (也称为不可控系统), 由人工预先调整好电抗器、变压器等的气隙和线圈匝数, 系统根据负载状态来控制被调量, 即仅根据负载变化提供相应的励磁电流。

3. 复合调节 (按 I 及 $\cos\varphi$ 和 ΔU 调节) (可控相复励自励恒压装置)

按电压偏差调节的自励恒压装置,静态性能好,动态性能差;按负载电流大小及相位进行补偿调节的装置,动态性能好,静态性能差。综合这两种调节方法,既按负载电流大小及相位进行补偿,又按电压偏差校正,可以取长补短获得较好的调节效果。

图 6-8 是复合调节的原理方框图。如前所述的相复励励磁系统的调节是“不可控”的,在此基础上,增加了按电压偏差进行调节(实船中将此部分专门做成自动电压调节器 AVR),使相复励的装置输出“可控”,用这种原理构成的励磁调节装置称为“可控相复励”装置。这种类型的励磁调节系统的动态性能由相复励部分实现,静态性能的不足则由自动电压调节器 AVR 来校正。

在实船中基本都采用复合调节的可控相复励自励恒压装置。

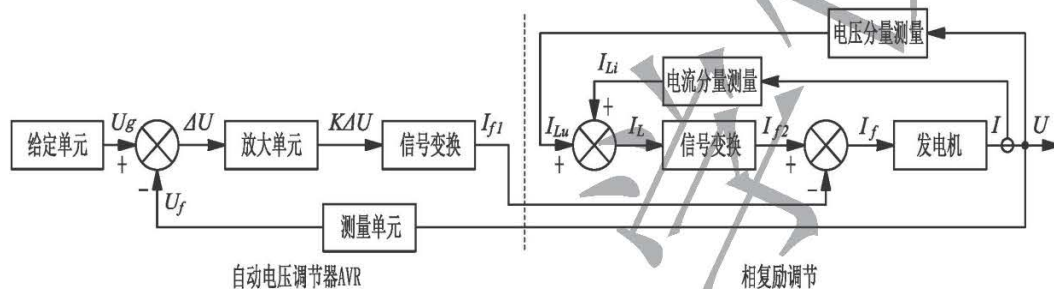


图 6-8 按 I 和 $\cos\varphi$ 及 ΔU 调节的原理框图

6.3 相复励自励恒压装置原理分析

不可控相复励自励恒压装置具有结构简单、管理方便、价格便宜、动态特性优良,并在恶劣环境下可靠工作等优点,在船舶中广泛使用。该装置利用发电机本身的剩磁电压进行自励起压,根据负载电流的大小进行复励以及电压电流的相位关系进行相位补偿,以调整励磁电流,达到恒压目的。根据电压分量和电流分量叠加方式的不同,主要可分为电流叠加、电动势叠加和电磁叠加三种方式。目前在船舶中基本都采用电磁叠加方式。

可控相复励自励恒压装置是在“不可控”的基础上,增加了 AVR 的校正环节,从而实现发电机输出电压的“可控”调节。

6.3.1 不可控电流叠加相复励装置调压原理

1. 电流叠加相复励装置的电路组成

图 6-9 是电流叠加相复励装置原理图,其主要元件及其作用是:

G: 交流发电机。图中虚线框内包含发电机的三相定子绕组和转子励磁绕组 F。

L: 移相电抗器。将由发电机电压 U 产生的电流移相 90° 为 \dot{I}_{Lu} , 称为励磁电流的电压分量(又称空载分量),主要作用是自励起压。电抗器线圈有抽头可调,调整线圈匝数可改变感抗 X_L , 改变电压分量 \dot{I}_{Lu} 的大小,以整定发电机空载电压。

TA: 电流互感器。它反映发电机负载电流 \dot{I} 的大小和相位, 其副边电流 \dot{I}_{Li} 称为励磁电流的电流分量 (又称复励分量), 主要作用是调压, 按负载电流的变化进行相复励调压。其副边有抽头可调, 调整匝数可改变电流分量 \dot{I}_{Li} 的大小, 以整定发电机带载电压。

R、C: 三相桥式整流器 (整流桥) 的阻容保护。三相桥式整流器的作用是将交流侧合成电流 $\dot{I}_L = \dot{I}_{Lu} + \dot{I}_{Li}$ 整流成直流励磁电流 I_f , 供励磁绕组 F 励磁。

该相复励装置所提供的励磁电流为两部分: 一部分是由发电机本身的电压 \dot{U} 通过自励回路提供的自励电流 \dot{I}_{Lu} , 它是励磁电流 \dot{I}_L 的电压分量; 另一部分是由发电机本身的负载电流 \dot{I} 通过复励回路提供的复励电流 \dot{I}_{Li} , 它是 \dot{I}_L 的电流分量。 \dot{I}_{Lu} 和 \dot{I}_{Li} 是以电流的形式在整流器交流侧相量叠加成为 \dot{I}_L , 并经整流后形成总的直流励磁电流 I_f 去供励磁绕组 F 进行励磁。所以, 该装置是电流叠加的相复励自励恒压装置。

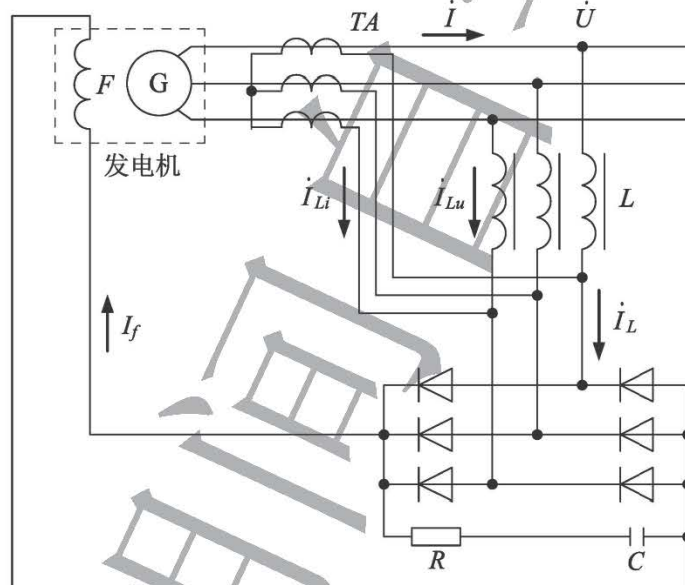


图 6-9 电流叠加相复励装置原理图

2. 电流叠加相复励装置的单相等效电路分析

如图 6-10 所示, 为简化问题, 假设同步发电机负载对称, 将整流桥的直流侧阻抗, 包括转子励磁绕组内阻、碳刷滑环接触电阻和整流桥本身阻抗, 一起折算到整流桥的交流侧, 近似等效为一个三相对称的线性电阻 R_f ; 忽略电抗器 L 的电阻 R_L , 感抗为 X_L ; 忽略电流互

感器的损耗, 设原副边匝数比为 K ($K < 1$), I 为发电机电流, 可得出其单相电路图。

在图 6-10 (a) 中, 可得到:

$$\dot{I}_L = \dot{I}_{Lu} + \dot{I}_{Li}$$

在图 6-10 (b) 中, 应用叠加原理分别考虑电压源、电流源作用, 可得到:

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{R_f + jX_L} + \frac{jX_L}{R_f + jX_L} K \cdot \dot{I}$$

当 $X_L \gg R_f$ 时, 上式可表示为:

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{jX_L} + K \cdot \dot{I}$$

式中:

\dot{I}_L : 交流侧励磁电流。

\dot{I}_{Lu} : 励磁电流的电压分量, 又称空载分量。

\dot{I}_{Li} : 励磁电流的电流分量, 又称复励分量。

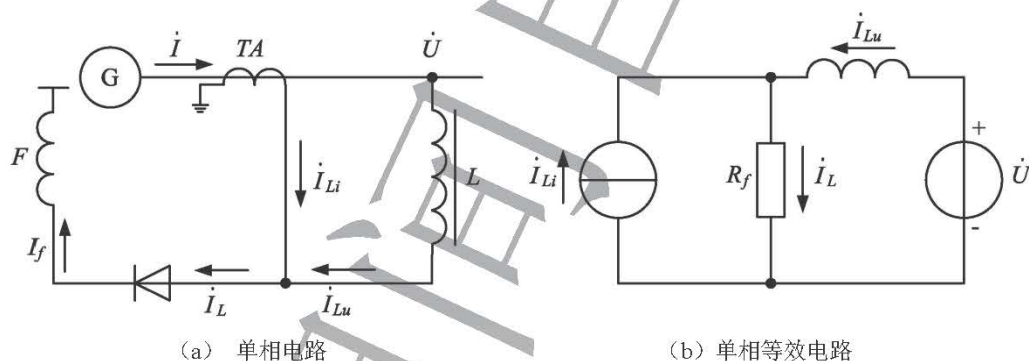


图 6-10 电流叠加相复励装置单相电路图

3. 相复励作用的相量图分析

由于线性电抗器 L 的感抗远远大于它的内阻 ($X_L \gg R_L$), 故可近似认为励磁电流的空载分量 \dot{I}_{Lu} 滞后于发电机端电压 \dot{U} 90° 。而励磁电流的复励分量 \dot{I}_{Li} 与负载电流成比例, 它与发电机端电压 \dot{U} 之间的夹角即为功率因数角 φ 。

下面来分析发电机负载变化时, 发电机电压如何变化, 自励恒压装置又是如何动作, 进

行补偿达到恒压的目的。图 6-11 是励磁电流的相量图，负载电流的变化分四种不同的情况：电流大小的变化及功率因数的变化。

(1) 功率因数不变，负载电流的大小增大

如图 6-12 (a)，电流大小从 I_{Li} 增大到 I'_{Li} ，电枢反应去磁作用增强，使发电机端电压下降；调压器动作，根据相量图，励磁电流从 I_L 增大到 I'_L ，励磁磁场增强，使发电机端电压增加，补偿了压降，达到恒压目的。

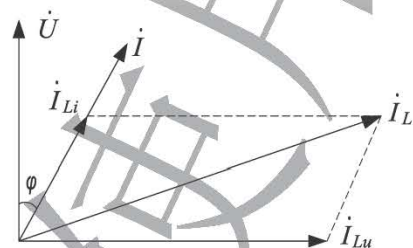


图 6-11 励磁电流的相量图

(2) 功率因数不变，负载电流的大小减小

如图 6-12 (b)，电流的大小从 I_{Li} 减小到 I'_{Li} ，电枢反应去磁作用减弱，使发电机端电压上升；调压器动作，根据相量图，励磁电流从 I_L 减小到 I'_L ，励磁磁场减弱，使发电机端电压下降，补偿了电压升，达到恒压目的。

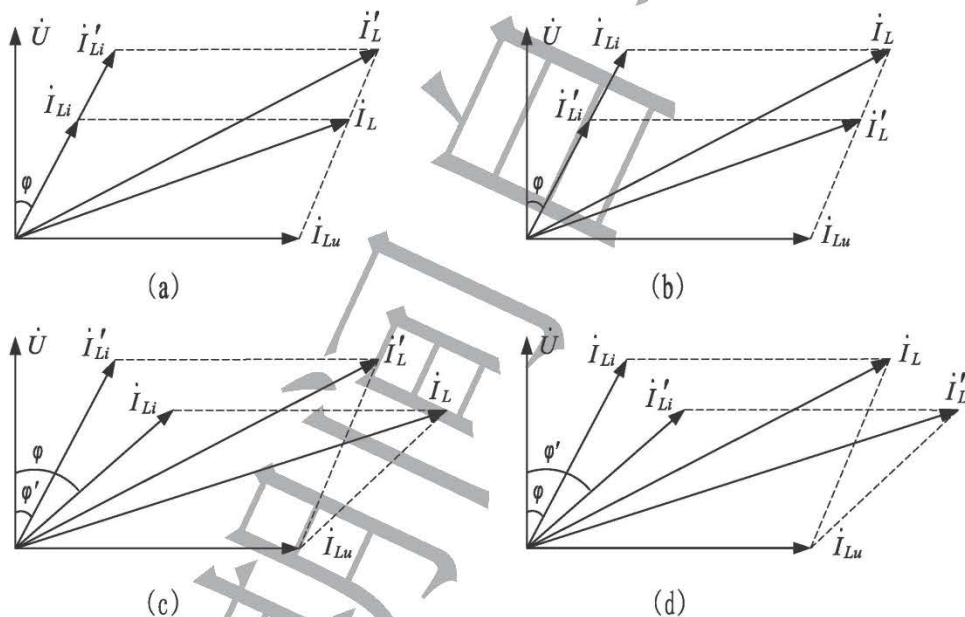


图 6-12 不同负载性质情况下的励磁电流相量图分析

(3) 负载电流的大小不变，功率因数 $\cos\varphi$ 增大

如图 6-12 (c)，功率因数 $\cos\varphi$ 增大， φ 减小到 φ' ，负载阻性增强、感性减弱，电枢反应去磁作用减弱，使发电机端电压上升；调压器动作，根据相量图，励磁电流从 I_L 减小到 I'_L ，

励磁磁场减弱,使发电机端电压下降,补偿了电压升,达到恒压目的。

(4) 负载电流的大小不变,功率因数 $\cos\varphi$ 减小

如图 6-12 (d), 功率因数 $\cos\varphi$ 较小, φ 增大到 φ' , 负载阻性减弱、感性增强, 电枢反应去磁作用增强, 使发电机端电压下降; 调压器动作, 根据相量图, 励磁电流从 I_L 增大到 I'_L , 励磁磁场增强, 使端电压上升, 补偿降压, 达到恒压目的。

从上述分析可以看出, 励磁电流 \dot{I}_L 随负载电流 \dot{I} 的变化而变化, 这就补偿了随负载电流变化而产生的电枢反应去磁作用, 使发电机的电压得到补偿。只要在设计时适当地选择自动恒压装置各元件的参数, 就可以满足由空载到额定负载及功率因数经常变化的情况下, 维持发电机端电压在“规范”所允许的范围内。

在不可控相复励的基础上, 加上能够根据电压偏差信号进行调节的自动电压调节器 AVR 就可以构成可控相复励装置, 来进一步提高电压调节精度。

6.3.2 发电机自励起压过程分析

电流叠加相复励自励恒压装置依靠剩磁自励起压, 图 6-13 所示是自励起压特性曲线, 曲线 1 是同步发电机的空载特性曲线, 曲线 2 是自励回路的理想励磁特性曲线。

其自励起压原理及过程是: 由于磁滞现象, 在转子铁芯中有剩磁。当柴油机起动, 拖动发电机 G 的转子转动后, 剩磁场切割发电机的定子绕组, 在定子绕组中感应出剩磁电动势 E_{00} , E_{00} 加在自励回路, 经整流桥整

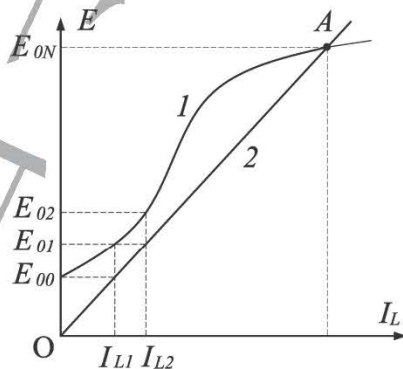


图 6-13 自励起压特性曲线

流, 在发电机励磁回路中产生励磁电流 I_{L1} ; I_{L1} 产生的励磁磁场与剩磁场叠加, 在发电机定子绕组中感应出电动势 E_{01} , E_{01} 通过自励回路又产生 I_{L2} ; I_{L2} 又相应感应出更高的电动势 E_{02} , 如此循环, 构成正反馈, 逐渐提高发电机空载电压, 最后达到交点 A 稳定, 得到发电机空载额定电动势 E_{0N} 。

由上述分析可知, 自励同步发电机要达到正常自励起压, 必须满足三个条件:

1. 必须要有足够大的剩磁电动势 E_{00} , 以使自励回路导通。如果发电机剩磁减弱或消失,

需要用其他直流电源充磁。

2. 剩磁电动势所产生的励磁电流的磁场方向与剩磁方向相同, 以使自励过程构成正反馈。

3. 必须适当整定自励回路阻抗, 使励磁回路特性与空载特性配合适当, 正好相交在空载额定电压 E_{0N} 。

对于自励同步发电机, 上述自励起压过程只是一种理想状况。实际上, 由于自励回路是一非线性电路, 在起压过程中, 其阻抗是变化的, 所以使得自励同步发电机的自励起压过程更加复杂。

6.3.3 电磁叠加相复励装置

如图 6-14 所示为电磁叠加不可控相复励电路原理图。图中, 采用三绕组变压器做为不可控相复励的空载分量与复励分量的叠加元件, 该变压器有两个输入端,

一个输出端。变压器的一个输入端 N_3 绕组, 流过负载电流, 产生反映负载电流大小与相位的复励分量;

另一个输入端 N_1 绕组流过的是经过移相电抗器 L 移相 90° 的空载分量。 N_3 、 N_1 绕组产生的磁通

在每相铁芯进行叠加, 并在 N_2 绕组产生感应电动势, 产生励磁电压, 经过整流后向发电机的励磁绕组励磁。由于 N_2 绕组

的感应电动势是由 N_3 、 N_1 绕组产生的叠加磁通产生的, 因此, 发电机的励磁电流包含有空载分量与复励分量。

6.3.4 相复励装置的调节

发电机空载电压的调节可通过调节电压分量来实现, 发电机带负载后电压的调节可通过调节电流分量来实现。

1. 空载调节

当发电机空载电压偏低时, 说明空载分量大小不合适。可以减少电抗器 L 匝数, 以减小

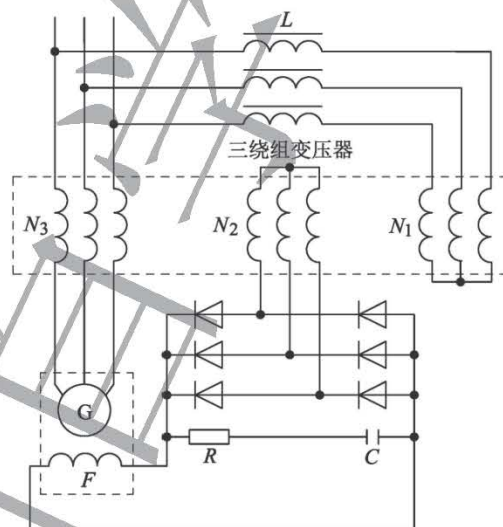


图 6-14 电磁叠加不可控相复励原理图

感抗 X_L ，增大电压分量。对于电磁叠加的相复励装置，还可以增加三绕组变压器的电压绕组匝数。通过调节使励磁电流增大，空载电压增加；当空载电压高于正常值时，调节过程相反。

2. 负载调节

当发电机带负载后电压偏低时，则说明复励分量大小不合适。可通过减少电流互感器副边匝数来增大 K ，因电流分量 $\dot{I}_{Li} = K\dot{I}$ ，即增加电流分量来调节励磁电流。电流互感器的原边匝数一般只有一匝或几匝，没有抽头可调整；对于电磁叠加的相复励装置，还可以减小三绕组变压器的电流线圈匝数，使复励分量增加，发电机电压将升高。当带载后电压高于正常值时，则与上述调节相反。

6.3.5 无刷同步发电机的可控电磁叠加相复励自励恒压装置

不可控相复励自励恒压装置虽然动态性能好，励磁能力强，但其调压精度不高，静态误差大，调压特性的线性度差，发电机并联运行时实现无功功率的均匀分配较难。

因此在不可控相复励自励调压装置的基础上，增加一个自动电压调节器 AVR，按照电压偏差对发电机端电压进一步调节，其主要作用是负责静态电压调整，提高电压的调节精度，这种装置称之为可控相复励自励调压装置。

可控相复励自动恒压装置的类型比较多，包括可控相复励变压器式、可控移相电抗器式、可控电抗器分流式、交流侧晶闸管分流式、直流侧晶闸管分流式、无刷同步发电机的可控相复励自励恒压装置。

目前，在船舶上基本都使用无刷同步发电机的可控电磁叠加相复励自励恒压装置。

1. 可控相复励的基本结构

可控相复励装置是以相复励为励磁装置主体，再加上根据电压偏差信号实现调节的电压校正器

（Automatic Voltage Regulator，缩写为 AVR，又称为自动电压调节器）而构成的。相复励做为基本调节（粗调），AVR 做为辅助调节（细调），其构成原理图如图 6-15 所示。

图中，虚线框内为相复励部分，它保证了发电机的自励起压及强励性能，而且动态性能好。当负载电流变化且电压偏差尚未形成时，相复励电路即根据负载电流的变化对励磁电流做出调整。但相复励调节精度不太高，发电机的端电压仍然存在一定的静态偏差。出现偏差后，通过电压互感器 TP 的检测，自动调压器 AVR 得到电压偏差后，做出进一步的励磁电流分流控制，

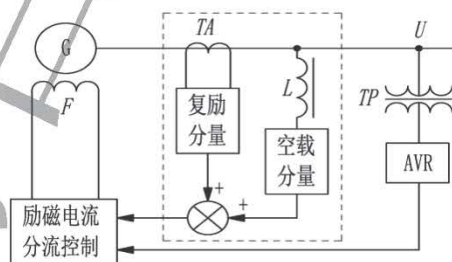


图 6-15 可控相复励磁装置原理框图

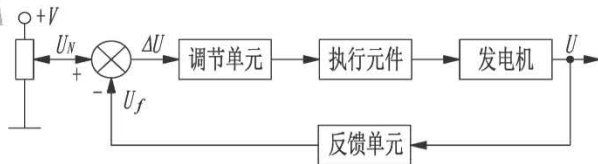


图 6-16 自动电压调节器 AVR 的原理框图

从而保证同步发电机端电压满足静态偏差要求。

自动电压调节器 AVR 的原理框图如图 6-16 所示, 在 AVR 内部, 设有给定电压电位器, 对 AVR 提供给定电压 U_N , 并通过电压互感器检测发电机实际端电压, 经过整流后得到反馈信号 U_f , 送到 AVR 的输入端与给定值 U_N 比较。如果发电机端电压与给定值存在偏差 ΔU (即 $\Delta U = U_N - U_f \neq 0$), 偏差信号输入给 AVR 的调节单元, 根据事先设定的调节规律进行调节, 然后通过执行元件改变发电机的励磁电流, 从而使发电机的端电压满足静态指标的要求。

2. 无刷同步发电机相复励装置的基本结构

按同步发电机的励磁电源的不同, 同步发电机的励磁方式有两种基本类型, 即自励和他励。

在自励方式中, 同步发电机转子绕组中的励磁电流, 是通过电刷和滑环引入的。由于电刷的磨损, 增加了维护和保养工作。磨损产生的碳粉又会导致发电机绝缘下降, 产生的电火花不仅会影响无线电通信, 在油轮上使用极为危险。

为从根本上解决这一问题, 采用了具有同轴交流励磁机和旋转硅整流器的无刷同步发电机。无刷同步发电机的励磁方式属于他励方式。

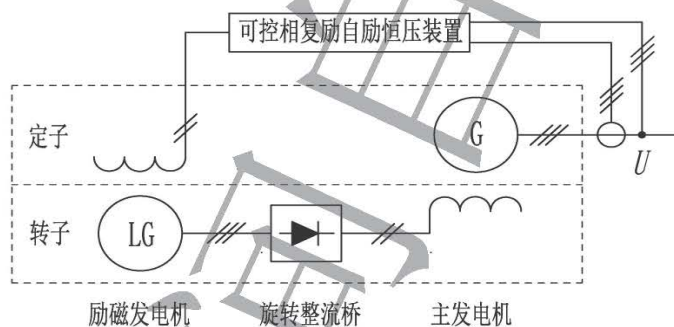


图 6-17 无刷同步发电机自励恒压装置原理框图

如图 6-17 所示是无刷同步发电机自励恒压装置原理框图, 无刷同步发电机实际上是由两台同轴运行的同步发电机组成, 一台为转极式结构, 一台为转枢式结构。

转极式结构的发电机做为主发电机, 定子为三相电枢绕组, 转子为直流励磁绕组, 在转子励磁绕组通入直流励磁电流, 其定子的三相电枢绕组就可向电网输出三相交流电压 U ; 转枢式结构的发电机则做为励磁发电机, 其定子为直流励磁绕组。同样, 在励磁发电机的定子励磁绕组中通入直流电流, 其转子三相电枢绕组将感应三相交流电动势, 产生三相交流电压; 若在转子中设置旋转整流器, 将励磁发电机转子电枢绕组感应的三相交流电压整流为直流电, 励磁发电机就可为主发电机转子励磁绕组提供直流励磁电流。

6.4 并联运行发电机组间的无功功率分配

如果并联运行的发电机组的无功功率不按各自的容量比例分配,则会造成部分机组的电流偏大,部分机组的电流偏小,这不但会使机组总的定子铜损耗增加,效率降低,而且会影响发电机组并联运行的稳定性。

《钢制海船入级规范》对并联运行的各交流发电机组的无功功率的分配要求为:并联运行的各交流发电机组均应能稳定运行,且当负载在额定负载的20%~100%范围内变化时,各机组所承担的无功功率与总无功功率按机组额定比例分配值之差,应不超过下列数值中的较小者:①最大机组额定无功功率的 $\pm 10\%$;②最小机组额定无功功率的 $\pm 25\%$ 。

6.4.1 自励恒压装置的调压特性

通常同步发电机都配有自励恒压装置(以下称调压器)来自动调整发电机的电压。调压器的被调量是发电机的输出电压 U ,由于发电机的负载电流大小及其相位变化引起 U 的变化,调压器的任务是要把被调量调到所要求的值上。同时,两台发电机并联运行时,无功功率的分配与两台发电机调压器的自动励磁调压特性有关。

发电机的调压特性是指发电机输出的无功电流与端电压之间的关系 $U = f(I_Q)$ 。与发电机组的调速器相似,调压器的特性也有无差特性和有差特性,如图6-18(a)所示是自励恒压装置特性图。曲线1称为无差调压特性曲线,它说明当系统处于稳定平衡状态时,被调量 U 等于一个恒定的数值。曲线2称为有差调压特性曲线,它说明当系统处于稳定平衡状态时,被调量 U 是随 I_Q 变化而变化的。

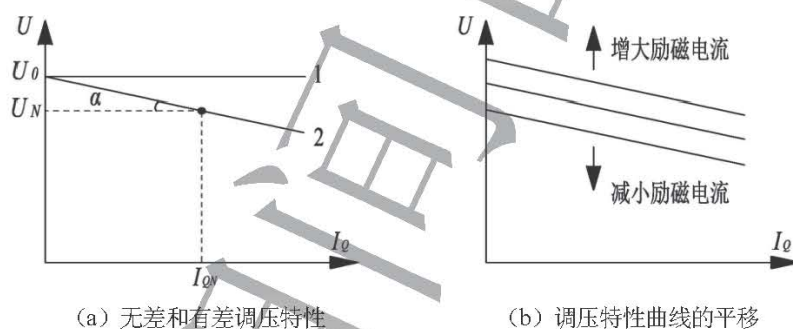


图6-18 自励恒压装置调压特性

被调量 U 随 I_Q 而变化的程度叫做电压调差系数 K_c ,它是由调压特性曲线的倾斜度来表示的:

$$K_c = \frac{U_0 - U_N}{I_{QN}} = \operatorname{tg} \alpha$$

式中: U_0 为发电机空载电压; I_{QN} 是额定无功电流; U_N 为额定无功负载时的发电机电压。

若 $K_c = 0$, 则调压特性为无差特性, 由于无差特性发电机并联运行时无法获得恒定的无功分配关系, 实船中一般不采用; 广泛应用在实船发电机上的调压特性曲线是下倾的一条直线, 即 $K_c > 0$, 称为下倾的有差特性。通常 K_c 可整定在 5% 以内。

改变调压器的励磁电流的大小可以使调压器的特性曲线上下平移, 如图 6-18 (b) 所示是特性曲线调节图。

6.4.2 船舶同步发电机组间无功功率自动分配

发电机并联运行时, 单独增加一台发电机的励磁电流时, 该发电机输出的无功功率增加, 而另一台发电机输出的无功功率自动减少。此外, 增加励磁电流使空载电动势增大, 而另一台无功功率的减少使其去磁效应减少, 两者都使电网的电压有所上升; 单独减少一台发电机的励磁电流, 则其变化与上述相反。只有同时反方向调节两台发电机的励磁电流, 才能保持电网的电压不变。

通常同步发电机都配有自励恒压装置来自动调整发电机的电压, 实现无功功率按容量比例分配同样也是由自励恒压装置来完成。

1. 无功功率自动分配的基本原理

并联运行的发电机, 对调压器特性的要求与对调速器特性的要求相似, 无差特性会影响并联运行发电机的稳定运行, 因此对调压器特性的要求是: ① 两台发电机的调压器特性都为有差特性, 以保证并联运行的稳定性; ② 两台发电机的调压器有差特性的差尽量小, 尽量具有一致的斜率。

如图 6-19 所示, 与调速器特性类似, 如果并联运行的两台发电机的调压器特性斜率不一致, 负载无功功率变化后, 调差系数 K_c 大的发电机承担的无功变化

量较小, 调差系数 K_c 小的发电机承担的无功变化量较

大; 一台为有差特性另一台为无差特性, 负载无功变化后, 有差特性发电机承担的无功功率不变, 无差特性发电机承担所有无功功率的变化量; 只有两台发电机调压器特性斜率一致, 才能保证电网无功负载变化时两台发电机输出的无功功率按容量比例分配。

但实际的调压器特性很难做到完全一致, 因此实际并联运行时, 无功负载的变化会使无功分配不均匀。因此, 实际还应针对不同的励磁恒压装置, 采取不同的措施, 首先保证并联运行发电机随电网无功负载的变化自动稳定运行, 然后保证无功功率按容量比例分配。

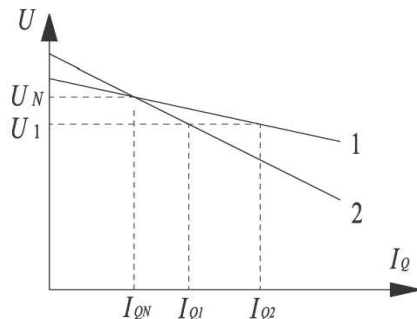


图 6-19 两台有差特性发电机的无功功率分配特性曲线

2. 无功功率自动分配装置

欲使发电机之间无功功率分配均匀, 要求两台发电机的调压特性曲线斜率相同, 也即调差系数 K_c 相同。在船舶中一般采用均压线或调差装置两种方法来实现无功功率的均匀分配。

不可控相复励自励恒压同步发电机并联运行时, 一般采用均压线方法, 均压线有直流均压线和交流均压线两种。直流均压线适用于同容量发电机之间并联运行, 交流均压线适用于不同容量发电机之间并联运行。

由于目前船舶中基本采用无刷可控相复励同步发电机, 一般采用调差装置来实现无功功率的均匀分配。

在按电压偏差进行调压的励磁系统中, 其静态调压精度很高, 调差系数 K_c 一般是很小的, 甚至几乎接近是无差的。但并联运行时无差特性会影响并联运行的稳定性, 即并联运行时不能采用无差特性。

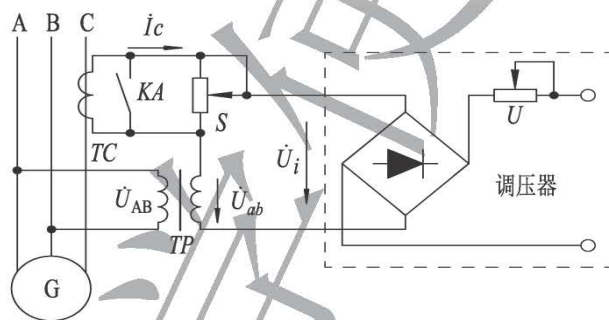


图 6-20 调差装置原理图

为了在发电机并联运行时, 使调压特性曲线变为具有足够倾斜度的有差特性, 且 K_c 相同, 从而稳定平均地分配无功功率, 在调压器的基础上加装了可以改变调差系数 K_c 的装置, 因其

作用就是利用电流信号, 通过调压器, 以使无功电流的分配稳定, 所以也称为电流稳定装置。图 6-20 是调差装置原理图, 调差装置由电流互感器 TC 和调差电阻 S 组成。

当发电机单机运行时, 中间继电器 KA 得电, 其常开触点闭合, 电流互感器 TC 副边绕组被短路, 不起作用, 调差装置的输出电压, 也即调压器的输入电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{ab}$ 。经过调压器, 发电机输出电压可以实现无差调节; 若发电机并联运行, 中间继电器 KA 不得电, 其常开触点断开, 电流互感器 TC 起作用, 在电阻 S 上产生压降 $I_c S$, 调压器的输入电压

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_c S。$$

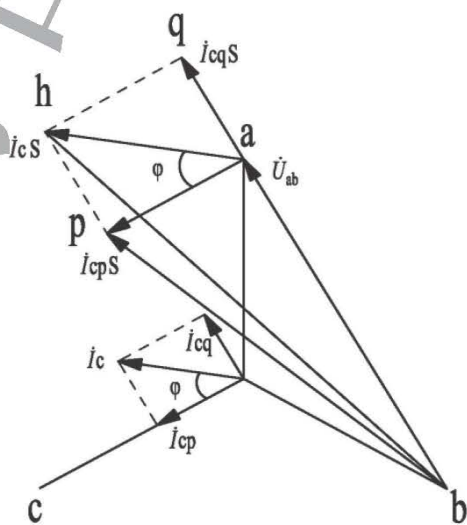


图 6-21 调差装置的相量图

根据输入电压方程式 $\dot{U}_i = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_c S$, 画出相量图, 如图 6-21 所示是调差装置的相量图。

将负载电流 \dot{I}_c 分解为有功分量 \dot{I}_{cp} 和无功分量 \dot{I}_{cq} ，来分析两个分量对调压器输入电压 \dot{U}_i 的影响。

(1) 有功分量 \dot{I}_{cp} 的作用

此时，调压器的输入电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_{cp}S = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_c \cos \varphi \cdot S$ ，其有效值是图中的线段 bp ，相比于无调差作用时的线段 ba 增加很少，可以近似认为 $bp = ba$ ，也即有功分量对后续的调节基本不起作用。

(2) 无功分量 \dot{I}_{cq} 的作用

此时，调压器的输入电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_{cq}S = \dot{U}_{ab} + \dot{I}_c \sin \varphi \cdot S$ ，其有效值是图中的线段 bq ，在线段 ba 的基础上增加了 qa ，可见调压器的输入电压主要随无功电流而变化，因而通过调压器使发电机的输出电压 U 也随无功电流而变化。

两台发电机并联运行时，正常情况两台发电机无功功率分配应按比例。但是，若实际运行中，某台发电机输出电流的无功分量偏小，调差装置调节的结果应该是增大该发电机输出电流的无功分量。

如图 6-21，此时，对应的调压器输入电压 U_i 减小，经过调压器的调节，会使发电机的励磁电流增大，产生的电动势增大，则发电机的输出电流的无功分量也相应增大；反之，若并联运行的某台发电机输出无功电流偏大，则对应的调压器输入电压 U_i 增大，经过调压器的调节，会使发电机的励磁电流减小，输出电流的无功分量也相应减小，这样就可实现并联运行的发电机输出无功功率按容量比例进行调节。

因此，并联运行时，调差装置投入使用，就能把调压器的无差特性变为有差特性，可以调节发电机间的无功分配；调节调差电阻 S 可以改变调压特性曲线的调差系数 K_c ，只要仔细调节，完全可以将并联运行的两台发电机调压器特性调节到有差且差很小，从而既满足并联运行的稳定性，又满足所要求的静态精度，还满足无功功率按各自容量比例进行分配的要求。

本章小结

本章讲述的主要内容有：发电机电压变化的原因、危害及调整措施；自励恒压装置的作用、技术指标、分类及调压原理；不可控电流叠加相复励装置调压原理及相量图分析；发电机自励起压过程分析；相复励装置的调节；无刷同步发电机的可控电磁叠加相复励自励恒压装置的基本结构；自励恒压装置的调压特性；船舶发电机并联运行时无功功率自动分配的基本原理和装置。

本章的重点内容如下：

1. 发电机电压变化的原因、危害及调整措施。
2. 自励恒压装置的主要作用，相复励、不可控、可控、自励、他励的概念。
3. 不可控电流叠加相复励装置调压原理及相量图分析。
4. 发电机自励起压原理及过程分析。
5. 自励恒压装置的调压特性，有差特性及无差特性分析。
6. 船舶发电机并联运行时无功功率自动分配的基本原理和装置。

复习思考题

- 6-1 简述发电机电压变化的原因。自励恒压装置有什么作用？分成哪几类？
- 6-2 如图 6-9 所示是电流叠加不可控相复励自励恒压装置的原理图，阅图后回答下列问题：
- (1) 简单说明在电流叠加不可控相复励恒压装置中，励磁电流由哪几个分量组成并写出励磁电流的相量方程。
- (2) 当发电机的负载电流大小不变而负载功率因素 $\cos\varphi$ 增大时，发电机的输出电压以及相复励装置提供的励磁电流将如何变化，并用相量图加以说明。
- 6-3 画出电流叠加不可控相复励恒压装置的单线原理图；简单说明在电流叠加不可控相复励恒压装置中，励磁电流由哪几个分量组成，以及各自的主要作用；述说负载电流大小增大而功率因数不变时的恒压原理并用相量图加以说明；述说负载电流大小减小而功率因数不变时的恒压原理并用相量图加以说明；述说负载电流大小不变而功率因数增加时的恒压原理并用相量图加以说明；述说负载电流大小不变而功率因数减小时的恒压原理并用相量图加以说明。
- 6-4 如图 6-13 所示，试叙述同步发电机的自励起压原理及过程。
- 6-5 叙述船舶同步发电机的自励起压条件。
- 6-6 如图 6-17 所示是无刷同步发电机自励恒压装置原理框图，叙述无刷同步发电机的结构与工作原理。
- 6-7 假设两台发电机并联运行，单独增加 1 号发电机的励磁电流，将会引起什么变化？
- 6-8 假设两台发电机并联运行，单独减小 1 号发电机的励磁电流，将会引起什么变化？

第7章 船舶应急电站自动控制

应急电站由应急发电机和应急配电板组成。

正常情况下，应急电网由主配电板供电；主配电板因故失电时，应急发电机通过应急配电板向应急电网供电。主配电板恢复正常后，转换回由主配电板供电。

我国《钢质海船入级规范》规定：应急发电机组在主电源失电时，能自动启动，并在 45s 内把发电机投入应急电网供电运行。

应急电站自动控制包括供电电源的自动转换和柴油发电机组的自动启动/停止控制。

7.1 供电电源的自动转换

1. 供电电源的自动转换程序

图 7-1 是应急电站供电自动转换流程图。在主电源供电的情况下，如果主电网失电，联络开关自动断开，延时发出应急发电机组启动指令；若机组启动并运转，判断应急发电机电压是否建立；若电压建立，经延时（例如 2s）的确认，发出应急发电机 ACB 合闸指令，转换到由应急发电机供电。

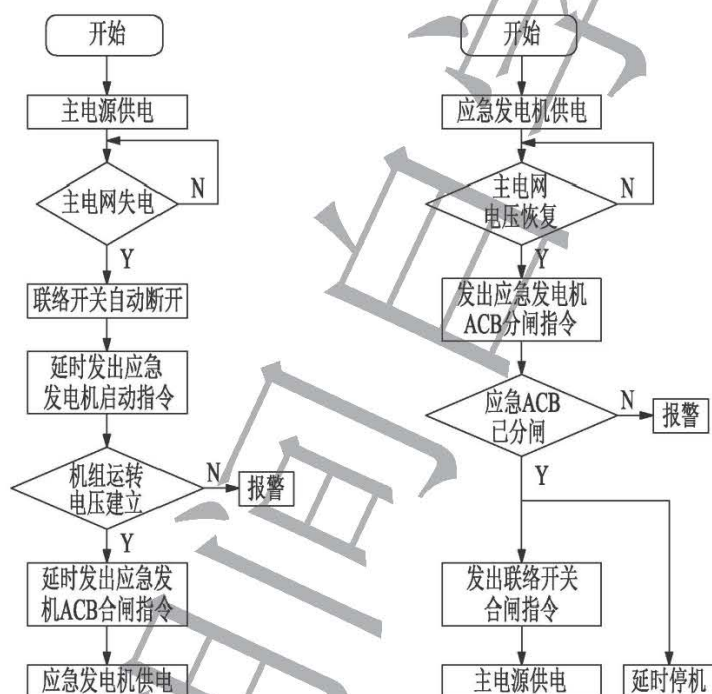


图 7-1 应急电站供电自动转换流程图

在应急发电机供电的情况下，如果主电网电压恢复，则发出应急发电机 ACB 分闸指令；若 ACB 已经断开，发出联络开关合闸指令；若联络开关合闸，恢复由主配电板供电。

若在供电电源的自动转换过程中出现异常，控制系统应发出警报，提醒操作人员及时处理。

应急发电机 ACB 分断后，应急发电机组一般需要空转一段时间后才停机。该功能通常

由机组的控制装置本身提供。

供电电源的自动转换电路不同厂家的设计差异较大,但主要的转换条件是一样的。例如主电源供电转为应急电源供电,是主电源失电;反过来是主电源恢复,应急发电机 ACB 分间。

2. 控制电路

应急发电机原动机的自动启动和停止控制由应急发电机的自动控制装置实现,图 7-2 是某轮的应急发电机自动控制电路,其控制过程分析如下:

遥控启动和停止由时间继电器 KT14 的 1 组触点控制,KT14 的触点“闭合”,应急发电机组启动;KT14 的触点“断开”,应急发电机组停机。应急发电机组启动运行条件具备且允许遥控,“备用就绪”触点闭合;启动完毕并正常运行,“运行”触点闭合。

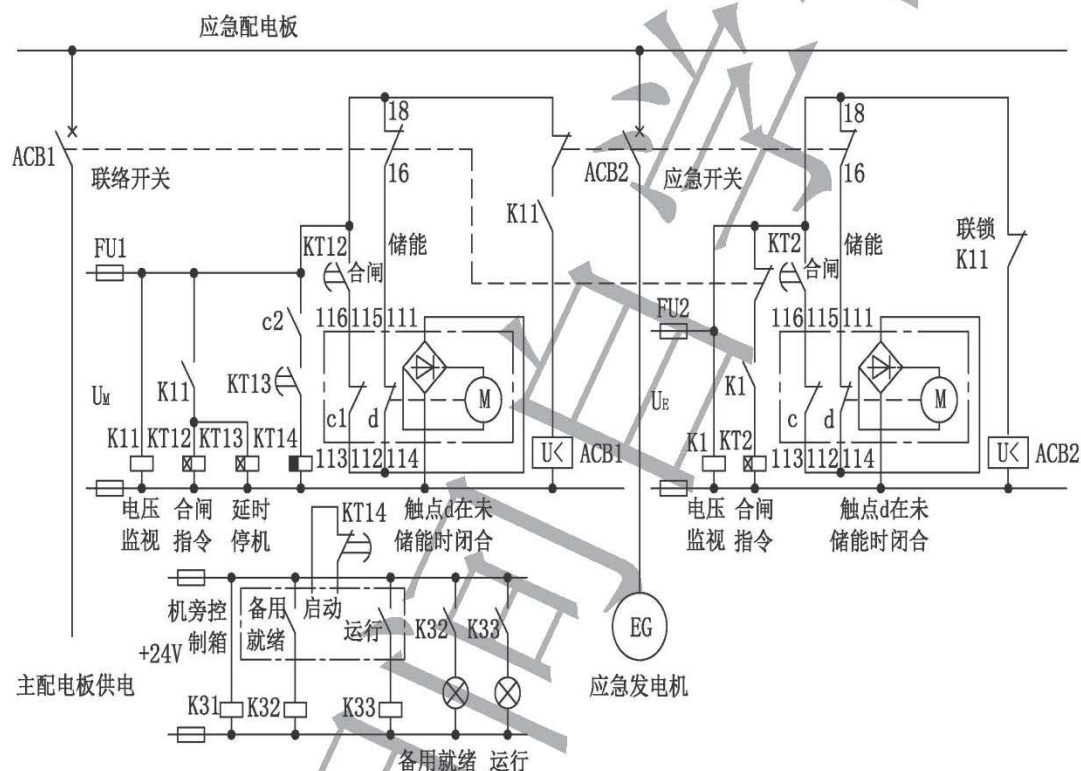


图 7-2 应急电站供电自动转换电路图

应急发电机组自动控制装置的工作条件是:在主配电板正常供电的情况下,应急发电机组已处于备用状态,即应急发电机组控制开关置于“遥控”位置(注意这里所说的“遥控”其实是指“自动”)、应急配电板上的“备用就绪”指示灯亮。

(1) 主配电板供电,向应急配电板供电

控制电源 U_M 来自主电网,主配电板供电时,联络开关 ACB1 若未储能,则通过 ACB1 辅助触点(16、18)、储能机构触点 d 使储能电机 M 得电自动储能,储能完毕后触点 d 自动

断开, 联络开关自动复位(再扣), 处于准备合闸状态。

主配电板供电时, 监视主电网失电的继电器 K11 线圈得电动作, 其常开触点(2组)闭合。其中一组触点使 ACB1 欠压线圈($U<$)得电, 允许联络开关合闸; 另一组触点使合闸指令延时继电器 KT12 线圈和延时停机继电器 KT13 线圈得电动作(KT12、KT13 均为通电延时时间继电器)。

KT12 经延时, 确认主电网供电电压已稳定, KT12 常开触点延时闭合, 通过 ACB1 辅助触点 c1 使储能电机 M 再次得电, 联络开关 ACB1 合闸, 主配电板向应急配电板供电。

KT13 延时的作用是: 确认在应急发电机供电时, 主配电板电压已恢复, 且应急配电板转回由主配电板供电后, 断电延时时间继电器 KT14 线圈通过 ACB1 辅助触点 c2、KT13 常开延时触点得电动作, KT14 常闭触点瞬时断开, 发出应急发电机组的停机信号。

(2) 主配电板失电, 供电转换

由主配电板供电转换为应急发电机供电的条件是主电网失电。此时, 控制电源 U_M 为 0, 联络开关 ACB1 欠压线圈($U<$)失电, 使联络开关脱扣分闸; 同时, 时间继电器 KT14 失电, 其常闭触点延时闭合, 发出应急发电机组启动指令。

应急发电机组启动成功后, 继电器 K33 得电, “运行”指示灯亮; 继电器 K1 用于监视取自应急发电机输出端的电压 U_E , 电压建立后, 应急开关 ACB2 若未储能, 则通过 ACB2 辅助触点(16、18)、储能机构触点 d 使储能电机 M 得电自动储能, 储能完毕后触点 d 自动断开, 应急开关自动复位(再扣), 处于准备合闸状态。

电压建立后, 同时使 ACB2 欠压线圈($U<$)得电, 允许应急开关合闸。

K1 线圈得电动作, 其常开触点闭合使时间继电器 KT2 线圈得电, 经 KT2 延时确认, 其触点通过辅助触点 c 使储能电机 M 再次得电, 使应急发电机开关 ACB2 合闸, 应急发电机向应急电网供电, 完成主电源失电的供电转换。

(3) 主配电板恢复供电

当主电网恢复, 此时联络开关处于脱扣状态。联络开关 ACB1 若未储能, 则通过 ACB1 辅助触点(16、18)、储能机构触点 d 使储能电机 M 得电自动储能, 储能完毕后触点 d 自动断开, 联络开关自动复位(再扣), 处于准备合闸状态。

K11 线圈得电动作, K11 常闭触点断开 ACB2 的欠压线圈($U<$), 使应急开关 ACB2 脱扣分闸。

同时, K11 常开辅触点闭合, 使联络开关 ACB1 欠压线圈($U<$)得电, 允许联络开关合闸。

KT12 常开触点延时闭合, 通过 ACB1 辅助触点 c1 使联络开关合闸。KT13 常开触点延时闭合, 使时间继电器 KT14 线圈得电, 其常闭触点瞬时断开, 发出应急发电机组停机信号。

3. 操作设置

上述电路始终处于自动工作状态。如果要切断主配电板供电, 需要断开熔断器 FU1, 或到主配电板去切断应急配电板的馈电开关。如果要取消供电自动转换功能, 需要把机旁控制箱上的控制开关设置到断开位置。

根据实际使用要求, 供电转换需要有 3 种工作状态: 手动、自动和试验。

手动状态: 机组的启动、停机和电源转换都由人工操作。

自动状态：机组处于备用状态，主电源失电，机组自动启动，投入供电运行。

试验状态：在主电源供电的情况下，试验机组的自动功能和电源自动转换功能。

为满足上述功能，需要设置2个选择开关：正常/试验选择开关 SA13 和手动/自动选择开关 SA14。在图 7-2 所示电路中加入了这 2 个选择开关的电路如图 7-3 所示。

(1) 手动及自动的功能选择

手、自动控制选择方式由开关 SA14 设定，通过选择继电器 K34 执行。SA14 置手动位时，K34 不动作；置自动位时 KA34 动作。

选择开关置“手动”位时，KA34 不动作，分别输出 2 对常闭触点和 4 对常开触点；输出的 2 对常闭触点分别接入联络开关 (ACB1) 的合闸按钮 SB11 和应急发电机供电开关 ACB2 的合闸按钮 SB1，允许手动合闸操作；输出的 2 对常开触点分别把 ACB1 的分闸按钮 SB12 和 ACB2 的分闸按钮 SB2 接入分闸控制电路，允许手动分闸操作；输出的另外 2 对常开触点分别把 ACB1 和 ACB2 的自动合闸电路断开。

选择开关置“自动”位时，K34 线圈得电动作，2 对常闭触点断开，禁止手动合闸操作；2 对常开触点闭合，分别接通 ACB1 和 ACB2 的自动合闸控制电路，允许自动合闸操作；另外 2 对常开触点闭合，分别短路 ACB1 和 ACB2 的手动分闸按钮 SB12 和 SB2，解除手动分闸功能。

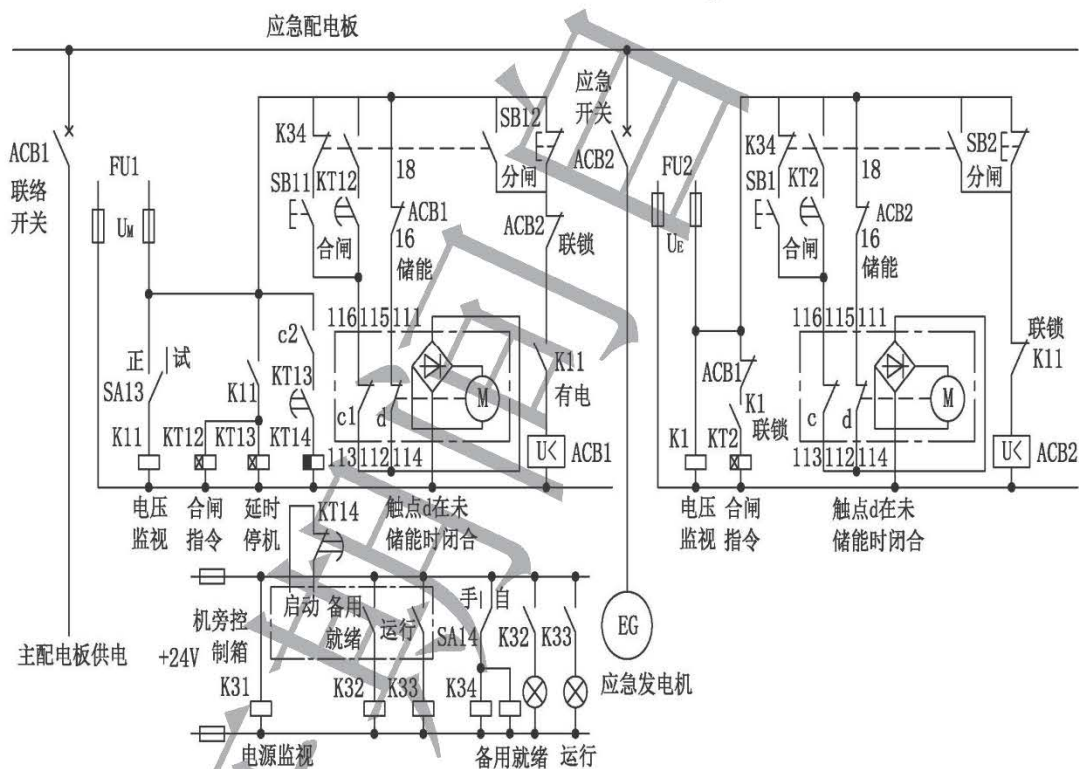


图 7-3 应急电站供电手、自动和试验转换电路图

(2) 正常及试验的模式选择

供电电源转换的条件是主配电板的失电和恢复,该条件由电压监视继电器 K11 来实现。供电电源转换试验是在主配电板正常供电情况下,使 K11 释放,模拟失电。

正常、试验选择开关 SA13 转在正常位置接通 K11 线圈;在试验位置断开 K11 线圈。正常供电情况下断开 K11 线圈,模拟了主配电板失电。试验位置是检查供电自动转换功能是否正常,应该把手、自动转换开关置于自动位置。

7.2 应急柴油发电机组的自动控制

应急电站的柴油发电机组大多数时间是处于不运行状态,一般只在主电源失电时才投入使用,对机组自动启/停控制电路要求比较简单。通常只要求尽快启动达到额定转速、建立电压投入应急电网。有的应急电站的应急柴油发电机组跟主柴油发电机组一样设置预润滑和冷却水预热环节,也有不设置。

例如,国内船舶过去多采用 135 型柴油机作应急发电机的原动机。该机原来只具有手动操作功能,为了配合应急发电机自动控制要求,可附加一套自动控制装置。这套装置完全按照柴油机正常启动要求设计,启动工作流程如图 7-4 (a) 所示。启动时先把油门置于低速位置,启动发火后升至中速,暖机运行一段时间,再升至额定转速,发电机建压后投入电网供电运行。

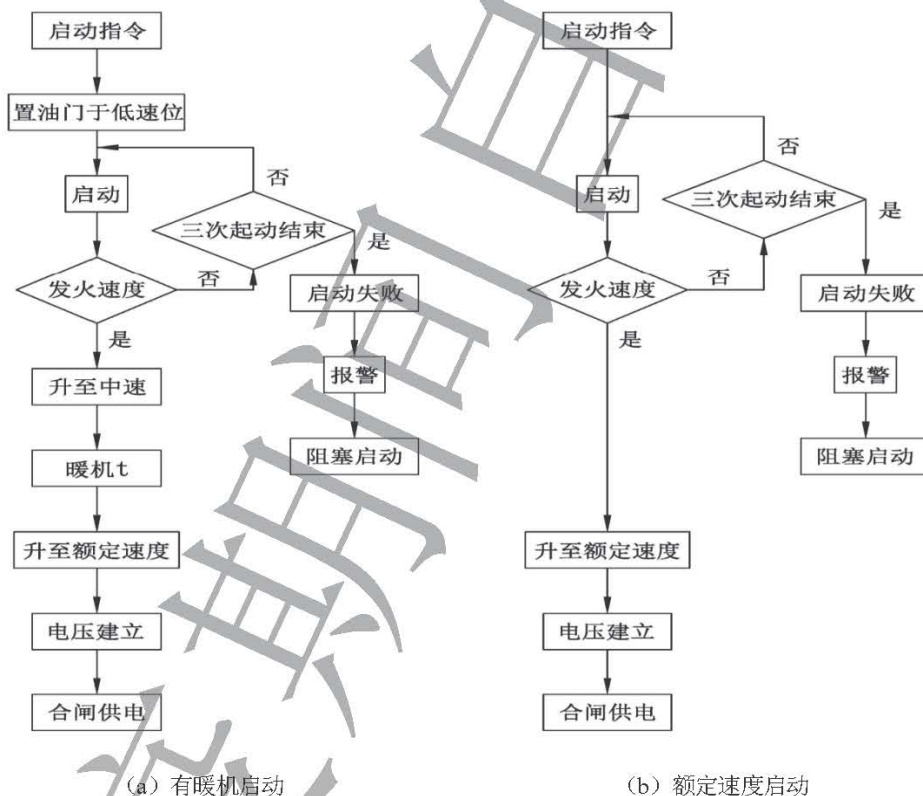


图 7-4 应急发电机组启动工作流程

现在,具有自动启、停控制装置的应急柴油发电机组,都是把调速器置于额定位置启动。柴油机启动发火即升至额定转速,发电机建压后即投入电网供电运行。启动工作流程如图 7-4(b) 所示。

应急柴油发电机组的自动启、停控制电路一般可分为两部分:操作部分和控制部分。这两个部分一般分设两个装置,有的合为一个装置。柴油机厂家通常提供操作部分,控制部分由电站设计厂家另行配置。

自动控制装置有两种,一种是自动启、停控制装置;另一种是自动启动控制装置。后者只有自动启动功能,停机由人工操作。

应急柴油发电机组的柴油机的控制部分,有的制成独立的装置安装在机房里;也有组成电路单元,安装在应急配电板内。

控制部分可实现如下功能:

用转换开关选择手动或自动操作;允许重复启动(一般为 3 次);启动运转超过发火转速,停止启动;运行参数越限时发出故障报警;故障指示;手动或自动停机。

控制部分的输入信号有:手动启动、自动启动、转速信号、滑油低压(开关)信号、冷却水高温(开关)信号。

控制部分的输出信号有:启动指令、停机指令、运转信号。

下面以有触点的控制电路为例来说明自动启动、停机控制装置的输入、输出之间的逻辑关系。采用可编程器件(单片机或 PLC)的装置同样也满足这些逻辑关系。

图 7-5 是具有自动启、停的控制电路,一般安装在应急配电板内。它可以实现以下功能:

1. 启动

转换开关 SA1 置“自动”位时,接受自动启动信号,自动启动信号来自供电转换电路(无源触点信号,图示中的 K6);转换开关 SA1 置“手动”位时,通过按钮 SB2 手动启动。

在自动或手动启动时,满足无停机信号(K26)、转速小于发火转速(K18)、无故障信号(K21)条件时,启动中间继电器 K12 线圈得电动作。

中间继电器 K12 的常开触点闭合使继电器 K15 线圈得电动作,K15 常开触点闭合输出启动指令至操作电路。

2. 重复启动

冷机第一次启动有时会失败,需要尝试再次启动,再次启动一般控制在 2 次。启动时间由启动时间继电器 KT13 设定(这里设 5s);间歇时间由时间继电器 KT14 设定(这里设 5s)。KT13 线圈得电动作,其常闭触点延时 5s 后断开中间继电器 K15 的线圈电路,停止启动;同时 KT13 的另一常开触点延时闭合接通 KT14 线圈,KT14 延时 5s 动作,其触点断开 KT13 线圈;KT13 释放,其常闭触点又接通中间继电器 K15 线圈,实现再次启动;KT13 的常开触点又断开 KT14 线圈,其常闭触点使 KT13 线圈又通电延时,延时 5s 后再次停止启动。

按 5s 设定启动和间歇时间,3 次启动用 15s,2 次间歇用 10s。启动时限时间继电器 KT16 线圈得电的延时应大于 25s、小于 30s,这里取 28s。KT16 动作表示启动失败。

3. 转速检测

柴油机启动运转至发火转速(额定转速的 20%~30%)以上,可以喷油运转,启动解除。

转速检测器 B1 的输入为测速机 TG 发出的转速信号, 输出两个信号:

(1) 低值信号 (L) 为发火转速: 输出接通时间继电器 KT17 和中间继电器 K18 线圈。KT17 做为滑油低压故障信号的启动阻塞, 延时 18s 动作, 接通滑油低压信号电路; K18 动作输出, 一方面断开 K12 线圈停止启动, 另一方面输出做为柴油机运转 (启动成功) 信号。

(2) 高值信号 (H) 为超速: 输出接通继电器 K19 线圈, K19 的动作输出做为超速停机和报警信号。

4. 故障停机和报警

我国《钢质海船入级规范》规定: “应急发电机的原动机除超速保护外, 不应设置其他应急停机保护系统。”

柴油机运行出现下列故障: 启动失败, 继电器 KT16 动作, 其常开触点闭合使继电器 K22 线圈得电动作发出启动失败信号, 同时使故障停机继电器 K21 线圈得电动作, 其常闭触点断开 K12 线圈, 停止启动; 超速后, 继电器 K19 动作, 其常开触点闭合使继电器 K25 线圈得电动作。

故障中间继电器 K22 和 K25 动作, 其输出触点使停机中间继电器 K21 动作, 发出故障停机信号。

出现下列故障: 冷却水高温时, 温度开关 TM7 动作, 触点闭合, 使继电器 K24 线圈得电动作; 滑油低压时, 压力开关 KP6 动作返回, 触点闭合, 使继电器 K23 线圈得电动作。冷却水高温及滑油低压故障的处理一般分为两级: 1 级故障只报警不停机; 2 级故障不允许机器运行, 立即停机、报警。现多采用 1 级, 只报警不停机。故障中间继电器动作发出声光报警, 指示灯 H2、H3、H4 和 H5 显示故障名称。故障中间继电器都有自保, 记忆故障的发生, 故障解除后通过复位按钮 SB3 复位。电源监视中间继电器 K11 在控制电源正常时动作, 接通指示灯 H1 显示电源正常。按钮 SB5 是试灯按钮, 用来检查灯和电路是否正常。

5. 停机

手动停机信号由按钮 SB4 输入, 故障停机信号由继电器 K21 输入, 在停机信号的作用下中间继电器 K26 线圈得电动作, 常开触点闭合输出停机指令。K26 动作自保, 停机操作直到机停为止。K26 动作自保, 停机时限中间继电器 KT27 开始工作, 设定时间到, KT27 常闭触点断开 K26 线圈的电源, 解除停机指令。停机时限由实际停机测定后设定。

本章小结

本章讲述的主要内容有：主配电板和应急配电板的联络关系；应急电站供电转换流程图；应急电站供电自动转换电路图分析；应急柴油发电机组的自动控制的基本功能；应急发电机组自动控制部分电路原理图分析。

本章的重点内容如下：

1. 主配电板和应急配电板的联络关系。
2. 应急电站供电自动转换电路图分析。
3. 应急发电机组自动控制部分电路原理图分析。

复习思考题

- 7-1 叙述主配电板和应急配电板的联络关系。
- 7-2 如图 7-2 所示是应急电站供电自动转换电路图，试分析主配电板供电，向应急配电板供电的工作过程。
- 7-3 如图 7-2 所示是应急电站供电自动转换电路图，试分析主配电板失电，供电转换的工作过程。
- 7-4 如图 7-2 所示是应急电站供电自动转换电路图，试分析主配电板恢复供电的工作过程。
- 7-5 如图 7-4 所示是应急发电机组启动工作流程图，试分析其工作过程。
- 7-6 如图 7-5 所示是应急发电机组自动控制部分电路原理图，试分析其启动过程。
- 7-7 如图 7-5 所示是应急发电机组自动控制部分电路原理图，试分析其重复启动过程。
- 7-8 如图 7-5 所示是应急发电机组自动控制部分电路原理图，试分析其转速检测的工作原理。
- 7-9 如图 7-5 所示是应急发电机组自动控制部分电路原理图，试分析其故障停机和报警功能。
- 7-10 如图 7-5 所示是应急发电机组自动控制部分电路原理图，试分析其停机功能。

第8章 船舶高压电力系统

目前国内外建造的船舶大多数是 440V, 或者 380V 低压交流电力系统。随着船舶用电量的增加, 发电机的容量也在增加, 特别是一些特种用途船舶及电力推进船舶所装备的大功率用电设备, 为降低电路及电器的电流值而须提高其电压值, 使高压开始进入船舶电力系统, 而且发展前景良好。例如, 一些大型集装箱船舶侧推器的高压电动机、变频控制装置和配电网络, 电力推进船舶的高压发电、配电、用电设备和网络。

8.1 船舶高压电力系统概述

中国船级社《钢制海船入级规范》对交流高压电气装置的特殊要求中指出: 交流高压电气装置适用于额定电压超过 1kV 的交流三相电气装置。除另有明文规定外, 低压电气设备的构造和安装一般也适用于交流高压电气装置。系统额定电压应不超过 15 kV。但如有特殊需要, 经 CCS 同意可以采用更高的电压等级。

根据中国船级社规定, 超过低压电压等级的船舶电力系统就称为船舶高压电力系统。船舶高压电力系统的电压等级在 1 kV~15 kV。

促使船舶使用高压电力系统的主要原因是:

1. 目前, 船舶低压工频发电机的设计容量上限为 2.5 MW, 接近或超过这个极限的发电机在制造技术上是困难的, 且在经济上也不合算。如今很多大型船舶的电站容量已达到十几 MW 甚至几十 MW, 若采用常规船用低压发电机, 一艘船上需要安装十几台甚至更多发电机组, 这显然是不合理的, 实船上也无法实现。

2. 随着船舶用电设备的增多, 船舶电站容量的增大。当船舶电力系统发生短路故障时, 短路电流也大幅度增加。如果采用低电压等级的船舶电力系统, 大幅度增加的短路电流使目前所能生产出的开关电器与保护装置的断流容量无法满足要求。

3. 如果输送大功率电能仍采用低电压等级, 船舶电缆的截面积会很大, 并需多股并联, 线路传输损耗严重, 电缆的发热量将增大, 敷设时更加困难。随着电压等级的提高, 输送同一功率采用的电缆规格与数量都可大幅下降。特别是在船舶条件下, 由于敷设工作量降低所带来的效益更是不可低估, 在船舶电缆的选择上, 采用高电压等级的优越性尤为显著。

4. 采用高压电力系统可以有效地减小电气设备的体积和重量, 节省空间和减轻船舶自重。

实践证明, 高压电站应用到现代船舶上取得了很好的效果, 船舶高压电站可以降低线路损耗, 减少发电机组数量, 提高电站容量, 满足船舶日益提高的用电需求, 必将越来越多地应用在未来大型船舶电站中。船舶高压电力系统已成为大型客船、集装箱船、油船、电力推进船舶及某些特殊工程船舶等的必选, 成为今后船舶电站的主要发展方向。

采用高压电力系统后, 保护装置、接地、高压变压器、配电方式、主开关型式、电缆端头的构造及处理方法都与低压电力系统有很大差别, 特别是船舶高压电力系统往往采用中性点接地方式, 与低压电力系统普遍采用中性点绝缘方式有着明显的区别, 中性点采用何种接地方式也是船舶高压电力系统需要解决的关键技术。

目前, 从国内外应用来看, 船舶高压电力系统普遍采用高电阻接地方式。船舶高压电力系统给船舶电气系统带来一系列新的变化, 船舶设计、使用和管理者必须特别注意。

8.2 船舶高压电力系统基本知识

8.2.1 高压电力系统的电压等级

所谓高压电力系统,是指电网额定电压达到“高压”的电力系统。有关电压等级的划分,不同国家和不同领域的定义存在差别,在我国,电器方面仅划分两个电压等级,交流电压 1000V 或直流电压 1500V 以下为低压电器,高于这个标准的为高压电器。而在岸上电力系统中,一般将电压等级划分为高中低三个等级,高压是指电压等级为 35KV 以上电压等级;中压是指 3~35KV (含 35KV) 电压等级;低压则指 1KV 以下电压等级。

电压等级划分常用的 IEEE (国际电工委员会) 标准规定,中压交流电力系统的定义是指额定电压大于 1KV,小于 10KV 的电力系统,比中压电力系统电压高的是高压和超高压电力系统。对于额定频率为 60 Hz 的电力系统,电压额定值有 3.3、6.6、11kV 三个等级;而额定频率为 50 Hz 的电力系统,电压额定值有 3.0、6.0、10kV 三个等级。

8.2.2 高压电力系统的结构

船舶高压电力系统结构原理图如图 8-1 所示,该电力系统由高压系统和低压系统两大部分组成。高压系统主要包括:主发电机、主配电板、高压负载和变流机组的高压电动机(或变压器);低压系统主要包括:变流机组的低压发电机(或变压器)、辅助发电机、辅助配电板、应急发电机、应急配电板、低压负载、应急负载、照明变压器、照明负载和岸电连接开关。

从图中可以看出,高压电力系统中的低压部分与普通低压电力系统的组成非常相似,高压电力系统变流机组的低压发电机(或变压器)和辅助发电机等相当于低压系统的主发电机组;高压电力系统的辅助配电板相当于低压系统的主配电板。其他部分,如应急发电机、照明变压器及其配电板等都与低压电力系统基本相同。因此,高压电力系统与低压电力系统的主要差别是增加了高压部分。

高压电力系统的高压部分的主发电机组一般也采用中速柴油机做为原动机,主发电机组的发电机通常为容量较大的同步发电机。高压系统的负载通常都是容量很大的负载,如电力推进船舶的推进电动机、海洋工程船舶中的泥浆泵电动机等。这些高压负载电动机的调速往往采用变频调速,其调速设备或其他辅助设备也要求为高压设备,有的负载设备可能存在不同电源频率。

高压电力系统除了高压负载外,还有大量的普通低压负载,因此需要将高压三相交流电变换成低压三相交流电。一种方法是采用变压器实现高压变成低压,但高压负载采用变频调速时产生的大量高次谐波,会污染低压系统,造成低压系统的电能质量恶化,因此要有谐波抑制措施。为了解决这个问题,另一种方法是采用旋转变流机组进行电压变换,将谐波截留在高压系统中,避免低压负载的谐波污染。

8.2.3 高压电力系统的特点

船舶高压电力系统最主要的特点之一是电压等级上升到高压的水平。电压等级的提升,带来的问题主要两方面:一是电气设备的绝缘必须加强,二是管理人员必须注意避免触电的

危险。

与普通船舶采用的 400~450V 低压电力系统不同的是, 由于电工材料的绝缘是相对的, 当电压足够高时, 绝缘体也会击穿。在高压电力系统, 操作人员即使没有直接接触带电部分, 如果不慎距离带电部分过近, 小于规定的安全操作距离, 也可能受到严重的触电伤害。因此, 高压电气设备, 例如变压器、电流互感器、电压互感器、断路器都安装在完全封闭的开关柜中。

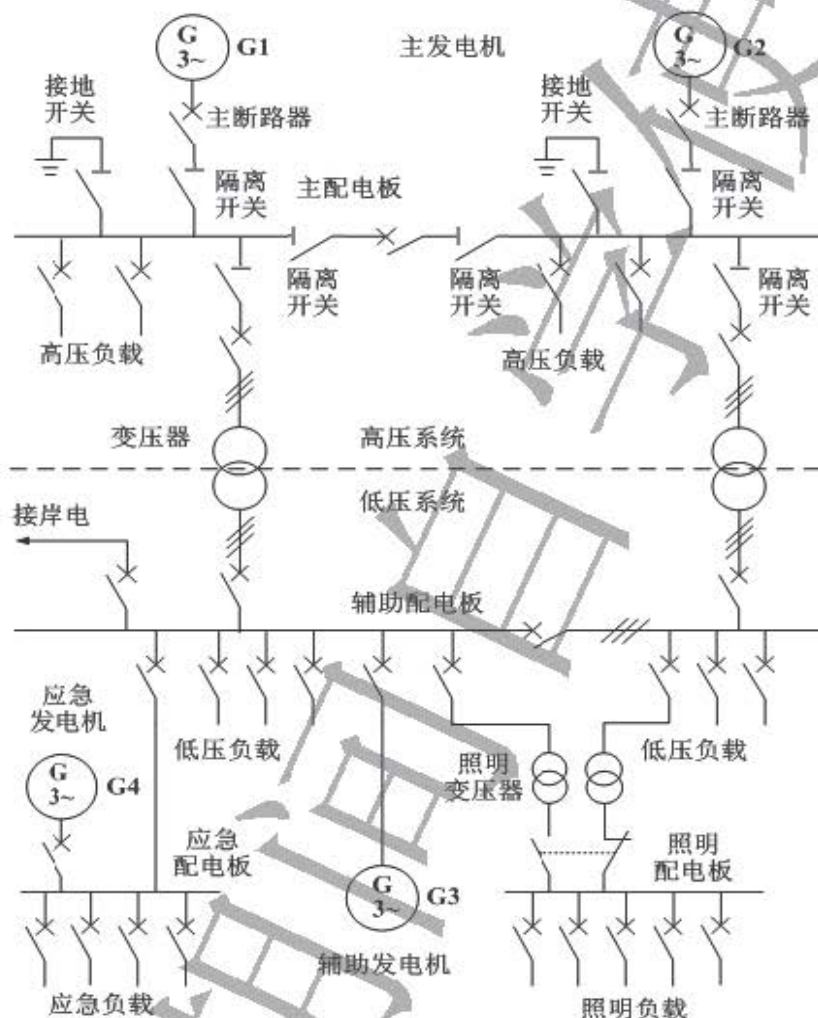


图8-1 船舶高压电力系统结构原理图

高压系统的安全用电与低压系统的安全用电概念有所不同, 实际管理时应该特别注意。尤其是应该注意接触电压与跨步电压的概念, 避免接触电压与跨步电压对人体造成的触电伤害。

所谓跨步电压, 是指接地点有较大接地电流通过时, 在接地点周围一定范围内不同的两点之间存在的电压, 靠接地点越近、接地电流越大, 产生的跨步电压越高。对于低压电力系

统, 由于电压等级低, 即使出现较大的接地电流, 跨步电压通常对人体构成的威胁较小。但对于高压电力系统, 跨步电压的威胁将随着电压等级的提升而增大。

8.2.4 船舶高压电力系统防护要求

船舶高压电气设备的外壳防护等级均应与其安装场所相适应, 除至少应符合外壳防护等级的最低要求外, 还应满足下列要求:

1. 旋转电机的外壳防护等级至少应为 IP23, 其接线盒的防护等级至少应为 IP44。安装在非专职人员可以到达处所的电动机, 其外壳防护等级至少为 IP4X, 以防止人员接近或触及电机的带电或转动部分。
2. 变压器的外壳防护等级至少应为 IP23, 如安装在非专职人员可以到达的处所时, 则其外壳防护等级至少为 IP4X。
3. 具有金属外壳的控制设备、配电设备组件和静止变换器的外壳防护等级至少应为 IP32, 如安装在非专职人员可以到达的处所时, 则其外壳防护等级至少为 IP4X。
4. 由于功率大, 损耗的绝对值也大, 加上机舱水雾灭火系统对船舶发电机的防护性能要求, 所以船舶高压发电机绝大多数采用水冷却方式, 其防护等级一般为 IP54 以上, 可满足 IP44 的最低要求。至于冷却水用淡水还是海水, 视具体船舶设计而定, 但不论何种水质, 水冷却器均应做成双管式, 具有水泄漏传感器报警装置。

8.3 船舶高压电力系统实例

本节以“泰安口”半潜式电力推进特种运输船的高压电力系统为例, 简单介绍高压电力系统的结构。

“泰安口”半潜船载重量 18000 吨, 总长 156 米, 可以装载海洋钻井平台。船上安装了先进的动力定位系统 (DP), 船尾左舷和右舷安装了 SIEMENS 公司和 SCHOTTEL 公司联合生产的吊舱式电力推进系统 (Siemens Schottel Propeller, 简称 SSP), 其螺旋桨可以 360 度回转, 船舶可以在极小的范围内灵活动作。如图 8-2 所示是该船电力系统的单线原理图。图中, 电网由三个层次组成: 一是 6.6 KV 的高压主系统, 二是 450V 的辅助低压系统, 三是 450V 的应急系统。

1. 6.6 KV 高压主电力系统的组成

高压主电力系统的电源: 3 台 5200KVA/720rpm/60Hz 的主发电机组, 柴油机为 Wartsila 9L32, 可以单独或者并联向高压电网供电。其中 No.1 主发电机在装载需要 50Hz 高压电源供电的货物时, 可以切换为 2030KVA/600rpm/50Hz 的模式运转, 单独为 50Hz 的货物负载供电, 此时, 图中用于高压汇流排连接的断路器 QF1 应该处于分闸状态。

高压主电力系统的负载:

① 船尾左右舷各一台吊舱式电力推进器 SSP 的 4.7MW 永磁同步电动机及其变频调速服务的变压器组、晶闸管装置。

② 左右舷各一台侧推器的 800KW 电动机及其变频调速服务的变压器组、晶闸管装置。

③ 可以为 450V 的辅助低压系统供电的 2 台 900KVA、将电压从 6.6 KV 转变为 450V 的旋转变流器 (在此没有采用变压器变压的原因, 是因为带有大量变频调速负载的高压主电网

的波形不好)。

其供电装置包括：在高压开关柜控制室共有 12 屏高压控制屏，分别用于 3 台主发电机的控制（PMA71 自动电站管理系统通过电流互感器、电压互感器、高压断路器等对发电机组进行控制），2 台电力推进装置 SSP 的供电，2 台侧推器的供电，2 台旋转变流器（机组）高压接线端的供电，2 个汇流排连接断路器的控制，以及 50Hz/60Hz 货物负载高压电源供电的控制。另外，两台 UPS（24VDC）控制柜也安装在高压开关柜控制室内。

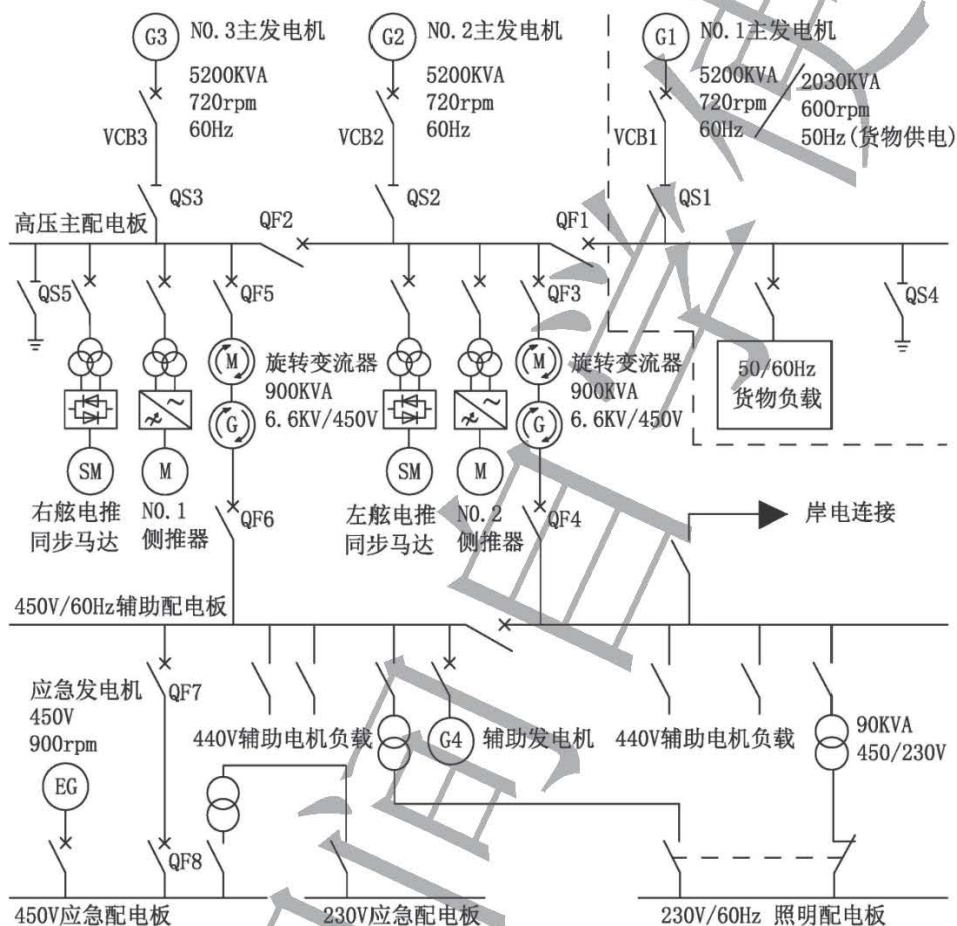


图 8-2 “泰安口”半潜式电力推进船高压电力系统

2. 450V/60Hz 低压辅助电力系统

低压辅助电力系统的电源由三个来源提供：

① 航行时，电源来自高压系统的旋转变流器（机组），此时图 8-2 中旋转变流机组两端的断路器 QF3、QF4、QF5、QF6 都处于合闸位置。

② 当旋转变流机组发生故障或检修时，以及在码头没有装载货物时，电源来自 1 台 1125KVA/900rpm/60Hz 的辅助发电机组 G4，柴油机是瓦锡兰 6L20 型，此时图中旋转变流机组两端的断路器 QF3、QF4、QF5、QF6 都处于分闸位置。

③ 在港内还可以连接岸电。

低压辅助电力系统的负载包括：常规船舶运行时需要供电的各种设备，例如淡水循环泵、燃油传输泵、滑油传输泵、低温淡水泵、高温水循环泵、中央冷却海水泵、通风机、燃油锅炉、空压机、锚机、消防泵、甲板液压起货机、照明电力配电板、航海仪器供电、机舱监控系统的供电等。也包括电力推进装置的方位控制泵，电力推进装置变压器，变频器的冷却泵，货物起重机，半潜船的空压机，用于 3 台主发电机、辅助发电机、旋转变流机组、电力推进驱动装置的保温装置，动力定位系统（DP）的供电。

其配电装置包括：在低压配电板控制室共有 17 屏低压控制屏，分别用于 1 台辅助发电机的控制，2 台旋转变流器低压端的连接，1 个汇流排连接断路器的控制，4 个电动机组合起动屏，6 个输出负载屏，以及为高压变频驱动器服务的低压负载的供电屏。

3. 450V/60Hz 应急电力系统

应急电力系统的电源有两个来源：正常情况下，电源来自 450V 的辅助供配电系统，此时图 8-2 中连接辅助电力系统和应急电力系统的断路器 QF7、QF8 都处于合闸位置。应急情况时，电源来自 1 台 250KVA/900rpm/60Hz 应急发电机组。

应急电力系统的负载包括：常规船舶应急时需要供电的各种设备，例如蓄电池充放电板、应急照明、航行灯、雷达、电罗经、机舱通风机、消防系统、应急消防泵、电话、报警系统、机舱监控系统等的供电。也包括半潜船的压载水控制台、SSP 控制台、动力定位（DP）控制台的供电。

其配电装置包括：在应急发电机控制室共有 3 屏低压配电板分别用于应急发电机的控制，与 450V 辅助供配电系统的连接，电动机起动和输出负载的分配。

8.4 船舶高压电力系统接地技术

船舶高压电力系统往往采用中性点接地方式，与低压电力系统普遍采用中性点绝缘方式有着明显的区别，中性点采用何种接地方式也是船舶高压电力系统需要解决的关键技术难题。目前，从国内外应用来看，船舶高压电力系统普遍采用高电阻接地方式。

电力系统的中性点接地方式是指电源或变压器中性点采用何种方式接地。通常，中性点接地方式分为四种，分别为不接地方式、直接接地方式、消弧线圈接地方式和高电阻接地方式。

8.4.1 不接地方式

不接地方式又称中性点绝缘。由于不接地方式的中性点对地绝缘，比较安全、可靠，当电力系统发生单相接地故障时，不会影响三相电压各相之间的对称关系，单相接地也不形成短路，可以继续带接地故障运行，供电连续性好。中性点不接地电力系统，配电线路各相对地的电容小，因此接地故障电流也小，瞬时性故障往往自动消除。因接地电流小，对通信线路的干扰也小。中性点不接地方式的缺点是当一相接地时，另外两相对地电压升高，最大至相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，易使绝缘薄弱处击穿，造成两相接地短路。

8.4.2 直接接地方式

中性点直接接地方式的优点是一相接地时,其他两相对地电压不升高,不存在间歇电弧造成的过电压危险。因此,可降低整个电力系统的绝缘水平。另外,中性点直接接地系统单相接地时,短路电流很大,可使保护装置迅速、准确地动作,提高保护的可靠性。但由于短路电流很大,需要选择容量较大的开关及设备,并有造成系统不稳定和对通信线路造成强烈干扰等缺点。

8.4.3 消弧线圈接地方式

消弧线圈接地方式是利用电抗器的感性电流补偿电网的容性电流,可使接地电流大为减少。若感性电流等于容性电流,则可达到完全补偿,对熄灭接地电弧非常有利。但实际上完全补偿是不可能的,这是由于存在线路电阻、接地点电阻、漏电阻、变压器和消弧线圈的有功损耗等,使故障点流过一个不确定的剩余电流。在正常运行时,如果三相线路对地分布电容不对称,或出现一相断线时,可能出现消弧线圈与分布电容的串联谐振,这时电力系统中性点可能出现危险的高电位。为此,消弧线圈一般采用过补偿运行,即电感电流大于电容电流,这是消弧线圈接地方式的一个缺点。

8.4.4 高电阻接地方式

高电阻接地方式的最大特点是当电力系统发生单相接地故障时,可以继续带接地故障运行2小时,但也可以选择定时或快速跳闸。高电阻接地系统的设计应符合中性点接地电阻小于或等于电力系统各相对地分布电容的总容抗,即 $R_N \leq X_{\infty}$ 的准则,以限制由于接地故障产生的瞬态过电压。

电力系统采用电阻接地方式的目的是给接地故障点注入阻性电流,使接地故障电流呈阻容性质,减小接地故障电流与电压的相位差角,降低故障点电流过零熄弧后的重燃率。当阻性电流足够大时,重燃将不再发生,这样可以防止间歇性弧光接地过电压和谐振过电压;电力系统中性点采用高电阻接地还可以限制单相接地故障电流。而且,阻容性电流还可以提高零序保护灵敏度,使断路器跳闸,满足保护的要求。

8.5 船舶高压电力系统的配电装置与发电机保护

8.5.1 高压配电装置

为控制和分配电能,高压配电装置(一般称为高压开关柜)上装有各种开关、控制及保护电器、电气测量仪表、信号指示灯。其中,极其重要、较为复杂、又与低压电力系统区别较大的开关电器主要有高压断路器、高压真空接触器等。

高压配电装置按CCS规范要求:应将主配电板至少分成两个独立的分断,通过至少一个断路器或其他合适的隔离设备分隔开,每一分断至少由一台发电机供电。如两个独立配电板由电缆进行连接,则在电缆的每一端应设有断路器。由于分断高压断路器的下端不可能再从该屏中接汇流排引上连接到第二分断母线,只能旁接至另一屏再引上连接第二分断母线,这

屏就称为提升屏或母联开关屏,是低压配电板中不会有的特殊的结构。

高压配电板的控制与低压配电板类似。对于高压发电机而言,具有与低压发电机完全相同的同步控制要求,包括调压、调速、同步检测以及自动准同步或手动准同步控制。除了在高压配电板上进行控制外,还可以在集中控制台上进行控制。

1. 高压断路器

高压断路器是高压电力系统中最重要的控制和保护设备。在正常运行时,根据电网的需要,接通或断开电路,起控制作用;当电网发生故障时,高压断路器和保护装置及自动装置相配合,迅速、自动地切断故障电流,保障电网无故障部分的安全运行,以减少停电范围,起保护作用。

根据断路器使用的灭弧介质,可分为以下几种类型:

(1) 油断路器。油断路器是以绝缘油为灭弧介质,可分为多油断路器和少油断路器。在多油断路器中,油不仅做为灭弧介质,而且还做为绝缘介质,因此用油量多、体积大;在少油断路器中,油只做为灭弧介质,因此用油量少、体积小、耗用钢材少。

(2) 空气断路器。空气断路器是以压缩空气做为灭弧介质,此种介质防火、防爆、无毒、无腐蚀性,使用方便。空气断路器靠压缩空气吹动电弧使之冷却,在电弧达到零值时,迅速将弧道中的离子吹走或使之复合而实现灭弧。空气断路器开断能力强、开断时间短,但结构复杂、工艺要求高、有色金属消耗多,因此,空气断路器一般应用在 11KV 及以上的电力系统中。

(2) 六氟化硫(SF₆)断路器。SF₆断路器采用具有优良灭弧能力和绝缘能力的 SF₆ 气体做为灭弧介质,具有开断能力强、动作快、体积小等优点,但金属消耗多、价格较贵。近年来 SF₆ 断路器发展很快,在高压系统中得到广泛应用。尤其以 SF₆ 断路器为主体的封闭式组合电器,是高压电器的重要发展方向。

(3) 真空断路器。真空断路器是在高度真空中灭弧,真空中的电弧是在触点分离时电极蒸发出来的金属蒸汽中形成的,电弧中的离子和电子迅速向周围空间扩散。当电弧电流到达零值时,触点间的粒子因扩散而消失的数量超过产生的数量时,电弧即不能维持而熄灭。真空断路器开断能力强,开断时间短、体积小、占用面积小、无噪声、无污染、寿命长,可以频繁操作,检修周期长。真空断路器目前在我国的配电系统中已逐渐得到广泛应用。

此外,还有磁吹断路器和自产气断路器,它们具有防火防爆,使用方便等优点。但是一般额定电压不高,开断能力不大,主要用做配电用断路器。

高压真空断路器(或称高压开关)常用做发电机主开关及高压母线联络开关。在正常情况下用于接通和断开电路;在电路发生短路、过流以及出现其他不正常现象时,将通过独立的保护装置的作用,切断过负荷电流和短路电流,它具有相当完善的灭弧结构和足够的断流能力。与空气断路器不同的是,它可用于高压电网,如 3300V 或 6300V 的电网,其触点处于真空中,在断开电路时,由于没有空气的存在,高压大电流电弧容易熄灭。图 8-3 是 ZN63 型真空断路器结构简图及外形图,图中各部位分别为:1.上出线座;2.上支架;3.真空灭弧室;4.绝缘筒;5.下出线座;6.下支架;7.绝缘拉杆(内加触点压力弹簧);8.传动拐臂(四连杆机构);9.分闸弹簧;10.传动连板(四连杆机构);11.主轴传动拐臂(四连杆机构);12.分闸保持掣子(四连杆机构);13.连板;14.分闸脱扣器;15.手动分闸顶杆;16.凸轮;17.

分合指示牌连板。

高压真空断路器的额定电压为15KV，额定分断电流为25KA，额定电流为1250A，机械寿命为30000次，合闸系统为马达-弹簧储能传动机构，可以电动储能和手动储能。真空断路器正面有状态指示器、计数器、弹簧储能指示器以及启动、停止按钮。侧面有接地刀闸。

- ① 状态指示器用于显示真空断路器的合闸和分闸状态。
- ② 计数器用于累计真空断路器的合闸次数。
- ③ 弹簧储能指示器用于显示弹簧储能是否完成。
- ④ 启动、停止按钮用于对真空断路器进行手动操作。

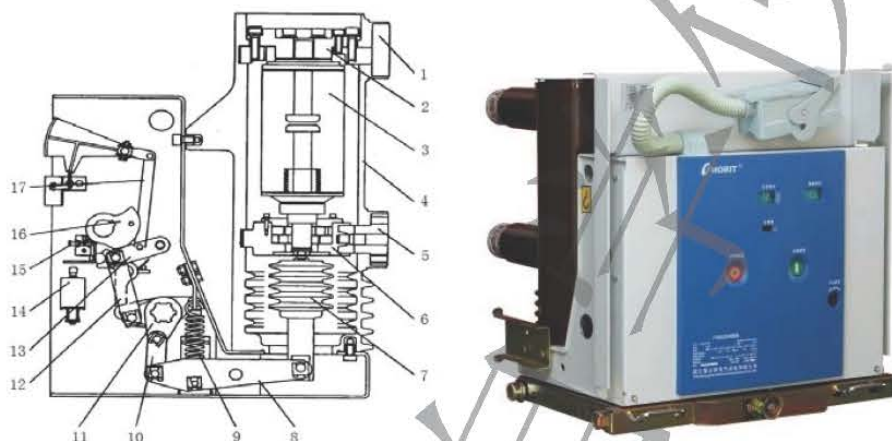


图 8-3 ZN63 型真空断路器结构简图及外形图

2. 高压电磁接触器

高压电磁接触器在电力系统中与隔离开关、熔断器配合用做高压电动机的开关，控制电动机的运行与停止，同高压真空断路器一样，也有真空灭弧作用，只是它的切断容量不够大，因此它本身只有过电流保护，高压电动机的短路保护由熔断器来完成。

图 8-4 是 CKJ-200/3 型交流真空接触器结构示意图，主要由电磁系统、触点系统、灭弧系统及其它部分组成。

(1) 电磁系统：电磁系统包括电磁线圈和铁芯，是真空接触器的重要组成部分，依靠它带动触点的闭合与断开。触点的控制机构一般均采用电磁式操作机构。

(2) 触点系统：触点是真空接触器的执行部分，包括主触点和辅助触点。主触点的作用是接通和分断主回路，控制较大的电流。而辅助触点是在控制回路中，以满足各种控制要求。



图 8-4 真空接触器结构示意图

(3) 灭弧系统: 灭弧装置用来保证触点断开电路时, 产生的电弧可靠的熄灭, 减少电弧对触点的损伤。为了迅速熄灭断开时的电弧, 通常真空接触器都装有灭弧装置, 一般采用半封闭式纵缝陶土灭弧罩, 并配有强磁吹弧回路。

(4) 其它部分: 有绝缘外壳、弹簧、短路环、传动机构等。

其工作原理为: 当交流真空接触器电磁线圈不通电时, 弹簧的反作用力和衔铁的自重使主触点保持断开位置。当电磁线圈通过控制回路接通控制电压(一般为额定电压)时, 电磁力克服弹簧的反作用力将衔铁吸向静铁芯, 带动主触点闭合, 接通电路, 辅助触点随之动作。

3. 高压开关柜的组成

(1) 开关柜的断路器小室

断路器小室两侧装有水平方向导轨, 使断路器能沿着导轨前后移动, 其内部装有一套螺旋推进机构, 提供手动推进摇把。摇把顺时针转动, 使断路器小车前进; 摇把逆时针转动, 使断路器小车退出, 从而使断路器在“工作”位置和“试验/断开”位置之间移动。断路器上装有一次隔离动触点和二次动触点。随着断路器的移动, 在“工作”位置时, 一次、二次动触点和安装在柜体上的一、二次静触点座插入并可靠锁住。在“试验/断开”位置, 随着断路器的移动, 一、二次动静触点自动脱离, 此时二次动触点可手动插入, 使二次回路接通, 保证试验工作进行。

(2) 断路器小车(又称断路器手车)

断路器小车的移动是靠手动操作的机械机构实现的, 小车由真空断路器和辅助设备组成, 真空断路器主回路由一次静触点、一次动触点组成, 当小车移动到“试验/断开”位置或“工作”位置时, 同时在小车上的位置开关也动作, 在控制屏上有小车的位置指示状态灯。小车上分合闸手动控制按钮、弹簧储能指示器、合闸计数器。断路器小车有高压熔断器、一次静触点、电压互感器等组成。

开关柜具有以下联锁功能:

- ① 断路器手车一旦离开“工作”位置或“试验/断开”位置时, 断路器不能合闸。
- ② 断路器手车在“工作”与“试验/断开”位置时, 断路器处于合闸状态时, 手车不能被移动。
- ③ 当断路器手车在“工作”与“试验/断开”两个位置移动或从柜内进出时, 断路器储能的合闸弹簧能自动释放。
- ④ 断路器手车在“工作”位置时, 接地开关不能合闸, 接地开关在合闸状态时, 断路器不能进入“工作”位置。
- ⑤ 接地开关合闸后, 才能打开高压开关柜的后盖板, 打开后盖板后, 接地开关不能分闸, 只有盖上后盖板后, 接地开关才能进行分闸操作。

8.5.2 高压发电机保护

高压电力系统中, 高压同步发电机是十分重要的电气设备, 它的安全运行对电力系统的正常工作、用户的不间断供电、保证电能的质量等方面, 都起着极其重要的作用。

由于高压发电机是长期连续运转的设备, 它既要承受机械振动, 又要承受电流、电压的冲击, 因而常常导致定子绕组绝缘的损坏。因此, 高压同步发电机在运行中, 定子绕组和转

子励磁回路都有可能产生危险的故障和不正常的运行情况。

为了使高压同步发电机能根据故障的情况有选择地、迅速地发出信号或将故障发电机从系统中切除,以保证发电机免受更为严重的损坏,减少对系统运行所产生的不良后果,使系统其余部分继续正常运行,在发电机上装设能反映各种故障的保护是十分必要的。

一般来说,高压发电机的内部故障主要是由定子绕组及转子绕组绝缘损坏而引起的,常见的故障有:

1. 高压发电机内部定子绕组相间短路
2. 高压发电机内部定子绕组同一相的匝间短路
3. 高压发电机内部定子绕组的单相接地
4. 高压发电机内部转子绕组的一点接地或两点接地

因此,船舶高压发电机除了与船舶低压发电机具有相同的短路、过载、欠压、逆功率保护外,针对船舶高压发电机内部可能出现的故障,还应设置船舶高压发电机的纵联差动保护、高压发电机定子绕组的零序电压保护、高压发电机转子接地等保护,以实现船舶高压发电机内部故障的保护。

8.6 船舶高压电力系统安全操作及检修注意事项

8.6.1 安全操作规程

电工材料的绝缘是相对的,当电压足够高时,绝缘体也会击穿。对于船舶高压电力系统,操作人员即使没有直接接触带电设备,如果不慎距离带电设备太近,小于规定的安全操作距离,也可能发生严重的触电事故。船舶高压电力系统的变压器、电流互感器、电压互感器、断路器等一般要求安装在完全封闭的开关柜中。当需要带电操作某些设备时,要严格按照安全操作规程,戴绝缘手套,穿绝缘鞋,使用专用的绝缘工具进行。

1. 船舶高压发电机检修操作规程

船舶高压发电机只有做备用机时才能进行检修,以保证船舶电站供电的连续性。检修船舶高压发电机,必须将发电机组方式选择开关打到“手动”位置,防止发电机组误启动。断开发电机主开关,关闭励磁电源,合上接地开关,才能进行检修。如果需要测量船舶高压主发电机绕组的绝缘,必须将发电机中性点接地电阻断开。

检修时,操作人员必须戴绝缘手套,穿绝缘鞋。

2. 船舶高压主开关检修操作规程

高压配电板通常分为左右两侧,分别放置在不同的高压配电室中,高压配电室都配有高压绝缘地面,并且高压配电板都具有非常高的防护等级,保证操作人员的安全。

船舶高压主开关检修的流程为:将船舶高压主开关置于断开位置,断开相应的隔离开关,闭合接地开关,打开开关柜,方可检修船舶高压主开关。检修完毕后,首先关闭开关柜,断开接地开关,闭合相应的隔离开关,将船舶高压主开关置于工作位置。虽然主开关、隔离开关与接地开关和柜门之间都有电气或机械连锁,以防止误操作,但是操作人员仍应按照操作流程逐步操作。

3. 船舶高压隔离开关操作规程

船舶高压隔离开关是船舶高压电力系统中重要的开关电器，需与高压断路器配套使用，其主要功能是：保证高压电器及装置在检修工作时的安全，起隔离电压的作用，仅可用于不产生强大电弧的某些切换操作。由于断路器的断开点在外是看不见的，为了保证在检修船舶高压电力系统时操作人员的人身安全，在船舶高压主发电机断路器与高压汇流排之间，在分断高压汇流排的断路器两端，以及在高压变压器的断路器与高压汇流排之间，都串联了隔离开关。隔离开关是具有可见断开点的开关，由于隔离开关没有灭弧装置，因此不能带电进行分合闸操作。由于有机械或电气的联锁，操作船舶高压隔离开关时，要与断路器的分、合闸操作相配合，只有当断路器断开后，才能进行断开船舶高压隔离开关的操作。断路器在合闸位置时，不能分断船舶高压隔离开关。同样，必须先合上船舶高压隔离开关之后才允许合上高压断路器。其操作规程如下：

- (1) 操作前应确保断路器在相应分、合闸位置，以防带负载分合隔离开关。
- (2) 操作中，如发现绝缘子严重破损、隔离开关传动杆严重损坏等现象时，不得进行操作。
- (3) 如操作隔离开关时有异常声音，应查明原因，不得硬分、硬合。
- (4) 隔离开关、接地开关和断路器之间安装有防误操作的闭锁装置时，倒闸操作一定要按顺序进行。如倒闸操作被闭锁不能操作时，应查明原因，正常情况下不得随意解除闭锁。
- (5) 如确实因闭锁装置失灵而造成隔离开关和接地开关不能正确操作时，必须严格按照闭锁要求的条件，检查相应的断路器和隔离开关的位置状态，只有在核对无误后才能解除闭锁进行操作。
- (6) 解除闭锁后应按规定方向迅速、果断地操作，即使发生带负载合隔离开关，也禁止再返回原状态，以免造成事故扩大，但也不要用力过猛，以防损坏隔离开关；对单极刀闸，合闸时先合两边相，后合中间相；分闸时，顺序相反。
- (7) 分、合带负载和有空载电流的刀闸时应符合有关规定。
- (8) 对具有远程控制操作功能的隔离开关操作，一般应在主控室进行操作。只有在远控电气操作失灵时，才可在征得技术负责人许可，并有现场监督的情况下在现场就地进行电动或手动操作。
- (9) 远程控制操作完毕，应检查隔离开关的实际位置，以免因控制回路中传动机构故障，出现拒分、拒合现象，同时应检查隔离开关的触头是否到位。
- (10) 发现隔离开关绝缘子断裂时，应根据规定将相应断路器分闸。
- (11) 操作时应戴好安全帽、绝缘手套，穿好绝缘靴。
- (12) 操作隔离开关后，要将防误闭锁装置锁好，以防下次发生误操作。

4. 高压接地开关的操作规程

为了确保维修人员正在接触的线路无电，高压供配电线路上还安装了多处接地开关。接地开关（三相）的一端与母线相连，另一端与接地点可靠相连，与隔离开关相同，接地开关也没有灭弧装置，不可以带负载分合闸。在停电维修某一段线路和设备时，合上相应的接地开关，能保证被维修线路和设备可靠的接地，防止线路上电荷积累，或者在断路器意外合闸时，由于线路三相接地，短路电流会使断路器立即跳闸。

检修完成后，首先打开接地开关，才能合上船舶高压隔离开关，最后才可以进行相应的

断路器合闸操作。

5. UPS 管理操作规程

不间断电源 UPS 是高压电站控制系统的应急供电设备, 如果 UPS 不能正常工作, 在船舶失电后, 高压电站控制系统将不能工作, 导致高压自动电站处于瘫痪状态。因此, 对 UPS 的操作和管理应予以重视, 同时, UPS 的功能试验也是高压电力系统的船舶必检内容。

平时保持电瓶间整洁, 并确保通风良好。保持电瓶以及接线柱清洁, 确保接线紧固。日常经常检查 UPS 设备各参数是否正常。平日 UPS 设备采用浮充电制, 每月充分放电一次, 然后手动充足, 再转浮充。检修 UPS 时, 应将其他电源代替 UPS 供电, 保证高压电站控制系统的供电。

8.6.2 船舶高压开关柜的“五防”措施

随着船舶高压电力系统的不断发展, 特别是控制技术的不断更新, 船舶高压电力系统防误装置得到不断改进和完善。防误装置的设计原则是: 凡有可能引起误操作的高压电气设备, 均应装设防误装置和相应的防误电气闭锁回路。为保证安全及各连锁装置可靠不至损坏, 必须按连锁防误操作程序进行操作。船舶高压开关柜的“五防”措施成了船舶高压电力系统安全工作的重要措施之一。

船舶高压开关柜的“五防”措施的具体内容如下:

1. 防止误分、合高压断路器

对高压断路器分、合闸按钮做防护设计, 防止在正常运行时误分闸操作或不具备合闸条件时误合闸。船舶高压断路器在工作位置时, 二次插头被锁定不能拔出, 防止了带负载误分、合高压断路器。

2. 防止带负载分、合隔离开关

隔离开关无灭弧装置, 因此不能带负载分、合隔离开关。隔离开关与相应的高压断路器有机械或者电气的连锁, 只有高压断路器分闸后, 才能分、合隔离开关。

3. 防止带电分、合接地开关

仅当相应的高压断路器处于试验位置时, 接地开关才能进行合闸操作, 实现了防止带电误合接地开关。

4. 防止带接地开关合高压断路器

仅当接地开关处于分闸位置时, 相应的高压断路器才能从试验位置移至工作位置, 防止接地开关处于闭合位置时合高压断路器。

5. 防止误入带电间隔

接地开关处在分闸位置时, 高压开关柜的下门及后门都无法打开, 防止人员误入带电间隔。

本章小结

本章讲述的主要内容有：船舶使用高压电力系统的主要原因；高压电力系统的电压等级、结构及特点；“泰安口”半潜式电力推进特种运输船的高压电力系统实例；船舶高压电力系统接地技术；船舶高压电力系统的配电装置与发电机保护；船舶高压电力系统安全操作及检修注意事项。

本章的重点内容如下：

1. 船舶使用高压电力系统的主要原因。
2. 高压电力系统的电压等级、结构及特点，隔离开关、接地开关的功能。
3. 船舶高压电力系统接地技术。
4. 船舶高压电力系统安全操作及检修注意事项。

复习思考题

- 8-1 叙述船舶使用高压电力系统的主要原因。
- 8-2 叙述电力系统的中性点接地方式的定义，主要有哪几种接地方式。
- 8-3 叙述船舶高压隔离开关的主要功能。
- 8-4 叙述船舶高压接地开关的主要功能。
- 8-5 简述船舶高压开关柜的“五防”措施。

第9章 典型电站自动控制系统分析

船舶电站自动化系统的发展,主要经历了五个阶段:继电器控制、晶体管分立元件控制、单片机控制、PLC 控制、PPU 模块+PLC 控制。目前在船舶中使用较多的电站自动控制系统是采用丹麦 DEIF 公司的 PPU 模块+PLC 的控制方式。

9.1 PPU 模块+PLC 控制的主要功能

1. PPU 模块+PLC 控制的主要功能

可编程控制器 PLC 在工作原理和装置结构上都与单片机类似,与单片机相比,其具有可靠性强、组合灵活、扩展方便、程序设计开发简单、现场调试容易等优点。日、韩及欧美等造船发达国家,利用 PLC 对船舶电站进行自动控制,已成功构成全自动电站。PLC 的优势在于其强大的逻辑控制能力,既能实现逻辑控制(例如机组的起停控制),也能实现过程控制(例如同步并车控制);但是其缺点在于程序执行的扫描周期较长,控制的实时性较差;而且 PLC 对模拟量的输入输出处理复杂,占 CPU 内存较大。

基于微处理器技术的并车和保护控制单元 PPU (Paralleling and Protection Unit),其优势在于实现控制功能的同时拥有更强的数据采集及处理能力、强大的网络通讯功能以及能够执行比较复杂的控制算法等。它采集信号的精度高,运算速度快,在控制发电机同步并车及负荷控制方面尤为突出。PPU 模块的优点可以弥补 PLC 控制的不足。

(1) PPU 模块的主要功能

PPU 模块作为发电机组控制器,每台机组配置 1 套 PPU 模块,其主要功能包括如下。

▲ 参数的设定、采集与数据处理

参数的设定可以在显示面板或专用软件进行。主要设定机组的额定电压、电流、频率、功率因数及相应的死区范围等。

PPU 模块采集发电机三相电压、发电机三相电流、电网三相电压;通过数据处理及计算得到频率、有功功率、无功功率、功率因数等电参数,并上传给 PLC 模块。

▲ 主开关合闸控制

分为单机合闸和准同步并车合闸。

单机合闸:在电网失电状态,一备机组起动成功,待电压和频率达到额定值后即自动合闸供电。

准同步并车合闸:在电网有电状态,一备机组起动成功,PPU 自动检测准同步并车条件,满足后自动合闸。

▲ 自动调频调载控制

机组并车合闸后,PPU 模块可实时根据并联机组的瞬时有功功率精确地发出调速信号,进行负载分配及恒频控制。

要注意的是:机组的解列控制是由 PPU 与 PLC 共同完成的。在网运行的某机组出现故障或是电网负载均低于单机额定功率的 35%且持续 5min 以上时(此参数可以调整),由 PLC 进行解列决策,向 PPU 模块发出解列指令,PPU 收到解列指令后,起动负载转移程序,将欲解列机组承担的有功功率减至额定功率的 5%,适时控制解列机组分闸。

▲ 保护功能

根据采集和计算得到的实际电参数,与设定值进行比较,PPU 模块可以实现逆功率、过载、短路、欠压等发电机的保护。

(2) PLC 控制的主要功能

PLC 作为电站整体的管理模块,其主要功能包括发电机组的备机顺序及其设定、备机状态检测、自动增机、自动减机、自动分级卸载、重载询问、机舱重要泵的分级起动、原动机和电网的保护、监测报警等,并作为与监控层计算机的桥梁,完成数据通讯。PLC 与 PPU 之间通过总线(PPU-3 模块)或网线(PPU 300 模块)实现数据通讯。

基于以上分析,PPU 模块+PLC 控制是融合了两者的优点,两者相互配合,共同完成电站管理的现场控制,在船舶自动化电站中得到了广泛的应用。目前,在船舶中以 Multi-Line2 系列的 PPU-3 模块+PLC 控制的方式比较多见,随着技术更新和产品的升级,Multi-Line300 系列的 PPU 300 模块+PLC 控制的方式也逐渐在船舶电站控制中开始得到应用。

2. 电站控制的实现

船舶电站的控制有手动、半自动和自动三种模式。采用 PPU 模块+PLC 控制,其实现方法如下:

(1) 手动控制模式

手动控制是在 PLC 控制器和 PPU 控制器均不能正常使用时,通过手动方式使用船舶电站,保证船舶正常航行。其功能主要包括:启动发电机组,发电机同步并车,并联运行发电机之间负载分配,分级卸载,解列和停机,重载询问。

(2) 半自动控制模式

半自动控制是指在 PLC 控制器不能正常使用时,可以通过 PPU 模块使用船舶电站,实现自动同步并车及自动调频调载控制。

(3) 自动控制模式

自动控制是指 PLC 控制器和 PPU 控制器均可以正常使用。可以自动实现电站控制的全部功能。

9.2 PPU 模块介绍

1. DEIF 控制器的三个层次

丹麦 DEIF 公司成立于 1933 年,主要为分布式电力生产、船舶与海工和风力发电行业提供绿色、安全和可靠的控制解决方案。DEIF 控制器分三个层次:单功能(single-function)、多功能(multi-function)和集成化系统(integrated)。

(1) 单功能(single-function)模块

每个模块分别实现单一功能,比如过压/欠压、过频/低频、过流、短路、逆功率等保护模块,自动同步装置,自动调频调载装置等。图 9-1 中,(a)是完成单一功能的自动同步器、(b)是过载/逆功率继电器、(c)是电压保护继电器、(d)是频率保护继电器。

(2) 多功能(multi-function)模块

包括 multi-line 2 系列控制器和 multi-line 300 系列控制器。

图 9-2 是 multi-line 2 系列三款控制器(发电机保护单元 GPU-3、并车保护单元 PPU-3、并车保护与功率管理单元 PPM-3)的功能对比图。其中 PPU-3 模块是目前船舶电站控制中使

用的主流产品。

图9-3是multi-line 300系列三款控制器(发电机保护单元GPU300、并车保护单元PPU300、并车保护与功率管理单元PPM300)的功能对比图。其中PPU300模块逐渐在船舶电站控制中开始应用。



图9-1 单功能模块

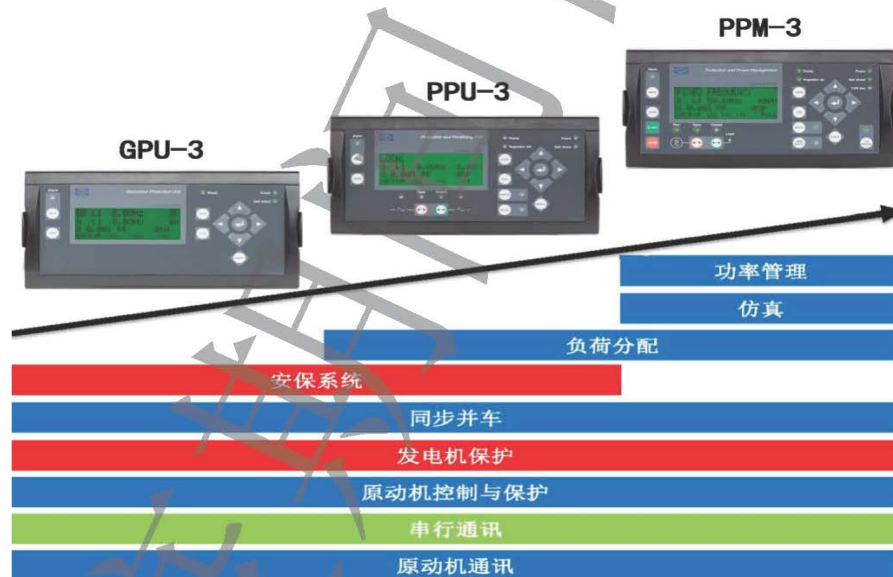


图9-2 multi-line 2系列三款控制器的功能对比图

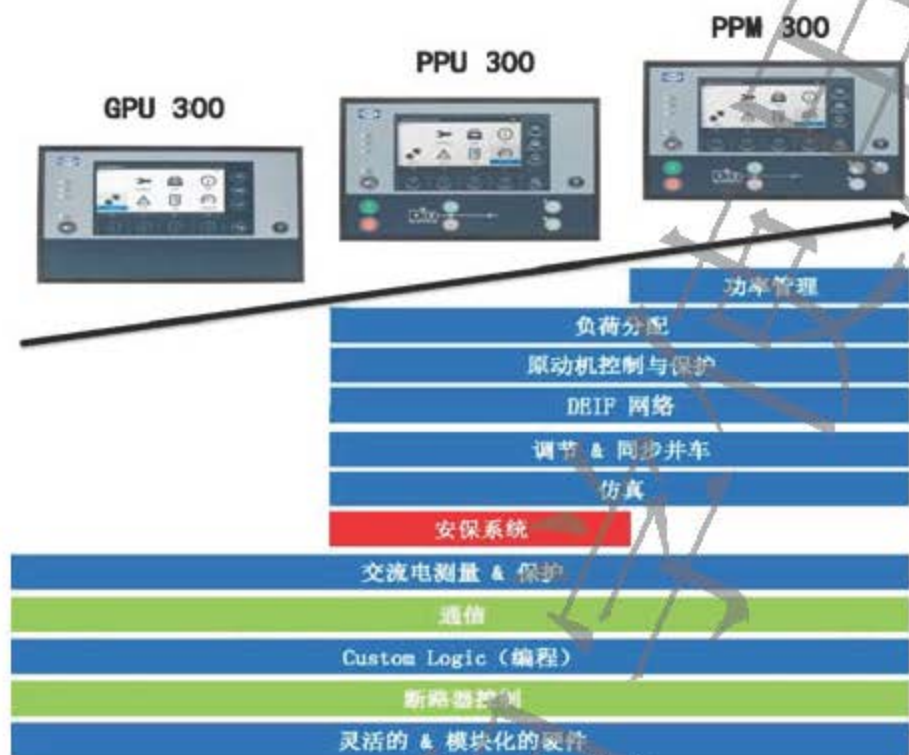


图9-3 multi-line 300 系列三款控制器的功能对比图

(3) 集成化系统 (integrated)

图 9-4 是 DEIF 公司的 DM-4 船用控制系统模块图, 该系统可以进行客户化设置、实现先进的 PMS 电站管理控制功能。

DM-4 船用控制系统非常适合需要大量输入或联络开关的应用场合, 能够提供额外的逻辑功能或灵活性, 也可在调整后用于应急发电机控制。其特性主要包括:

- 自检系统
- 发动机控制、监测和保护
- 三相发电机保护
- 自动同步
- 负载分配
- 双 ARCnet 通讯实现冗余通讯
- 支持多个显示单元和高级操作面板
- 支持 DEIF 高级图形触摸屏 AGI 接口
- 2 个 RS485 Modbus 通讯端口
- 2 个发动机 J1939 通讯口, CANopen 协议
- 服务软件采用 USB 端口
- 高达 690V 的直接交流电接入

- 报警和事件日志
- 先进的自动增/减机运算
- 断电预防和恢复
- 优先级选择
- 重载询问处理

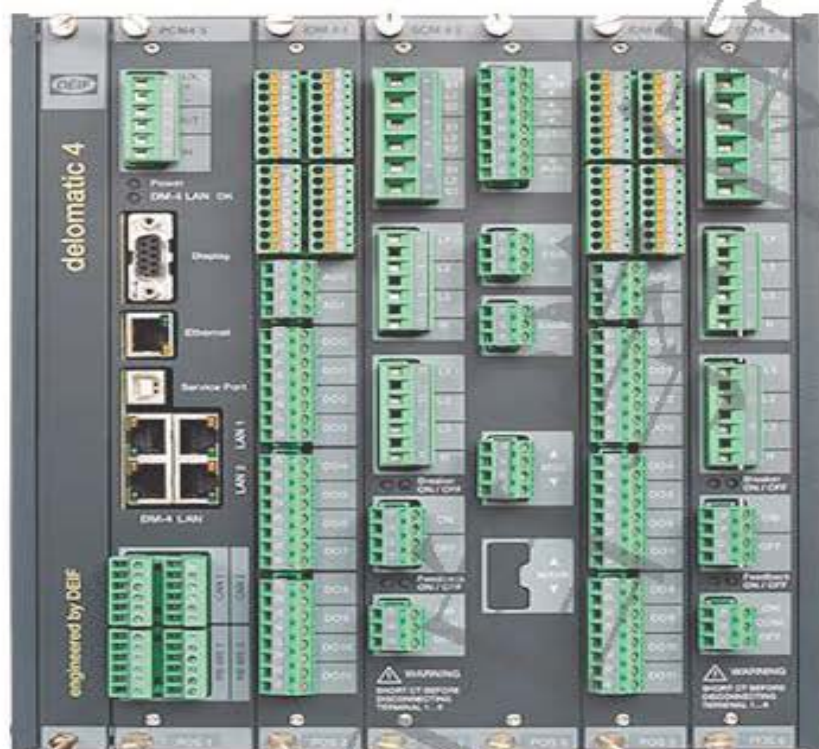


图9-4 DDM-4 船用控制系统模块图

- 基本负载模式
- 非重要负载组跳闸（优先脱扣）
- 先进的燃油优化
- 一键式控制
- 允许在母联开关闭合状态下进行动力定位（DP-2）操作
- 快速动态负载分配偏差保护
- 优化的负载分配
- 1*Modbus TCP/IP
- 通过以太网远程访问服务软件

2. PPU-3 模块

PPU-3 模块是一个基于微处理器（16 位单片机 HBS/2655）技术实现发电机并联运行及保护功能的船舶电站核心控制器，目前广泛应用于船舶电站自动控制系统中。

PPU-3 控制器可控制发电机准同步并车,并在同步运行后实现所有必须的发电机控制和保护功能,比如对发电机三相电压进行检测,并且在液晶显示屏 LCD(Liquid Crystal Display)上显示所有的测量值和报警值。各项保护的设定值既可通过 LCD 的按钮在线修改,也可通过 RS232 与 PC 机相连,利用操作软件进行编写、修改。

PPU-3 控制器的接口非常适合用于 PLC 控制系统,所以采用 PPU 与 PLC 配合使用,是目前船舶电站自动控制系统的主流选型。PPU-3 控制器可通过数字和模拟 I/O 检测端口,采集系统各运行参数并进行运算,输出至 PLC、继电器等报警单元,也可通过串行通信接口与其他控制器交换数据。

PPU-3 控制器内部有循环自检功能,可通过文字显示出错误的信息。当有任何错误出现时,可通过相应的配置继电器输出,用来指示错误。

图9-5是PPU-3模块主控单元;图9-6是PPU-3模块的显示单元,它是独立的部分,可直接安装在发电机控制屏门前面(附带3 m长显示面板电缆)。显示单元显示所有测量值和计算值以及来自事件日志的报警和数据;图9-7是PPU-3模块主控单元与显示单元连接图。



图9-5 PPU-3模块主控单元



图 9-6 PPU-3 模块的显示单元

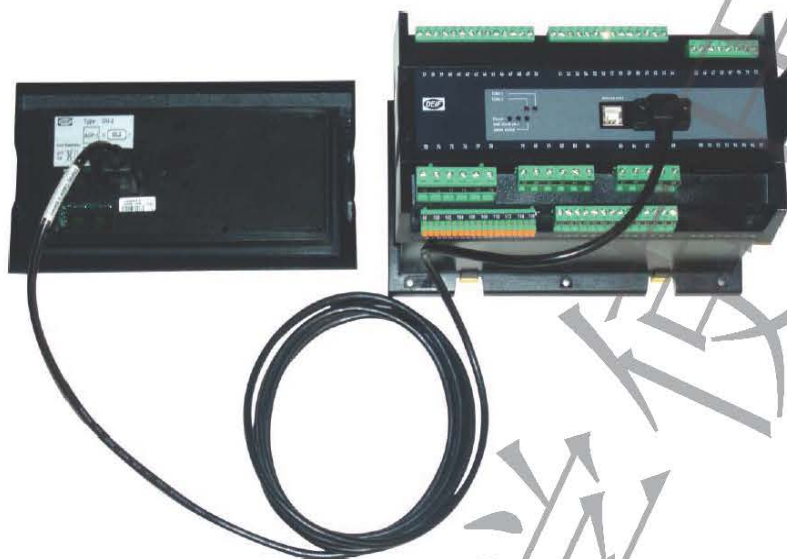


图 9-7 PPU-3 模块主控单元与显示单元连接图

3. PPU 300 模块

目前,节能减排、应用灵活以及操作简便等需求已经成为船舶控制的主流发展方向。PPU 300 模块是丹麦 DEIF 公司基于最新的发动机与发电机控制平台 Muti-line 300 (ML 300) 技术开发的,采用先进的处理器技术以及高速的冗余通信技术,使控制器具有快速的报警响应以及变送输出。图 9-8 是 PPU 300 模块显示单元,图 9-9 是 PPU 300 模块主控单元。

PPU300 并联和保护装置是一款具有很高的灵活性与可配置性的控制器,专为船用而设计。控制器包含发电机及其断路器的保护与控制功能(具体应用于柴油发电机、轴带发电机、岸电开关与母线联络开关)。通过网络连接,最多可以连接 12 个 PPU 300 控制器来构建一个电站自动控制系统。



图 9-8 PPU 300 模块显示单元



图 9-9 PPU 300 模块主控单元

通过手动或 PLC 向 PPU-300 发送原动机起停指令、发电机主开关分合闸指令，改变控制模式，改变各种参数的设定值等。

通过显示单元的按钮，操作人员也可以改变控制器模式，控制断路器分合闸以及启停柴油发电机组。彩色图形化显示屏可以显示各种状态和参数信息，显示屏还支持快速访问实时数据以及报警管理。得到授权后，操作人员还可以查看或更改输入输出和参数配置。

控制器主控单元包括最新的处理器和高速通信模块，可以实现快速的保护功能。控制器采用模块化设计，硬件模块可以在现场更换或添加。

PPU-300 并联和保护装置的主要功能包括：

- 可以直接测量高达 690 伏的三相交流电
- 发动机控制、监测和保护，断路器的操作
- 负载分配
- 自动同步和解列
- 仿真和监视功能
- 灵活的模块化输入/输出设计
- 即插即用，自动配置输入/输出模块和网络
- 集成 5*RJ45 端口，具有自动检测功能
- 在一个网络端口可以访问所有连接的 PPU-300 控制器
- 带有实时时钟的事件和警报日志
- 预定义的控制设置
- 对用户友好的逻辑配置工具，配置有基于梯形逻辑和带监视操作的功能块

9.3 PPU 模块+PLC 控制的电站自动控制系统结构框图

目前在船舶中使用较多的集散型船舶电站自动控制系统是采用丹麦 DEIF 公司的 PPU-3 模块+PLC 的控制方式。集散型控制系统与现场总线控制技术、网络控制技术相结合,是船舶电站自动控制系统的发展方向,也是目前新造船舶所采用的主流控制系统。

图9-10是比较典型的PPU模块+PLC控制的电站自动控制系统结构框图。该系统分别由现场设备控制层、监控层和网络管理层组成三层网络监控系统,包含了船舶电站自动化应具备的各项功能,通过总线及工业以太网把它们有机组织在一起,各种功能相互独立又相互联系,共同完成船舶电站的自动化运行。

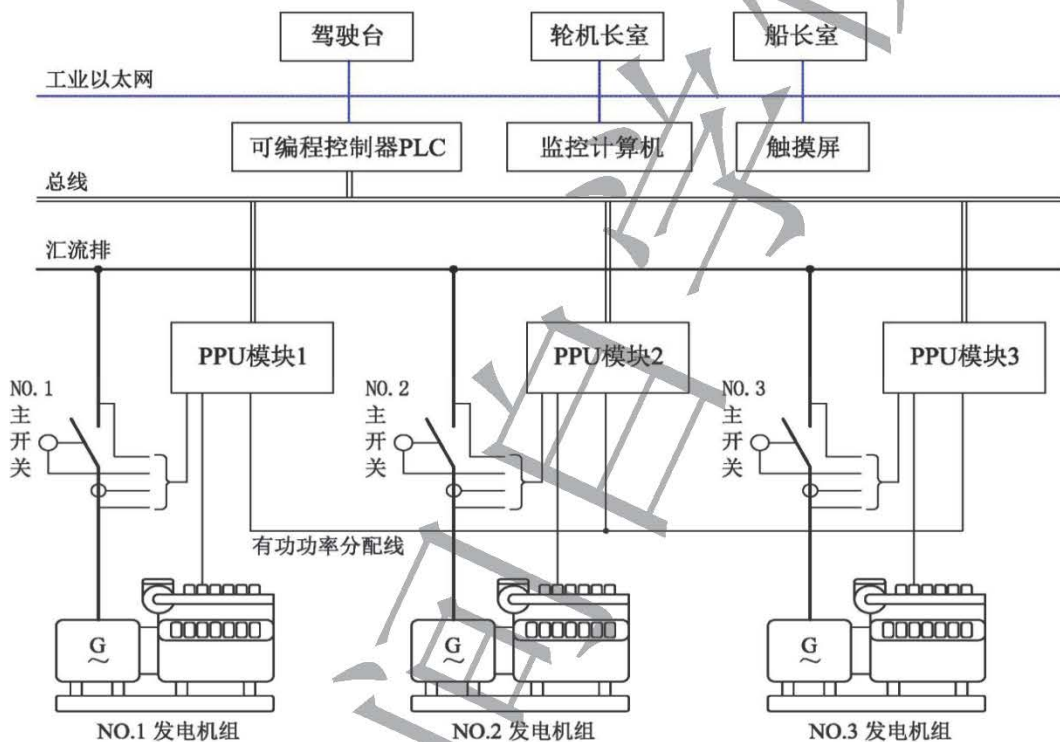


图9-10 典型的PPU模块+PLC控制的电站自动控制系统结构框图

整个控制系统主要由主配电板及仪表单元、PLC控制单元和PPU控制单元组成,通过硬件接线和通讯线路将三者有机结合在一起,实现船舶电站的数据采集、状态判断、功能控制等功能,实现手动、自动与半自动的控制模式。触摸屏做为具有监控功能的人机交互设备,实时显示系统各设备的状态及数据信息。监控计算机的监控界面可以实现远程监视与遥控功能。各设备的状态及数据信息通过网络,发布至网络内计算机。

自动控制模式下,PLC通过接收各个设备的数据及状态信息,判断电站及设备运行状态,并下达相应的控制指令给PPU控制单元、执行及检测单元等。PPU既做为发电机并车保护和控制单元,处理部分模拟量,弥补了PLC模拟量处理的不足,同时又接受和下达部分离散控

制信息。PLC主要处理开关量，PLC与PPU通过电气接线和RS485通讯相结合，互相交换数据及状态信息，实现对船舶电站的自动化管理。触摸屏通过工业以太网接入系统，实时监控电站运行状态。主配电板做为人工手动及半自动操作电站的主要介质，部分关键数据由PLC采集并传输给监控计算机的监控界面。

1. 监控计算机、触摸屏与PLC的通讯设置

监控计算机、触摸屏与PLC的通讯方式采用工业以太网Modbus TCP/IP方式，其具有协议开放，与不同厂商设备兼容，能实现远程访问、远程诊断、网络速度快、实时性强、系统安全性高、成本低等特点。

监控计算机、触摸屏与PLC之间通过以太网Modbus TCP/IP连接时，需要配置其网络地址（IP地址）。在触摸屏编程软件中添加驱动程序并进行配置，使通信设置与设备相匹配，并将编制好的用户应用程序下载到触摸屏，即可实现触摸屏与PLC和PC上位机之间的以太网通讯，无需编写复杂的通信程序。

PLC、触摸屏和计算机的IP地址的网络ID必须相同。例如，如果PLC的IP地址为192.168.1.1，则触摸屏和计算机的有效地址可为192.168.1.x（x=2~255）。

2. PLC与PPU通讯设置

PLC和PPU主要是以硬件接线方式实现控制功能，部分电站参数通过485串口通讯完成。通讯接线如图9-11所示。

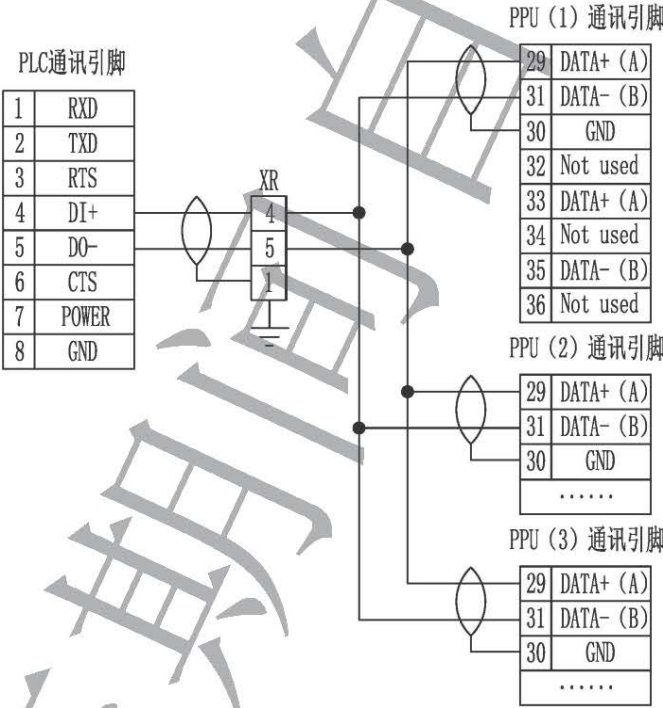


图 9-11 PLC 与 PPU 串口通讯接线图

采用编程软件对 PLC 和 PPU 进行通讯设置。设置为 RS485 通讯，传输速率为 9600 位/

秒, 数据长度为 8 位, 停止位 1 位, 偶校验, 1~3 号发电机组所对应的 PPU 的地址分别设为 1、2、3, PPU 将常用数据存放在其内部指定寄存器中, 建立通讯后 PLC 执行 READ_VAR 和 WRITE_VAR 通讯指令实现与 PPU 的数据交换。

9.4 PPU-3 模块主要功能介绍

PPU-3 控制器主要用于多台发电机组的自动同步并车及负载分配和转移控制, 并对船舶电站运行过程进行实时检测和保护, 下面对其控制功能分别加以说明。

1. 自动同步并车功能

自动同步并车功能是 PPU-3 控制器的主要功能之一。PPU-3 控制器可以自动进行频率、电压调节, 并可通过软件程序进行编程, 设定主开关固有动作的时间, 使得待并发电机与电网同步时刻准确合闸, 实现自动控制船舶发电机准同步并车操作。

2. 功率和频率控制功能

PPU-3 控制器可以按照四种模式控制发电机的功率和频率, 模式的选择可通过二进制数字输入, 也可通过串行通信选择, 从而实现在各种不同的应用环境下对发电机进行适当的控制。具体可分为:

模式一: 恒频率模式, 即控制发电机的频率保持恒定 (适用于单机运行)。

模式二: 恒功率模式, 即控制发电机的负载保持恒定 (适用于发电机与无穷大电网并联运行)。

模式三: 频率下倾模式, 即控制发电机负载变化时频率的变化值, 以保证负载变化时频率的基本恒定。

模式四: 负载分配模式 (适用于发电机之间并联或解列运行时进行负载分配和转移), 这也是一般船舶电站的控制模式。



图9-12 基于 XBTGT5330 触摸屏的 PPU 控制面板

3. 保护及显示功能

PPU-3 控制器具有标准的发电机保护功能,如过流保护、逆功率保护等,这些标准保护功能均可设置成反时限特性,并可通过对相应的继电器输出进行配置,实现报警或断开主开关等功能。

PPU-3 控制器可以通过串行通信将检测到的系统运行参数送至 LCD 液晶显示单元,使得在操作的过程中可实时获取和监测系统运行参数。

PPU-3 控制器除了配置自身的显示单元外,还可以配置施耐德 XBTGT5330 触摸屏(船舶中的主流配置)。图 9-12 是基于 XBTGT5330 触摸屏的 PPU 控制面板,通过触摸屏可以设置系统发电机保护启动的电流、电压、频率,以及相应的启动时间等。

9.5 PPU-3 硬件电路模块及外部接线端子

1. 硬件电路模块

PPU-3 控制器采用模块化的设计思想,其内部硬件电路包括 10 块印刷电路板(S1~S10)和 1 块底部连接电路板。

其中标准配置电路板为:

S1--电源及继电器配置板

S2--负载分配、工作点设定及继电器控制板

S3--发电机电流检测及串口通讯板

S4--电压检测及核心控制板

S6--通讯模块板

S7--发电机电压、转速控制输出板

此外,PPU-3 控制器还具有许多扩展功能,如输出 PWM 信号至转速控制器、扩展 I/O 端口等。若需要实现这些扩展功能,则需在内部配置相应的印刷电路板(即 S5、S8、S9、S10 板)。每块印刷电路板均完成各自不同的功能,彼此又可通过底部印刷电路板相连,进行内部信号的传输。选择不同的印刷电路板进行组合,PPU-3 控制器能够实现各种所需完成的功能。

PPU-3 控制器的核心控制单元是瑞萨(RENESAS)公司生产的 16 位单片机 HBS/2655 系列,该系列单片机具有 16 个 16 位的内部寄存器,最大时钟可达 20MHz,可以很好地实现实时控制。

2. PPU-3 外部接线端子分布

PPU-3 外部接线端子主要由 8 个插槽组成,如图 9-13 所示,各插槽的具体连接分布为:

插槽 1(包括接线端子 1~28):与电源及继电器配置板 S1 相连。

插槽 2(包括接线端子 29~36):与通讯模块板 S6 相连。

插槽 3(包括接线端子 37~64):与负载分配、工作点设定及继电器控制板 S2 相连。

插槽 4(包括接线端子 65~72):与发电机电压、转速控制输出板 S7 相连。

插槽 5(包括接线端子 73~89):与电压检测及核心控制板 S4 相连。

插槽 6(包括接线端子 90~97):模拟量输出端子。

插槽 7(包括接线端子 98~124):用于检测柴油机运行参数的端子。

插槽 8(包括接线端子 126~133):输出增加、减小电压的控制信号端子。

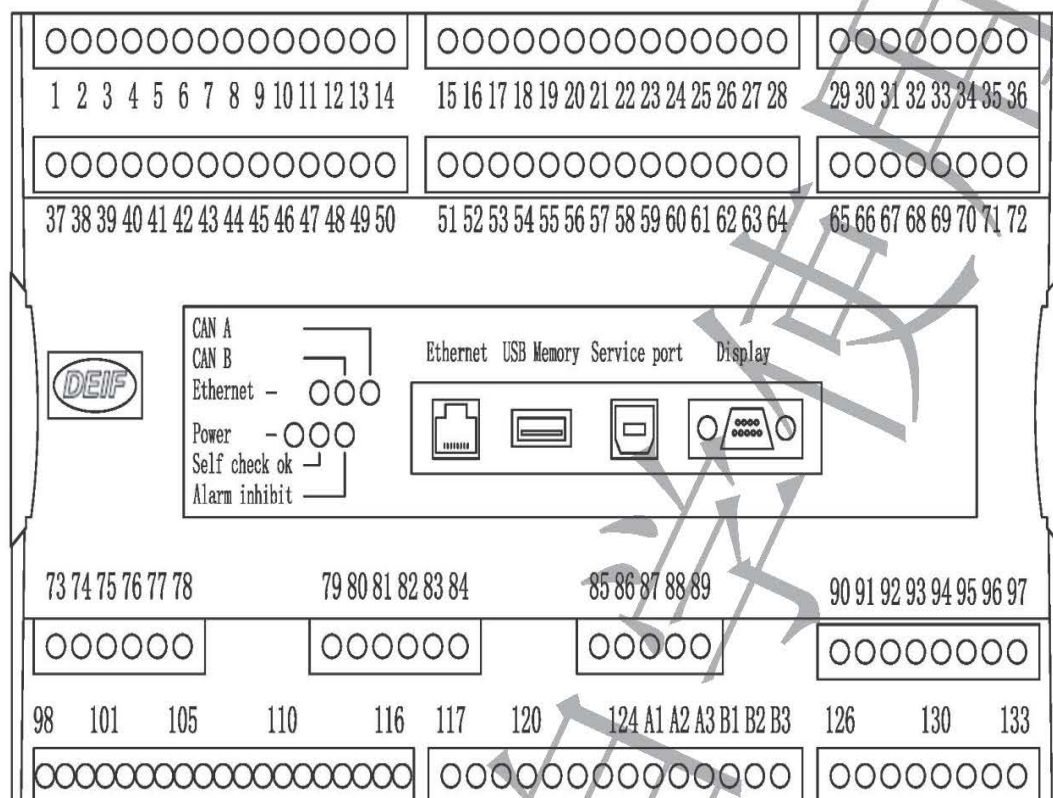


图 9-13 PPU-3 主控单元顶视图

3. PPU-3 三相交流流量测量端子

PPU-3 具有检测发电机及电网的电压、电流信号的功能,检测到的电压、电流信号用于控制、显示、保护等功能。

图 9-13 中,接线端子 73~78 的输入信号分别是发电机三相电流经过三个电流互感器转换的电流信号;接线端子 79~84 的输入信号是发电机三相电压信号,其电压可以在 100~690V 范围内变化;接线端子 85~89 的输入信号是电网三相电压信号,电压范围同样为 100~690V。

9.6 PPU-3 控制器的外部接线及工作原理分析

下面以某轮船电站为例,分析常见 PPU-3 控制器的外部接线,并分析 PPU-3 控制器的工作原理。该轮船电站由三台柴油发电机和一台轴带发电机组成,在每台发电机的控制屏上均安装有 PPU-3 控制器做为船舶电站核心控制器,相应地实现每台发电机的检测、控制和保护功能,并可通过串行通讯接口与其他控制器进行通信,从而实现船舶电站的自动化管理。

PPU-3 控制器在船舶电站中与 PLC 配合进行自动控制。PPU-3 控制器利用微处理器将检测到的电参数进行运算,获得控制信号后,通过数字和模拟 I/O 端口输出至 PLC 和继电器等,用于进一步控制船舶电站。

1. 两台柴油发电机并联运行及功率分配

图 9-14 为该轮船舶电站中任意两台并联运行的柴油发电机的 PPU-3 控制器外部连线示意图。图中, 三相电网电压、三相发电机电压、三相发电机电流分别接入 PPU-3 控制器, PPU-3 控制器对两台柴油发电机进行并车及功率分配的自动控制。PPU-3 模块各端子说明如下:

端子 14、15: 常开触点, 通过 PPU 的解列程序输出主开关分闸信号。

端子 17、18: 常开触点, 通过 PPU 的并车程序输出主开关合闸信号。

端子 25: 自动并车起动信号, KA1 (或 KA3) 触点闭合时, 端子 25 高电平, 开始自动并车程序。

端子 28、56: 直流电源“DC-”端。

端子 37、38、39: 端子 37 是有功功率分配线, 端子 39 是无功功率分配线, 端子 38 是端子 37 和 39 的公共端。

端子 43: 自动解列起动信号, KA2 (或 KA4) 触点闭合时, 端子 43 高电平, 开始自动解列程序。

端子 48-53: PPU 模式选择端子。

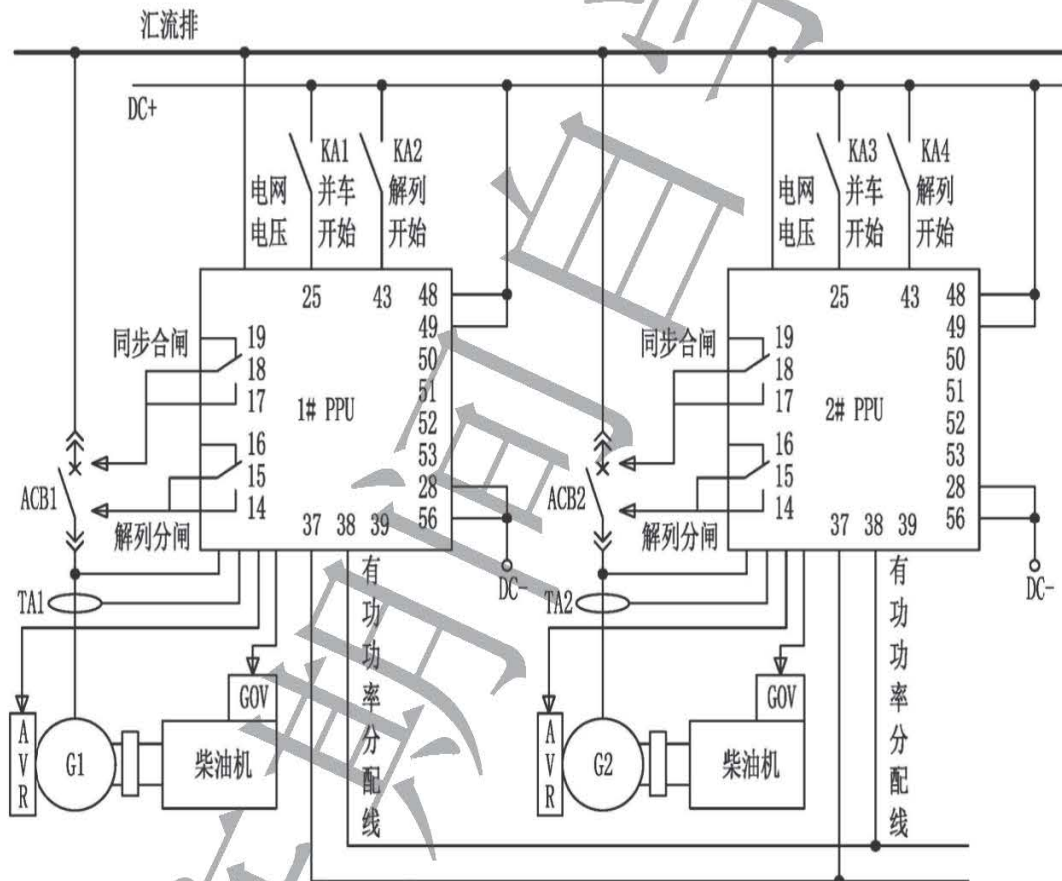


图 9-14 两台柴油发电机的 PPU-3 控制器外部连线示意图

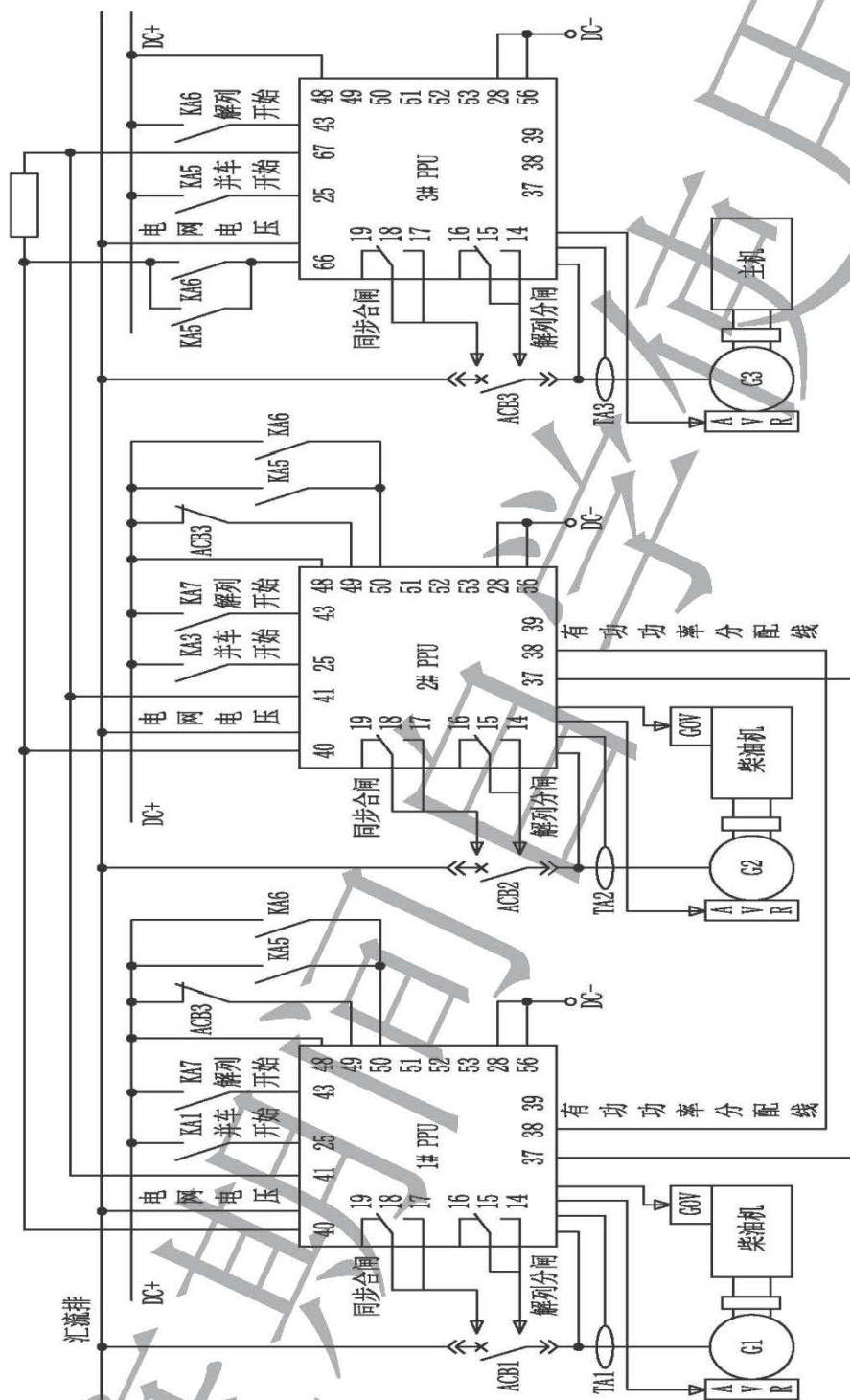


图 9-15 两台柴油发电机、一台轴带发电机及其各自的 PPU-3 控制器的连线示意图 (续)

假设此时 1#柴油发电机和 2#柴油发电机已经工作在电网上, 轴带发电机处于待并状态。此时要求 PLC 程序控制开始轴带发电机并车 (SYNC SG) 动作, 使触点 KA8 闭合, 使继电器 KA5 得电, 辅助常开触点闭合自锁, 继电器 KA5 线圈在轴带发电机主开关 ACB3 闭合之前一直处于得电状态。

当继电器 KA5 动作时, 3#PPU 控制器的端子 25 为高电平, 此时 1#和 2# PPU 控制器的端子 50 接至“DC+”, 使其工作在外设定工作点状态。同时, 轴带发电机的频率受主机转速控制, 3#PPU 控制器端子 66、67 对 1#和 2#PPU 控制器的端子 40、41 输出转速调节模拟量信号, 改变 1#发电机和 2#发电机的频率设定值, 由 1#和 2#PPU 控制 1#发电机和 2#发电机的频率, 使之满足并车条件, 实现轴带发电机的并车操作。

(2) 柴油发电机向轴带发电机转移负载 (柴发解列)

当轴带发电机并网运行后, 柴油发电机需要向轴带发电机转移负载。

此时要求 PLC 程序控制柴油发电机解列 (DE-LOAD DGS) 动作, 使触点 KA10 闭合, 使继电器 KA7 得电, 1#和 2#PPU 的端子 43 有高电平输入信号, 控制 1#和 2#发电机转速下降, 它们各自承担的负载减少, 使得轴带发电机承担负载增大。直至 1#发电机和 2#发电机的主开关均断开, 继电器 KA7 失电, 负载转移结束。

(3) 轴带发电机向柴油发电机转移负载 (轴发解列)

当轴带发电机准备解列时, 轴带发电机需将负载转移至柴油发电机。

此时要求 PLC 程序控制轴带发电机解列 (DE-LOAD SG) 动作, 使触点 KA9 闭合, 使继电器 KA6 得电, 1#和 2#PPU 的端子 50 为高电平, PPU 控制器工作在外设定工作点状态。同时 3#PPU 控制器的端子 43 有高电平输入信号, 端子 66、67 输出转速调节模拟量信号至 1#和 2#PPU 的端子 40、41, 控制 1#和 2#发电机频率设定值增大, 使得 1#和 2#发电机转速上升, 各自承担的负载增大, 相应的轴带发电机承担负载减少。直至轴带发电机的主开关 ACB3 断开, 继电器 KA6 失电, 负载全部转移至柴油发电机。

本章小结

本章讲述的主要内容有: PPU 模块+PLC 控制的主要功能; PPU 模块介绍; PPU 模块+PLC 控制的电站整体构架; PPU-3 模块主要功能介绍; PPU-3 硬件电路模块及外部接线端子; PPU-3 外部接线及工作原理分析。

本章的重点内容如下:

1. PPU 模块+PLC 控制的主要功能。
2. 典型电站自动控制系统结构框图。
3. PPU-3 控制器的主要功能。
4. PPU-3 控制器的外部接线及工作原理分析。

复习思考题

- 9-1 叙述 PPU 模块+PLC 控制的主要功能。
- 9-2 船舶电站的控制模式一般有哪几种? 采用 PPU 模块+PLC 控制的电站中, 是如何实现的?
- 9-3 如图 9-10 所示是典型的 PPU 模块+PLC 控制的电站自动控制系统结构框图, 叙述其主要功能。
- 9-4 叙述 PPU-3 控制器的主要功能。
- 9-5 如图 9-14 所示是两台并联运行的柴油发电机的 PPU-3 控制器外部连线示意图, 假设 2# 发电机为运行发电机, 1# 发电机为待并发电机, 试分析其自动并车过程; 功率的自动分配是如何实现的?

参考文献

- [1] 海船船员培训大纲（2016 版），北京：交通运输部，2017.
- [2] 钢制海船入级规范（2018 版），北京：中国船级社，2018.
- [3] 电气制图及图形符号国家标准汇编，北京：国家标准局，1989.
- [4] 张存有. 育鹏轮动力装置与管理[M]. 大连：大连海事大学出版社，2017.
- [5] 张春来，吴浩峻. 船舶电气设备管理与工艺[M]. 大连：大连海事大学出版社，2016.
- [6] 林洪贵. 船舶电站[M]. 西安：西安交通大学出版社，2015.
- [7] 林叶春. 船舶电气及控制系统[M]. 上海：上海交通大学出版社，2015.
- [8] 张春来. 船舶电气与自动化（船舶电气）[M]. 大连：大连海事大学出版社，2012.
- [9] 吴志良. 船舶电站[M]. 大连：大连海事大学出版社，2012.
- [10] 张春来，吴浩峻. 船舶电气设备维修技术[M]. 大连：大连海事大学出版社，2011.
- [11] 赵殿礼，张春来. 船舶电气设备及系统[M]. 大连：大连海事大学出版社，2009.
- [12] 赵殿礼，张春来. 船舶电站控制与管理技术[M]. 大连：大连海事大学出版社，2009.
- [13] 林华峰. 船舶电站及电力拖动[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2006.
- [14] 姜锦范. 船舶电站及自动化[M]. 大连：大连海事大学出版社，2005.
- [15] 孟宪尧，吴浩峻等. 海上作业多用途工作船自动控制系统[M]. 大连：大连海事大学出版社，2004.
- [16] <https://www.industry.siemens.com.cn/>[OL].
- [17] <http://www.deif.cn/>[OL].
- [18] PPU 操作使用说明书[G]. DEIF. 2010.