

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD18-2023



中国船级社

船舶直流综合电力系统检验指南

2023

生效日期：2023年5月1日

北京

目 录

第 1 章 通则	1
第 1 节 一般规定	1
第 2 节 图纸和资料	3
第 3 节 产品检验	4
第 4 节 船舶检验	6
第 2 章 直流综合电力系统设计	9
第 1 节 一般规定	9
第 2 节 直流配电系统设计的要求.....	9
第 3 节 交流日用配电系统设计的要求.....	11
第 3 章 系统保护	13
第 1 节 一般规定	13
第 2 节 直流配电系统保护设计.....	13
第 3 节 交流日用配电系统保护设计.....	14
第 4 节 短路电流计算和保护电器选择.....	15
第 4 章 控制和监测	19
第 1 节 一般规定	19
第 2 节 功率/能量管理系统（PMS/EMS）设计要求	21
第 5 章 电磁兼容	23
第 1 节 一般规定	23
第 2 节 电磁兼容设计和分析要求.....	23
第 3 节 抗干扰设计原则.....	23
第 6 章 故障模式和影响分析	25
第 1 节 一般规定	25
附录 1 短路电流计算及保护校核方法	26
第 1 节 一般规定	26
第 2 节 直流配电系统的短路计算与保护校核方法.....	27
第 3 节 交流日用配电系统的短路计算及保护校核方法.....	32
附录 2 电磁兼容风险分析与设计报告模板	34
第 1 节 电力系统说明	34
第 2 节 电磁环境分析	34
第 3 节 主要设备（系统）电磁兼容特性.....	35
第 4 节 主要电磁兼容设计措施及预期效果.....	37
第 5 节 系统布局、布线、滤波、接地说明框图.....	37

第1章 通则

第1节 一般规定

1.1.1 适用范围

1.1.1.1 《船舶直流综合电力系统检验指南》（以下简称本指南）适用于船长20m及以上^①设有直流综合电力系统的船舶。

1.1.1.2 安装本指南所规定的直流综合电力系统的船舶，除应满足本指南的要求之外，还应满足CCS《钢质海船入级规范》、《国内航行海船建造规范》、《钢质内河船舶建造规范》、《国内航行海船入级规则》或《内河船舶入级规则》等规范（以下简称相关规范）的相应要求。

1.1.1.3 由于直流综合电力系统技术尚在不断发展中，对于特殊的和新型的直流综合电力系统，不能满足本指南规定的技术要求，而需采用基于相应的理论计算、试验结果、使用经验或有效的公认标准进行评估，经CCS同意，可以接受作为代替和等效方法。

1.1.2 定义

1.1.2.1 本指南适用的定义如下：

(1) 直流综合电力系统：将全船一次能源（含燃料燃烧或化学反应产生的能源、储能能源、风能、光伏能源等）统一转变为直流电能，并实现综合运用的船舶新型动力电力系统。其将电源装置输出的电能（包括发电装置产生的电能和（或）储能装置释放的电能），经直流配电系统、交流日用配电系统，向全船负荷（如电力推进、作业负荷、主要日用负荷等）供电，并通过功率/能量管理系统实现全船能源的综合调度使用。

(2) 集中式直流综合电力系统：发电装置、储能装置、负载直接或经变流器接入直流母排。直流母排由两个及以上的母排分段组成，各母排分段通过母联保护装置连接，正常工况下母联保护装置合闸，集中式直流配电。

(3) 分布式直流综合电力系统：发电装置、储能装置、负载直接或经变流器接入多段直流母排。各段直流母排通过母联接触器或隔离开关连接，正常工况下母联接触器或隔离开关分闸，各段直流母排相互独立、分布式运行。

(4) 电源装置：船舶的电力来源，一般包括发电装置和储能装置。

(5) 发电装置：将燃料燃烧或直接将燃料化学反应产生的电能，为船舶负载提供电力来源的装置。其特征是在正常的技术状态下，能量仅能单向从发电装置流向配电系统。可分为交流发电装置（如交流同步或异步发电机组）、直流发电装置（如交流整流发电机组、直流发电机组、燃料电池、太阳能光伏系统等）。

(6) 储能装置：储存电能或其他能源的装置，能够为船舶负载提供电力来源，也可由发电装置、储能装置或岸电进行充电。其特征是在正常的技术状态下，能量能够在储能装置和配电系统之间双向流动，如蓄电池（组）、超级电容器、飞轮储能等。

(7) 直流配电系统：将发电装置、储能装置、岸电提供的电能分配至各用电设备，并根据用电设备的不同电能需求实现电制、电压和频率的变换。包括直流配电板、变流器、电缆等。

(8) 直流配电板：系指由发电装置、储能装置、岸电直接或相应接入变流器供电，分配和控制直流电能至船上各用电负荷的直流汇流排、开关设备、保护电器和监控设备的组合。

^① 如《内河小型船舶检验技术规则》和《沿海小型船舶检验技术规则》对小型船舶的船长范围作出调整，则应执行两规则适用范围中新的船长范围的有关规定。

(9) 直流母排：系指直流配电板内部，连接电源装置和负载的公共直流汇流排。

(10) 变流器：系指根据用电设备电能需求，实现电制、电压、频率变换的电力电子设备。包括整流器（AC/DC）、逆变器（DC/AC）、变频器（DC/AC或AC/DC/AC）、斩波器（DC/DC）等。

(11) 交流日用配电系统：系指将逆变器、交流发电装置、岸电提供的三相交流电能分配至日常用电负荷的配电系统。包括交流配电板、照明变压器、电缆等。

(12) 交流配电板：系指由逆变器、交流发电装置、交流岸电供电，分配和控制三相交流电能至船上日常用电负荷的交流汇流排、开关设备、保护电器和监控设备的组合。

(13) 功率/能量管理系统（PMS/EMS）：系指为船舶功率/能量获取、分配和使用提供相应监测、控制和管理功能的自动化系统。

(14) 固态开关：系指采用电力电子功率半导体作为电流分断元件的无触点开关。

(15) 熔断器弧前时间：系指熔断器从一个足够分断熔体的电流出现至电弧产生瞬间的时间间隔。

(16) 熔断器燃弧时间：系指熔断器从电弧产生瞬间到电弧最终熄灭瞬间的时间间隔。

(17) 熔断器熔断时间：系指弧前时间和燃弧时间之和。

(18) 熔断器 I^2t ：即焦耳积分，系指在给定时间间隔内电流平方的积分，弧前 I^2t 是熔断器弧前时间内的 I^2t 积分；熔断 I^2t 是熔断器熔断时间内的 I^2t 积分。

(19) 泵升电压：系指电动机处于再生制动状态时，机械能通过电动机转换为电能，此能量回馈至驱动电动机的变流器直流侧电容引起的电压升高。

上述(2)、(3)示意图见图1.1.2.1 -1, 和图1.1.2.1 -2。

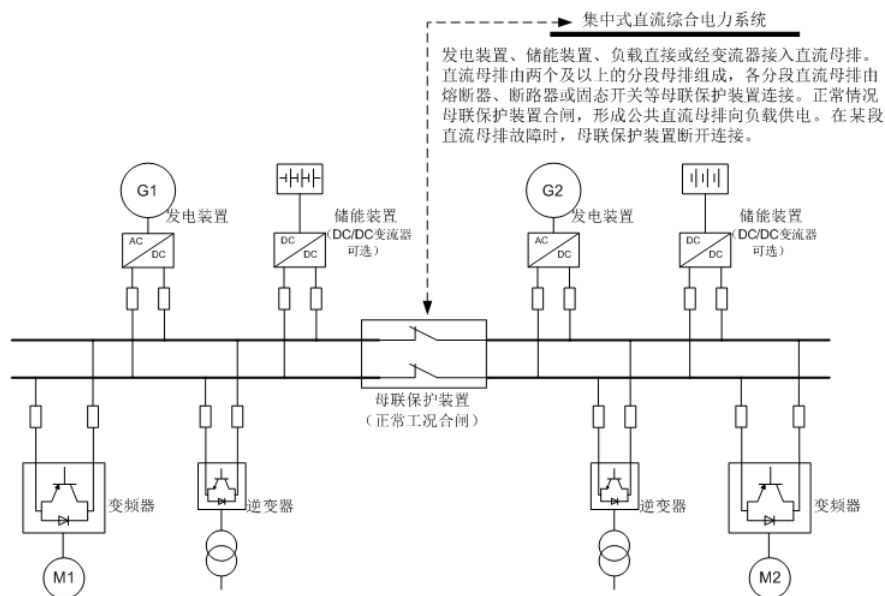


图 1.1.2.1 -1 集中式直流综合电力系统示意图

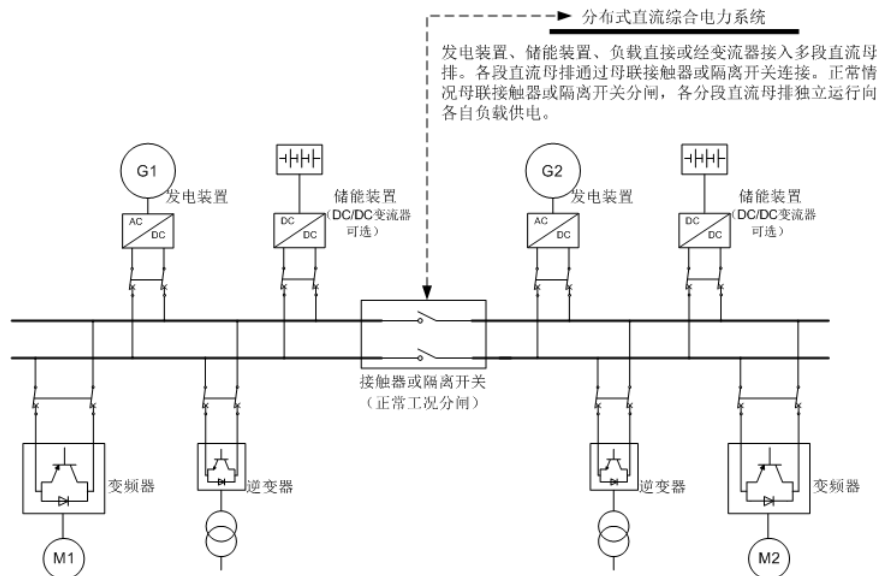


图 1.1.2.1 -2 分布式直流综合电力系统示意图

第2节 图纸和资料

1.2.1 送审图纸和资料

1.2.1.1 船舶审图阶段，除按CCS相关规范的要求提交图纸资料外，对于制造商在CCS入级船舶上首次安装的直流综合电力系统，还应将下列图纸资料提交CCS批准：

(1) 直流综合电力系统原理图（可为单线图）；

(2) 直流综合电力系统短路电流计算书（见3.4.1.2），包括直流配电系统和交流日用配电系统两部分（适用于可并联电源装置总功率大于200kW的船舶）；

(3) 直流综合电力系统选择性保护分析报告（见3.4.3.1），包括直流配电系统和交流日用配电系统两部分（适用于可并联电源装置总功率大于200kW的船舶）；

(4) 直流配电系统短路电流计算和选择性保护分析验证资料（见3.4.4），用于对(2)和(3)的内容进行试验验证；

(5) 直流综合电力系统控制和监测系统图；

(6) 直流综合电力系统系泊和航行试验大纲。

1.2.1.2 船舶审图阶段，除按CCS相关规范的要求提交图纸资料外，对于制造商在CCS入级船舶上首次安装的直流综合电力系统，还应将下列图纸资料提交CCS备查：

(1) 系统说明书，应至少包含系统概述、各主要部件功能、系统保护原理、系统控制功能以及系统外部接口描述；

(2) 直流综合电力系统电磁兼容设计和分析报告（见5.2.1.1）；

(3) 直流综合电力系统故障模式和影响分析（FMEA）报告（见第6章）。

1.2.1.3 船舶审图阶段，除按CCS相关规范的要求提交图纸资料外，对于已经过首次安装批准，在CCS入级船舶上后续安装的同型式^①直流综合电力系统，并将下列图纸资料提交CCS批准：

(1) 直流综合电力系统原理图（可为单线图）；

(2) 直流综合电力系统短路电流计算书（见3.4.1.2），包括直流配电系统和交流日用配电系统两部分（适用于可并联电源装置总功率大于200kW的船舶）。用于计算短路电流的仿真/建模计算方

^①同型式即指系统拓扑结构、保护原理和控制逻辑无原则性变化。一般情况下，当直流综合电力系统直流母排分段数、3.2.1.1 中的保护电器和保护策略无原则性变化时，可认为是同型式直流综合电力系统。

法，应与首制船所采用的方法相一致；

(3) 直流综合电力系统选择性保护分析报告（见3.4.3.1），包括直流配电系统和交流日用配电系统两部分（适用于可并联电源装置总功率大于200kW的船舶）；

(4) 直流综合电力系统控制和监测系统图；

(5) 直流综合电力系统系泊和航行试验大纲。

1.2.1.4 船舶审图阶段，除按CCS相关规范的要求提交图纸资料外，对于已经过首次安装批准，在CCS入级船舶上后续安装的同型式直流综合电力系统，并将下列图纸资料提交CCS备查：

(1) 系统说明书，应至少包含系统概述、各主要部件功能、系统保护原理、系统控制功能以及系统外部接口描述；

(2) 直流综合电力系统首次安装的有关信息，应至少包括首制船舶下列信息：船舶识别号、系统原理图（可为单线图）、短路电流计算书、选择性保护分析报告、试验验证情况等；

(3) 直流综合电力系统电磁兼容设计和分析报告（见5.2.1.1）。

1.2.1.5 经过首次安装批准后，在CCS入级船舶上后续安装同型式直流综合电力系统，但有个别组件产生变更时，CCS可要求增加送审图纸和资料。

1.2.1.6 已完成CCS原则认可的直流综合电力系统或类似应用了直流母排的电力系统，无须满足1.2.1.1-1.2.1.2 的要求，应按照1.2.1.3-1.2.1.5 的要求进行图纸资料的提交。

第3节 产品检验

1.3.1 一般要求

1.3.1.1 除满足本指南的要求外，产品检验还应满足CCS相关规范、规则和产品检验指南的有关要求。

1.3.1.2 直流配电系统中使用的电气设备的制造和试验应符合国际或国家标准。对于没有标准的新设备或设备的新用途，应提交文件证明其与传统设备具有等效性。

1.3.2 直流配电板

1.3.2.1 直流配电板应经CCS认可并取得CCS签发的船用产品证书，方可上船使用。

1.3.2.2 直流配电板中部件持证要求应符合表1.3.2.2 的规定。

直流配电板中部件持证要求

表 1.3.2.2

序号	部件名称	证件类别		认可模式				审图	备注
		C/E	W	DA	TA-B	TA-A	WA	PA	
1.	熔断器	—	X	—	X ⁴	—	—	X	
2.	断路器	—	X	—	X	—	—	X	
3.	隔离开关	—	X	—	X	—	—	X	
4.	母联连接用固态开关	—	X	—	X	—	—	X	见 CCS《混合动力船舶检验指南》第3章第2节
5.	变流器	X	—	—	X	—	—	X	功率 50kW 及以上
6.	发电机保护装置	—	X	—	X	—	—	X	
7.	功率/能量管理系统	—	X	—	X	—	—	X	
8.	电工仪表	—	X	—	X	—	—	X	
9.	绝缘监测仪	—	X	—	X	—	—	X	

10.	接触器	—	X	—	X	—	—	X	
11.	继电器	—	X	—	X ⁴	—	—	X	
12.	电线电缆	—	X	—	—	—	X	X	

符号说明：1) C—船用产品证书；E—等效证明文件；W—制造厂证明；X—适用；O—可选；
2) DA—设计认可；TA-B—型式认可B；TA-A—型式认可A；WA—工厂认可；PA—图纸审查；
3) X⁴：经CCS特别同意可以接受。

1.3.2.3 直流配电板柜体（含汇流排）应符合IEC61439-1《低压成套开关设备和控制设备第1部分：总则》和IEC61439-2《低压成套开关设备和控制设备第2部分：成套电力开关和控制设备》的规定。

1.3.2.4 直流配电板应完成以下出厂试验：

- (1) 结构及接线检查，必要时应进行外壳防护等级试验；
- (2) 电气间隙及爬电距离的检查；
- (3) 冷却系统效用试验；
- (4) 电气功能试验，检查半导体变换装置、仪表、报警、指示、显示屏等的效能，功率/能量管理系统（PMS/EMS）的功能试验应尽实际可能进行；
- (5) 汇流排温升试验，对批量生产的同型产品可仅对首件产品进行温升试验；
- (6) 耐压试验；
- (7) 绝缘电阻测量。

1.3.3 电源装置

1.3.3.1 额定功率50kVA及以上的发电机组应进行单件/单批检验，持有CCS产品证书。

1.3.3.2 《产品检验指南 E-04发电机》中表7.1所规定的稳态短路检验试验，可按如下规定进行校核：交流发电机及其励磁系统，在稳态短路状态下，至少应能维持其保护装置设定的最大短路电流，耐受时间为保护装置设定的最大分断时间。

1.3.3.3 三相交流异步发电机应按照表1.3.3.3的要求进行型式试验。获得型式认可证书后，单件/单批检验项目应至少包括表中1至8项。

三相交流异步发电机型式试验项目表

表 1.3.3.3

序号	试验项目	技术要求
1.	外观检查	批准的图纸及技术文件
2.	绝缘电阻测量	CCS《钢质海船入级规范》第4篇3.2.9.6
3.	绕组电阻测量	技术条件
4.	过载/过电流试验	CCS《钢质海船入级规范》第4篇3.2.5.1
5.	超速试验	IEC60034-1第9.7条
6.	耐压试验	IEC60034-1第9.2条
7.	空载试验(空载电流和空载损耗的测定)	GB/T 19071.2第4.5条
8.	轴承检查	CCS《钢质海船入级规范》第4篇3.2.9.16
9.	最大转矩测定	GB/T 1032第9条
10.	工作特性曲线的测定	GB/T 19071.2第4.7条
11.	额定负载试验和温升测量	CCS《钢质海船入级规范》第4篇3.2.3
12.	倾斜试验	CCS《电气电子产品型式认可试验指南》
13.	交变湿热试验	CCS《电气电子产品型式认可试验指南》
14.	盐雾试验Ka ^①	CCS《电气电子产品型式认可试验指南》

15.	外壳防护等级试验	IEC60034-5
-----	----------	------------

注：① 未进行盐雾试验的产品需在认可证书及产品证书中注明“不适于安装在开敞甲板”。

1.3.3.4 发电机组不必进行《产品检验指南 E-05发电机组》中要求的并联运行试验或负载转移试验。

1.3.3.5 交流异步发电机组若在制造厂完成《产品检验指南 E-05发电机组》中规定的所有试验项目不可行时，应经CCS同意，在制造厂至少完成《产品检验指南 E-05发电机组》中第5.4(1)至(8)和(17)的试验项目，在系泊试验期间完成其余的试验项目。

1.3.3.6 锂电池(包括能量型超级电容)的制造、试验和检验应符合《纯电池动力船舶检验指南》的规定。

1.3.4 变流器（半导体变换器）

1.3.4.1 功率50kW及以上的变流器（半导体变换器）应按照《钢质海船入级规范》第1篇第3章附录1A或《内河船舶入级规则》第1篇第3章附录1A持有证书。

1.3.5 推进控制系统

1.3.5.1 推进控制系统应按照《钢质海船入级规范》第1篇第3章附录1A或《内河船舶入级规则》第1篇第3章附录1A持有证书，可参照CCS《产品检验指南 E-16主机遥控系统》进行型式试验。

1.3.5.2 推进控制系统的软件应符合《钢质海船入级规范》第7篇第2章第6节或《钢质内河船舶建造规范》第4篇第2章第8节的规定。

第4节 船舶检验

1.4.1 一般要求

1.4.1.1 所有检验程序、检验方式、检验种类、检验间隔期、检验条件、检验前准备、检验和试验要求以及船舶图纸、资料、证书、记录和报告等的保存，对于海船应按CCS《钢质海船入级规范》的有关规定执行，对于内河船舶应按CCS《内河船舶入级规则》的有关规定执行。

1.4.2 建造中检验

1.4.2.1 船舶的建造中检验除应按CCS相关规范的适用要求进行检验外，有关直流综合电力系统，尚应增加下列项目：

(1) 确认各工况下直流综合电力系统的操作、保护、联锁、指示、报警和相应的动作处于正常状态；

(2) 如电力负荷估算书中存在两台及以上电源装置并联运行工况，则需选择最少台数电源装置并联运行工况进行试验。在该工况停止其中一台电源装置，验证系统供电连续性。若电源装置额定功率不同，则需停止较大功率电源装置；

(3) 根据电力负荷估算书，在保证船舶动力安全的情况下，在航行工况或者作业工况下切除一台单机功率最大的负荷（如停止一台推进电动机），验证系统电压调节性能和稳定性；

(4) 控制和监测系统的检查和试验，应至少验证：

- ① 控制位置（机旁/遥控）的设定和切换正常；
- ② 控制模式（手动/半自动/自动）的设定和切换正常；
- ③ 各电源装置及保护电器运行状态、参数显示及启停控制正常；
- ④ 故障指示（声光报警）及历史故障记录调出显示功能正常；
- ⑤ 验证在发生如下情况时，系统能自动进入到安全状态：

- (a) 功率/能量管理系统 (PMS/EMS) 电源故障;
- (b) 功率/能量管理系统 (PMS/EMS) 可编程控制器故障;
- (c) 功率/能量管理系统 (PMS/EMS) 通讯故障;
- (d) FMEA分析报告中风险等级较高的其他故障。

(5) 直流综合电力系统的电源装置包含同步发电机组或异步发电机组时, 需进行以下项目:

① 由机旁控制箱、配电板和功率/能量管理系统 (PMS/EMS) 控制面板分别进行机组的启动和停止正常;

② 发电机组安全系统模拟效用试验;

③ 发电机组负荷试验, 对于变速运行发电机组, 则分别在最高转速和最低转速进行试验; 对于恒速运行发电机组, 则在额定转速进行试验;

④ 突加和突卸负荷试验, 对于变速运行发电机组, 则分别在最高转速和最低转速时进行试验, 对于恒速发电机组, 则在额定转速进行试验;

⑤ 并车和负荷转移试验, 对于变速运行发电机组, 则分别在最高转速和最低转速进行试验; 对于恒速运行发电机组, 则在额定转速进行试验。应尽实际可能为每台机组加载至100%负荷。若存在困难, 应至少加载并车总负荷等于推进电动机总功率或直流配电系统向船舶交流配电板提供的负荷 (两者取大者), 并经CCS同意;

⑥ 异步发电机组按照1.3.3.5 的规定进行出厂试验时, 还应进行《产品检验指南E-05发电机组》第8.4(9)至(15)的试验项目。其中, 对于电压整定范围、稳态电压调整率、电压波动率、瞬态电压变化率, 应考核变流器输出侧的直流电压;

⑦ 发电机组 (连同变流器) 并网预充电功能 (如有时) 正常;

⑧ 发电机组解列功能正常。

(6) 直流综合电力系统的电源装置包含储能装置时, 除应符合CCS《纯电池动力船舶检验指南》的适用要求外, 还需进行以下项目:

① 对每组储能装置 (连同变流器, 如有时) 的检查和启动/停止试验;

② 储能装置 (连同变流器, 如有时) 并网预充电功能 (如有时) 正常;

③ 逐一向直流母排投入每组储能装置 (连同变流器, 如有时) 时, 确认直流综合电力系统及在网储能装置处于正常状态;

④ 每组储能装置 (连同变流器, 如有时) 急停功能的检查和试验;

⑤ 储能装置 (连同变流器, 如有时) 并联带载运行及负载分配功能的检查和试验;

⑥ 岸基充电装置 (如有时) 操作、指示、联锁等功能的检查和试验;

⑦ 如电力负荷估算书中具有仅使用储能装置供电的工况时, 应考核储能装置承受负载突加/突卸的稳定供电能力, 可采用以下试验方法并提交试验报告经CCS同意:

(a) 在系泊试验时应进行突加和突卸负载试验, 选取对应工况下电力负荷估算书中最大额定功率/实际最大使用功率设备, 并结合系泊试验条件作为突加和突卸负载功率;

(b) 在航行试验时, 进行最大功率储能装置停机试验, 和停止一台推进电动机试验, 以考察系统的稳定性。

(7) 直流综合电力系统的电源装置包含燃料电池发电装置 (连同变流器) 时, 除应符合CCS《船舶应用燃料电池发电装置指南》的适用要求外, 还需进行以下项目:

① 对每组燃料电池发电装置 (连同变流器) 的检查和启动/停止试验;

② 燃料电池发电装置 (连同变流器) 并网预充电功能 (如有时) 正常;

③ 逐一向直流母排投入每组燃料电池发电装置 (连同变流器) 时, 应分别验证投入前直流母排有电和无电 (如适用) 等各类工况, 确认直流综合电力系统及在网燃料电池发电装置处于良好状态;

④ 燃料电池发电装置 (连同变流器) 并联带载运行及负载分配功能的检查和试验;

⑤ 确认燃料电池发电装置 (连同变流器) 在功率/能量管理系统 (PMS/EMS) 设定的最低稳定

输出功率的工况下能平稳运行30min。

(8)交流日用配电系统使用逆变器供电时，需进行以下项目：

① 逆变器的检查和启动/停止试验；

② 逆变器带载运行的检查和试验；

③ 两台逆变器之间相互转移供电，以及与其他交流电源装置（如有时）相互转移供电的试验，且转移过程中负载不断电；

(9)直流综合电力系统的负荷包含推进电动机时，除应符合CCS相关规范的适用要求外，还需进行以下项目：

① 在驾驶室操作面板、集控室（如有时）或机旁操作变频器分别进行推进电动机的启动和停止正常；

② 确认急停功能正常；

③ 模拟故障情况下越控功能正常；

④ 确认防冷凝加热器功能正常；

⑤ 模拟在网电源装置功率不足时，4.2.1.1 (8)功率限制功能有效。

(10)确认强弱电走线，强弱电接地回路、电缆布置等抗干扰设计满足第5章 第3节 的有关要求。

1.4.3 建造后检验

1.4.3.1 年度/中间检验：除应按CCS相关规范的适用要求进行检验外，尚应对下列项目进行检验：

(1)对构成直流综合电力系统的电气设备和电缆应尽实际可行在工作状态下进行总体检查；

(2)确认直流配电系统和交流日用配电系统对安全至关重要的电气设备处于良好的工作状态。检查备用电源自动供电的工作情况；

(3)检查连续监视系统绝缘电阻装置，在系统绝缘电阻异常低时应能发出报警（如适用）；

(4)对遥控、报警监测和安全系统进行总体检查。

1.4.3.2 特别检验：除应按CCS相关规范的适用要求和1.4.3.1 的要求进行检验外，尚应对下列项目进行检验：

(1)对直流配电系统和交流日用配电系统上的开关、仪表等进行检查，并对过载电流保护电器和熔断器（目视检查、测量接通电阻或类似方式）完好程度进行检查，以确认其对各自电路提供适当保护；

(2)确认保护电器保护的有效性和延时（如适用）设置正确；

(3)电源装置在工作负荷状态下作单机和并联运行试验，检查负载分配及转移功能；

(4)系统报警和安全系统功能应尽实际可行进行试验加以验证。

第2章 直流综合电力系统设计

第1节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 直流综合电力系统应能在船舶所有工况（包括航行、作业、进出港、停泊等）下，为船舶提供足够的电力。

2.1.1.2 直流综合电力系统应在所有正常工况和故障情况下，确保旅客、船员及船舶的安全，免受电气事故的危害。

2.1.1.3 采用直流综合电力系统的船舶，其安全性、可用性和可靠性应与使用常规交流配电系统的同类船舶相当。

2.1.1.4 直流综合电力系统电气设备的构造和安装方式，应能确保在正常运行时，人员无法意外接触其中的带电部件。

2.1.1.5 直流综合电力系统各配电支路均应设置隔离开关或类似措施，防止设备处于维护状态时，人员因意外接触带电部件造成伤害。推进电动机采用永磁电动机时，除设置隔离开关之外，应设置合适的措施（如锁轴装置等），避免在非推进状态下回馈的能量，在推进电机电气端口处产生的高电压危及人员安全。

2.1.2 电能质量

2.1.2.1 直流综合电力系统提供的电能质量应符合CCS《钢质海船入级规范》第4篇1.2.2-1.2.3或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第1章第3节的规定。

2.1.2.2 对于专用的直流配电系统，制造厂能提供文件证明全部直接连接到直流母排的设备能在更宽的电压波动范围和更高的纹波电压下长期无故障地运行，可不必满足2.1.2.1的要求。

第2节 直流配电系统设计要求

2.2.1 直流配电系统线制

2.2.1.1 直流配电系统可采用下列线制形式：

- (1) 双线绝缘系统；
- (2) 负极直接接地的双线系统（不采用船体作为负极回路）；
- (3) 中线直接接地的三线系统（不采用船体作为负极回路）；
- (4) 中线经高阻接地的双线系统。

2.2.1.2 设有蓄电池和超级电容器等电化学储能装置时，不应使用2.2.1.1 (2)和2.2.1.1 (3)的线制形式。

2.2.2 绝缘配电系统和经高阻接地配电系统应满足以下要求：

2.2.2.1 对地绝缘系统和经高阻接地系统，应设有连续监测直流配电系统绝缘电阻，且能在绝缘电阻异常低时发出听觉和视觉报警的绝缘监测装置。

2.2.2.2 对地绝缘系统和经高阻接地系统，如第一次接地故障发生时配电支路开关设备不断开，则系统应设计为，在第一次接地故障清除之前再发生第二次接地故障（与第一次接地故障不同极）时，开关设备能够断开此时的故障电流。

2.2.2.3 经高阻接地系统的接地电阻值的选择，应能实现以下功能：

(1) 限制系统单极接地故障时的故障电流和过电压水平，保障系统在单极接地故障下的短时连续运行，以及设备和人员安全；

(2) 发生单极接地故障时，流经接地电阻的电流的大小应确保能触发系统接地监测、报警或保护。

2.2.3 直流配电系统可采用下列两种配电拓扑形式：

2.2.3.1 集中式拓扑：直流母排应至少分成两个独立的分段，发电装置、储能装置、负载直接或经变流器均匀地连接于这些分段上，各分段直流母排由熔断器、断路器或固态开关等母联保护装置连接。正常情况母联保护装置合闸，形成公共直流母排向负载供电；在某段直流母排故障时，母联保护装置断开连接，隔离故障点后，其它直流母排可继续向负荷供电。

2.2.3.2 分布式拓扑：直流母排应至少分为两个独立的分段，发电装置、储能装置、负载直接或经变流器均匀地连接于这些分段上，各段直流母排通过母联接触器或隔离开关连接。正常情况母联接触器或隔离开关分闸，各分段直流母排独立运行向各自负载供电；在某段直流母排故障时，其它直流母排供电不受影响。

2.2.4 电源装置

2.2.4.1 作为船舶主电源的电源装置，其台数和容量应符合《钢质海船入级规范》第4篇2.1.1.1或《钢质内河船舶建造规范》第3篇3.1.2或《纯电池动力船舶检验指南》3.1.2的有关要求。

2.2.4.2 辅助系统（如冷却系统、润滑系统和监控系统等）的设计不应使得2.2.4.1中作为船舶主电源的电源装置和用于其备用的电源装置同时失效。

2.2.4.3 接入直流母排并联运行的电源装置应自动实现负荷分配，并确保各工况下并联运行的电源装置输出功率不超过各电源装置的最大可用功率。可以采用：

(1) 一台电源装置调节直流母排电压，所有其他的电源装置根据功率/能量管理系统调节电流；
或

(2) 基于电源装置自身（或通过变流器模拟）的电压下垂特性实现负荷分配。

当采用方式(1)实现并联及负荷分配时，系统应设置合适容量且以电压模式运行的电源装置，以确保系统全部电源装置的输出功率与当前负载功率的稳态和暂态需求相适应，避免对直流综合电力系统运行造成严重影响；同时应采取适当措施，以保证当调节直流母排电压的电源装置失效后，其余的电源装置可以正常工作。

2.2.4.4 变速运行发电机组应能在制造商规定的全部转速范围内(或转速点上)运行和并网发电。

2.2.4.5 并联运行的多台储能装置应通过变流器和保护电器接入直流母排；若各储能装置始终独立运行，则可经保护电器直接接入直流母排，不设置相应的变流器。

2.2.5 直流配电系统对变流器的设计要求

2.2.5.1 2.2.5.2 -2.2.5.7 适用于发电机整流器、储能装置接入变流器、变频器（推进或作业）、逆变器（日用）等直接连接直流母排的变流器。

2.2.5.2 变流器应能承受直流母排上可能出现的电压或电流的尖峰，应考虑正常和一切合理预见的异常情况下出现的状况，例如由于短路，保护设备动作所引起的电压尖峰，以及非故障区域恢复供电所引起的变流器的电流尖峰。

2.2.5.3 如使用能量可双向流动的变流器(如储能接入变流器、变频器或逆变器兼做整流器等)，应评估允许变流器双向流动的功率的大小，确保直流配电系统及其相连电气设备的安全运行。

2.2.5.4 在直流母排电压非常低时，如变流器启动过程出现的冲击电流较大以至于有安全隐患时，应设置预充电回路进行限制。

2.2.5.5 如发电机整流器的设计能防止直流母排向发电机组反向馈送电流，则可以替代发电机逆

功率保护。

2.2.5.6 变频器应采用储能装置、制动电阻或类似措施消耗或抑制推进电机制动能量（如推进电动机全速倒车产生的能量），避免直流配电系统电气设备由于泵升电压过高导致损害，或能提交证明文件，表明推进电机制动能量的回收不会导致直流母排电压泵升。在推进电动机正常电动状态运行时，泵升电压抑制电路不应启动。泵升电压抑制电路动作结束时，不应使直流母排电压降得过低，避免引起系统不稳定。

2.2.5.7 变频器可采用速度控制或转矩控制等方式驱动推进电动机，并应限制变频器的输出转矩或推进电动机最高转速，保证船舶航行及设备安全。

2.2.6 直流配电系统对岸电或其他外来电源的设计要求

2.2.6.1 岸电或其他外来电源供电电制和电压与直流配电系统的直流母排相匹配时，可经断路器等保护电器直接接入直流母排，否则需配置匹配的变流器。

2.2.6.2 不与电源装置并联（含短时并联转移负荷）的岸电或其他外来电源（直接或经变流器）接入直流母排应设置必要的联锁，以避免不当连接时对直流配电系统运行造成严重影响。

第3节 交流日用配电系统设计要求

2.3.1 一般规定

2.3.1.1 交流日用配电系统的供配电形式及绝缘监测，应符合《钢质海船入级规范》第4篇2.4.1-2.4.2或《钢质内河船舶建造规范》第3篇2.1.1的有关要求。

2.3.1.2 交流日用配电系统可通过逆变器与直流配电系统连接，也可自行配置交流发电装置和接入岸电。当直流配电系统与交流配电日用系统绝缘等级相差较大时，应设有隔离变压器。

2.3.1.3 交流日用配电系统电源装置主要包括交流同步发电机组和连接至直流配电系统的逆变器等。交流电源装置的台数和容量，应符合《钢质海船入级规范》第4篇2.1.1.1或《钢质内河船舶建造规范》第3篇3.1.2的有关要求。

2.3.1.4 辅助系统（如冷却系统、润滑系统和监控系统等）的设计不应使得2.3.1.3中电源装置和用于其备用的电源装置同时失效。

2.3.2 交流日用配电系统对逆变器的设计要求

2.3.2.1 逆变器之间，以及逆变器与交流发电机组之间切换供电时，应保证切换过程平稳、无冲击，且切换过程中日用交流负载不断电。

2.3.2.2 交流日用配电系统若仅由逆变器供电，在正常工况下，逆变器应采用恒压恒频控制策略；在发生交流系统短路故障时，逆变器应能立即响应从恒压恒频控制切换至恒流恒频控制，向交流日用配电系统提供指定幅值和恒定频率的短路电流，且持续时间不低于0.5s，用于交流日用配电系统保护电器识别和分断短路故障。

2.3.2.3 交流日用配电系统若由逆变器与交流同步发电机组并联供电，可由交流同步发电机组调节交流母排电压，逆变器根据功率/能量管理系统调节电流；必要时，无论交流同步发电机组是否投入，逆变器均应能够向交流日用配电系统提供稳定的电压和频率。

2.3.3 交流日用配电系统对岸电或其他外来电源的设计要求

2.3.3.1 岸电或其他外来电源供电电制和电压与交流日用配电系统的交流母排相匹配时，可经断路器等保护电器直接接入交流母排，否则需配置匹配的变压器或变流器。

2.3.3.2 不与电源装置并联（含短时并联转移负荷）的岸电或其他外来电源接入交流母排应设置

必要的联锁，以避免不当连接时对交流日用配电系统运行造成严重影响。

第3章 系统保护

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 直流综合电力系统的保护应能最大限度减少供电中断和设备损坏的可能性。

3.1.1.2 除满足本指南的要求外，系统保护还应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇第5节或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第2章第3节的要求。对于某些特定应用场合（如通航于急流航段，或设有动力定位系统的船舶等），还应符合相关规范中的特定要求（如CCS《钢质内河船舶建造规范》第8篇第2章2.2.13，CCS《钢质海船入级规范》第8篇第11章等）。

第2节 直流配电系统保护设计

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 直流配电系统可采用空气式框架或塑壳直流断路器、固态开关、直流熔断器等保护电器，结合保护策略设计，实现系统短路故障的快速分断与隔离，系统非故障部分恢复正常工作，不导致故障范围扩大。

3.2.1.2 对直流母排电压稳定性较为依赖的发电装置，如异步发电机组（含整流器），不宜使用直流断路器作为保护电器。

3.2.1.3 如不能提供必要的电流及适当的维持时间保持至直流配电系统保护电器动作时，电源装置（及其变流器）支路不应使用直流断路器作为保护电器。

3.2.1.4 直流配电系统出现短路故障时，应考虑在直流配电系统保护电器动作前，推进电机通过变频器反并联二极管向短路点放电的可能性，避免推进电机及变频器受损。

3.2.1.5 电源装置（含变流器）应设有过载保护和短路保护功能：

(1) 保护电器的过载保护整定值应根据电源装置（含变流器）的额定电流配置，并避开电源装置（含变流器）启动或并网时的冲击电流；

(2) 当电源装置（含变流器）内部出现短路故障时，应能立即停止运行，并断开电源装置（含变流器）与直流母排的连接，不应影响与其并联的其他电源装置的正常运行；

(3) 交流同步发电机组与整流器之间、交流整流发电机组与直流配电板之间的线路发生短路时，电励磁发电机应能够依靠差动保护或切断励磁停止输出实现保护功能；永磁同步发电机，应设置相应的保护，如通过定子绕组上的熔断器熔断实现保护功能，同时还应能够停止原动机的运行；

(4) 蓄电池、超级电容器和燃料电池与相应斩波器之间，或蓄电池、超级电容器与直流配电板之间的线路发生短路时，应能依靠蓄电池、超级电容器和燃料电池高压盒内部熔断器熔断实现保护功能；

(5) 电源装置的变流器至直流母排之间的保护电器动作时间应与变流器拓扑结构相适应，例如，在短路过程中，应能限制电源装置通过升压斩波器主电路二极管向短路点馈送短路电流的持续时间，或者通过变流器限流控制向短路点输出恒定短路电流的大小和持续时间，避免造成设备损坏。

3.2.1.6 除必要的维护外，直流配电系统配电支路上的隔离开关应始终保持在接通的状态，除非某一支路处于故障状态，或能提交证明文件，表明需断开的隔离开关不会影响系统的选择性保护。

3.2.1.7 直流配电系统的负载支路应设有短路瞬动保护。当该负载支路发生短路故障时，负载输入端保护电器应优先瞬动作，隔离故障后，其他配电支路均能继续正常供电。

3.2.2 短路保护原则

3.2.2.1 除3.2.2.2 -3.2.2.4 另有规定者外，直流配电系统的短路选择性保护应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.5.4或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇2.3.1.1的要求。

3.2.2.2 多段直流母排中的一段母排发生短路故障时：

(1) 不应使得本段母排上的电源装置和负载装置发生损坏；

(2) 保护装置应具备就地复位功能，如使用熔断器，其结构和布置应便于更换；

(3) 若系统采用集中式拓扑，断开母联保护装置，故障影响相邻段母排的持续时间和严重程度应予以限制，不应导致相邻段母排上各支路保护电器动作和设备停止运行。如无法避免相邻段母排上各支路保护电器动作和设备停止运行，应能在母联保护装置断开后立即自动恢复相邻母排上的供电和设备运行；

(4) 若系统采用集中式拓扑，母联保护装置建议采用固态开关(数十或数百 μs 动作并隔离故障)，若采用其他型式的母联保护装置时，应提交证明资料说明在任何工况下均能达到上述(3)同样的安全性和可靠性；

(5) 若系统采用分布式拓扑，则故障母排上所有在网电源装置配电支路的保护电器应动作，其他非故障母排供电不受影响。

3.2.2.3 任一电源装置(含变流器)输出端发生短路故障时：

(1) 应设置单独的短路保护，以限制短路对系统或设备的影响；

(2) 如故障支路电源装置为本段母排唯一在网的供电电源，因短路故障及保护动作后导致本段直流母排失电时，应能在失电后30s内自动启动备用电源装置(有条件者，如蓄电池组为备用电源装置时，宜在失电后0.5-20s内自动启动)，或经由相邻母排恢复该电源装置所在直流母排供电，最长不超过45s；

(3) 原则上除该故障电源装置所在配电支路保护电器动作(如为断路器，应为逆电流瞬动)之外，不应导致任何其他支路保护电器动作(不包括自动卸载非重要负荷等这一情形)。如出于限制故障影响范围等因素考虑，允许母联保护装置动作，以减少对相邻段母排的影响；

(4) 故障影响本段及相邻段母排的持续时间和严重程度应予以限制。在故障电源装置配电支路保护期间，本段母排及相邻段母排上的非故障设备，不应因直流欠压而停机或相应断路器欠压脱扣分闸，在故障电源装置配电支路保护电器动作完毕后，随着供电电压恢复而自动恢复正常工作；日用逆变器应具备3.3.1.4要求的低电压穿越能力，使得在故障电源装置配电支路保护电器动作期间，交流日用负载不断电。

3.2.2.4 任一负载(含变流器)输入端发生短路故障时：

(1) 应设置单独的短路保护，以限制短路对系统或设备的影响；

(2) 原则上除立即断开本负载支路保护电器动作(如为断路器，应为瞬动)之外，不应导致任何其他支路保护电器动作。如出于限制故障影响范围等因素考虑，允许母联保护装置动作，以减少对相邻段母排的影响；

(3) 故障影响本段及相邻段母排的持续时间和严重程度应予以限制，在故障负载支路保护期间，本段母排及相邻段母排上的非故障设备，不应因直流欠压而停机或相应断路器欠压脱扣分闸，在故障负载支路保护电器动作完毕后，随着供电电压恢复而自动恢复正常工作；日用逆变器应具备3.3.1.4要求的低电压穿越能力，使得在故障负载支路保护电器动作期间，交流日用负载不断电。

第3节 交流日用配电系统保护设计

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 交流电源装置的出口应配置保护电器，需设有过载保护和短路保护功能。

3.3.1.2 逆变器单独作为交流日用配电系统供电电源时，若发生交流短路故障，应按2.3.2.2 要求切换至恒流输出工况，恒流输出的电流有效值为逆变器额定交流电流有效值的2倍以上（以达到重要日用负载配电支路保护电器瞬动要求为原则设定），若持续恒流输出超过0.5s短路故障仍未被分断和隔离，应立即闭锁逆变器控制信号，限制逆变器输出。

3.3.1.3 逆变器与交流同步发电机组并联作为交流日用配电系统供电电源时，若发生交流短路故障，则主要依靠交流同步发电机组提供短路电流，逆变器在短路期间可参考3.3.1.2 以恒流输出运行。

3.3.1.4 逆变器应具有低电压穿越功能，低电压穿越时间应尽可能与短路保护动作响应时间相适应，使得在熔断器熔断及3.2.2.3 (3)和3.2.2.4 (2)规定的瞬动保护动作期间，交流日用负载不断电。一般的，逆变器应能在不高于50%负荷率的情况下，当发生直流侧电压跌落或掉电的时候，保持交流日用负载在30ms内不断电。

3.3.1.5 负载应设有短路保护功能，重要负载还应配置过载保护功能。

3.3.1.6 交流日用配电系统保护设计应实现重要电气设备和负载的完全选择性保护。

3.3.2 短路保护原则

3.3.2.1 交流日用配电系统短路保护电器的选择和选择性保护策略的设计，应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.5.3-2.5.4的要求或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第2章2.3.1和2.3.3的要求。

3.3.2.2 交流母排发生短路故障时：

(1) 不应使得本段母排上的电源装置和负载装置发生损坏；

(2) 向交流母排供电的电源装置的配电支路保护电器应动作；

(3) 若交流日用配电系统有多段交流母排，其中一段母排发生短路故障，若其他段交流母排上有电源装置供电，应优先断开母联保护装置，避免其他段母排上各支路保护电器动作和设备停止运行。

3.3.2.3 任一电源装置输出端发生短路故障时：

(1) 应设置单独的短路保护，以隔离短路故障，限制短路对系统或设备的影响；

(2) 如电源装置为交流日用配电系统中唯一在网的供电电源，因短路故障及保护动作后导致交流母排失电时，应能在失电后30s内自动启动备用电源装置（有条件者，宜在失电后0.5-20s内自动启动），恢复交流日用配电系统供电，最长不超过45s；

(3) 如交流日用配电系统还有其他并联运行的电源装置，则除故障电源装置所在配电支路保护电器瞬动之外，不应导致任何其他支路保护电器动作（不包括自动卸载非重要负荷等这一类情况）。

3.3.2.4 任一负载输入端发生短路故障时：

(1) 应能立即自动断开本负载配电支路的保护电器（瞬动），确保短路故障快速切除，不导致交流母排电力中断和其他支路保护电器动作。

第4节 短路电流计算和保护电器选择

3.4.1 短路电流计算

3.4.1.1 可根据附录1或CCS接受的标准^①计算直流综合电力系统各处短路电流值，并与过电流保护电器的时间-电流特性曲线进行比较，以确定保护电器的整定值。应按照3.4.4.3 的要求在首次设计阶段对比短路计算及选择性保护分析的仿真结果与试验结果的一致性。

3.4.1.2 直流综合电力系统应进行短路计算并提交计算书，应包括仿真模型、计算方法和计算结果，并提交最大短路电流和最小短路电流计算数值。

^①如 IEC 61660《变电站和发电厂直流辅助电源系统短路电流》和 IEEE 946《固定式应用直流电源系统设计的推荐规程》。

3.4.2 保护电器的选择

3.4.2.1 直流综合电力系统及其电气部件，应符合下列规定：

- (1) 应适应所在场所的环境条件；
- (2) 额定电压应与所在回路标称电压相适应；
- (3) 额定电流不应小于所在回路的计算电流；
- (4) 应满足短路条件下的动稳定与热稳定的要求；
- (5) 用于断开短路电流的保护电器应满足短路条件下的接通能力和分断能力的要求。

3.4.2.2 直流配电系统的导体及保护电器选择应符合3.4.2.4 -3.4.2.9 的要求。

3.4.2.3 交流日用配电系统的导体及保护电器选择应符合CCS《钢质海船入级规范》第4篇第2章第5节2.5.3或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第2章第3节的要求。

3.4.2.4 导体与汇流排

- (1) 导体及汇流排的长期允许电流不应小于该回路的持续工作电流；
- (2) 校验导体及汇流排动稳定和热稳定所用的短路电流，应满足安装位置最大预期短路电流的要求。

3.4.2.5 直流隔离开关选择

- (1) 隔离开关额定电压不应低于系统的最高工作电压；
 - (2) 隔离开关的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流；
 - (3) 校验隔离开关动稳定和热稳定所用的短路电流，应满足安装位置最大预期短路电流的要求。
- 回路短路电流持续时间内，短路电流的时间电流特性曲线在隔离开关电流耐受曲线范围内，即短路电流作用下隔离开关不粘接、不起火、不爆炸。

3.4.2.6 快速熔断器选择

- (1) 快速熔断器的额定电压不应低于系统的最高工作电压；
- (2) 快速熔断器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流；
- (3) 校验快速熔断器的开断电流，应满足安装位置所应分断的最大预期短路电流的要求；
- (4) 快速熔断器弧前 I^2t 值应符合：分别在最大/最小运行方式各典型故障下计算系统短路电流及其总 I^2t 值，故障回路熔断器熔断时，每一非故障回路短路电流总 I^2t 值应小于其快速熔断器弧前 I^2t 值的一半；
- (5) 快速熔断器总 I^2t 值应符合：分别在最大/最小运行方式下各典型故障下计算系统短路电流及其总 I^2t 值，故障回路熔断器熔断时，回路时间电流特性曲线在本回路隔离开关电流耐受曲线范围内；
- (6) 快速熔断器应为螺栓式熔断器，当采用其他型式的熔断器时，应提供资料证明这种安装方式增加的接触电阻不会影响系统的选择性。

3.4.2.7 直流断路器选择

- (1) 直流断路器的额定电压不应低于系统的最高工作电压；
- (2) 直流断路器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流；
- (3) 在校核直流断路器的开断能力时，宜取断路器实际开断时间的短路电流作为校验条件；
- (4) 直流断路器的额定短路接通电流，不应小于短路电流最大冲击值；
- (5) 在上、下级保护装置均为断路器的配电系统中，应对上级和下级断路器的短路电流整定值和（或）短延时整定值进行协调设计，以保证在同一故障电流作用下，上级和下级断路器具有保护选择性。如断路器仅依靠短路电流瞬时值进行整定，则上级断路器的短路电流整定值应大于下一级断路器可能流过的最大短路电流；如断路器还设有短延时脱扣器，则下级断路器的全分断时间应小于上级断路器的可返回时间。可采用以下原则：

① 直流母排的母联断路器配置短延时保护，发生短路故障时，母联断路器应能够动作，隔离故障，保证非故障侧母排和负载受短路故障的影响程度符合3.2.2.2 -3.2.2.3 的规定；

② 直流电源装置输出断路器宜配置短延时保护和逆电流瞬动保护。其中，短延时保护的延时时

间应大于母联断路器的保护返回时间；逆电流瞬动保护用于直流电源装置与直流母排之间发生短路时的快速隔离故障；

③ 负载输入端断路器配置瞬动保护，用于快速隔离故障，保护负载设备免受较大的短路电流冲击。

(6) 在选择性保护要求的时间内，断路器应具有能承载安装处的短路电流而不分断的能力。

3.4.2.8 固态开关选择

(1) 固态开关的额定电压不应低于系统的最高工作电压；

(2) 固态开关的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流；

(3) 固态开关应能承受任何一对端子之间的最高峰值电压，必要时应装设过电压吸收装置；

(4) 固态开关的控制电路应具备联锁和延时功能，以防止双向电力电子开关引起的正负极之间短路；

(5) 固态开关应能承受正常工作期间可能出现的过电流；

(6) 固态开关应能可靠分断短路电流，且分断时的 di/dt 不超过产品技术文件的限值。

3.4.2.9 直流接触器选择

(1) 直流接触器的额定电压不应低于系统的最高工作电压；

(2) 直流接触器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流；

(3) 直流接触器的断流能力不应小于最大可能的过负荷电流；

(4) 校验直流接触器动稳定和热稳定所用的短路电流，应满足安装位置最大预期短路电流的要求。回路短路电流持续时间内，时间电流特性曲线在直流接触器电流耐受曲线范围内，即短路电流作用下直流接触器不粘接、不起火、不爆炸。

3.4.3 选择性保护分析

3.4.3.1 直流综合电力系统应进行选择性保护分析并提交报告。

3.4.3.2 直流配电系统的选择性保护分析，应逐一分析直流配电系统发生3.2.2.2、3.2.2.3、3.2.2.4故障时系统保护电器动作情况和系统受影响范围。应基于短路电流计算和保护电器选择，对故障切除情况、非故障支路运行情况、母线是否失电、母线电压波动情况等进行分析，确认其符合3.2.2 短路保护原则。

3.4.3.3 交流日用配电系统的选择性保护分析，应基于逆变器恒流输出电流及保护电器时间-电流特性曲线，逐一分析交流日用配电系统发生3.3.2.2、3.3.2.3、3.3.2.4故障时系统保护电器动作情况和系统受影响范围，进行各级保护电器协调动作分析，确认其符合3.3.2 短路保护原则。

3.4.4 首次安装系统的试验和验证

3.4.4.1 已获得CCS原则认可的直流配电系统首次安装于CCS入级船舶上，无需进行3.4.2.2-3.4.2.3规定的试验和验证。

3.4.4.2 直流综合电力系统安装上船之前，制造商应进行如下试验，且应由CCS验船师到场见证，以验证其系统保护的合理性，经验船师签署的报告应上传至CCS产品检验发证系统。

(1) 直流配电系统直流母排正负极间短路。该故障情况下，连接故障母排分段的母联保护装置（若有时）动作、直流电源装置停机或其配电支路保护电器动作，非故障母排分段能够不受影响或在母联保护装置动作后立即自动恢复供电和设备运行；电源装置和负载装置不发生损坏；

(2) 直流配电系统电源装置（含变流器）输出端正负极间短路。该故障情况下，故障电源装置配电支路保护器件应动作，故障电源装置对应直流母排分段应能在45s内恢复供电（如发生失电时）；日用逆变器应在低电压穿越期间保证交流负载不断电；电源装置和负载装置不发生损坏；

(3) 直流配电系统负载装置（含变流器）输入端正负极间短路。该故障情况下，故障负载支路保护器件应动作；日用逆变器应在低电压穿越期间保证交流负载不断电；电源装置和负载装置不发生

损坏；

(4)交流日用配电系统交流母排三相短路。该故障情况下，连接故障交流母排分段的母联保护装置（如有时）、交流电源装置停机或其配电支路保护电器动作；非故障交流母排分段若有电源装置供电时，在母联保护装置动作后可立即自动恢复供电和设备运行；电源装置和负载装置不发生损坏；

(5)交流日用配电系统电源装置输出端三相短路。该故障情况下，故障电源装置配电支路保护器件应动作；故障电源装置对应交流母排应能在45s内恢复供电（如发生失电时）；电源装置和负载装置不发生损坏；

(6)交流日用配电系统负载输入端三相短路。在该故障情况下，故障负载支路的保护电器应动作，交流母排及其它负载供电不受影响；电源装置和负载装置不发生损坏；

上述试验若在上船安装之前因设备配套原因无法完成，允许在系泊航行试验中进行。

3.4.4.3 直流综合电力系统制造商应基于3.4.4.2 的试验，提交1.2.1.1 (4)所要求的文件以证明其短路电流仿真计算和选择性保护分析的正确性。该文件应至少包括3.4.4.2 所规定试验的试验方法、试验结果和故障电流波形图，并与仿真计算所得波形图对比。

第4章 控制和监测

第1节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 直流综合电力系统的控制和监测应基于系统设计原理和各设备组件功能而设置，以保证船舶电网的供电连续性和船舶推进系统的可靠运行。

4.1.1.2 应对直流综合电力系统中各电源装置、直流配电板、交流配电板、变流器、推进电动机、保护电器等状态进行监控，并指示出现故障的子系统或设备。

4.1.2 监测和报警要求

4.1.2.1 直流综合电力系统应至少设置表4.1.2.1 要求的报警和显示项目。这些项目应在机舱集控室(如无集控室，在机旁)设置，经CCS同意，可设置与表中项目等效的报警和显示；在驾驶室设置安全动作报警，发电机、推进电动机、推进变频器的组合报警以及部分重要参数和数据的显示。

直流综合电力系统监测和报警

表 4.1.2.1

系统	监测参数	报警	显示	自动停车	备注
发电机	轴承润滑油进口压力低或轴承温度高	√	√	√	原动机自动停机
	电压(高/低)	√	√		读取所有相；异步发电机不适用
	频率或转速(高/低)	√	√		仅对交流发电机
	电流		√		读取所有相；异步发电机不适用
	功率		√		
	定子绕组温度高	√	√		读取所有相；发电机功率>500kW
	发电机主开关断开/闭合		√		适用于不经过变流器与直流母排直接连接的情况
	发电机运行		√		
	在网发电机故障	√			
	发电机冷却介质温度高	√	√		如适用时
	发电机冷却泵或风机故障	√			如适用时
	励磁电流		√		异步发电机不适用
换向极绕组温度高	√	√		仅对直流发电机	
推进电动机	轴承润滑油进口压力低或轴承温度高	√	√	√	
	电压(高/低)	√	√		读取所有相。对于变频器控制的推进电动机，可用变频器的输出来替代。
	频率(高)	√	√		仅对交流推进电动机。对于变频器控制的推进电动机，可用变频器的输出频率来替代。
	电枢电流		√		读取所有相
	励磁电流		√		异步电动机不适用

	定子绕组温度高	√	√		读取所有相；电机功率>500kW
	电动机开关断开/闭合		√		适用于不经过变流器与直流母排直接连接的情况，以及 2.1.1.5 永磁同步电动机隔离开关状态。
	电动机运行		√		
	电动机超速	√	√	√	
	在网电动机故障	√			
	电动机冷却介质温度高	√	√		如适用时
	冷却泵或风机故障	√			如适用时
	换向极电流		√		仅对直流推进电动机
燃料电池/锂电池/超级电容器的变流器	电压		√		
	电流		√		
	过载（大电流）	√			
	充放电指示		√		适用于锂电池/超级电容器
	与 BMS 通讯状态（正常/故障）	√	√	√	适用于锂电池/超级电容器
	外部紧急切断请求	√		√	
	配电开关断开/闭合位置		√		
	变流器冷却介质温度高	√	√		如适用时
	变流器冷却泵或风机故障	√			如适用时
	电抗器温度高	√	√		安装电抗器时
滤波电路保护脱扣	√			如适用时	
发电装置整流器/变频器	电压		√		测量变流器输出侧；发电装置整流器输出侧频率免设。
	电流		√		
	频率		√		
	过载（大电流）	√			
	配电开关断开/闭合位置		√		
	外部紧急切断请求	√		√	
	变流器功率器件温度高	√	√		
	变流器滤波元件温度高	√	√		
	变流器冷却介质温度高	√	√		如适用时
	变流器冷却泵或风机故障	√			如适用时
变流器滤波电路保护脱扣	√			如适用时	
日用逆变器	输入直流电压		√		
	直流电压低	√		√	与低电压穿越时间相协调
	输出交流电压		√		
	输出交流电流		√		
	输出交流频率		√		
	过载（大电流）	√			
	配电开关断开/闭合位置		√		
	逆变器冷却介质温度高	√	√		如适用时
	逆变器冷却泵或风机故障	√			如适用时
	电抗器温度高	√	√		

	滤波电路保护脱扣	√			如适用时
	预充磁故障	√			如有时
直流 配 电 板	母排电压(高/低)	√	√		每一分段
	母排功率		√		显示总功率和可用功率
	母排绝缘电阻(正常/异常)	√			每一分段
	重要负载支路电流		√		
	配电板冷却系统综合故障	√			
	配电板内冷却系统介质泄漏	√			如适用时
	母排母联保护装置动作	√			
	发电机/负载保护电器(熔断器或直流断路器等)动作	√			
	能量管理系统综合故障	√			
	母排预充电失败	√			适用于需预充电时
交流 日 用 配 电 板	母排电压(高/低)	√	√		每一分段
	母排频率		√		每一分段
	母排绝缘电阻(正常/异常)	√			每一分段
	重要负载支路电流		√		
	母联保护装置断开/闭合位置及动作	√	√		如适用时
	逆变器/发电机支路保护电器断开/闭合位置及动作	√	√		
	重要负载支路保护电器断开/闭合位置及动作	√	√		
其他	励磁电路接地故障	√			无励磁系统和额定功率小于500kW的电机励磁电路, 可免设
	主推进电路接地故障	√			

注: 当使用天然气、甲醇、乙醇、氨、氢或其他燃料的燃料使用设备作为发电装置或发电机的原动机时, 其监测和报警项目还应符合 CCS《船舶应用天然气燃料规范》或《船舶应用甲醇/乙醇燃料指南》或《船舶应用氨燃料指南》或《船舶应用燃料电池发电装置指南》等相应规范的有关要求。

4.1.2.2 储能装置作为直流综合电力系统的电源时应设置电池管理系统。铅酸等蓄电池的管理系统应至少具备对电压、放电电流、电池温度和电池内阻的监测功能。锂电池(包括能量型超级电容)的管理系统应符合 CCS《纯电池动力船舶检验指南》的要求。

第2节 功率/能量管理系统(PMS/EMS)设计要求

4.2.1.1 直流综合电力系统应设置功率/能量管理系统(PMS/EMS), 以保证在船舶正常操作工况供给足够的电力, 至少具有以下功能:

(1) 电源装置的启/停管理、电源装置并网/解列、负载功率分配、自动卸载非重要负荷; 功率/能量储备分析、重载询问;

(2) 功率/能量管理系统(PMS/EMS)应能监测电源装置备车状态, 仅能在其备车完毕的情况下进行自动启动和运行;

(3) 如多个电源装置设置了自动启动, 功率/能量管理系统(PMS/EMS)应能控制其启动顺序,

当某一电源装置启动失败次数超过了启动装置允许的次数时，功率/能量管理系统（PMS/EMS）应能发出报警，并自动切换到启动下一顺位的电源装置；

(4) 如设有变速运行发电机组，功率/能量管理系统（PMS/EMS）在计算当前系统的负荷率时，应考虑变速运行发电机组在不同运行转速下可用功率差异；

(5) 如设有燃料电池发电装置，功率/能量管理系统（PMS/EMS）应根据负载需求调整其并网数量，在满足燃料电池发电装置最低稳定功率的前提下，尽量使其工作在高效率运行区间；

(6) 能根据储能系统的荷电状态实时核算其可用功率和可用电量；

(7) 对储能系统充放电实施控制；

(8) 应具有功率限制功能，当一台或一组电源装置故障停机后，能立即限制推进功率，不会导致其他在网电源装置过载跳闸而造成全船失电，待系统动态过程恢复后再解除推进功率的限制，调节推进负载至合适的需求功率值；

(9) 应能监测直流综合电力系统故障，当使得非故障段线路上的系统和设备供电中断时，应能自动执行3.2.2.2 (3)、3.2.2.3 (4)、3.2.2.4 (3)和3.3.2.3 (2)等类似措施恢复系统和设备供电。

第5章 电磁兼容

第1节 一般规定

5.1.1 一般要求

5.1.1.1 直流综合电力系统的电气设备和电子设备应符合CCS接受的标准^①的有关要求。

5.1.1.2 直流综合电力系统电磁兼容设计的目标是确保系统自兼容,即系统内各设备能在确保直流综合电力系统性能的情况下协同工作,并在船舶电磁环境中能与其他系统(通信、导航、智能化等)相互兼容,在各工况下系统均能正常工作。

5.1.1.3 除另有规定外,本章适用于直流综合电力系统中各电气装置的布置和安装。

第2节 电磁兼容设计和分析要求

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 直流综合电力系统装船时应进行电磁兼容设计和分析。应按照不低于CCS接受的标准^①对直流综合电力系统进行分析和评估,需要分别评估外界电磁环境对系统的影响和系统内部自身强弱电设备间的互相影响(自兼容),并形成电磁兼容分析和设计报告,用以指导电磁兼容抗干扰设计,保证船舶系统的安全性和可靠性。

5.2.1.2 电磁兼容分析和设计报告应至少涵盖系统说明、电磁环境分析、主要设备(系统)电磁兼容特性、主要电磁兼容设计措施及预期效果等内容,可参考附录2模板,其一般包括:

(1)直流综合电力系统的电磁环境分析,应考虑直流综合电力系统在整个生命周期相关的所有可预见的电磁环境,包括综合电力系统内的电磁环境及综合电力系统面临的船舶电磁环境,用于确立系统中各设备遵循的标准限值。

(2)直流综合电力系统的主要设备(系统)电磁兼容特性,包括主要设备(系统)的干扰特性和主要设备(系统)的抗扰度特性,优先采用实测数据,在没有实测数据的情况下,也可以采用根据设备工作原理的分析计算结果。在设备厂商提供的这些数据基础上,应在电磁兼容分析报告中应根据这些数据建立的电磁干扰矩阵,对系统中的电磁兼容风险进行预判。

(3)电磁兼容设计措施用于消除电磁兼容风险,这些措施包括系统布局、线缆布置、滤波设计、屏蔽设计、接地设计等,应确保这些措施固化在产品中,不会对直流综合电力系统和船舶其它系统产生负面影响,并应考虑与其安装、布置、操作、维护以及软件更新相关的潜在风险。在电磁兼容分析和设计报告中应对这些措施的安装位置、设计要求等提供说明框图。本项可分为设备电磁兼容设计措施和系统电磁兼容设计措施,可由设备厂商和船舶设计院共同完成。

5.2.1.3 应尽可能从空间布局、频率分配等总体设计上消除风险,不能完全通过总体设计消除的风险,应结合电磁兼容试验进行评估,确保风险可控。

第3节 抗干扰设计原则

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 设备布置时,在包含大功率设备的舱室中,应做好强弱电分区布置。敏感的电子设备,

^①参见 IEC 60533 《船舶电气设备和电子设备的电磁兼容性》。

不应布置在可能成为电磁干扰源的设备附近，如电动机、整流器、变频器、逆变器、变压器、开关柜等。

5.3.1.2 强、弱电走线分开，以减小强电部分对弱电控制部分的辐射干扰。电子设备的信号线缆应距可引起干扰的其他强电设备不少于1m，距荧光灯不少于0.13m。若因空间限制无法满足上述线缆间距要求，则需对信号线缆采取屏蔽等防护措施。若特殊情况下，强弱电无法分离，则应从系统设计上采取分频分时工作等措施避免干扰。

5.3.1.3 强电设备（如变频器、推进电机等）和弱电设备（如控制器、交换机等）分别设置接地点，接地点应做好防腐蚀设计。电子设备中的信号电路应接地，并与强电回路完全独立，避免强电设备对弱电设备的干扰。交流电路线缆不应与信号接地线紧贴或近距离平行敷设，相距不应小于0.3m，交叉时宜成直角。

5.3.1.4 大功率设备机柜应使用金属板制作，金属板材料可根据所要屏蔽的干扰性质（磁场、电场）选择，以提供相应的屏蔽效能，柜门和柜体之间采用电磁兼容屏蔽封条，以保证连续导电界面，减小电磁场的泄漏。进风口、显示屏等较大开口处内侧可以装波导通风板或屏蔽网，波导通风板与屏蔽网等均应与柜体保持良好的电气连接，输入、输出大功率电缆应通过填料函与柜体相连，其屏蔽层通过填料函与柜体相连。

5.3.1.5 电缆布置应遵循CCS《钢质海船入级规范》第4篇第2章或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第11章相关规定；大功率电缆应成束对称布置，从而减小电缆向外产生的辐射干扰；弱信号线路应加屏蔽并在两端接地，在经过高电压（ $\geq 1000\text{V}$ ）大功率（ $\geq 100\text{kW}$ ）环境时，宜使用光纤传输。

5.3.1.6 布置在不同舱室的弱电设备，如不能排除各个舱室距离较远使得信号地电位存在电位差的可能性，它们之间宜采用光缆或者数字通信信号联系，避免由于电位差和空间电磁场干扰带来的影响。

5.3.1.7 为避免共模干扰的影响，交流日用配电系统与直流配电系统之间宜设有2.3.1.2 要求的隔离变压器，或对关键弱电设备采用隔离变压器供电。

第6章 故障模式和影响分析

第1节 一般规定

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 直流综合电力系统应进行故障模式和影响分析（FMEA）。FMEA技术可以用来分析单一故障不会导致不可接受的后果。

6.1.1.2 直流综合电力系统的FMEA分析，应考虑直流综合电力系统在整个生命周期相关的所有可预见的故障和风险。应确保安全措施能涵盖所有由于发电装置、储能装置、变流器、直流配电板、交流配电板、推进电机、功率/能量管理系统（PMS/EMS）等在任何合理并可预见的故障发生时对船舶产生的影响，特别应考虑与其安装、布置、操作、维护以及软件更新相关的潜在风险。

6.1.1.3 故障模式和影响分析应按照不低于CCS接受的标准^①对直流综合电力系统各组件进行分析和记录，应至少涵盖单个核心部件失效、加热/冷却系统失效、控制电源失效、接地故障、短路故障、电力来源失效、人员操作的影响、天气的影响、非预计发生的化学反应、起火、爆炸和断电。评估应确保尽可能消除风险，不能消除的风险应尽可能地予以减轻。

^①参见 IEC 60812 《失效模式和影响分析 (FMEA 和 FMECA)》。

附录1 短路电流计算及保护校核方法

第1节 一般规定

1.1 一般要求

1.1.1 本附录适用于船舶直流综合电力系统短路电流计算及保护校核。

1.1.2 本附录提供一种普遍适用的短路建模仿真计算和保护校核方法以供参考，其计算结果可用作：

- (1) 校核所选用保护电器的短路接通能力和短路分断能力；
- (2) 校核汇流排等元件的电动力稳定性和热稳定性；
- (3) 校核直流综合电力系统保护设计和整定的准确性；
- (4) 为在必要时选择适当的限流设备，以能将短路电流限制在保护电器的能力范围之内提供依据。

1.1.3 设计方可根据具体情况采用其他计算方法，但应保证短路计算与第3章 3.4.4 试验结果的吻合精度。

1.1.4 完整的短路电流计算应能提供系统在典型位置发生短路时，在不考虑保护器件动作情况下，短路点电流、各短路电源提供短路电流随时间变化的细节。直流综合电力系统一般采用建模仿真方法，系统建模应根据系统拓扑结构及不同工况下投入的设备，构建直流综合电力系统仿真模型，选用目前已成熟应用的商业化电力电子和电力系统电磁暂态仿真软件进行短路计算。

1.1.5 对于以熔断器为主要保护电器的电力系统，应能准确计算从短路发生后10ms内的短路故障电磁暂态过程，仿真计算步长宜不超过0.5 μ s；对于以断路器为主要保护电器的电力系统，应能准确计算从短路发生后200ms内的短路故障电磁暂态过程，仿真计算步长宜不超过50 μ s。

1.1.6 计算所需要的电气设备、电缆等的各项特征参数，应由产品制造厂提供，并保证足够的精确度。短路回路的电阻和电感也可以通过在实际系统上测量确定。在计算短路电流时，可不考虑负荷电流。

1.1.7 对于首次安装系统，应按照第3章 3.4.4 进行试验验证；依据试验结果对模型进行修正，并在后续安装系统中使用校正后的数据。

1.1.8 应计算系统在最大和最小运行方式下的短路电流：

- (1) 系统最大运行方式下的短路电流，用于校验电气设备的动稳定、热稳定及分断能力；
- (2) 系统最小运行方式下的短路电流：用于校验保护器件的保护整定值和灵敏度。

1.1.9 在计算系统最大运行方式下的短路电流时，应考虑以下的操作和运行条件：

- (1) 导体电阻为20 $^{\circ}$ C的值；
- (2) 忽略各汇流排、电压互感器阻抗及导体之间连接点的接触电阻；
- (3) 动力电池组处于充满状态对应的额定容量（SoC为100%）；
- (4) 需考虑熔断器及其他保护变流器（如斩波器、逆变器等）的限流作用。

1.1.10 在计算系统最小运行方式下的短路电流时，应考虑以下的操作和运行条件：

- (1) 导体电阻为最高运行温度的值（短路结束时的导体温度，由于熔断器保护动作迅速，如无实测值，可以使用导体电阻为20 $^{\circ}$ C的值）；
- (2) 考虑各汇流排通过螺栓相互连接的接触电阻；
- (3) 动力电池组处于放电终止电压对应的容量；
- (4) 需考虑熔断器及其他变流器（如斩波器、逆变器等）的限流作用。

第2节 直流配电系统的短路计算与保护校核方法

2.1 计算条件及假设

2.1.1 本节短路计算与保护校核适用于双线绝缘系统发生正负极间短路的情形。

2.1.2 在计算直流综合电力系统短路电流时，考虑以下设备作为短路电源^①：

- (1) 交流同步发电机+可控整流；
- (2) 交流整流发电机（多相交流同步发电机+多相不控整流）；
- (3) 动力电池组（或超级电容）、燃料电池及其接入DC/DC变流器；
- (4) 变频器+推进电动机（如直流配电系统短路时可向直流母排馈送短路电流）；
- (5) 其它接入直流母排的变流器^②。

2.1.3 应根据系统特点选择全部可能出现的短路点，一般应包括：

- (1) 电源装置（含变流器）输出端极间短路故障；
- (2) 直流母排及母排连接线缆极间短路故障；
- (3) 负载装置（含变流器）输入端正负极间短路故障等。

2.1.4 本节短路计算采用了下列假设：

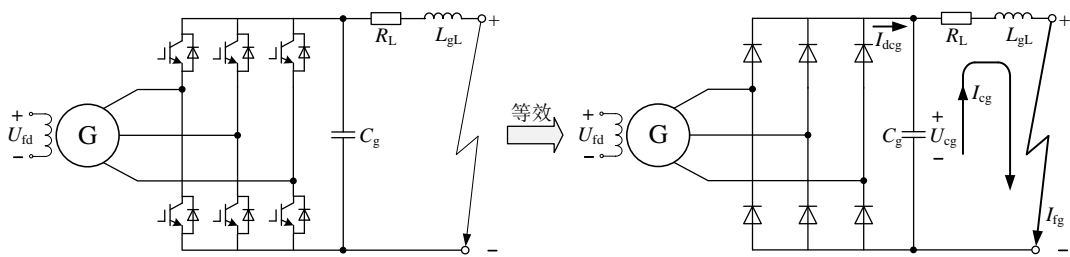
- (1) 忽略不计短路电弧阻抗、直流配电系统中的所有对地电容；
- (2) 短路期间短路电流的传递路径不变；
- (3) 短路在正负极间同时发生。

2.2 主要电气设备的建模计算方法

2.2.1 发电装置及接入变流器的建模

- (1) 三相交流同步发电机+三相可控整流器

该模型适用于三相交流同步发电机组经三相PWM整流器供电的直流配电系统。当发生直流配电系统正负极间短路时，PWM整流器会立即封锁脉冲，PWM整流器可等效为三相不控整流器，如图2.2.1-1所示。短路点的短路电流 I_{fg} 由两部分组成：1) 短路发生后瞬间直流侧支撑电容 C_g 向短路点放电电流 I_{cg} ；2) 当电容电压 U_{cg} 降至低于交流发电机线电压峰值时，三相不控整流器导通，发电机经不控整流器向短路点放电并提供短路电流 I_{dcg} 。



- ① 1.对于采用异步发电机/电动机加上可控变流器的支路，可以认为无法向直流母排馈送短路电流。
2.永磁同步电动机工作在发电状态，在短路故障发生时，应考虑向直流母排馈送短路电流。
3.异步电动机交流侧短路发生变流器模块短路时，主要电流是无功电流，可以认为对直流母排没有影响。
4.储能装置（蓄电池或超级电容器）和燃料电池加上变流器的支路，当储能装置或燃料电池输出端短路时，可依靠其自身短路保护电器进行保护，同时变流器触发瞬动保护，可以认为对直流母排没有影响。
5.储能装置（蓄电池或超级电容器）和燃料电池加上变流器的支路，当变流器后端发生短路时，应考虑当直流母排电压跌落到小于储能装置或燃料电池输出电压时，储能装置或燃料电池通过变流器开关器件反并联二极管向直流母排馈送短路电流的可能性。
- ② 直流母排系统中的变流器，如内部设置电容器时，应在系统保护的设计中，应考虑其对短路电流的贡献。如变流器支路上安装了隔离开关，安装在变流器和直流母线之间的隔离开关应始终保持在接通的状态，除非某一支路处于故障状态，或能提交证明文件，表明需断开的隔离开关不会影响系统的选择性保护。

图 2.2.1-1 三相交流同步发电机+三相可控整流器的原理图及等效电路图

图2.2.1-1中， R_L 为整流器输出电缆导体电阻； $L_{g1}=L_L+L_g$ ， L_L 为整流器输出电缆导体电感， L_g 为整流器输出串联的限流电感（如有时）。

采用商业仿真软件自带的三相交流同步发电机、二极管等元件的仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的同步发电机模型（Synchronous Machine）、二极管模型（Power electronic switch）等，可搭建图2.2.1-1所示三相交流同步发电机+三相可控整流器的等效电路模型。

(2) 十二相交流整流发电机

该模型适用于十二相交流整流发电机组直接供电的直流配电系统。十二相交流整流发电机将十二相交流同步发电机、十二相不控整流器集成于一体。当发生直流配电系统正负极间短路时，十二相交流发电机立即经十二相不控整流器向短路点提供短路电流，此时可认为十二相交流发电机的4套三相定子绕组完全对称，可将其等效为4台相同参数的三相交流同步发电机分别串联移相变压器的电路，如图2.2.1-2所示。其中，三相发电机电气参数与十二相发电机电气参数之间的定量关系如下：

① 定子电路参数关系：每台三相发电机的定子电压和电流的实际值、基准值分别与十二相发电机定子单个三相绕组相应参数的实际值、基准值相等。即：每台三相发电机定子电路参数的标幺值与十二相发电机定子单个三相绕组电路参数的标幺值相等。

② 转子电路参数关系：每台三相发电机的励磁电压的实际值、转子绕组（含励磁绕组、D轴和Q轴阻尼绕组、Q轴稳定绕组）电流的实际值分别与十二相发电机励磁电压的实际值及转子相应绕组电流的实际值相等；每台三相发电机励磁电压的基准值与十二相发电机励磁电压的基准值相等；每台三相发电机转子绕组（含励磁绕组、D轴和Q轴阻尼绕组、Q轴稳定绕组）电流的基准值是十二相发电机转子相应绕组电流基准值的4倍。即：每台三相发电机励磁电压的标幺值与十二相发电机励磁电压的标幺值相等，每台三相发电机转子绕组（含励磁绕组、D轴和Q轴阻尼绕组、Q轴稳定绕组）电流的标幺值是十二相发电机转子相应绕组电流标幺值的1/4，每台三相发电机转子绕组（含励磁绕组、D轴和Q轴阻尼绕组、Q轴稳定绕组）电阻、电抗的标幺值是十二相发电机转子相应绕组电阻、电抗标幺值的4倍。

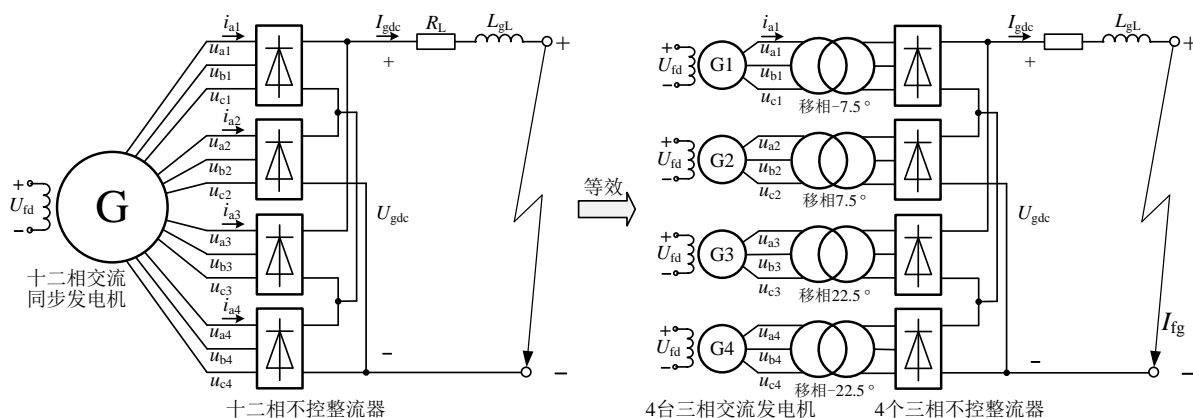


图 2.2.1-2 十二相交流整流发电机的原理图及等效电路图

图2.2.1-2中， R_L 为十二相交流整流发电机输出电缆导体电阻； $L_{g1}=L_L+L_g$ ， L_L 为十二相交流整流发电机输出电缆导体电感， L_g 为十二相交流整流发电机输出串联的限流电感（如有时）。

采用商业仿真软件自带的三相交流同步发电机、二极管等元件的仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的同步发电机模型（Synchronous Machine）、二极管模型（Power electronic switch）等，可搭建图2.2.1-2所示十二相交流整流发电机的等效电路模型。

(3) 燃料电池发电装置

以目前市场上常见的质子交换膜燃料电池发电装置为例，可用图2.2.1-3所示等效电路模型表示。图中， E 为燃料电池电堆内电势， U_{fc} 和 I_{fc} 为燃料电池发电装置输出电压和电流，电堆内电势 E 是输出

电流的 I_{fc} 函数，其对应关系可通过制造厂家提供的燃料电池V-I特性曲线（即不同输出电流对应的电堆内电势）查表得到； R_i 为电堆欧姆电阻， R_d 为电堆活化等效电阻与浓度损失等效电阻之和， C_{dl} 为双层电荷效应等效电容，这些参数可由制造厂家提供或对实际燃料电池发电装置进行试验测试得到。

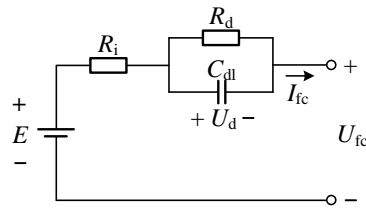


图 2.2.1-3 燃料电池发电装置的等效电路模型

2.2.2 储能装置及接入变流器的建模

(1) 动力电池储能装置

动力电池储能装置通常由小的电池单体通过大量串并联实现高电压、大功率输出。在电池单体一致性较好的假设前提下，电池组可用图2.2.2-1所示的戴维南等效电路模型表示。图中， U_{oc} 为动力电池组开路电压， $U_{oc}=N_{sb} \times U_{ocv}$ ，这里 N_{sb} 为串联电芯数量， U_{ocv} 为单体电芯开路电压， U_{ocv} 随电池SoC变化而变化，可根据当前电池组SoC值，利用制造厂家提供的OCV-SOC特性曲线（即不同SoC对应的电池开路电压）查表得到； R_0 为欧姆电阻、 R_s 为极化电阻、 C_s 为极化电容，这些参数可由制造厂家提供或对实际动力电池储能装置进行试验测试得到。

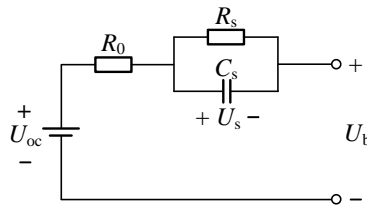


图 2.2.2-1 动力电池储能装置的等效电路模型

(2) 超级电容储能装置

超级电容储能装置通常由小的超级电容器单体通过大量串并联实现高电压、大功率输出，其等效电路模型为等效电容 C_{sc} 与等效内电阻 R_{sc} 串联，再与等效自放电电阻 R_{sd} 并联的结构，如图2.2.2-2所示，该模型是超级电容器充放电过程的一阶近似。图中，等效电容 $C_{sc}=N_{pc} \times C_c / N_{sc}$ ，这里 N_{pc} 为并联超容单体数量， N_{sc} 为串联超容单体数量， C_c 为超容单体的容值；等效内电阻 R_{sc} 、等效自放电电阻 R_{sd} 可由制造厂家提供或对实际超级电容储能装置进行试验测试得到。

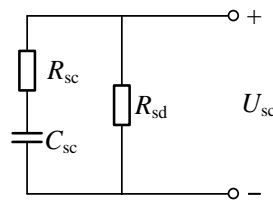


图 2.2.2-2 超级电容储能装置的等效电路模型

(3) 储能装置DC/DC变流器

锂电池或超级电容储能装置可经DC/DC变流器接入直流配电系统。DC/DC变流器可分为隔离型、非隔离型两类，其中非隔离型变流器DC/DC变流器又可细分为升压型、降压型、升-降压复合型三种。本节模型适用于储能装置经DC/DC变流器接入的直流配电系统。当发生直流配电系统正负极间短路时，这四种DC/DC变流器的等效电路模型如图2.2.2-3所示。图中 U_{in} 为DC/DC变流器的输入端电压（如储能装置或其他直流发电装置输出电压）， R_L 为DC/DC变流器输出电缆导体电阻， L_L 为DC/DC变流

器输出电缆导体电感。

① 非隔离升压型DC/DC变流器：直流配电系统正负极间短路时，该变流器立即封锁脉冲 T_b ，短路点的短路电流 I_{fb} 由两部分叠加：1) 短路发生后瞬间直流侧滤波电容 C_b 向短路点放电电流 I_{cb} ；2) 当电容电压 U_{cb} 降低于输入电压 U_{in} 时，二极管 D_b 导通，输入侧（储能装置）经二极管 D_b 向短路点提供短路电流 I_{Lb} 。

② 非隔离降压型DC/DC变流器：直流配电系统正负极间短路时，该变流器立即封锁脉冲 T_b ，则输入侧（储能装置）不会向短路点提供短路电流，短路点的短路电流 I_{fb} 主要是直流侧滤波电容 C_b 向短路点放电电流 I_{cb} 。

③ 非隔离升-降压复合型DC/DC变流器：直流配电系统正负极间短路时，该变流器可按恒流模式运行，短路点的短路电流 I_{fb} 由两部分叠加：1) 短路发生后瞬间直流侧滤波电容 C_{b2} 向短路点放电电流 I_{cb} ；2) 变流器按设定电流指令值 I_{Lim} 输出恒定电流，该恒流值 I_{Lim} 可根据直流配电系统的实际运行需求设定，但应在变流器功率器件和滤波元件安全运行范围以内。

④ 隔离型DC/DC变流器：与上述第③型DC/DC变流器相同，在直流配电系统正负极间短路时，该变流器可按恒流模式运行，短路点的短路电流 I_{fb} 由两部分叠加：1) 短路发生后瞬间直流侧滤波电容 C_{b2} 向短路点放电电流 I_{cb} ；2) 变流器按设定电流指令值 I_{Lim} 输出恒定电流，该恒流值 I_{Lim} 可根据直流配电系统的实际运行需求设定，但应在变流器功率器件和滤波元件安全运行范围以内。

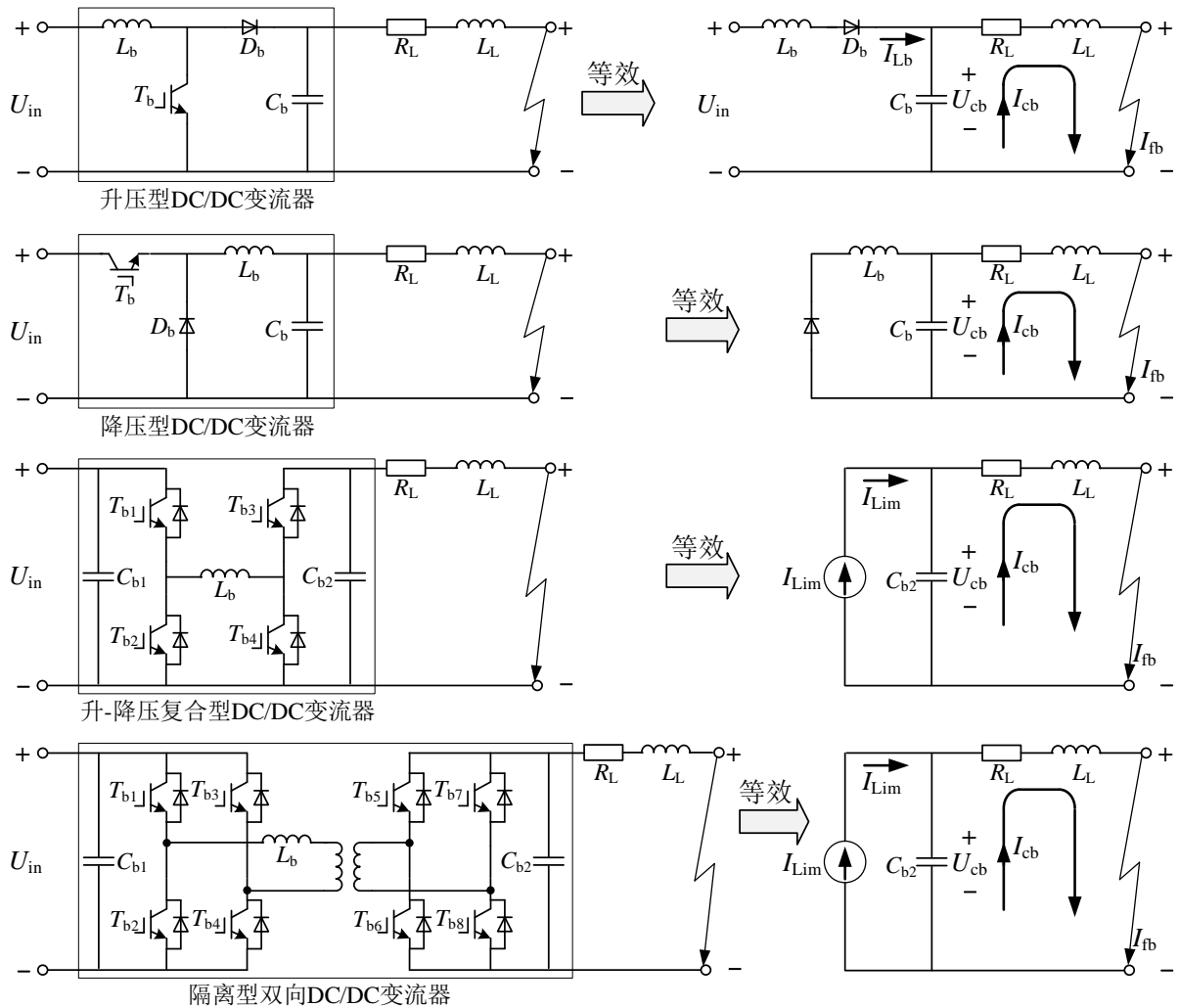


图 2.2.2-3 四类 DC/DC 变流器的等效电路模型

以上四类DC/DC变流器均为最基本形式，实际系统若将多个相同结构的基本型变流器组合构成多相、多重化结构的DC/DC变流器，也可采用本节类似方法建模。

采用商业仿真软件自带的电阻、电容、电感、二极管、恒流源等元件仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的电阻模型（Resistor）、电感模型（Inductor）、电容模型（Capacitor）、二极管模型（Power electronic switch）、受控电流源模型（Current Source）等，可搭建图2.2.2-3所示各类型DC/DC变流器的等效电路模型。

2.2.3 变频器和电动机的建模

该模型适用于直流配电系统中由直流母排直接供电的变频器驱动推进电机、以及其他变频器驱动的作业电机设备（如有时），且变频器直流侧未配置止逆二极管。

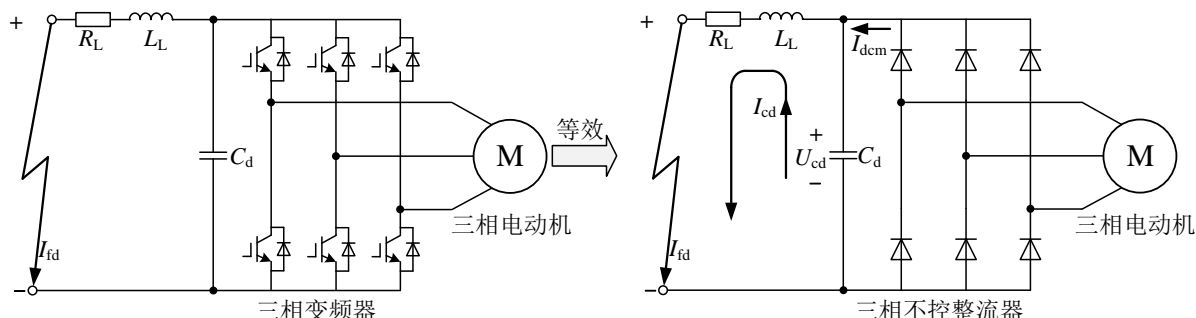


图 2.2.3-1 三相变频器+三相电动机的原理图及等效电路图

当发生直流配电系统正负极间短路时，变频器会立即封锁脉冲，变频器可等效为三相不控整流器，如图2.2.3-1所示。图中， R_L 为变频器直流输入电缆导体电阻， L_L 为变频器直流输入电缆导体电感。变频器和电动机向短路点提供的短路电流 I_{fd} 由两部分叠加：1）短路发生后瞬间变频器直流侧支撑电容 C_d 向短路点放电电流 I_{cd} ；2）当电容电压 U_{cd} 降至低于电动机反电势峰值时，三相不控整流器导通，三相电动机经不控整流器向短路点提供短路电流 I_{dcm} 。

采用商业仿真软件自带的二极管、三相电动机等元件仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的二极管模型（Power electronic switch）、感应电动机模型（Induction Machine）或永磁电动机模型（Permanent Magnet Machine）等，可搭建图2.2.3-1所示变频器和电动机的等效电路模型。

若实际系统中变频器直流侧在支撑电容前端配置有止逆二极管，当直流配电系统正负极间短路时，变频器和电动机将不向短路点馈送短路电流，则可不考虑该类型变频器和电动机的短路建模。

2.2.4 直流导体回路的建模

用导体回路单位长度的电阻 R' 和电感 L' 分别乘以单回导体的长度可得到电阻和电感值。

$$R_n = R'x$$

$$L_n = L'x$$

式中， R_n 为线缆总电阻， L_n 为线缆总电感， x 为线缆长度。

2.3 以熔断器为主要保护电器的直流配电系统短路计算与保护校核方法

2.3.1 建立系统主要设备的简化仿真模型。熔断器保护速度快，快速熔断器一般能在百 μ s-ms级范围内动作，因此在直流配电系统正负极间短路发生至故障支路对应熔断器熔断期间，系统短路电流主要是各变流器、变频器的直流侧支撑电容放电电流，以及直接向直流母排供电（不经过额外的变流器）的交流整流发电机（如有时）、动力电池或超容（如有时）等提供的短路电流。具体而言，对于2.2节所述各电气设备的模型，可适当简化：

- (1) 三相交流同步发电机+三相可控整流器：可仅考虑直流侧支撑电容 C_g 向短路点放电电流 I_{cg} ；
- (2) 十二相交流整流发电机：维持2.2.1 (2)的模型不变；
- (3) 燃料电池发电装置（或者动力电池储能装置、超级电容储能装置）+DC/DC变流器：可仅考虑变流器直流侧支撑电容 C_b 向短路点放电电流 I_{cb} ；

(4) 动力电池储能装置、超级电容储能装置（直接向直流母排供电时）：维持2.2.2(1)和2.2.2 (2)的模型不变；

(5) 变频器和电动机（若变频器直流侧无止逆二极管时）：可仅考虑变频器直流侧支撑电容 C_d 向短路点放电电流 I_{cd} ；

(6) 直流导体回路：维持2.2.4节的模型不变。

(7) 快速熔断器建模：快速熔断器模型为一个可变电阻，快速熔断器所在回路 I^2t 积分值达到熔断器弧前 I_2t 时熔体开始熔化，阻值增大，并在回路 I^2t 积分值达到熔断器总 I^2t 时熔断。通常等效短路电阻值在起弧前应是稳态直流电阻值的数倍，起弧后则更大。一般应使用制造商提供的熔断器等效短路电阻，如无法确定且必要时，等效电阻模型应采用熔断器专门短路试验予以确定。

2.3.2 依据设备投运状态和各设备之间的连接关系，建立系统最大和最小运行方式下的等效仿真模型。针对2.1.3选取的短路点，依次进行极间短路故障设置，开展直流母线电压和短路电流瞬时值的计算。

2.3.3 根据短路电流瞬时值计算结果，得到各回路最大短路电流峰值及其总 I^2t 值，按照第3章 3.4.2.6 的规定校验快速熔断器的选型。

2.3.4 根据各种短路情况下熔断器的仿真结果，以及直流母线电压跌落情况，按照第3章 3.4.3.1 的规定校验直流配电系统保护设计的合理性。

2.4 以断路器为主要保护电器的直流配电系统短路计算与保护校核方法

2.4.1 利用2.2节给出的各设备模型，依据设备投运状态和各设备之间的连接关系，分别根据最大和最小运行工况下系统仿真模型，针对2.1.3选取的短路点，依次进行极间短路故障设置，开展直流母线电压和短路电流瞬时值的计算。

2.4.2 根据短路电流瞬时值计算结果，得到各回路最大短路电流峰值，按照第3章 3.4.2.6 的规定校验直流断路器的选型。

2.4.3 根据各种短路情况下断路器的仿真结果，以及直流母线电压跌落情况，按照第3章 3.4.3.1 的规定校验直流配电系统保护设计的合理性。

第3节 交流日用配电系统的短路计算及保护校核方法

3.1 计算条件及假设

3.1.1 本节短路计算与保护校核适用于由逆变器和（或）交流发电机组供电的交流三线绝缘系统发生相间短路的情形。

3.1.2 在计算交流日用配电系统短路电流时，应考虑以下设备作为短路电源：

- (1) 日用逆变器（连同变压器，如有时）；
- (2) 交流发电机组（如有时）；
- (3) 直接启动的三相电动机负载；
- (4) 三相交流岸电电网。

3.1.3 应根据系统特点选择全部可能出现的短路点，一般应包括：

- (1) 逆变器（连同变压器，如有时）和交流发电装置（如有时）输出端相间短路故障；
- (2) 交流母排（如380V汇流排）及母排连接线缆相间短路故障；
- (3) 交流负载（如380V交流负载）输入侧相间短路故障。
- (4) 电力/照明分电箱汇流排（如230V汇流排）相间短路故障。

3.1.4 本节短路计算采用了下列假设：

- (1) 忽略不计短路电弧阻抗、交流设备和线缆的对地分布电容；

- (2) 短路期间短路电流的传递路径不变；
- (3) 短路在三相同时发生。

3.2 主要电气设备的建模计算方法

3.2.1 日用逆变器的建模

该模型适用于逆变器直接或经变压器供电的日用交流配电系统。当发生日用交流配电系统三相短路时，逆变器若短路前按恒压模式运行，则将按照第2章 2.3.2.2 要求在短路后立即切换至恒流输出模式，则逆变器可采用如图3.2.1所示等效电路模型，短路点的短路电流即为逆变器恒流输出电流。

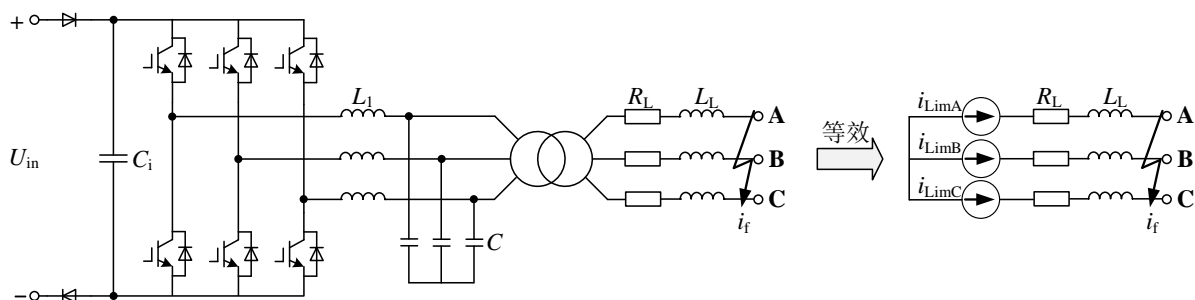


图 3.2.1 日用逆变器的原理图及等效电路图

采用商业仿真软件自带的受控电流源等元件的仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的受控电流源模型（Current Source）等，可搭建图3.2.1所示逆变器在交流配电系统短路时的等效电路模型。

3.2.2 三相交流发电机、交流导体回路、阻感负载及电动机负载的建模

采用商业仿真软件自带的三相交流同步发电机、电阻、电感、三相异步电动机等元件的仿真模型，如PSCAD/EMTDC软件中的同步发电机模型（Synchronous Machine）、电阻模型（Resistor）、电感模型（Inductor）、感应电动机模型（Induction Machine）等，可搭建这些设备的仿真模型。

3.2.3 三相交流岸电电网的建模

三相交流岸电电网可采用三相理想电压源与电阻、电感串联的戴维南等效电路，其中三相理想电压源的幅值可根据实际接入的岸电情况空载实测得到，电阻和电感可根据岸电系统的短路容量估算得到。

3.3 交流日用配电系统短路计算与保护校核方法

3.3.1 利用3.2节给出的各设备模型，依据设备投运状态和各设备之间的连接关系，分别根据最大和最小运行工况下系统仿真模型，针对3.1.3选取的短路点，依次进行三相短路故障设置，开展短路电流瞬时值的计算。

3.3.2 根据短路电流瞬时值峰值和达到瞬时值峰值的时间计算结果，按照第3章 3.4.3.3 校验交流日用配电系统保护设计和保护电器的选型。

附录2 电磁兼容风险分析与设计报告模板

第1节 电力系统说明

1.1 系统组成概述

简述系统功能及主要设备。例如：

本船综合电力系统从发电机、蓄电池等获得电力，经电能变换器输出1000V直流电，向变频器供电，变频器驱动推进电机，为船舶提供动力。

1.2 系统组成框图

给出系统组成框图。例如：

系统构成框图如图1.2所示。

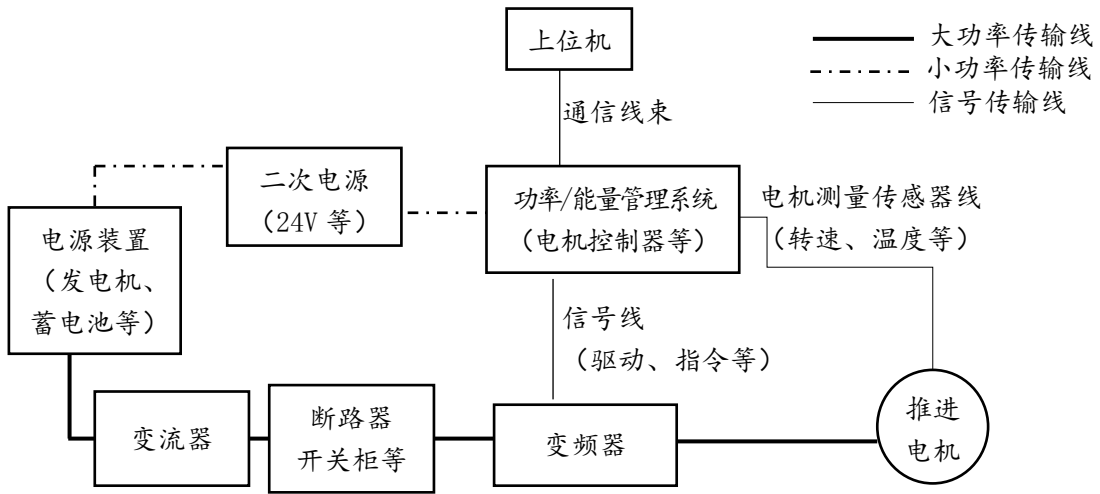


图 1.2 直流综合电力系统组成框图

第2节 电磁环境分析

2.1 系统内电磁环境

简要说明系统内各组成部分的安装位置及相关电磁环境，本节内容可用于指导设备选择所应用的电磁兼容标准。例如：

该综合电力系统可以按功能分为电源装置、配电系统、推进系统、功率/能量管理系统。各装置和系统的安装位置及相关电磁环境分别如下：

电源装置：包括发电机及蓄电池；处于底部机舱和电池舱，主要干扰源来自整流发电机；

配电系统：包括直流配电板及变流器等；处于底部机舱，主要干扰源来自变流器；

推进系统：包括变频器及推进电机；处于船体艏部机舱，主要干扰源来自变频器；

功率/能量管理系统：包括控制器和上位机；位于驾驶室；非主要干扰源，属于敏感设备，面临的干扰主要是强电设备对传感器的干扰。

2.2 系统外电磁环境（可选）

如有必要，可简单说明船舶上的其他系统与直流综合电力系统之间的位置关系及电气连接关系，本节内容用于分析综合电力系统对外界的影响。例如：

该船对外通信系统处于船体上方单独舱室，与综合电力系统无直接相连，综合电力系统对此无影响。

第3节 主要设备（系统）电磁兼容特性

本节根据各设备电磁兼容数据并结合电磁环境分析，对相关设备分类进行电磁兼容分析：说明直流综合电力系统内各设备（系统）之间的电磁兼容情况，包括电磁干扰特性、电磁抗扰度特性。本节内容可根据实际系统特性进行裁剪，但推荐按IEC60533《船舶电气和电子装置-电磁兼容性(EMC)-金属船体船舶》附录B4中的方法，分别获取设备分类表（示例如表3.1）、干扰频率分布图（示例如图3.4-1）、干扰幅值分布图（示例如图3.4-2），最终得到设备干扰矩阵（示例如表3.4）。

3.1 设备分类

例如：该系统主要设备根据干扰特性和敏感特性可以定性分类如表3.1所示。

表 3.1 主要设备分类表

设备分类		设备	设备类型	设备代号
A	发电装置和变流器	整流发电机	干扰源，非敏感	A1
		电机励磁器	干扰源，敏感	A2
		电能变换器	干扰源，非敏感	A3
B	开关和控制设备	断路器/接触器	干扰源，非敏感	B1
		继电器	敏感	B2
		电子保护装置	敏感	B3
C	通信和信号处理设备	网络交换机	敏感	C1
		电机控制器	敏感	C2
		传感器	敏感	C3
		上位机	敏感	C4
D	储能装置	蓄电池	非敏感	D1
E	推进系统	推进变频器	干扰源，非敏感	E1
		推进电机	非敏感	E2

3.2 设备电磁干扰特性

汇总主要设备电磁干扰特性，首选来自设备电磁干扰测试报告的数据；若没有测试数据，也可以根据设备工作原理进行估计。例如：

该综合电力系统中主要干扰源来自大功率电力电子设备的共模干扰、差模干扰及大功率断路器的瞬态干扰；大功率电力电子设备的谐波干扰频率分布从工频频段的150Hz延伸到MHz频段；幅值则从低频段的10V级（140dB μ V）到高频段的mV级（60dB μ V）；断路器瞬态干扰的频率分布从100kHz到50MHz，幅值则约在0.1V~5V间波动即（100~134dB μ V）。

3.3 设备电磁敏感度特性

汇总主要设备电磁敏感特性，首选来自设备电磁干扰测试报告的数据，若没有测试数据，也可以根据设备工作原理进行估计。例如：

该综合电力系统中主要敏感设备是B类和C类设备，敏感频段在1M~30MHz，敏感阈值在1~10V（即120~140dB μ V）。

3.4 电磁兼容风险分析

根据前面对系统各设备的干扰特性总结，可得到该综合电力系统干扰频率分布图（如图3.4-1）、干扰幅值分布图（如图3.4-2），这里的频率包括设备工作频率及产生的谐波频率、干扰频率等。根据设备电磁干扰特性分析结果，生成设备电磁干扰矩阵（示例如表3.4），设备干扰矩阵表需在受扰

设备和发射源之间的干扰可能性进行粗略估计。在那些不可能出现干扰的地方，在矩阵交点处标记“-”；在可能出现干扰的地方，标记“+”；对于那些执行分析计算后，若分析表明不会出现干扰，在矩阵中用“⊕”，若表明会出现干扰，用符号“#”。

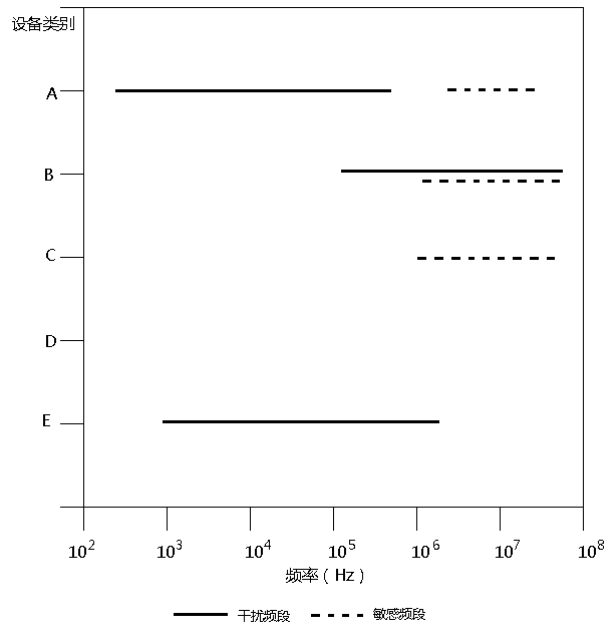


图 3.4-1 设备干扰频率分布图（实线：设备发射频率，虚线：设备敏感频率）

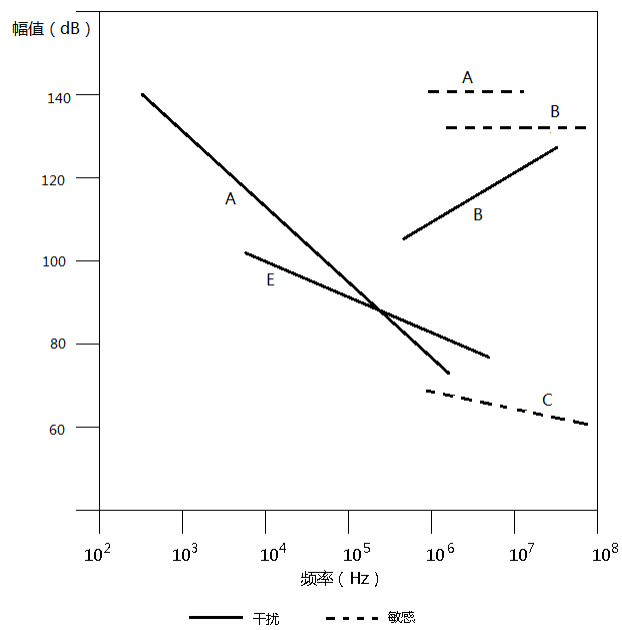


图 3.4-2 设备干扰幅值分布图（实线：设备发射幅值，虚线：设备敏感幅值）

表 3.4 设备干扰矩阵

敏感设备	干扰源												
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	E1	E2
A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2	⊕	-					-	-	-	-	-		
A3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

敏感设备	干扰源												
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	E1	E2
B1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	⊕	-	#	#	-	-	-	-	-	-	-	#	-
B3	⊕	-	#	#	-	-	-	-	-	-	-	#	-
C1	⊕	⊕	#	⊕	-	-	-	-	-	-	-	#	⊕
C2	⊕	-	#	⊕	-	-	-	-	-	-	-	#	⊕
C3	#	#	#	⊕	-	-	-	-	-	-	-	#	⊕
C4	⊕	-	#	⊕	-	-	-	-	-	-	-	#	⊕
D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

第4节 主要电磁兼容设计措施及预期效果

4.1 系统级电磁兼容设计措施

本节说明从系统设计采取的电磁兼容设计措施及效果，如频谱分配、设备布局等。例如：

根据表3.1和表3.4，该综合电力系统中主要干扰源为A、B、E类设备，而敏感设备为B、C类设备；故在系统设计时，对强弱电设备的布局进行了分离布置，在无屏蔽情况下需确保C类设备及其传输信号线与A、E类设备的线缆距离1m以上。

4.2 设备级电磁兼容优化措施

说明针对电磁兼容问题，各设备采取的相应措施，如滤波、屏蔽等。例如：

根据表3.4，主要可能出现电磁干扰的情形为A3、E1设备对C类设备产生的干扰；为此，在A3、E1设备的电网端增加了EMI滤波器，对C类设备的传输信号线分别采用了双绞线和屏蔽双绞线。

第5节 系统布局、布线、滤波、接地说明框图

提供第4节 中各设计措施的图解说明。例如：

5.1 A3、E1设备的EMI滤波器布置

滤波器位置：



图 5.1-1 EMI 滤波器位置示意图

滤波器结构：

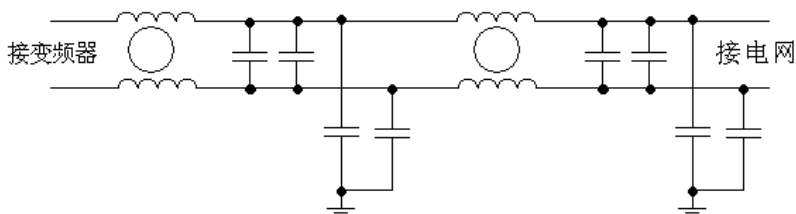
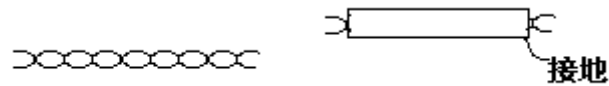


图 5.1-2 EMI 滤波器结构示意图

5.2 C类设备的传输信号线



(a)双绞线 (绞数 ≥ 30 匝/米) (b)双绞屏蔽线 (绞数 ≥ 30 匝/米)

图 5.2 传输信号线示意图

注：本例以一个简单综合电力系统为例，说明了电磁兼容风险分析与设计报告的模板，主要用于说明电磁兼容风险分析与设计报告各部分应包含的内容框架，实际应用中需根据系统具体情况对报告中的内容进行剪裁或补充，例如本例中只给出了设备传导干扰特性，实际系统中可能还需要给出辐射干扰特性。