

2.4.2.5 一次系统的设计

一次电力系统的设计,应注意以下几点:

1. 应与主配电板、应急配电板、蓄电池充放电板等配电装置以及照明、内部通信、通信、导航、无线电设备等有关系统设计很好协调,确保应由主配电板直接供电的设备或电源得到合理的配电,路数和容量应满足要求,并留有适当的余度。

2. 通常,主配电板和应急配电板是相互连接的,在正常情况下,应急配电板应通过相互连接的馈电线由主配电板供电。

3. 由一台或几台动力设备组成的每一电动机或电动液压操舵装置,至少应由主配电板设两路独立馈电线直接供电。但是,其中一路可以由应急配电板供电。该两路供电电缆必须在全长距离尽量远离敷设,例如采用左右两舷敷设。对于小于 500 总吨的内河船舶可不考虑此款要求。

4. 对于重要辅机,例如主机滑油泵,有时设置两套,互为备用,并具有自动转换功能。此时,这类设备的供电开关,应由主配电板左右配电屏供电。

5. 航行灯控制箱应由两路供电。其中一路由主配电板直接供电,另一路由应急电源供电。

6. 无线电台和航行设备电源分配板,应由主配电板或应急配电板设独立馈电线供电,通常由应急配电板供电。

7. 除由主配电板直接供电的设备外,其他用电设备一般都经由区配电板或分配板供电。区配电板和分配板的设置应根据用电设备的位置和用途、电压等级及系统等因素综合

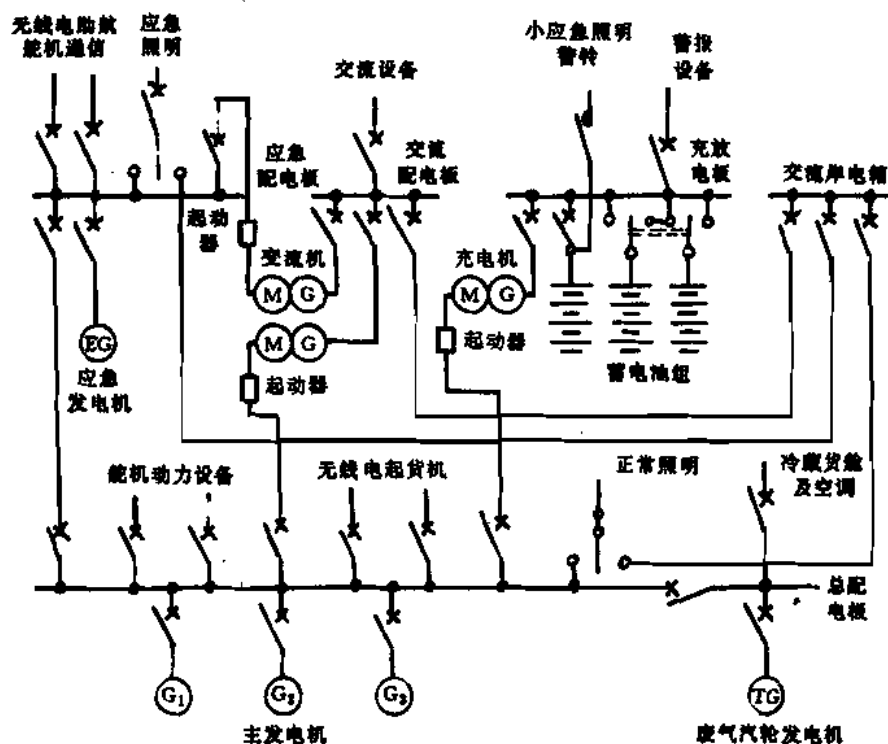


图 2.4.2.1 万吨级远洋货船一次配电系统(直流)

考虑确定。

8. 当主电源为船舶推进所必需时,主汇流排应用断路器或其他认可的设施至少分为两段,并尽可能将发电机、双套设备平均分配连接至各分段。

作为一次电力系统的设计实例,见图 2.4.2.1 和图 2.4.2.2。

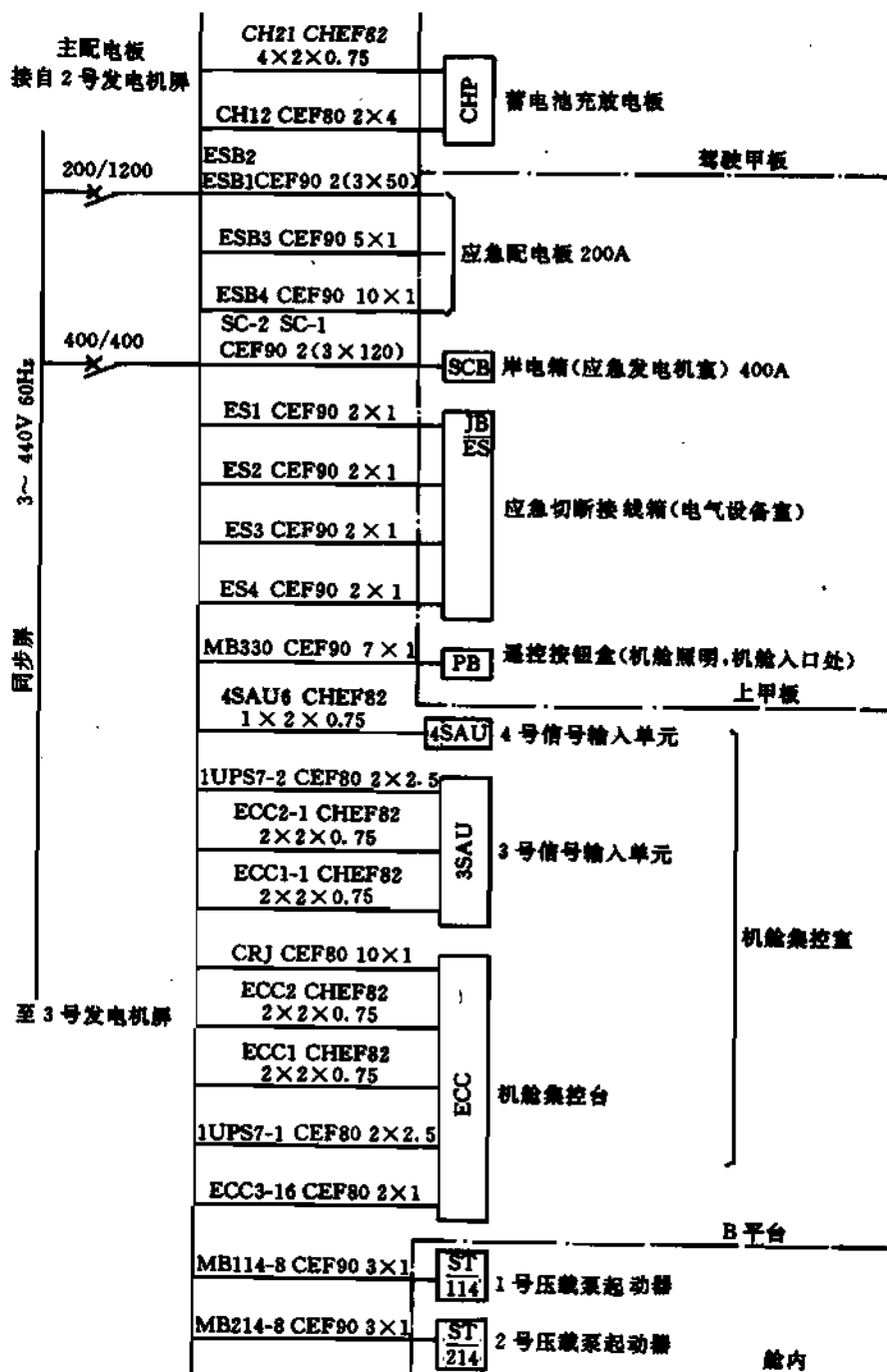


图 2.4.2.2 50000t 大开口散货船一次电力系统图一例

2.4.2.6 二次系统设计

二次电力系统是指由区分配板或分配电板向负载供电的网络,所以必须将这类用电设备(负载)进行分组,划分为不同的二次系统,以满足操作管理方便、维持简单和经济可靠的要求。

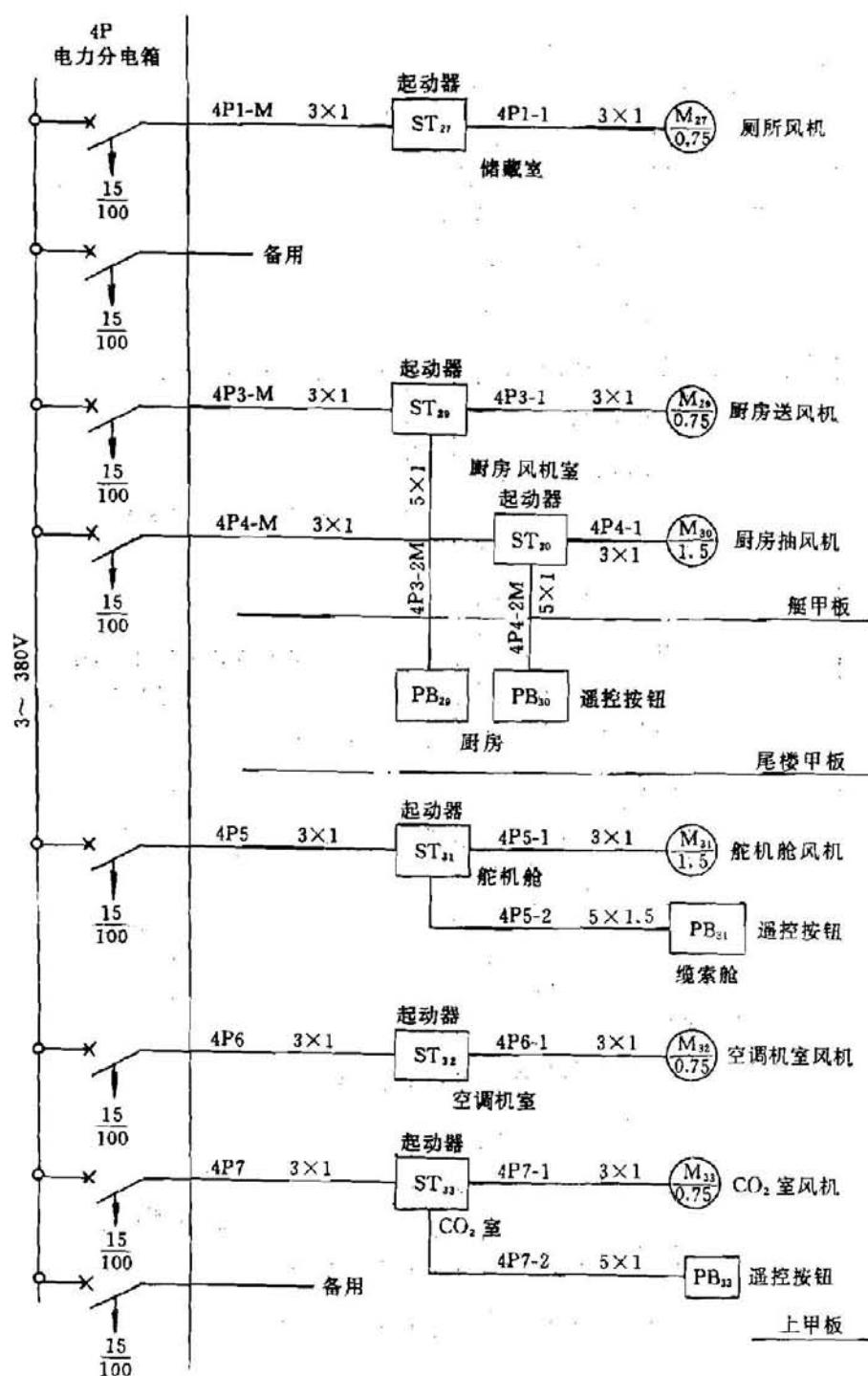


图 2.4.2.3 220 箱多用途集装箱船室内通风二次系统图

分组原则为:

1. 按系统分——如信号灯、航行灯、助航、动力和照明等。
2. 按电压等级分——如 380V 和 220V 等。
3. 按设备用途分——如通风、锅炉、冷藏集装箱、起艇机和厨房设备等。
4. 按位置分——如左舷、右舷、首部和尾部以及甲板等。
5. 按控制要求分——如集中遥控的燃油系统、分油机系统等。

以 4000t 海洋调查船的电力二次网络为例可了解其分组的概貌,该船二次网络图包括:主机滑油泵、应急鼓风机等;主机海水泵、淡水泵;主空压机、副海水泵;轻柴油泵、轻柴油分油机等;低压燃油泵、滑油分离器等;副空压机;喷油嘴冷却器;辅机海水泵、淡水泵;日用海水泵、淡水泵;主机盘车机;修理工具机;轴隧消防泵、舱底泵;副锅炉;厨房用电设备;绞盘、锚机;起艇机;舵机;尾部中型绞车;尾部电缆绞车;13700m 底栖绞车;应急发电机自动启动;首部 25t 起重機;尾部 25t 起重機;首部绞车;11000m 水文绞车;中间甲板尾部风机;主机舱风机;辅机舱风机;中间甲板首部风机;测深仪舱等风机;中间甲板空调风机等;上甲板风机;起居甲板空调风机等;尾部房舱风机;空调;冷藏;1 号蓄电池充放电系统;2 号蓄电池充放电系统;150kg 副锅炉。

作为电力二次网络图的绘制实例,见图 2.4.2.3。

2.4.3 船舶电力网设计的整体要求

进行船舶电力网设计时,还必须注意下述整体要求:

1. 应根据安装位置的环境条件,选择合适的区配电板和配电板、磁力起动器和控制箱结构型式和外壳防护等级。
2. 区配电板和分配电板应有一定数量的备用路数,备用开关的电流定额应兼顾预期使用的开关电流整定值。
3. 开关的整定值大小,应根据负载保护要求和系统保护的要求选定,例如容量大于 0.5kW 和所有重要设备电动机,均要求设立独立的过载、短路保护等。
4. 对于交流三线或四线系统,应在最后分路上将用电设备合理组合,以便在正常情况下,使各相负载在区配电板、分配电板以及主配电板处尽可能平衡在其各自额定负载的 15% 以内。
5. 只有导线截面等于或大于 10mm^2 时,才允许作并联使用。进行并联使用的所有电缆应为相同阻抗、截面和导体最高工作温度,其电流定额应为所有并联导体的电流定额之和。
6. 额定功率等于或大于 1kW 的电动机及所有重要用途的电动机,均应由配电板设独立的最后分路供电。
7. 风机和油泵均要求有应急切断。设计时,通常将这些设备集中在一个或几个分配电板,以便集中控制;并应注意不同船舶(如客船和货船)的不同要求。
8. 应注意有关规范和规则对某些设备的特殊要求,如固定式潜水舱底泵、消防泵等。

2.4.4 船舶电力网绘制应遵守的原则

进行船舶电力网绘制时,应遵守下述原则:

1. 采用标准规定的图面尺寸。
2. 使用国家标准规定的电气图形符号、文字代号和电缆编号。
3. 标明设备大致位置,如注明甲板、舱室或左右舷肋骨号。
4. 注明设备的型号、规格和数量。
5. 注明电缆型号、规格、线芯和截面。
6. 在二次网络中,应注意标明一次网络的供电电源电缆的型号、规格、线芯和截面以及与其他网络的联系电缆,诸如遥控、集中指示等导线。

2.4.5 电力布置图的绘制原则

当决定了全船配电系统、并已完成电力一次网络和二次网络图设计后,便可结合总体布置图、机舱布置图以及有关专用舱室布置图(如冷藏机室、厨房等)等,进行电力布置图的绘制。绘制电力布置图时,应注意下述各点:

1. 电力布置图通常是以图形符号或代号标明其设备的相对位置,该图形符号和代号应与系统图一致。
2. 各种辅机用电气设备布置位置,应与辅机布置位置一致,并以辅机布置位置为基准。所以,应与有关专业密切配合。
3. 供电电源区配电板或分配电板,应布置在便于管理和维护的处所,并确保选定位置可以缩短各用电设备间连接电缆。所以,通常设置在各用电设备较集中的处所。
4. 起动器或用于切断电动机的任何其他电器装置,应布置在靠近电动机处所。否则,为了确保维修安全,还必须采取下述任一种措施:
 - 能够在“分断”位置上把电路锁定在断开状态;或
 - 在靠近电动机处再装设一个附加的切断开关;或
 - 使安装在每一个带电极或相上的熔断器可以方便地由专职人员卸除和保管。
5. 除了极其特殊情况下,非机舱辅机用电设备、控制装置、分配电板及其电缆,不应布置在机舱内。
6. 通常用电设备及其控制装置的布置位置应尽可能保证正常供电的完整性。例如,一般应将控制装置与受控的电气设备布置在同一防火区内,以免一个防火区内的火灾故障影响到另外区域电气设备的工作。
7. 应特别注意有关规范、规则对某些设备控制和布置方面的特殊要求,诸如:
 - 舵机两路供电电源馈电线,应在整个长度范围内尽可能地远离;
 - 固定式潜水舱底泵应在任何情况下,能自舱壁甲板以上进行起动。若固定式潜水舱底泵的电动机附近另有“起动”、“停止”按钮时,应保证在舱壁甲板以上还能将该“起动”、“停止”按钮的所有控制线路切断;
 - 关于载客超过 36 人的客船内动力通风控制装置和切断的附加要求;
 - 关于载客不超过 36 人的客船内动力通风切断的要求;
 - 关于强力送风和抽风机、燃油驳运泵、锅炉燃油泵以及类似的燃油泵等应急切断装置的要求;
 - 油船上,电动货油泵的应急切断装置的要求;等等。
8. 分配电板、起动器等具有控制操作和指示仪表的电气设备,其安装高度应布置成易于

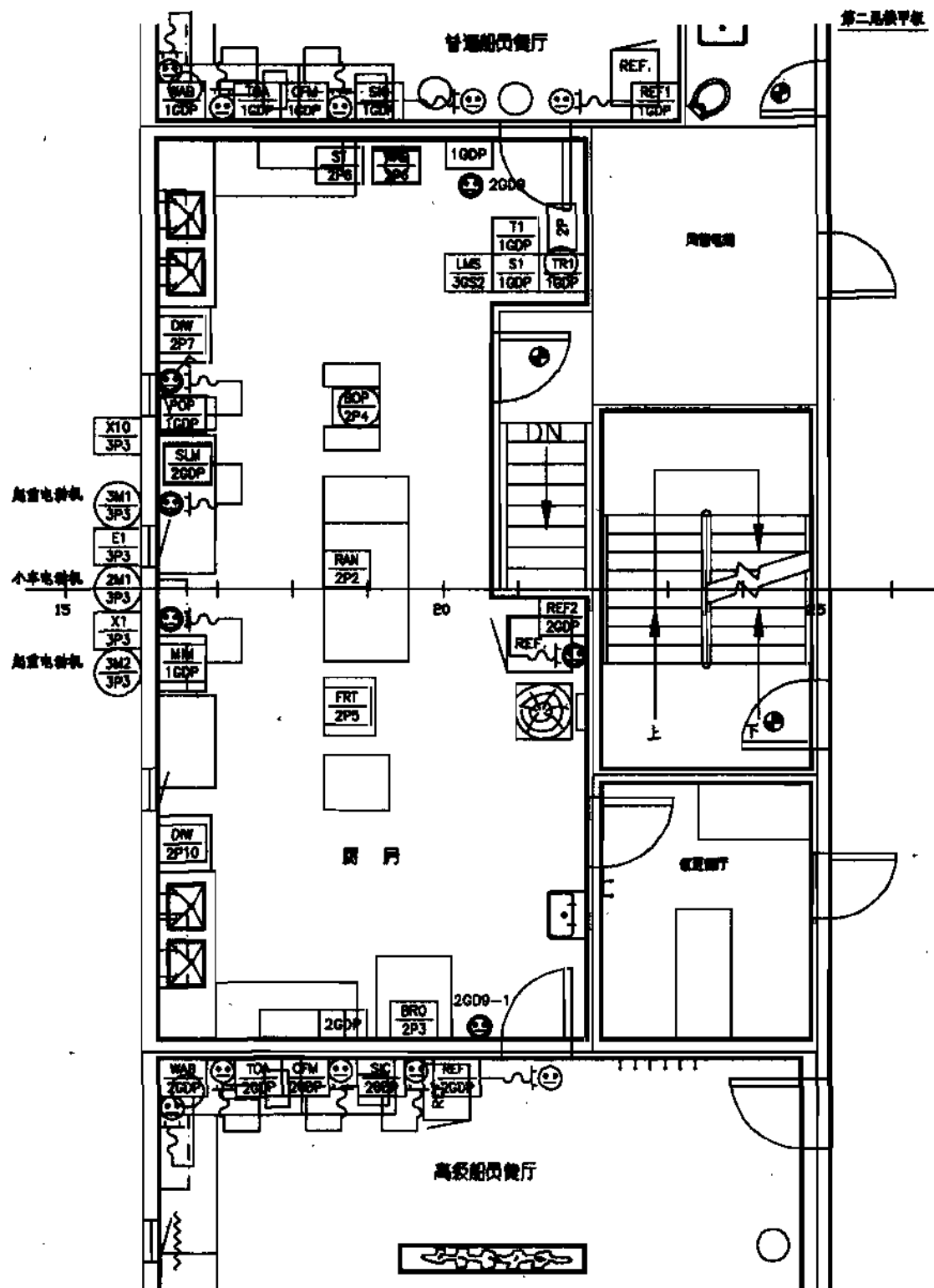


图 2.4.5.1 50000t 大开口散货船电力布置图一例

操作、操作人员易于平视指示仪表;其后方和上方应尽量没有水、油或蒸汽管。

9. 有些舱室应布置的电气设备较多(如厨房、控制室等),用原来比例的总布置图面难以布置时,可以采用局部舱室放大比例的图面进行绘制。

电力布置图的绘制实例,见图 2.4.5.1。

2.4.6 主干电缆走向图的设计原则

主干电缆通常是指直接接至主配电板和应急配电板的电缆,有时也包括穿过两层甲板或两舷远离敷设的电缆。

主干电缆走向图设计的好坏,不仅直接影响船舶电力系统供电的可靠性,也关系到使用电缆的经济性和船上安装工艺的复杂性等,所以越来越引起设计者的重视。

通常在总布置图、机舱布置图、电力一次系统图设计完成后,便可以开始进行主干电缆走向图的设计,设计中主要考虑用电设备对电缆的走线和敷设的要求、电缆敷设的环境条件以及尽量节省电缆和降低工艺复杂程度。所以在进行主干电缆走向图设计时,必须遵守下述原则:

1. 主发电机至主配电板的电缆,必须分开敷设至主配电板,并应尽量远离。
2. 对于重要辅机,例如主机滑油泵、淡水冷却泵等,有时设置两套互为备用,这类互为备用设备用电电缆应尽可能远离敷设。
3. 非机舱辅机电缆不应穿过机舱敷设。
4. 两路供电电缆应尽量分开敷设,实际不可能时,应尽量缩短敷设在同一电缆束的长度。
5. 电缆走线应避免潮气或水凝结的影响,尽量远离锅炉、热管或电阻器等热源。
6. 主干电缆走向应尽量减少穿过过多的防火区或水密隔舱。
7. 主干电缆走向应考虑到通过用电设备集中区域或兼顾左右舷用电设备。
8. 舵机两路供电电缆和控制、报警等电缆,应尽最大可能在水平及垂直方向远离敷设。
9. 用于重要设备或应急动力设备、应急照明、以及应急状态下使用的船内通信或信号设备的电缆应尽可能远离厨房、洗衣间、机器处所及机舱棚,以及其他高度失火危险处所。
10. 主干电缆应远离具有较大失火危险的机械和机械部件敷设,但这些设备本身的电缆、以钢质舱壁或甲板与这些设备隔开的电缆及采用耐火电缆除外。
11. 对于特殊船舶,例如闪点不超过 60℃ 的油船、化学品船等,主干电缆的走向图设计必须注意其附加要求。

第5章 船舶电力系统保护

2.5.1 船舶电力系统保护的目和内容

2.5.1.1 船舶电力系统保护的目

对船舶电力系统供电的基本要求是：

- 要保证安全可靠地供电；
- 要保证电能质量；
- 要能实现经济运行。

船舶电力系统的任何故障，均可能带来不良的恶果，特别是短路故障，若不及时切除，将有可能导致并联运行的发电机解列，使整个电力系统失电，甚至会发生火灾，危及船舶和人命安全。

船舶电力系统保护设计的宗旨，就是通过保护装置的动作，尽快切除故障回路，以使故障涉及范围最小；同时，又要最大限度地保证非故障回路连续供电，增加电力系统的生命力，因此，电力系统保护的基本要求是：

1. 快速切除短路故障——保护装置能自动地快速动作，切除故障回路，排除受损的电路及火灾危险。
2. 故障时选择动作——保护装置选择性动作，仅切除故障回路，保证非故障回路的连续供电。
3. 对设备和回路的最大保护——保护装置应对较大范围的故障电流均能动作，以实现对设备和回路的最大保护。
4. 选择合理的保护方式——根据负载的性质和重要程度，合理地选择选择性保护、非选择性保护或后备保护。
5. 选择合适的保护装置——保护装置必须具有适当的短路定额、短时额定电流和适当的热容量。
6. 合理地选择电缆——电缆与保护装置特性协调。
7. 系统保护的协调——整个电力系统保护装置动作配合完好。

2.5.1.2 船舶电力系统保护内容

典型的船舶交流电力系统图如图 2.5.1.1 所示，根据其系统的组成，保护的主要内容有：

1. 发电机保护。
2. 馈电回路保护。
3. 电源变压器保护。
4. 电动机保护。
5. 蓄电池回路保护。

6. 照明回路保护。

7. 其他,如电缆、仪表和电力半导体设备等。

按保护的目可以分为:

1. 过载——过电流或过功率。
2. 短路。
3. 逆功率。
4. 欠电压。
5. 自动卸载,等等。

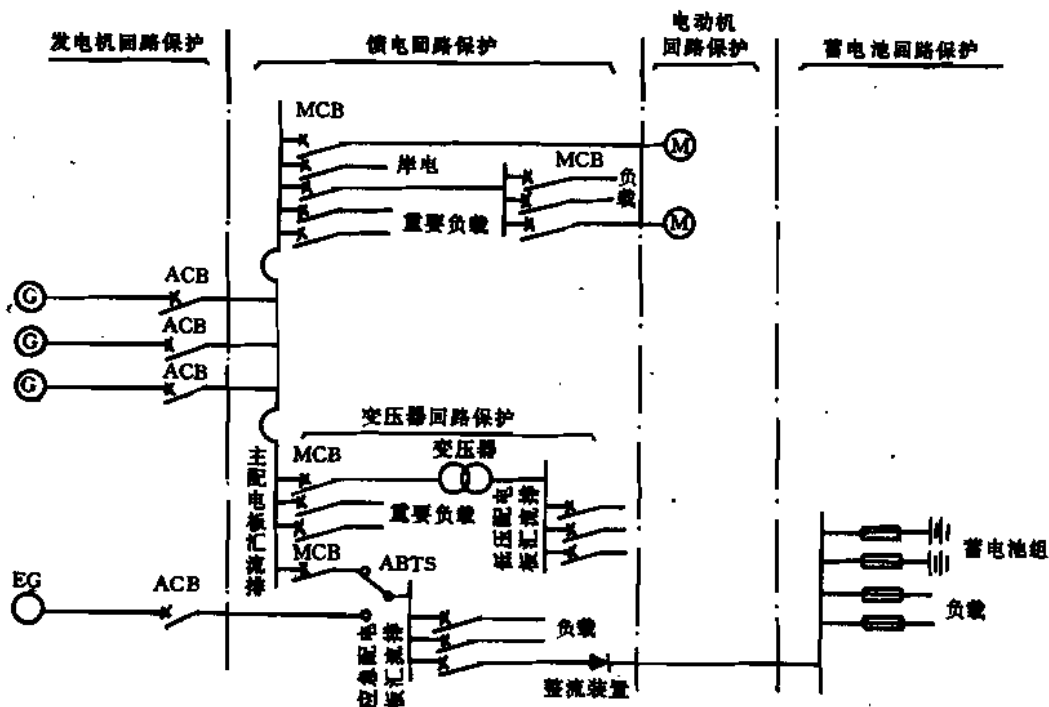


图 2.5.1.1 典型船舶交流电力系统图

G—主发电机; EG—应急发电机; M—电动机; ACB—空气断路器;

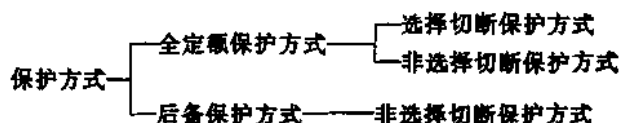
MCB—装置式断路器; ABTS—汇流排转换接触器。

2.5.2 船舶电力系统保护方式及其保护装置组合

2.5.2.1 船舶电力系统保护方式

作为船舶电力系统保护用的保护装置,主要是空气断路器、装置式断路器、熔断器和过载继电器等。这些保护装置的整定值,通常是按时间原则和电流原则或者两者的综合使用。以电力系统选择保护为例,按时间原则,其保护装置的動作时间的整定值,从用电设备至电源设备逐级递增;按电流原则,其保护装置的動作电流的整定值,从用电设备至电源设备逐级递增。由于两种方法各有利弊,有时难以得到满意的效果,实际上,大都将两种方法混用。

船舶电力系统保护方式,按其可以实现的保护功能,通常分类如下:



全定额保护方式,是指系统内所有保护装置所具有的额定短路容量均大于其安装点的推算短路电流。根据所选定保护装置特性,可以组成选择切断保护方式和非选择切断保护方式。

选择切断保护方式是指:当由于系统中的电气设备或电路的异常或故障,其回路中通过过电流和短路电流(通称为过电流)时,仅仅把与故障回路直接有关的回路从系统中切除,其他正常回路的供电不中断,保护装置之间能够得到协调的保护方式,简称为选择保护方式。

选择保护方式,可以分为全区域选择保护方式和部分区域选择保护方式。

所谓全区域选择保护方式,是指被串级连接的上位和下位保护装置的各自额定切断电流,在覆盖的整个过电流区域或者适用回路的最大推算短路电流的整个过电流区域内能够选择保护。

所谓部分区域选择保护方式,是指被串级连接的上位和下位保护装置的各自额定切断电流,虽然在过电流区域或者适用回路的最大推算短路电流的整个过电流区域内不能实现选择保护,但是,在某一限定电流范围内,可以选择保护。

后备选择切断保护是指:系统中设置的保护装置,对于其安装点的最大推算短路电流,短路定额不够的场合,在该保护装置的电源侧(通称为上位)设置对该最大推算短路电流具有足够的短路定额的保护装置,借助于此后备的保护装置,安全地切断故障回路的保护方式,简称为后备保护方式。

后备保护方式分为全区域后备保护方式和部分区域后备保护方式两种。

所谓全区域后备保护方式,是指对于因下位保护装置短路定额不够而设置的上位保护装置的短路定额(主要是额定切断电流和额定接通电流)内的整个过电流区域,能安全地进行后备保护。

所谓部分区域后备保护方式,是指对于因下位保护装置短路定额不够而设置的上位保护装置的短路定额内的整个过电流区域,不能完全实现后备保护,但是,在某一限定的过电流区域内,可以实现后备保护。

2.5.2.2 选择保护方式组合及其条件

选择保护方式,要求串级连接的上下位保护装置保护特性具有良好的协调性。目前可能实施的保护装置组合有表 2.5.2.1 所示几种方式:

表 2.5.2.1 选择保护的保护装置组合方式

序号	上位保护装置	下位保护装置
1	带短延时脱扣器的空气断路器	带短延时脱扣器或(和)瞬时脱扣器空气断路器
2	带短延时脱扣器的空气断路器	带短延时脱扣器或(和)瞬时脱扣器装置式断路器
3	带短延时脱扣器的空气断路器	限流熔断器
4	带短延时脱扣器的装置式断路器	带瞬时脱扣器的装置式断路器
5	带短延时脱扣器和瞬时脱扣器的装置式断路器	带瞬时脱扣器的装置式断路器
6	带短延时脱扣器的限流断路器	带瞬时脱扣器的装置式断路器
7	带短延时脱扣器的装置式断路器	限流熔断器
8	限流熔断器	带瞬时脱扣器的装置式断路器
9	限流熔断器	限流熔断器

采用全区域选择保护方式的优点在于其供电连续性好,但经济性差,而部分区域选择保护反之。

为了实现选择保护,上下位保护装置必须满足下列基本条件:

1. 所有保护装置必须具有足够的短路容量,也就是说,应具有能切断保护装置安装点的预期短路电流的能力。对断路器来讲,还必须具有能接通短路故障电流的能力。

2. 串联连接的上下位保护装置的保护特性之间应很好地协调。比如,即使同时通过相同的过电流或短路电流,亦应保证下位保护装置动作,而上位保护装置不动作。为此,可以采用电流原则,上下位保护装置选择不同的动作电流;也可以采用时间原则,例如选择上位保护装置的可能返回时间大于下位保护装置的全切断时间。

3. 上位保护装置必须能承受下位保护装置切断故障电流时间内通过峰值电流以及 I^2t 强度。

4. 当上位保护装置(例如空气断路器)具有欠电压保护时,应保证:即使系统的短路故障产生异常电压降,也不影响保护装置的选择动作。换句话说,欠电压脱扣器应具有延时特性,延时动作时间足以保证下位保护装置切除短路故障。

这里应该注意的问题是:保护装置的动作电流,通常是用有效值表征的,对交流系统,有时还要考虑直流分量的影响。另一个不可忽视的问题是必须充分注意保护装置的动作误差。这些资料,通常在产品样本中可以查到,若无确切资料,应与制造厂联系,采用制造保证的数值和选择保护组合表。

2.5.2.3 后备保护方式组合及其条件

后备保护方式是属非选择保护的一种,是在下位保护装置切断容量不足的情况下,利用具有足够切断能力的串联连接的相邻上位保护装置共同切断故障回路的一种保护方式。保护装置必须具备下述条件,才能完全切断短路电流:

1. 应能承受过电流的电磁力冲击。也就是说,在该电磁力作用下,各部件不应有不允许的机械损伤。

2. 应能承受过电流的焦耳热,其双金属片、热元件、衔铁以及触头等不应熔化、熔断或熔接。

3. 应能承受切断时电弧能量的影响,其外壳等不应损坏。

由上所述,上位保护装置可以作为下位保护装置的后备保护基本条件是:

1. 上位保护装置的短路定额——上位保护装置对其安装点的最大推算短路电流,具有足够的短路定额。

2. 上位保护装置的限流特性——上位保护装置切断短路电流时的限流特性,保证通过的电流峰值和 I^2t 值均在下位保护装置允许范围内。

3. 上位保护装置和下位保护装置电弧能量的分担——上位保护装置必须分担电弧能量的全部或一部分,把下位保护装置的电弧能量限制在其安全值之内,为此,上下位保护装置必须具有电弧时间重叠。以串联连接的断路器为例,当上位断路器的开极时间快,比下位断路器先开极,可组成最为理想的后备保护方式。

目前可能实施的后备保护的组合如表 2.5.2.2 所示。

上位后备保护用保护装置,也可以采用空气断路器,但实用较少,这是因为空气断路器的开极时间长,难以获得“电弧时间”重叠的必要条件。

表 2.5.2.2 后备保护的保护装置组合方式

序号	上位保护装置	下位保护装置
1	装置式断路器	装置式断路器
2	限流断路器	装置式断路器
3	熔断器	装置式断路器
4	限流熔断器	装置式断路器

由于定量计算电弧能量的分担十分复杂,通常应按制造厂提供的后备保护组合表选择合适的配合。

2.5.3 船舶电力系统的短路电流计算

2.5.3.1 短路电流计算的目的和意义

船舶电力系统发生短路时,可能造成如下破坏:

- 电动力引起的破坏;
- 热负载引起的破坏;
- 故障电弧引起的破坏。

由于短路故障所致,可能引起火灾,造成全系统不能工作,危及船舶安全和人命安全。在船舶电力系统设计时,精确地推算电网中各点的短路电流值大小,可以合理地选择保护方式和保护装置,以保证电力系统发生短路时,能快速地、有效地切除短路故障,把短路引起的破坏限制在最小限度。

对船舶电力系统设计而言,在初步设计时推算短路电流,用以选择配电电器(例如选择空气断路器)。在电力系统设计基本完成后,计算短路电流,用以校核所选用电气设备的热稳定性(如配电板汇流排)和电动力稳定性(如主汇流排)、校核所选用保护电器的短路接通能力和短路分断能力以及为电力系统保护设计提供必要的数。据。

当保护电器的短路接通能力和短路分断能力不能满足要求时,计算短路电流可以为选择适当的限流设备,以能将短路电流限制在保护电器的短路通断能力范围之内提供依据。

因此,应该十分重视船舶电力系统的短路电流计算。由于短路电流计算是船舶电力系统设计的重要内容之一,所以,目前各船级社要求提交送审的图纸和资料中,都有短路电流计算书。

2.5.3.2 船舶电力系统的特点及其对短路电流计算的影响

船舶电力系统一般都以发电机作为主电源,不是无穷大电网,所以,在计算短路电流时,要计及发电机阻抗的影响。

尽管船舶电力系统包括负载的种类很多,但其主要负载是电动机,一般占 60% 以上,在短路时,旋转电动机是短路电流供给源,所以,要计及电动机提供的短路电流。

由于船舶电站的电压等级较低,虽然外电路的阻抗较小,但对短路电流的影响较大,所以,在计算短路电流时,必须考虑外电路阻抗的影响。

2.5.3.3 短路点的选择

根据电力系统保护设计的要求,以图 2.5.3.1 为例,一般应计算下述各处的短路电流:

1. 发电机出线端近主配电板处(A_1, A_2 点)。
2. 主汇流排(B_1 点)。
3. 应急配电板(C_1 点)。
4. 区配电板及分配电板的汇流排(C_2 点)。
5. 电力和照明变压器次级(D_1 点)。
6. 电力和照明变压器供电的分配电板汇流排(D_2 点)。
7. 大电动机的出线端近汇流排处(B_2 点)。

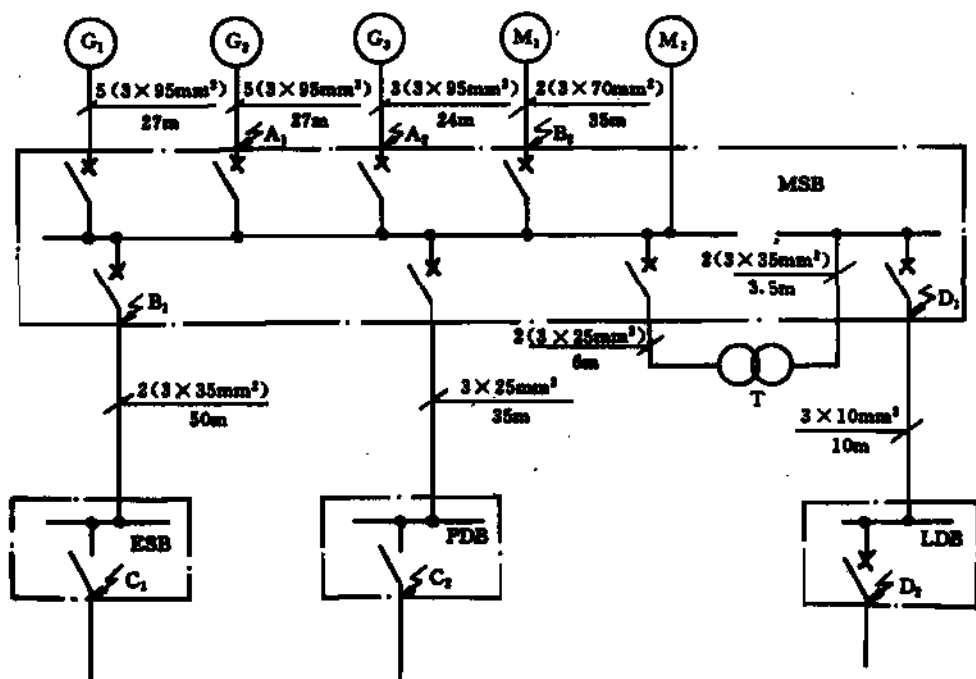


图 2.5.3.1 短路点的选择

G_1, G_2, G_3 —主发电机; MSB—主配电板; T—电力和照明变压器; M_1 —大电动机;
 M_2 —等效电动机; ESB—应急配电板; PDB—区配电板; LDB—分配电板。

必要时,应计算最小短路电流,例如舵机电动机出线端。

船舶电力系统的短路电流计算的目的是,为系统保护选定配电设备及其整定值时提供数据,所以,以交流电力系统为例,仅需计算如下几种短路电流:

1. 交流发电机的最大非对称短路电流。
2. 交流发电机的对称短路电流。
3. 交流发电机最小稳态短路电流。
4. 保护装置安装点的最大非对称短路电流。
5. 保护装置安装点的对称短路电流。
6. 断路器使用场所的最小短路电流。
7. 短路功率因数计算。

2.5.3.4 船舶直流电力系统的短路电流计算

目前,计算船舶直流电力系统的短路电流方法,大都采用 IEC363 号出版物中推荐的方法,参考文献[13]中,也列出了直流电力系统的短路电流计算方法。由于直流发电机和电动机在短路的时候,受电枢瞬态电阻和电枢初始电感影响较大,所以,在电机出线端短路时,仅仅考虑电枢回路的瞬态电阻和初始电感。其计算方法简述如下。

1. 已知数据及使用符号

N ——并联发电机台数;

P_n ——额定功率(kW);

I_n ——额定电流(A);

U_n ——额定电压(V);

e_o ——内电势(标么值);

n ——转速($r \cdot \min^{-1}$);

P ——极数;

R'_d ——电枢回路瞬态电阻(Ω);

r'_d ——电枢回路瞬态电阻(标么值);

L'_a ——电枢回路初始电感(H);

l'_a ——电枢回路初始电感(标么值);

T_a ——电枢时间常数 $\left(= \frac{L'_a}{R'_d} = \frac{l'_a}{r'_d} \right)$;

t ——短路后的时间(s);

R_e ——外部导体电阻(Ω);

r_e ——外部导体电阻(标么值);

L_e ——外部导体电感(H);

l_e ——外部导体电感(标么值);

T_e ——修正后电枢时间常数 $\left(= \frac{l'_a + l_e}{r'_d + r_e} \right)$ 。

2. 计算公式

在发电机出线端短路时,一台发电机的短路电流(标么值)计算公式如下:

短路电流峰值 I_{pr} :

$$I_{pr} = \frac{e_o}{r'_d} \quad (2.5.3.1)$$

达到短路电流峰值的短路电流特性:

$$i_{ar} = I_{pr} (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}) \quad (2.5.3.2)$$

当计算一台电动机出线端短路时,其短路电流峰值和短路电流特性,也可应用式(2.5.3.1)和式(2.5.3.2)计算。只是用电动机的有关参数代入各计算式。

这里应注意的是,必须将标么值转换成有名值,即安培值。

3. 各电机输出端的馈电线端短路

假如短路发生在离开电机出线端相当远时,应计及外部导体的电阻和电感的影响,并对电

枢时间常数进行修正。即:

短路电流峰值 I_{pr} (标么值):

$$I_{pr} = \frac{e_0}{r_d + r_e} \quad (2.5.3.3)$$

达到短路电流峰值的短路电流特性:

$$i_{ar} = I_{pr} (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}) \quad (2.5.3.4)$$

4. 主配电板汇流排处短路

若短路发生在主配电板汇流排附近时,则正在运行的发电机和电动机都是短路电流供给源。所以,其计算步骤是:

应用式(2.5.3.1)和式(2.5.3.3)求出各发电机和电动机的短路电流特性曲线。

再利用图解法进行加算,即可求出总短路电流特性曲线。

实际计算时,为了简化计算,可以把各电动机视作一台等效的电动机,其功率为发电机总输出功率的 60%,其参数采用平均电动机的参数。

5. 远离主汇流排的馈电线端短路

此时,把主汇流排短路电流特性曲线,近似的看作一台等效发电机的短路电流特性曲线,利用图解法求出该等效发电机的电枢瞬态电阻 R_B 、瞬态电感 L_B 和时间常数 T_B 。假设从主配电板到馈电线短路点电缆电阻为 R_C 、电感为 L_C ,则馈电线端的短路电流大小和特性可利用下述各式计算。

$$\text{短路电流 } I_{sf} = \frac{U_n}{R_B + R_C} \quad (2.5.3.5)$$

$$\text{短路电流特性 } I_f = (1 - e^{-\frac{t}{T_f}}) \quad (2.5.3.6)$$

$$\text{修正后时间常数 } T_f = \frac{L_B + L_C}{R_B + R_C} \quad (2.5.3.7)$$

2.5.3.5 船舶交流电力系统的短路电流计算

1. 船舶交流电力系统短路电流计算的特点

目前,国际上关于船舶交流电力系统短路电流的计算方法较多,但是,其共同的特点都是采用近似算法。所谓近似计算方法包括两层含义,一是都作了某些假设后进行计算,二是用一个计算公式描述整个短路过程。

另一个特点是计算中都考虑短路为三相对称金属性短路。并认为非对称最大峰值是在直流分量的初始值为最大的相位角,且交流分量为最大时出现。这就意味着,非对称最大峰值仅与短路功率因数有关,即非对称最大峰值 I_p 与对称有效值 I_{sym} 之比为:

$$n = \frac{I_p}{I_{sym}} = \sqrt{2}(1 + e^{-\frac{\pi}{\phi}}) \quad (2.5.3.8)$$

式中 ϕ ——短路功率因数角;

n ——非对称系数。

精确计算的短路功率因数与非对称系数的关系,列入表 2.5.3.1,供使用时参考。

表 2.5.3.1 短路回路功率因数与非对称系数

短路功率因数 $\cos\varphi$	非对称系数 n	短路功率因数 $\cos\varphi$	非对称系数 n
0.00	2.828	0.55	1.633
0.05	2.624	0.60	1.588
0.10	2.451	0.65	1.548
0.15	2.302	0.70	1.514
0.20	2.175	0.75	1.484
0.25	2.064	0.80	1.459
0.30	1.967	0.85	1.438
0.35	1.882	0.90	1.424
0.40	1.808	0.95	1.416
0.45	1.742	1.00	1.414
0.50	1.684		

注：本表数值按下列公式计算：

$$n = \sqrt{2} (1 + \sin\varphi \cdot e^{-(\frac{\pi}{2} + \varphi)/\arccos\varphi})$$

第三个特点是都计算短路后 $\frac{1}{2}$ 周期的对称有效值和非对称最大峰值。

2. 各种计算方法要点及其特征

现就目前国际上所应用的短路电流计算方法的要点和计算方法特征说明如下,其具体计算方法可参阅有关资料。这几种方法是:

1. IEC363 号出版物方法(A方法)。
2. 等效发电机方法(B方法)。
3. 日本《电气协同研究会》精密计算方法(C方法)。
4. 百分比阻抗方法(D方法)。
5. 图解方法(E方法)。
6. 美国海军标准计算方法(F方法)。
7. 我国国家标准计算方法(G方法)。
8. 有关船级社推荐的计算方法。

各种短路电流计算方法特征比较,列入表 2.5.3.2^[13]。可根据船舶入级规范和船东等有关要求,选择适用的计算方法。

表 2.5.3.2 船舶交流电力系统短路电流各种计算方法特征比较

计算方法	发电机交流分量的衰减	发电机有负载时的处理	外阻抗对时间常数的影响	电动机短路电流的计算	从汇流排到短路点的馈电线阻抗计算	总短路电流计算
A	考虑次瞬态衰减,忽略瞬态衰减	仅考虑发电机交流分量增加 10%	仅在发电机计算中考虑	汇流排和馈电线端短路都采用额定电流乘以一定的倍数来计算	分别与各发电机串联	发电机与电动机分量的代数和
B	同上	同上	发电机和电动机计算中都考虑	根据各电动机的常数计算	与等效发电机串联	在汇流排短路时,为各分量的代数和;在馈电线端短路时,按一台等效发电机短路计算
C	同上	交流分量与负载电流矢量相加	同上	同上	分解为并联阻抗,分别与发电机和电动机相串联	各分量的矢量和

(续)

计算方法	发电机交流分量的衰减	发电机有负载时的处理	外阻抗对时间常数的影响	电动机短路电流的计算	从汇流排到短路点的馈电线阻抗计算	总短路电流计算
D	不衰减	不考虑	—	根据发电机和电动机总合成阻抗来计算	计算从短路点看电源侧的总合成阻抗	基准电流除以总合成阻抗(标么值)
E	考虑次瞬态衰减,忽略瞬态衰减	仅考虑发电机交流分量增加10%	仅在发电机计算中考虑	汇流排短路时,用额定电流乘以一定倍数来计算	与等效发电机串联	在汇流排短路时,为各分量的代数和;在馈电线端短路时,按一台等效发电机短路计算
F	不衰减	不考虑	—	汇流排短路时,用额定电流乘以一定倍数来计算,并将馈电线阻抗考虑在内	分别与发电机和电动机串联	发电机与电动机分量的代数和
G	考虑次瞬态衰减,忽略瞬态衰减	仅考虑交流分量增加10%	仅在发电机计算中考虑	利用等效电动机常数或等效电动机额定电流来计算	分别与等效发电机(仅为发电机)和电动机串联	发电机与电动机分量的代数和

3. GB—3321《船舶交流电力系统的短路计算》简介

本方法是我国国家标准,并且与 IEC363 号出版物方法基本等效,适用于出口船舶设计。

1) 计算方法特征

本计算方法以 IEC363 号出版物为基础,与 IEC363 的计算方法相同之处是:

——计算短路后 $\frac{1}{2}$ 周期发电机短路电流时,考虑了交流分量的衰减,即计及时间常数的影响;

——在计算馈电线端短路时,计及了线路阻抗对时间常数的影响,即对时间常数进行必要的修正;

——在计算馈电线端短路时,计及了线路阻抗的影响;

——考虑了负载时短路电流的增加。

与 IEC363 的计算方法相比,本方法特征为:

——补充了不同型号、不同规格的发电机并联运行时,在汇流排短路时,用等效发电机方法计算发电机提供的短路电流;

——补充了短路功率因数 $\cos\varphi_k$ 的计算方法。该计算方法与《百分比阻抗方法》相同;

——补充了在变压器次级短路时的短路电流计算方法;

——在计算电动机提供的短路电流时,其电压值为电动机的额定电压;

——明确规定了当短路点至主汇流排的线路阻抗足够大时,可不计及电动机馈送的短路电流、可忽略发电机馈送的短路电流的非周期分量的具体数值,即:

在短路电路中不含变压器时, $R_e \geq 3X'_D$;

在短路电路中包含变压器时, $Z_e \geq 5X'_D$ 。其中 X'_D 为等效发电机次瞬态电抗, R_e 和 Z_e 为短路点至主汇流排线路的电阻和电抗。

2) 计算方法的通则

进行短路电流计算时,必须注意下述通则:

——仅计算三相对称回路发生短路时,短路后 $\frac{1}{2}$ 周期的短路电流值及短路功率因数。两相短路后 $\frac{1}{2}$ 周期时的短路电流,可取相应三相对称短路电流值的0.866倍;中性点接地的单相短路电流值,可认为近似等于相应的三相对称短路电流值;

——总的短路电流为发电机短路电流和电动机短路电流的代数和;

——计算最大短路电流时,应计及船舶电站最大负载情况下,所有可能并联运行的发电机(包括短时转移负载的发电机)和所有运行中的电动机馈送的短路电流;

——关于短路电路的阻抗,仅计及发电机、电动机、变压器以及电缆的阻抗,忽略汇流排、开关及导线的接触电阻等;

——计算电动机馈送的短路电流时,采用等效电动机。该等效电动机的额定功率,可以按电力负载计算书进行计算,也可以取为实际运行中发电机总额定功率的60%;

——在计算大容量电动机馈电线端的短路电流时,等效电动机馈送的短路电流中,可以不计及该电动机本身的作用。

3) 计算的必要条件

进行系统短路电流计算的必要条件,一是已具备电力系统单线图,并已确定了各运行工况下使用的发电机台数;另一是已索取了有关计算的必要数据,这些数据包括:

a. 发电机参数

包括额定容量、频率、额定电压、额定电流、瞬态电抗、次瞬态电抗、电枢电抗、电枢电阻、电枢时间常数、瞬态时间常数、次瞬态时间常数以及发电机装置台数等。

b. 电动机参数

包括电动机额定电压、等效电动机额定电流、平均等效电动机额定电流、等效电动机定子电阻、等效电动机转子电阻、平均等效电动机定子电阻、平均等效电动机转子电阻、等效电动机瞬态电抗、平均等效电动机瞬态电抗、等效电动机瞬态时间常数以及等效电动机直流时间常数等,随计算方法不同而异。

c. 变压器参数

变压器初级额定电压、次级额定电压、容量、电抗和电阻等。

d. 电缆参数

电缆长度、截面、并联根数以及电缆的电阻和电抗等。根据要求,有时要采用按环境温度进行修正的电阻和电抗值。

4) 计算步骤

由于目前均采用计算程序进行计算,所以,仅就几个环节加以说明。

收集有关数据——可以查阅产品样本、说明书,或向制造厂索取。

绘制电力系统单线图——仅画出与计算短路电流有关的部分,与下述短路点的选择配合进行;并注明有关电缆长度和截面。

选择短路点——根据计算短路电流目的决定。但要特别注意远离主汇流排的馈电线端的短路点的选择,要有代表性,并标注在单线图上。

进行计算——一般都是先计算发电机出线端短路,再计算等效电动机馈送的短路电流,进而计算主汇流排短路、变压器次级短路和远离主汇流排的馈电线端短路以及各短路点的短路功率因数 $\cos\varphi_k$ 。

对保护装置短路容量修正——如果计算的短路功率因数 $\cos\varphi_k$ 低于选定的保护装置的额

定功率因数时,应对选定的保护装置额定切断容量进行修正,以确保选定的保护装置短路容量满足要求。

由于目前多采用电算程序计算短路电流,使计算大为简化。表 2.5.3.3 是短路电流电算计算结果汇总表格式的一例。

表 2.5.3.3 短路计算结果和选用的保护电器数据汇总

短路计算结果					选用的保护电器								
短路点代号	短路发生后时间	对称短路电流/kA	短路电路上包络线值/kA	短路功率因数	型 号	额定电流/A	额定电压/V	短路分断能力		短路接通能力/kA	短路功率因数	cosφ _s	
								瞬时脱扣/kA	短延时脱扣/kA (分断时间/s)			换算系数	短路分断能力/kA

通常发电机瞬态电抗、次瞬态电抗、电枢电抗、电枢电阻、电枢时间常数、瞬态时间常数和次瞬态时间常数在产品样本中不提供,需向制造厂索取。1FC6 的有关参数列入表 2.5.3.4 中。

表 2.5.3.4 1FC6 系列发电机短路计算的技术数据表

型 号	额定 输出 功率 / kVA	峰值 电 流 /A	有效 值电流 /A	x_d /%	x_q /%	x_d' /%	x_d'' /%	x_q' /%	x_2 /%	x_0 /%	r_1 /%	T_a /s	T_d' /s	T_d'' /s	
1500r/min(4极)		400/231V, 50Hz													
1FC6	184	26	630	110	310	235	11.6	7.8	9.4	15.0	3.5	5.4	0.010	0.023	0.001
	186	35	1000	150	310	235	10.0	6.8	8.2	13.5	3.1	4.2	0.012	0.025	0.001
1FC6	224	56	1350	240	320	245	12.3	7.6	9.1	15.2	3.6	3.9	0.011	0.038	0.001
	226	80	2260	460	315	240	10.6	6.7	8.0	14.2	3.1	2.6	0.011	0.034	0.001
1FC6	284	145	3600	620	420	320	14.2	8.6	10.3	17.0	4.5	2.4	0.017	0.060	0.001
	286	210	6500	940	400	300	11.6	7.1	8.5	14.0	3.6	1.9	0.018	0.060	0.001
1FC6	350	240	4800	1200	455	345	20.2	11.6	15.0	19.1	6.0	1.7	0.024	0.053	0.002
	352	280	4800	1360	570	430	23.5	14.0	18.6	24.8	7.1	2.3	0.022	0.050	0.002
	354	340	6900	1800	530	400	19.6	11.7	15.5	21.5	6.1	1.7	0.025	0.049	0.002
	356	420	10000	2250	485	370	15.8	9.4	12.5	18.7	5.0	1.6	0.021	0.049	0.002
1FC6	404	510	9000	2500	630	475	23.5	14.4	19.5	25.9	7.6	2.1	0.025	0.059	0.002
	406	600	13000	3100	560	425	18.5	11.4	15.6	21.6	6.1	1.6	0.026	0.058	0.002
	408	680	13700	3300	610	465	19.5	12.0	16.5	23.6	6.3	1.9	0.024	0.057	0.002
1FC6	454	800	14000	3800	650	495	24.7	14.6	18.1	23.0	8.5	2.1	0.024	0.068	0.003
	456	950	21000	4300	630	480	19.5	10.9	13.8	19.7	6.6	1.7	0.022	0.061	0.003
1FC6	502	1070	22000	6400	590	445	20.8	11.7	14.8	19.9	6.8	1.8	0.023	0.082	0.004
	504	1310	26000	7800	650	490	20.4	11.3	14.4	18.0	6.8	2.1	0.019	0.073	0.003
	506	1420	30000	8000	670	510	20.1	11.2	14.2	18.1	6.8	1.9	0.021	0.074	0.003
1FC6	562	1730	33000	8000	680	510	24.0	13.5	17.2	20.6	8.2	1.9	0.026	0.089	0.005
	564	1850	37000	10200	660	500	22.6	13.0	16.4	20.3	8.1	1.8	0.026	0.087	0.004
	566	2000	45000	10400	650	495	20.5	11.6	14.7	19.1	7.2	1.4	0.030	0.092	0.005
1000r/min(6极)		400/231V, 50Hz													
1FC6	354	240	4400	1600	350	270	19.8	11.5	15.0	22.3	5.8	2.5	0.017	0.046	0.001
	356	310	7500	1700	310	230	15.3	8.9	11.5	18.1	4.6	1.8	0.018	0.044	0.001

(续)

型 号	额定 输出 功率 /kVA	峰值 电流 /A	有效 值电流 /A	x_d /%	x_q /%	x_d' /%	x_q' /%	x_2 /%	x_0 /%	r_1 /%	T_d /s	T_d' /s	T_d'' /s		
1000r/min(6极)		400/231V, 50Hz													
1FC6	404	375	7400	1600	410	310	18.9	10.7	14.4	20.5	5.1	2.3	0.017	0.048	0.002
	406	475	10200	2100	410	310	17.3	9.9	13.3	19.7	4.8	2.0	0.018	0.046	0.002
1FC6	454	590	12000	2800	420	320	19.1	11.0	13.6	21.7	6.3	1.9	0.021	0.054	0.002
	456	710	14800	3100	430	325	18.0	10.4	12.9	21.5	6.1	2.0	0.018	0.051	0.002
1FC6	502	1000	18800	3800	495	375	20.2	10.7	13.3	20.7	8.6	2.5	0.015	0.054	0.003
	504	1150	24600	4100	480	360	19.0	10.4	12.5	18.6	6.6	1.8	0.019	0.053	0.003
	506	1250	31700	5300	415	315	14.8	7.8	9.5	17.3	5.7	1.8	0.015	0.051	0.003
1FC6	562	1310	28300	5100	435	330	19.7	10.5	12.8	19.3	7.2	1.8	0.021	0.068	0.004
	564	1500	32800	5900	460	350	19.6	10.3	12.6	20.1	6.9	1.7	0.021	0.068	0.003
	566	1600	36000	8900	460	345	19.4	10.5	12.7	20.6	7.7	1.5	0.024	0.068	0.003
	567	1750	45800	7700	455	345	16.7	8.3	10.3	16.0	5.2	1.4	0.020	0.066	0.003
750r/min(8极)															
1FC6	502	670	11600	3000	395	300	23.5	13.6	17.4	21.0	5.7	2.3	0.021	0.077	0.003
	504	730	15300	4400	350	265	19.7	11.4	14.5	18.5	5.0	1.8	0.023	0.079	0.003
	506	800	18500	4500	335	250	18.0	10.4	13.2	17.4	4.6	1.6	0.024	0.079	0.003
1FC6	562	1050	19000	5000	490	370	23.6	11.9	16.3	19.7	6.2	2.3	0.019	0.079	0.003
	564	1200	21800	5200	520	390	24.3	12.4	17.0	20.8	6.6	2.1	0.022	0.082	0.003
	566	1300	21500	5400	590	445	27.7	14.1	19.6	23.4	7.2	2.1	0.025	0.084	0.003
	567	1400	34600	6500	400	300	18.3	9.5	13.0	17.5	5.2	1.3	0.027	0.085	0.003
	568	1500	31800	7500	400	300	19.4	11.0	14.4	18.9	5.4	1.4	0.029	0.095	0.003
600r/min(10极)		400/231V, 50Hz													
以下技术参数均为饱和值															
1FC6	502	550	9500	2200	210	160	25.0	13.2	15.9	14.6	-	2.1	0.022	0.083	0.002
	504	590	12300	3200	175	130	20.7	10.9	13.0	11.9	-	1.6	0.022	0.082	0.002
	506	670	14000	3800	190	140	20.9	11.0	13.2	12.1	-	1.5	0.023	0.084	0.002
1FC6	562	790	13700	4000	230	180	23.7	13.2	16.5	14.8	-	2.2	0.022	0.066	0.002
	564	890	15400	4400	240	180	23.3	13.5	16.8	15.1	-	2.2	0.022	0.070	0.002
	566	1050	22600	4750	210	160	18.5	9.4	12.2	10.8	-	2.0	0.017	0.060	0.002
1800r/min(4极)		450/260V, 60Hz													
1FC6	184	31	690	130	350	270	19.0	12.4	18.8	39.0	3.9	5.1	0.008	0.033	0.001
	186	42	1000	180	350	270	17.1	11.2	17.2	39.4	4.5	4.0	0.009	0.033	0.001
1FC6	224	68	1450	300	370	280	20.2	12.2	18.7	38.6	4.3	3.6	0.011	0.051	0.001
	226	92	2260	460	350	270	16.2	10.0	15.3	33.6	3.4	2.6	0.013	0.045	0.001
1FC6	284	160	4200	700	440	335	19.9	11.1	16.2	27.6	4.6	2.0	0.017	0.071	0.001
	286	240	6900	1100	430	330	16.3	9.4	13.8	27.1	3.9	1.7	0.018	0.067	0.001
1FC6	350	290	4800	1800	520	395	23.4	13.3	17.3	22.3	6.8	1.6	0.024	0.054	0.002
	352	330	4700	1850	630	480	25.9	15.3	20.3	27.8	7.9	2.1	0.022	0.053	0.002
	354	420	6900	2100	610	465	23.3	13.8	18.4	25.5	7.0	1.6	0.025	0.049	0.002
	356	525	10000	2700	580	435	19.0	11.3	15.2	22.6	5.9	1.7	0.021	0.049	0.002
1FC6	404	610	8400	2800	710	540	27.5	16.6	23.0	29.6	8.6	2.0	0.025	0.063	0.002
	406	700	12700	3100	620	470	20.8	12.6	17.4	24.4	6.6	1.5	0.026	0.060	0.002
	408	810	13400	3300	690	520	22.3	13.6	18.9	27.0	7.1	1.8	0.024	0.058	0.002
1FC6	454	950	14000	4400	730	560	27.9	16.5	20.4	25.8	9.5	2.0	0.024	0.068	0.003
	456	1150	21000	5200	730	550	22.5	12.6	15.8	22.7	7.6	1.7	0.022	0.062	0.003
1FC6	502	1300	22000	6800	680	520	24.1	13.5	17.1	22.9	7.8	1.7	0.023	0.083	0.004
	504	1520	27000	8150	710	540	22.5	12.4	15.8	19.7	7.5	1.9	0.019	0.076	0.003
	506	1660	30000	8200	740	560	22.3	12.4	15.8	20.0	7.5	1.8	0.020	0.076	0.003
1FC6	562	2000	35000	9000	740	560	26.6	15.0	19.1	22.7	9.0	1.6	0.027	0.094	0.005
	564	2110	37000	10500	710	540	24.6	14.1	17.9	22.2	8.8	1.6	0.027	0.093	0.005
	566	2300	44000	11000	710	540	22.5	12.7	16.1	21.1	7.9	1.2	0.031	0.096	0.005