

“十二五”国家重点出版规划项目



现代舰船导航、控制及电气技术丛书

赵琳 主编

舰船电力系统 (第2版)

■ 兰海 卢芳 孟杰 编著



JIANCHUAN
DIANLI XITONG
DIERBAN



国防工业出版社

National Defense Industry Press

“十二五”国家重点出版规划项目



现代舰船导航、控制及电气技术丛书

赵琳 主编

舰船电力系统 (第2版)

■ 兰海 卢芳 孟杰 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书全面介绍了舰船电力系统的各个组成部分的基本原理及设计方法,包括电站、配电装置、电网、负载等,针对有功无功运行特性进行了分析,对舰船电网的仿真计算方法,包括潮流计算、短路计算、继电保护、生命力、重构技术等进行了讨论,将最新的技术方法融入其中,并对目前船舶电站暂态稳定问题进行了分析和仿真验证,最后扼要地介绍了舰船电力系统综合仿真平台的简单实现。

本书既包含基本理论又涉及最新技术,适合舰船电力系计算和分析领域的科研人员、研究生及本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

舰船电力系统 / 兰海, 卢芳, 孟杰编著. —2 版.
—北京:国防工业出版社, 2015. 11
(现代舰船导航、控制及电气技术丛书 / 赵琳主编)
ISBN 978-7-118-10462-2

I. ①舰... II. ①兰... ②卢... ③孟... III. ①船舶—
电力系统 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 308118 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
三河市鼎鑫印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 388 千字
2015 年 11 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

丛书编委会

主 编 赵 琳

副主编 刘 胜 兰 海

编 委 (按姓氏笔画排序)

王元慧 卢 芳 付明玉 边信黔

朱晓环 严浙平 苏 丽 杨 震

杨晓东 宋吉广 金鸿章 周佳加

孟 杰 梁燕华 程建华 傅荟璇

蔡志刚 蔡成涛

随着海洋世纪的到来,海洋如今越来越成为人类新的希望,也越来越成为世界各国争夺的目标。当今世界强国,无一例外都是海洋大国,海洋战略已成为具有重要意义国家战略。现代舰船是保卫国家海上安全、领土主权,维护海洋权益,防止岛屿被侵占、海域被分割和资源遭掠夺的重要工具。伴随着我国“海洋强国”战略目标的提出,现代舰船对操纵性、安全性、可靠性及航行成本,适应现代条件下的立体化海战,及与其他军种、兵种联合作战等提出了更高的要求,必然要求在核心领域出现一大批具有自主知识产权的现代舰船装备。

要提升我国舰船行业竞争力,实现由造船大国向造船强国的转变,首先要培养一大批具有国际视野和民族精神的创新人才,突破制约舰船装备性能的瓶颈技术,进而取得具有自主知识产权的研究成果,应用于船舶工程和海军装备。而创新人才的培养,一直是科技教育工作者的历史使命。

新形势下,我国海洋安全面临着前所未有的严峻威胁和挑战。确立“海洋国土”观念,树立海洋意识,提升海军装备水平,是捍卫我国国土安全必不可少的内容。为此,我们邀请业内知名专家,联合开展“现代舰船导航、控制及电气技术丛书”编撰工作,就舰船控制、舰船导航、舰船电气以及舰船特种装备的原理、应用及关键技术展开深入探讨。

本丛书已列入“十二五”国家重点出版规划项目。它的出版不仅能够完善和充实我国海洋工程人才培养的课程体系,促进高层次人才的培养,而且能为从事舰船装备设计研制的工业部门、舰船的操纵使用人员以及相关领域的科技人员提供重要的技术参考。这对于加速舰船装备发展,提升我国海洋国防实力,确立海洋强国地位将起到重要的推动作用。



本书是在《舰船电力系统》(第1版)基础上的更新和修订,是作者近年来舰船设计研究与教学实践的总结,力求反映我国及世界舰船电力系统设计的最新技术和科研成果。本书主要面向从事舰船运行、控制和仿真的读者,使其对舰船电力系统有一个较全面的认识和理解。

舰船电力系统是舰船电站、舰船配电网和舰船用电负载的总称。本书旨在全面地介绍舰船电力系统的组成和设计技术,力求概念清楚,层次分明。特别侧重舰船这一有特殊使命的舰船电力系统运行及控制方面出现的新问题,其内容除第1版中涵盖的内容外,还新增了舰船中压系统介绍、交直流混合短路电流计算方法,以及舰船电网电压及无功功率的自动调整、频率及有功功率的自动调整,更新了故障应对及舰船电力系统生命力的计算方法。

本书内容共分为15章,第1章是对舰船电力系统的总体概述,从中可以了解舰船电力系统的组成,以及钢质海船入级规范中对舰船电力系统的参数要求;第2~5章分别对舰船电力系统各组成部分进行了介绍,主要包括发电、配电装置、负荷及容量的计算;第6章和第7章主要介绍舰船电力系统的电压与频率的波动和调整;第8~12章阐明了舰船电力系统的基本计算方法,包括潮流计算、短路计算、继电保护原则、生命力计算、重构技术;第13章主要以单机电站舰船电力系统为例,给出一种暂态稳定分析方法;第14章详细介绍了世界各主要大国舰船动力系统的主要方向——舰船综合电力推进技术,从中可以了解到将电力和推进两大系统从统筹全船能源的高度实现全面融合的新型舰船电力系统;第15章介绍了仿真平台的简单实现。从书的整体结构来看,不仅有概述性的介绍,而且对舰船电力系统的暂态与稳态分析所需的一些高级应用算法给以具体的论述与研究,又由于陆上电力系统的仿真并不适应用于舰船电力系统,所以第15章针对这一特殊性,介绍了一种仿真平台,通过该平台可以对某一类型舰船电力系统进行拓扑分析、潮流计算和短路计算,生命力计算,具有很好的适用性。

本书篇幅较大,写作分工如下:兰海负责第1~7章、第12~15章,卢芳负责第8~11章,孟杰负责第13章。

哈尔滨工程大学李殿璞教授对书稿进行了认真的审阅,给出了很有价值的改进

意见,在此深表感谢。本书在编写的过程中,参考及引用了国内外关于舰船电站方面的论文,在此一并致以诚挚谢意。

限于编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,热诚希望读者及同仁批评指正。

第1章 舰船电力系统概述

1.1 舰船电力系统的组成和类型	001
1.1.1 舰船电力系统的组成	001
1.1.2 舰船电力系统形式的发展	002
1.2 舰船电力系统的工作环境	005
1.3 舰船电力系统的主要电气参数	006
1.3.1 电流种类	006
1.3.2 额定电压	007
1.3.3 额定频率	008

第2章 舰船电源

2.1 舰船主电源	010
2.1.1 主电源发电机组的类别与选型	011
2.1.2 主发电机组的并联运行	013
2.1.3 主电源容量的估算和发电机组的选择	014
2.1.4 主发电机组的安装与试验	015
2.2 舰船应急电源	016

第3章 舰船配电装置

3.1 舰船配电装置概述	017
3.2 主配电板	018
3.2.1 主配电板功能	019
3.2.2 主配电板上配备的电器和仪表	019
3.2.3 主配电板的面板布置和安装方面的要求	021
3.3 配电装置中的开关电器	022
3.4 互感器	022
3.5 选择电器和载流导体的一般条件	024
3.6 应急配电板	026
3.7 充放电板及蓄电池	027
3.8 岸电箱及其他配电装置	027

第4章 舰船电网

4.1	舰船电网概述	033
4.2	舰船电网的结构形式	034
4.2.1	舰船电网基本类型	034
4.2.2	世界舰船电网实例分析	037
4.3	舰船电网分类及其选择	042
4.3.1	舰船供电网络的分类	042
4.3.2	电力负荷的分级	045
4.3.3	分配电箱设置原则	046
4.3.4	提高供电网络的可靠性和生命力	046
4.4	舰船中压电力系统简介	048
4.4.1	采用中压电力系统的原因	048
4.4.2	中压电力系统的优缺点	049
4.4.3	中压电力系统的选取	050
4.4.4	电力推进舰船中压系统的结构	050
4.4.5	中压电力系统的隔离开关和接地开关	051

第5章 舰船电站容量的确定

5.1	舰船电站容量概述	052
5.2	舰船电站容量的计算	053
5.2.1	舰船电站容量计算遵循原则	054
5.2.2	舰船用电设备安全准则及分类	054
5.2.3	舰船运行工况	056
5.3	负荷的计算	057
5.3.1	负荷分类	058
5.3.2	电动机负荷系数的确定	058
5.3.3	三类负荷法的计算步骤	060
5.3.4	负荷表的编制	061
5.4	需要系数法	061

第6章 舰船电网电压及无功功率调节

6.1	电压波动及调节的基本原理	065
6.1.1	同步发电机的电压波动	065
6.1.2	自励恒压装置的作用	066
6.1.3	自励恒压装置的主要技术指标	067
6.2	同步发电机的自励起压和相复励原理	068
6.2.1	同步发电机的自励起压	068
6.2.2	相复励恒压原理	070

6.3	相复励恒压装置	070
6.3.1	不可控相复励恒压装置	070
6.3.2	可控相复励恒压装置	071
6.4	无刷发电机励磁系统	073
6.5	电网无功自动补偿	074

第7章 舰船电网频率及有功功率自动调整

7.1	舰船电力系统频率波动的基本原理	076
7.2	舰船电力系统的负荷调节效应	077
7.3	调速器特性	077
7.3.1	调速器的有差调节特性	078
7.3.2	频率的调整——调速特性的平移	079
7.4	并联运行发电机组间的有功功率转移与分配	080
7.4.1	不同调速特性并联运行发电机组间有功功率的分配	080
7.4.2	有功功率的转移操作	081
7.4.3	调差系数与功率分配间的关系	081

第8章 舰船电网潮流计算方法

8.1	舰船电网潮流计算概述	083
8.2	电力网络的数学模型	083
8.2.1	节点电压方程	083
8.2.2	节点导纳矩阵的形成和修改	086
8.2.3	异步电动机的建模	087
8.3	陆上和舰船电力系统潮流计算方法的区别	088
8.4	节点电势法潮流计算	090
8.5	前推回代法潮流计算	093

第9章 舰船电网短路计算方法

9.1	短路电流概述	098
9.2	短路电流计算基础知识	100
9.3	短路点选择原则	102
9.4	舰船电力系统短路电流常用算法	103
9.4.1	各种常用方法比较	103
9.4.2	IEC 法	104
9.4.3	GJB 173 算法	106
9.5	舰船电力系统短路电流参考计算方法	109
9.5.1	临近汇流排处的短路电流计算	109
9.5.2	远离汇流排处短路电流计算	112
9.5.3	算例	114

9.6	交直流混合系统短路计算方法	115
9.6.1	发电机提供的短路电流	117
9.6.2	储能元件提供的短路电流	119
9.6.3	滤波电容器提供的短路电流	120
9.6.4	直流电机提供的短路电流	122
9.6.5	短路故障点的短路电流分析	125

第10章 舰船电力系统继电保护原则

10.1	继电保护概述	128
10.2	保护配置原则	129
10.3	舰船电力系统保护分类	130
10.3.1	发电机保护	131
10.3.2	变压器保护	133
10.3.3	电网保护	134
10.4	保护配合与协调	137
10.5	断路器选型	138

第11章 舰船电力系统生命力计算方法

11.1	舰船电力系统生命力概述	140
11.2	舰船电力系统的状态描述	141
11.3	图模型中任意故障组合的形式化描述	141
11.4	舰船电力系统故障后的应对策略	142
11.5	典型破坏环境的分析	145
11.5.1	典型破坏武器	145
11.5.2	武器击中目标舰船的爆炸点模拟	145
11.5.3	舰船易受毁伤的几种典型形式	146
11.6	破坏方式及受损情况分析	147
11.6.1	直接破坏下的舰船电力系统的受损情况分析	147
11.6.2	二次破坏下的舰船电力系统的受损情况分析	149
11.7	电力系统的生命力评估方法	150
11.7.1	舰船电力系统的生命力评估方法	150
11.7.2	电力系统生命力评估的具体步骤	152

第12章 舰船电力网络重构方法

12.1	网络重构的概述	156
12.2	舰船电力网络故障恢复系统	158
12.2.1	系统构架	158
12.2.2	故障恢复系统的典型实例	158
12.3	舰船电力网络故障恢复关键技术	161

12.3.1	最优(准最优)重构策略生成技术的概述	161
12.3.2	电力系统网络拓扑结构表达	161
12.3.3	重构优化算法	165
12.4	基于多 Agent 舰船电力系统网络重构方法	166
12.4.1	多 Agent 算法	166
12.4.2	引入负荷优先级和运行工况等影响因素	167
12.4.3	约束条件和目标函数的确定	169
12.5	与重构相关的其他研究	171

第13章 单机舰船电力系统的新型控制方法

13.1	舰船电力系统稳定性定义与分类	172
13.2	舰船电力系统稳定分析	174
13.2.1	舰船电力系统稳定分析模型	174
13.2.2	舰船电力系统的功角稳定性	175
13.2.3	舰船电力系统的电压稳定性	178
13.2.4	舰船电力系统的频率稳定性	180
13.3	柴油发电系统的数学模型	181
13.3.1	同步发电机转子运动方程	181
13.3.2	同步发电机输出功率方程	184
13.3.3	柴油机组调速系统	186
13.3.4	柴油机发电机组励磁绕组电磁方程	186
13.4	负载模型	187
13.5	舰船电力系统 L_2 干扰抑制控制方法	188
13.5.1	仿射非线性系统的 L_2 干扰抑制方法简述	188
13.5.2	舰船电力系统调速系统 L_2 干扰抑制控制策略	189
13.5.3	舰船电力系统调速、励磁系统综合控制策略	193
13.6	舰船电力系统哈密顿控制方法	197
13.6.1	基于哈密顿能量函数的非线性控制设计简述	198
13.6.2	基于哈密顿能量函数的综合控制设计	200
13.6.3	带有超导磁储能(Superconductor Magnetics Energy Storage, SMES)的 舰船电力系统哈密顿控制设计方法	204

第14章 综合全电力推进技术

14.1	综合全电力推进技术概述	208
14.1.1	电力推进装置的优点	208
14.1.2	传统电力推进装置	210
14.1.3	综合电力推进概念	211
14.2	综合电力推进技术特点与优势	212
14.2.1	主要特征	212

14.2.2	技术优势	212
14.3	舰船综合电力系统的关键技术	213
14.4	推进电机种类、特点	215
14.4.1	推进电机性能特点	215
14.4.2	推进电机结构特点	216
14.5	综合电力推进系统典型实例	219
14.5.1	美国的综合电力系统(IPS)	219
14.5.2	英国的综合全电力推进系统(IFEP)	221
14.6	综合全电力推进技术的发展前景	224
14.6.1	国外舰船综合电力推进技术应用发展状况	224
14.6.2	我国舰船综合电力推进技术发展状况	228
14.6.3	加速发展我国舰船综合电力推进技术的必要性	231
14.6.4	关于未来发展舰船综合电力推进技术的方向	233

第15章 基于模块化的舰船电力系统仿真平台设计

15.1	系统总体架构	234
15.2	功能模块及连接接口设计	235
15.2.1	功能模块的建立	235
15.2.2	模块间的接口设计	237
15.3	舰船电力系统数据库设计	238
15.3.1	数据库软件及开发技术	238
15.3.2	数据库系统的设计	239
15.3.3	数据库与仿真应用程序的接口设计	242
15.4	舰船电力系统网络拓扑分析	244
15.4.1	基于图论方法的舰船电力系统拓扑建模	244
15.4.2	拓扑分析算法模块	246
15.4.3	拓扑分析模块的输入接口数据设计	248
15.4.4	舰船电力系统网络拓扑分析	249
15.4.5	多电站舰船电力系统变工况下拓扑结构分析	253
15.5	图形化平台设计	255
15.6	软件说明及算例分析	259
15.6.1	软件主要功能界面	259
15.6.2	5节点系统仿真算例分析	260

参考文献	262
------------	-----

第 1 章

舰船电力系统概述

现代舰船上都装备有一个供给电能的独立系统,这就是舰船电力系统。随着舰船日趋大型化和自动化,舰船电力系统的容量日益增大,复杂性日益提高。本章的任务是简明扼要地介绍舰船电力系统的基本组成、特点和要求,使读者对舰船电力系统有一个概括的了解。

1.1 舰船电力系统的组成和类型

1.1.1 舰船电力系统的组成

舰船电力系统包括以下 4 个组成部分。

(1) 发电部分,又称为电源装置。舰船上常用的电源装置是发电机组和蓄电池。发电机是由原动机拖动的,原动机的类型可分为蒸汽机、汽轮机和燃气轮机等。

(2) 配电部分,又称为配电装置。它的作用是对电源进行分配、切换、保护、监视、控制。舰船配电装置可以分为总配电板、应急配电板、动力分配电板、照明分配电板和蓄电池充放电配电板等。

(3) 输电部分,又称为电网。它是全船输电电缆和电线的总称。其作用是将电能传送给全船所有用电设备(负载)。舰船电网通常由动力电网、照明电网、应急电网、低压电网、弱电电网等部分构成。

(4) 用电部分,又称为负载。舰船负载可分成下面几类。

① 各种舰船机械的电力拖动设备

甲板机械——舵机、锚机、绞缆机、起货机等;

舱室机械——各类油泵、水泵、空压机、冷冻机、通风机、空调设备等;

电力推进——推进电机、螺旋桨等。

② 舰船电气照明:工作场所和生活舱室的各种照明灯具和航行信号灯具等。

③ 舰船通信和电航设备:

舰船通信设备——无线电收发报机、电话、广播、声光警报器、电车钟、舵角指示器等；
电航设备——电罗经、雷达、无线电测向仪、电测深仪、电计程仪等。

④ 其他用电设备：电热器、电风扇、电视机等。

舰船电力系统各组成部分相互间的关系可用图 1-1 表示。

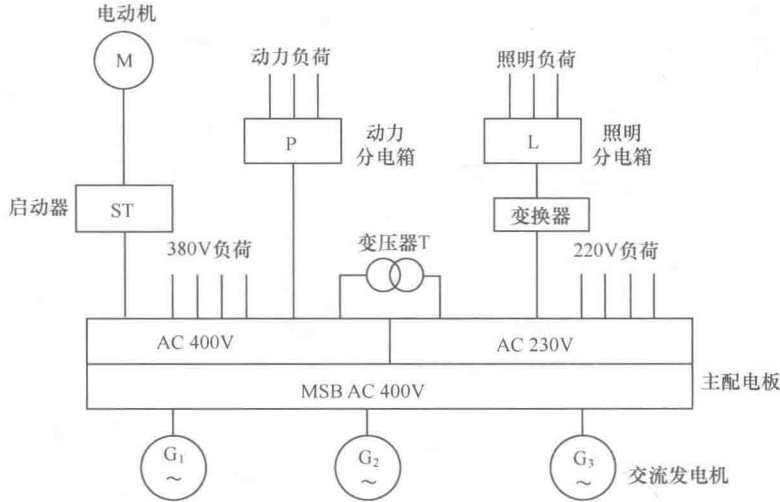


图 1-1 舰船电力系统各组成部分相互间的关系

1.1.2 舰船电力系统形式的发展

对于不同用途、不同吨位的舰船，其电力系统有很大的差异。通常将舰船电力系统的发电机组和主配电板称为电站。按舰船包含电站的数量、电源种类和它与舰船能源系统的连接形式可以分为以下几个发展过程。

1. 单电站电力系统

单电站电力系统除了配备主电站、保证舰船正常运行工况下各种用电设备的供电外，还设置停泊电站或应急电站，用以保证舰船处于低负荷、应急或其他特殊工况下部分电气设备的供电。单电站电力系统中常设置两台以上的发电机组，以便在检修或一台发电机组发生故障时替换使用。单电站电力系统常用于各种民用船舶和军用辅助舰船。

图 1-2 所示为万吨级货轮单电站电力系统实例。电站的容量为 1000 ~ 1200kW，发电机的台数为 3 ~ 4 台。每台机组通过电缆、自动空气开关和主配电板汇流排（母线）相连接。当两台机组同时供电时，发电机并联运行在共同的汇流排上。这种运行方式不但简化了供电网络，提高了电站备用容量的备用程度，还可以减小由于用电负荷的急剧变化（例如启动大电动机时）所引起的电网电压波动。图 1-2 中主配电板汇流排是采用分段汇流形式的连接方式，即通过隔离开关把汇流排分为两段或几段。它比单汇流排式的连接方式仅多了一只或几只自动开关，但具有一系列的优点。例如，同时工作的发电机可以单独运行，也可以并联运行；当汇流排的一段发生故障时，断开汇流排的分段开关，就可以通过另一台机组使未发生故障的一段汇流排仍保持正常供电；当某段馈线发生短路故障时，由于分段隔离开关的迅速跳开，切断了另一段汇流排上供给的短路电流，因而馈线上的短路电流就相应减小。

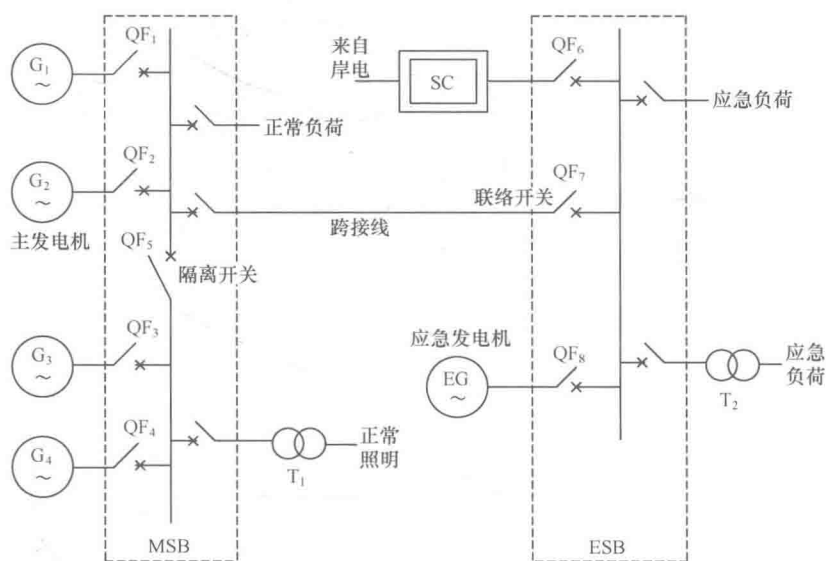


图 1-2 万吨级货轮单电站电力系统

MSB—主配电板； $G_1 \sim G_4$ —主发电机； T_1 —照明变压器；SC—岸电箱；

ESB—应急配电板；EG—应急发电机； T_2 —应急照明变压器； $QF_1 \sim QF_8$ —自动空气开关。

在单主电站电力系统中,正常情况下是由主发电机供电给主配电板汇流排和应急配电板汇流排。在主发电机发生故障停止供电时,应急发电机可手动或自动启动投入工作,并通过联锁装置将连接主配电板和应急配电板的联络开关断开,既可防止应急发电机向主配电板供电而造成过载,也可避免当主发电机组恢复供电时出现两者同时向应急配电板供电的现象而发生事故。当舰船停靠码头时,还可以利用陆上的电网供电。岸电一般均接到应急配电板上,然后通过联络开关再送至主配电板。

2. 多主电站电力系统

多主电站电力系统系指舰船上设有两个以上主电站的电力系统,大型的航空母舰上有时甚至设置8个电站。这些电站分散布置在舰船比较安全的部位,保证电力系统具有较高的供电可靠性和较强的生命力。这种电力系统通常用于战斗舰艇、核动力船或其他对供电可靠性有较高要求的舰船上。

图 1-3 所示为某型舰艇的多主电站电力系统。舰上有两个发电站:一组为汽轮机电站(艏电站);另一组为柴油机电站(艉电站)。每个电站各装有两组发电机组,同一电站发电机可长期并联运行。为了提高供电的可靠性,系统采用跨接线将艏艉两电站的主配电板连接起来。在非战斗时,全舰负载较轻,跨接线的自动开关(联络开关)接通,这时可只由一个电站向全舰供电。在战斗时,跨接线上的开关断开,两电站独立工作,分区供电。对重要的负载,可以由两个电站供电。当一条供电线路断电时,可以在负载处将转换开关接到另一电站的供电线路上,以提高供电可靠性。

3. 交流电力推进系统

随着计算机技术、电力电子技术,先进制造和新材料技术的跨越发展,使新型舰船采用电力推进技术具备了发展前提。交流电力推进系统采用电力推进代替原来的动力推进系统,是一种全新的系统,它包含了大量的高新技术,并不是供电和电力推进两个系统简

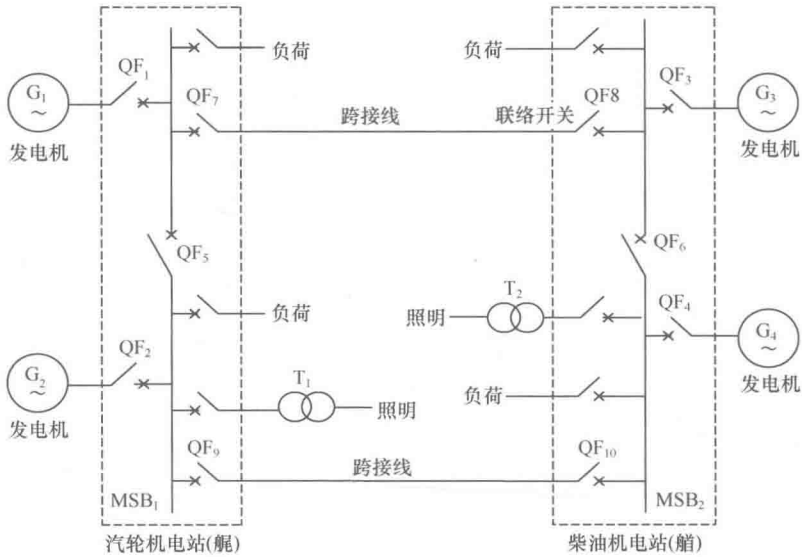


图 1-3 某型舰艇的多主电站电力系统

G_1, G_2 —汽轮发电机; $QF_1 \sim QF_4$ —发电机主开关; QF_5, QF_6 —隔离开关;
 G_3, G_4 —柴油发电机; T_1, T_2 —照明变压器; $QF_7 \sim QF_{10}$ —联络开关。

单地相加,而是从全舰船能源高度通盘考虑,真正地使电力和动力两大系统全面融合。该系统可以实施高度的模块化和通用化。因而,既能发扬电力推进的长处,又能提高电网供电的可靠性,为舰船作战使用带来很大的灵活性,使总体设计更能够满足未来舰船的各种需求。交流电力推进系统如图 1-4 所示。

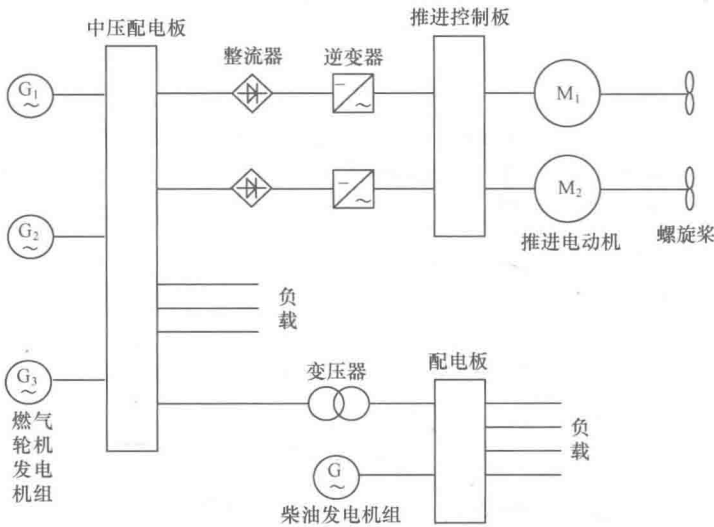


图 1-4 交流电力推进系统

4. 交直流混合电力系统

直至目前,世界各国舰船电力系统多数都还是交流系统。在综合电力系统这一概念提出之初,舰船交流电力系统似乎是唯一的方案,然而随着交流电网技术的应用和