指导性文件
GD18-2026

中　国　船　级　社

船舶应用直流综合电力系统指南

2026

2026 年 10 月 1 日生效

北　京

简 要 说 明

为适应船舶应用直流综合电力系统的快速发展，中国船级社基于国际海事组织（IMO）2019年7月8日通过的海安会MSC.1/Circ.1394/Rev.2通函《制定国际海事组织目标型标准的一般性指南》，同时结合国家重点研发计划“氢能驱动典型船舶关键技术”项目的科研成果以及行业发展现状，编制了新版《船舶应用直流综合电力系统指南》，生效后替代《船舶直流综合电力系统检验指南》（2023）。

《船舶应用直流综合电力系统指南》旨在对直流综合电力系统的设计、布置、安装、控制、监控和检验做出规定，以期通过直流综合电力系统技术，为船舶提供安全、可靠的动力和电力。

本指南起草得到了国家重点研发计划项目（2023YFB4301704）的资金支持。

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 10

第 1 节 一般规定 10
第 2 节 直流配电系统设计要求 10
第 3 节 交流日用配电系统设计要求 12

第 3 章 电气装置 14

第 1 节 一般规定 14
第 2 节 发电机 14
第 3 节 燃料电池 16
第 4 节 储能装置 16
第 5 节 光伏发电系统 17
第 6 节 变流器 18
第 7 节 推进电动机 20
第 8 节 谐波滤波装置 21

第 4 章 系统保护 22

第 1 节 一般规定 22
第 2 节 直流配电系统保护设计 22
第 3 节 交流日用配电系统保护设计 24
第 4 节 短路电流计算和保护电器选择 25

第 5 章 控制和监测 29

第 1 节 一般规定 29
第 2 节 PMS/EMS 设计要求 32
第 3 节 推进控制系统 33

第 6 章 电磁兼容 35

第 1 节 一般规定 35
第 2 节 电磁兼容设计和分析要求 35
第 3 节 抗干扰设计原则 36

第 7 章 故障模式和影响分析 38

第 1 节 一般规定 38

第 8 章 小型船舶应用直流综合电力系统的补充规定 40

第 1 节 一般规定 40

附录 1 短路电流计算及保护校核方法 43

第 1 节 一般规定 43
第 2 节 直流配电系统的短路计算与保护校核方法 44
第 3 节 交流日用配电系统的短路计算及保护校核方法 49
附录 2 电磁兼容风险分析与设计报告模板 51
第 1 节 电力系统说明 51
第 2 节 电磁环境分析 51
第 3 节 主要设备（系统）电磁兼容特性 52
第 4 节 主要电磁兼容设计措施及预期效果 54
第 5 节 系统布局、布线、滤波、接地说明框图 54

第1章 通则

第1节 一般规定

1.1.1 适用范围

1.1.1.1 《船舶应用直流综合电力系统指南》（以下简称本指南）适用于设有直流综合电力系统的船舶，除另有规定外，下列船舶不适用于本指南：

(1)军用船艇；

(2)渔船；

(3)游艇。

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，还应根据适用情况满足中国船级社（以下简称CCS）《钢质海船入级规范》或《国内航行海船建造规范》或《国内航行船舶入级和检验规则》或《钢质内河船舶建造规范》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时，CCS允许采用其他替代设备或措施，但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，确认其至少具有与本篇要求相等的效能。替代设计的等效性应按照CCS《船舶替代设计和布置应用指南》的规定进行证明并经CCS批准。CCS不允许用操作方法或管理程序替代本篇规定的特定附件、材料、仪表、设备的部件或其型式。

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：系指将全船一次能源（如燃料燃烧或其他反应产生的能源、风能、光伏能源）和储能能源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（以下简称PMS/EMS）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电器连接，正常工况下母联保护电器合闸，集中式运行。

(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。正常工况下母联接触器/隔离开关（如有时）分闸，各段直流母排相互独立、分布式运行。

(4)电源装置：系指船舶的电力来源，一般包括发电装置和储能装置。

(5)发电装置：系指将燃料燃烧或其他反应等过程中产生的能量转化为电能，为船舶负载提供电力的装置。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（如交流同步发电机组、交流异步发电机组）、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)。

(6)储能装置：系指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、飞轮储能装置。

(7)直流配电系统：系指将发电装置、储能装置、岸电提供的电能通过直流母排分配至各用电设备，并根据用电设备的不同电能需求实现电制、电压和频率变换的系统。一般包括直流配电板、变流器、电缆等。

(8)直流配电板：系指由发电装置、储能装置、岸电等直接或接入相应变流器供电，分配直流电能至船上各用电负荷并实施控制，通常为直流母排、开关设备、保护电器和监控设备的组合。

(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)单母线分段：系指一段母线通过保护电器分为两段或多段，并通过母联保护电器实现分段母线之间的连接。

(11)环型母线：系指由单母线构成的首尾闭合呈环状的母线结构。

(12)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。如整流器（AC/DC）、逆变器（DC/AC）、变频器（DC/AC或AC/DC/AC）、斩波器（DC/DC）。

(13)交流日用配电系统：系指将逆变器、交流发电装置、岸电等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。

(14)交流配电板：系指由逆变器、交流发电装置、交流岸电等供电，分配三相交流电能至船上日用负荷并实施控制，通常为交流母排、开关设备、保护电器和监控设备的组合。

(15)单极直流配电系统：系指仅有一个极（正极或负极）的直流配电系统，利用地（船体）或金属回路作为电流返回路径。

(16)双极直流配电系统：系指具有两个对地处于相反极性极（正极和负极）的直流配电系统，两极可独立运行。

(17)伪双极直流配电系统：系指具有两个对地处于相反极性极（正极和负极）的直流配电系统，两极不可独立运行。

(18)电压偏差：系指电力系统实际运行电压相对于系统标称电压的偏差值。

(19)电压波动：系指在规定时间窗口内，电压最大值与最小值之差相对于额定电压的变化量。

(20)电压纹波：系指直流电压中的交流分量。

(21)PMS/EMS：系指功率/能量管理系统，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。

(22)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。

(23)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。

(24)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。

(25)熔断器熔断时间：熔断器弧前时间和燃弧时间之和。

(26)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。

(27)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。

1.1.3 目标及功能要求

1.1.3.1 本指南的目标是为配备直流综合电力系统的船舶装置及系统，在设计、建造与检验环节提供标准，并使其对船舶、船员和环境的风险降至最低。

1.1.3.2 为达到上述目标，直流综合电力系统的设计和建造应满足如下功能要求：

(1)系统的安全性、可用性和可靠性应与常规以同步发电机构成的交流配电系统相同。

(2)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。

(3)系统应在所有正常工况和故障情况下，确保船舶及船上人员的安全，使其免受电气事故的危害。

(4)系统的设计应使得其相关子系统失效概率降至最低，且在单一故障情况下，能够确保船舶的操纵性得到保持或恢复。

(5)系统电气设备的构造和安装方式，应能确保在正常运行及单一故障条件下，人员无法意外接触其中的带电部件。

(6)应能通过装置和系统的设计将直流综合电力系统相关故障概率和后果降至最低。当系统故障

或风险降低措施失效时，应起动必要的安全措施。

(7)应确保装置和系统（包含控制和监测系统）的风险降低措施和安全措施不会导致不可接受的动力损失。

(8)系统保护应设计成：在发生本指南第4章 所述系统故障时，对于因系统低阻抗和电容器的特征产生的幅值更高且上升速率更快的峰值电流，能够通过阻断或限流等措施限制故障影响范围。

(9)应设置经适当设计的控制和监测系统，以实现直流综合电力系统发电装置、电源装置、推进装置及日用负荷的整体电力平衡。

1.1.4 指南引用文件

1.1.4.1 相关文件中的条款通过本指南的引用将成为本指南的条款。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

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，还应将下列图纸资料提交CCS批准：

(1)包含直流综合电力系统的电力系统图；

(2)直流综合电力系统短路电流计算书（见本指南第4章4.4.1.2 ），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[①]大于200kW的船舶）；

(3)直流综合电力系统选择性保护分析报告（见本指南第4章4.4.3.1 ），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)直流综合电力系统监测和报警项目表；

(5)直流综合电力系统水冷系统图（冷却水吸入口/储存装置至配电柜冷却水进口）；

(6)系泊和航行试验大纲涉及直流综合电力系统试验项目（可由现场验船师批准）。

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（见本指南第6章6.2.1.1 ）；

(3)直流综合电力系统故障模式和影响分析（FMEA）报告（见本指南第7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，对于已经完成首次安装批准，且在CCS入级船舶上后续安装的同型式（见本指南第4章4.4.5 ）直流综合电力系统，应将下列图纸资料提交CCS备查：

(1)本节1.2.1.2 (1)-(2)要求的图纸资料；

(2)同型式直流综合电力系统证明材料（见本指南第4章4.4.5.1 ）；

1.2.1.4 经过首次安装批准后，在CCS入级船舶上后续安装同型式（见本指南第4章4.4.5 ）直流配电系统和交流日用配电系统，在其分别符合本指南第4章4.4.5.2 和4.4.5.3 的规定的前提下，有个别组件产生变更时，CCS可要求增加送审图纸和资料。

① 可并联电源装置总功率，系指在正常工作条件下可接入直流配电系统的各电源装置额定功率的代数和。如电源装置未标称额定功率，则以其支路上串接的变流器额定功率作为计算依据，如支路上也未串接变流器，则以电力负荷计算书中制造商宣称的发电功率作为计算依据，下同。

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检验并取得CCS签发的船用产品证书。

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《船舶应用混合动力系统指南》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）X^4—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》、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》和IEC 62271《高压开关设备和控制设备 所有部件》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，半导体变换装置、仪表、报警、指示、显示屏等的效能，PMS/EMS的功能

须试验验证或其它方式验证；

(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；

(8)密封系统试验（仅高压直流配电板）。

1.3.2.5 首次安装的直流配电板的出厂试验，还应按照本指南第4章 4.4.4.1 和4.4.4.2 的要求进行试验，以证明其短路电流仿真计算和选择性保护分析的正确性。试验应由CCS验船师到场见证，仿真计算与试验所得的短路电流峰值误差一般不超过20%，若超出该范围，则不同位置短路实测电流峰值与仿真计算值的误差相对值应呈现较为一致的变化趋势，且选择性保护分析报告所列各分析项（见本指南第4章 4.4.3.2 ）与试验结果具有一致性，经验船师签署的试验报告应上传至CCS检验发证系统。无法在出厂试验完成上述全部试验项目时，应根据经CCS验船师批准的试验大纲，在航行试验之前完成全部试验项目。

1.3.3 电源装置

1.3.3.1 本节1.3.3.2 至1.3.3.9 适用于接入直流配电系统的电源装置。

1.3.3.2 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。

1.3.3.3 三相交流同步发电机进行CCS《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时，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。

1.3.3.4 三相交流异步发电机应按照表1.3.3.4 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 1.3.3.4

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13.1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Ka①	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”。

1.3.3.5 发电机组不必进行CCS《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。

1.3.3.6 三相交流异步发电机组若在制造厂完成CCS《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，经CCS同意，在制造厂应至少完成CCS《产品检验指南 E-05发电机组》中第8.4(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。

1.3.3.7 锂电池（包括能量型超级电容）的制造、试验和检验应符合《船舶应用电池动力规范》的规定。

1.3.3.8 燃料电池的制造、试验和检验应符合《船舶应用氢燃料指南》第2篇的规定。

1.3.3.9 太阳能光伏发电系统的制造、试验和检验应符合《太阳能光伏系统及磷酸铁锂电池系统检验指南》的规定。

1.3.4 变流器（半导体变换器）

1.3.4.1 变流器（半导体变换器）应按照CCS《钢质海船入级规范》第1篇第3章附录1A或《国内航行船舶入级和检验规则》第3章第1节或《内河船舶入级规则》第3章附录1A中“电源变换装置”的要求持有证书。

1.3.5 推进控制系统

1.3.5.1 推进控制系统应按照CCS《钢质海船入级规范》第1篇第3章附录1A或《国内航行船舶入级和检验规则》第3章第1节或CCS《内河船舶入级规则》第3章附录1A中“推进装置遥控系统”的要求持有证书，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CCS《钢质海船入级规范》第7篇第2章第6节或CCS《钢质内河船舶建造规范》第4篇第2章第8节的规定。

1.3.6 交流日用配电板

1.3.6.1 交流日用配电板应按照CCS《钢质海船入级规范》第1篇第3章附录1A或《国内航行船舶入级和检验规则》第3章第1节或CCS《内河船舶入级规则》第3章附录1A中“主配电板”的要求持有证书。

1.3.6.2 交流日用配电板应符合CCS《钢质海船入级规范》第4篇第3章第3节的规定。

1.3.6.3 首次安装的交流日用配电板的出厂试验，还应按照本指南第4章 4.4.4.1 和4.4.4.2 的要求进行试验，以证明其短路电流仿真计算和选择性保护分析的正确性。试验应由CCS验船师到场见证，仿真计算与试验所得的短路电流峰值误差一般不超过20%，若超出该范围，则不同位置短路实测电流峰值与仿真计算值的误差相对值应呈现较为一致的变化趋势，且选择性保护分析报告所列各分析项（见本指南第4章 4.4.3.3 ）与试验结果具有一致性，经验船师签署的试验报告应上传至CCS检验发证系统。无法在出厂试验完成上述全部试验项目时，应根据经CCS验船师批准的试验大纲，在航行试验之前完成全部试验项目。

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，应按CCS《钢质海船入级规范》或《国内航行船舶入级和检验规则》或《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的运行状态、参数显示及启停控制正常；

④ 各电源装置负荷分配功能正常；

⑤ 故障指示（声光报警）及历史故障记录调出显示功能正常；

⑥ 验证在发生如下情况时，系统能自动进入到安全状态：

(a) PMS/EMS电源故障；

(b) PMS/EMS控制器故障；

(c) 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PMS/EMS控制面板分别进行机组的启动和停止功能正常；

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，应按照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（两者中取大者）进行加载，并经CCS同意；

⑥ 异步发电机组按照本章1.3.3.6 的规定未在出厂试验期间完成全部试验项目时，在建造中检验期间还应进行CCS《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《船舶应用电池动力规范》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）的检查和起动/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或提交试验报告经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《船舶应用氢燃料指南》第2篇的适用要求外，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）的检查和起动/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 逆变器的检查和起动/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（如适用）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；

④ 启动一台单机功率最大且未配备软起动的电动机，验证系统电压调节性能和稳定性。

(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功能正常；

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 多个电源装置并联时，停止一台在网且负荷率超过80%电源装置，验证本指南第5章5.2.1.22功率限制功能有效。

(10) 直流综合电力系统的电源装置包含光伏发电系统（连同变流器）时，除应符合CCS《太阳能光伏系统及磷酸铁锂电池系统检验指南》的适用要求外，还需进行以下项目：

① 对每组光伏发电系统（连同变流器）的检查和起动/停止试验；

② 光伏发电系统（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光伏发电系统（连同变流器）时，确认直流综合电力系统及在网光伏发电系统处于正常状态；

④ 光伏发电系统（连同并网变流器）防孤岛保护功能试验；

⑤ 分别在33%、66%和100%额定运行功率下（或在当前环境条件下实际所能达到的最大输出功率）试验并网的电能质量。

(11) 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本指南第6章 第3节 的有关要求。

1.4.3 建造后检验

1.4.3.1 年度检验：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中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（如适用）；

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

(1)对于船龄在6年及以上的低闪点燃料动力船，应对危险区域内的电气设备和电缆作总体检查，特别是防爆灯及其有关电气装置的适用性进行检查，不应有下述的任一情况：

① 电气设备有明显的缺陷；

② 不适当的线路安装；

③ 未经认可的灯具和器具；

④ 空端线路。

(2)检查电缆绝缘层是否有磨损、老化、龟裂、变色等现象。

(3)检查导体之间以及导体与设备之间的连接是否可靠，如螺栓连接是否松动，焊接点是否有裂纹，保护导体连接是否可靠，是否存在锈蚀、断裂。

(4)检查电气设备外壳是否有裂缝、变形、腐蚀、生锈等现象。

1.4.3.3 特别检验：除应按CCS相关规范的适用要求和本节1.4.3.2 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能提供适当保护；

(2)检查过电流保护装置（如断路器、熔断器）的额定电流、分断能力和脱扣特性是否与图纸相一致。直流断路器和熔断器不能用交流装置替代。

(3)确认保护电器保护的有效性和延时（如适用）设置正确；

(4)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；

(5)储能装置还应作充、放电试验和急停功能试验；

(6)燃料电池发电装置（连同变流器）还应在最低稳定输出功率的工况下作带载试验；

(7)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

第1节　一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1　直流综合电力系统的设计应按负荷性质、用电容量和系统规模，合理确定设计方案。

2.1.1.2　直流综合电力系统的构成应简单明确，减少电能损失，并便于管理和维护。

2.1.1.3　直流综合电力系统直流电压的选择应充分考虑直流电源装置、直流负荷和交流日用配电系统的需求，尽量简化电压层级，避免重复降压与反复的交直流功率变换。

2.1.2 电能质量

2.1.2.1　直流配电系统运行时，其电能质量应满足负荷用电需求和设备运行要求，应对电压偏差、电压波动、电压纹波等指标进行评估。

2.1.2.2　除满足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节的规定外，直流综合电力系统电能质量还应满足表2.1.2.2 的要求：

直流综合电力系统电能质量　　**表 2.1.2.2**

设备	参数	稳态（%）	瞬态	
			（%）	恢复时间（s）
经变流器供电的公用直流汇流排	电压	-10 ～ +6	-20 ～ +7	1.5
	电压周期性波动	5	—	—
	纹波电压	4.5（针对频率小于2kHz）	—	—
经变流器供电的专用直流汇流排①	电压	±30	—	—
	电压周期性波动	—	—	—
	纹波电压	5（针对频率小于10kHz）	—	—
由储能设备供电的设备： 充电期间接于蓄电池者② 充电期间不接于蓄电池者	 电压 电压	 -25 ～ +30 -25 ～ +30	—	—

注：①制造厂能提供文件证明全部直接连接到专用直流汇流排的设备，在全部电压波动范围（含低频周期性电压波动、高频纹波电压以及高频可能的瞬态电压影响）下长期无故障地运行，且非该制造厂提供的直流设备不应接入此汇流排。

②应对由充/放电特性决定的不同电压波动予以考虑，包括充电设备的纹波电压。

第2节　直流配电系统设计要求

2.2.1 母线结构

2.2.1.1　直流配电网的母线结构应充分实现系统安全性、可靠性、灵活性和经济性的功能要求。

2.2.1.2　直流配电网的母线结构应考虑必要的网络重构和自恢复能力。

2.2.1.3　直流配电系统应根据负荷特点、重要程度和工况选择相应母线结构。

2.2.1.4　集中式拓扑应满足下列要求：

(1)直流配电系统结构应简单安全，综合考虑供电可靠性、电源装置容量和布置位置、负荷容量和布置位置等因素，可采用单母线分段和环型母线等结构。

(2)直流母排应划分为不少于2个母排分段，发电装置、储能装置、负载直接或经变流器尽可能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电器连接。正常情况母联保护电器合闸，形成公共直流母排向负载供电；在某段直流母排故障时，母联保护电器断开连接，隔离故障点后，其它直流母排可继续向负荷供电。母联保护电器应具有选择性，确保故障不会进一步传播，且与电流流向无关。

(3)环型母线结构还应满足下列要求：

① 组成环型母线的电源支路应分别来自不同电源装置或同一电源装置的独立出线；

② 各母线段电源装置供电范围宜相对独立。可根据负荷的重要程度建立必要联络，保障各母线段在事故情况下具备相互支援的能力；

③ 环型母线的节点不应再派生出孤立次级环网的结构型式；

④ 环形母线应支持闭环及开环两种运行方式。当任一段母线发生故障时，系统应能自动将该段母线解列，确保其余段母线继续正常运行；

⑤ 日用逆变器所在母线段电源装置故障时，应能完全转移负荷至相邻母线段；

⑥ 推进电动机所在母线段电源装置故障时，应能转移至少50%推进负荷至相邻母线段；

⑦ 各母联保护电器应能互联通讯，以保障系统可靠运行。

2.2.1.5 分布式拓扑应满足下列要求：

(1)直流母排应划分为不少于2个母排分段，发电装置、储能装置、负载直接或经变流器尽可能均匀地连接于这些分段上。正常情况母联接触器或隔离开关（如有时，应设有防误触碰措施）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。

2.2.2 直流配电系统线制

2.2.2.1 直流配电系统可采用下列线制形式：

(1)双线（单极和金属回路）绝缘或高阻抗接地系统；

(2)三线（正极、负极和中性线）绝缘或高阻抗接地系统；

(3)负极直接接地的双线（单极和金属回路）系统（不采用船体作为负极回路）；

(4)中性线直接接地的三线（正极、负极和中性线）系统（不采用船体作为负极回路）；

2.2.2.2 存在对不同电压等级设备灵活供电需求的直流配电系统，可采用双极或伪双极结构。

2.2.2.3 高压直流配电系统，或对供电可靠性要求较高，可采用双极结构。

2.2.2.4 应优先采用本节2.2.2.1 (1)和2.2.2.1 (2)的线制。设有蓄电池和超级电容器等电化学储能装置时，不应使用本节2.2.2.1 (3)和2.2.2.1 (4)的线制形式。

2.2.2.5 直流配电系统应采用一致的接地方式。

2.2.2.6 系统接地应采用单点接地，电源的中点或某极仅在一个位置与接地装置连接。

2.2.2.7 保护接地应确保所有电气设备外露导电部分（如设备外壳、金属布线管、金属支架）妥善连接至接地装置，连接至接地装置的每个设备的接地导体应能独立断开，拆除某一设备的接地导体不应影响其他设备的保护接地功能。接地导体与接地装置的连接应可靠，且仅能通过工具（如螺丝刀、扳手）断开，不应采用插拔式、卡扣式等无需工具即可断开的连接方式。连接接地导体的螺钉不得同时兼作其他用途，如用于固定设备外壳、布线管等其他部件。

2.2.3 绝缘配电系统和经高阻接地配电系统

2.2.3.1 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。

2.2.3.2 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。

2.2.3.3 双接地故障应纳入短路保护范围。需假设接地故障发生在最不利接地故障场景下，短路

保护应具备选择性切除至少一处故障点的能力。

2.2.3.4 经高阻接地系统的接地电阻值的选择，应能实现以下功能：

⑴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；

⑵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。

2.2.4 接地配电系统

2.2.4.1 配电回路应设置直流剩余电流保护装置（RCD），且RCD的动作电流不宜大于80mA。

2.2.5 主电源

2.2.5.1 作为船舶主电源的电源装置，其台数和容量应符合CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.1.1.1或CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇3.1.2的有关要求。

2.2.5.2 辅助系统（如冷却系统、润滑系统和监控系统等）的设计不应使得本节2.2.5.1 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。支持主电源的辅助系统及相关控制系统应尽可能独立设计、相互隔离，以减少共因故障。特别的，冷却系统应参照《船舶应用电池动力规范》第4章4.1.1.6条进行设计。

2.2.5.3 接入直流母排并联运行的电源装置应能自动实现负荷分配，并确保各工况下并联运行的各电源装置输出功率不超过自身最大可用功率。可以采用：

⑴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预先设定或PMS/EMS调节电流；

⑵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；

⑶上述方式的组合。

2.2.5.4 直流配电系统并网通常不应全部依赖PMS/EMS实现负荷分配、源网协调等稳定性控制，而应通过电力系统固有特性与设备自身（如变流器或电压调节器等）适应性保障运行稳定。

2.2.5.5 当采用本节2.2.5.3 (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，以保证当任一用来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。

2.2.5.6 当采用本节2.2.5.3 (2)实现并联及负荷分配时，应考虑变流器电压传感器至直流母排之间的阻抗差异，避免负荷分配差度超过系统安全裕度。

2.2.5.7 应采用适当措施保障直流配电系统的稳定性，作为主电源的电源装置的快速供电能力应与大功率负载冲击的大小和速度相适应，以使得在大功率负载投入时，系统电压能维持在本章2.1.2所要求的范围内。

2.2.5.8 并联供电的电源装置应能在合理可预期的工况（包括额定电流、起动电流、涌流和故障电流）下对负载供电，确保保护电器有效动作。

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CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.4.1-2.4.2或CCS《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日用配电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CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.1.1.1或CCS《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）的设计不应使得本节2.3.1.3 中电源装置和用于其备用的电源装置同时失效。支持该电源的辅助系统及相关控制系统应尽可能独立设计、相互隔离，以减少共因故障。

2.3.1.5 交流日用配电系统主汇流排应至少分成两个独立分段，并根据其是否长期并联运行，参照本章2.2.1.4 (2)或2.2.1.5 (1)的适用要求进行设计。如船舶日用负载中，重要设备（如舵机、消防泵舱底泵、重要设备的控制电源等）均由直流配电系统直接供电时，交流日用配电系统主汇流排可不分段。

2.3.2 交流日用配电系统对逆变器的设计要求

2.3.2.1 并联运行的逆变器之间，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，正常工况下逆变器应采用恒压恒频控制；发生交流系统短路故障时，逆变器应能立即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PMS/EMS调节电流，也可由逆变器和交流同步发电机组根据交流下垂特性实现并联；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可靠的稳压稳频供电能力。

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　电气装置

第1节　一般规定

3.1.1　一般要求

3.1.1.1　电气装置的设计应确保所有工况下不会造成人员和设备的安全风险，可采取的安全措施包括但不限于：

(1)与预期安装的位置相适应的外壳IP防护等级；

(2)设备外壳（含门等开口）的完整性；

(3)等电位连接/接地；

(4)隔离。

第2节　发电机

3.2.1　一般要求

3.2.1.1　除满足本节规定外，发电机还应符合CCS《钢质海船入级规范》第4篇第3章第2节的有关要求。

3.2.1.2　发电机的原动机的额定功率、过载能力和动态性能，应满足电力设备因操纵及通航环境与天气条件引起的工况过渡性变化时所需的功率需求。

3.2.1.3　当采用本指南第2章2.2.5.3 (2)方式进行并网时，发电机的自动电压调节器特性应确保并联运行时，发电机组与其他电源装置的负荷尽可能按其额定功率成比例分配。

3.2.2　轴承及润滑

3.2.2.1　轴承应有足够的润滑，确保在正常和恶劣航行工况（如横倾、纵倾）下，均能持续获得充分润滑。

3.2.2.2　轴承结构应采取有效措施防止过量润滑液体外泄并渗入发电机内部。

3.2.2.3　强制润滑型轴承，出现供油故障（油泵失效、轴承供油管路失压）或轴承温度异常升高（一般的，轴承润滑油温不高于70℃，采用滚动轴承时不高于80℃）时，应触发报警信号。若温度升高至危险水平时，应立即停机。

3.2.2.4　应采取可靠措施避免轴与轴承之间产生有害电流，以防止轴承损伤。

3.2.2.5　滑动轴承应设计为易于更换的结构。

3.2.2.6　对开式滑动轴承应设置温度监测装置，其测温元件宜布置于下轴瓦部位并有效反映轴瓦实际温度。

3.2.2.7　滚动轴承应具有足够的预紧力。

3.2.3　冷却

3.2.3.1　对配备强制风冷装置、风道系统、空气过滤器或液冷却器的发电机，应对冷却效果进行连续监测（如各相绕组温度），温度超出设定值时应触发报警动作。温度设定值应根据设备特性确定，且不得高于允许运行温度上限。

3.2.3.2　采用闭式循环冷却（带换热器）的发电机，应能对一次冷却介质与二次冷却介质的流量或压力进行监测，或对换热器进出口温差进行监测。

3.2.3.3　对配置液冷式换热器的发电机，应设置泄漏监测装置。

3.2.3.4　液冷式电机如具备切换至纯风冷运行模式的功能，在纯风冷工况下，发电机最大设计容量应相应降低。

3.2.4 保护

3.2.4.1 保护措施（如带限流功能的变流器或短路保护电器）应有效保护发电机，使之能承受直流配电系统短路引起的冲击。

3.2.4.2 交流同步发电机组与变流器之间发生短路，或变流器内部故障时，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。

3.2.4.3 发电机保护单元和/或其变流器应设置故障电流检测装置。

3.2.4.4 发电机保护单元的保护应与直流综合电力系统保护动作相协调。

3.2.4.5 发电机的保护应覆盖全部转速范围。

3.2.5 同步发电机的特殊要求

3.2.5.1 同步发电机励磁系统（包括自动电压调节器）的稳态与瞬态调节性能应符合CCS接受的标准[①]。

3.2.5.2 同步发电机一般应采用自励磁方式，其励磁系统由发电机自身供电，且发电机电压建立过程不应依赖其他电源装置。

3.2.5.3 如其他电源装置各自独立且互为冗余，并至少包含一组应急电源（如有时），则允许用于向同步发电机励磁和/或控制回路供电（含电压建立过程）。

3.2.5.4 同步发电机组励磁系统的保护电器脱扣时，应自动断开同步发电机出口断路器（可设置延时），并在本地及有人值班位置发出声光报警。

3.2.5.5 励磁系统的内部保护功能应与电力系统保护的选择性相协调。

3.2.5.6 应合理设置励磁系统的控制系统，避免因保护电器动作、电源装置并网/解列操作或励磁系统故障引起有害的电压升高。

3.2.5.7 交流同步发电机和不控整流器集成于一体的交流整流发电机的特殊要求：

(1)整流器件正负极间、带电体对地（发电机机壳）需有足够爬电距离和电气间隙；

(2)整体结构需满足船用环境下的抗冲击、抗振动的要求；

(3)集中式冷却系统应能确保二极管/晶闸管结温、转子绕组及励磁装置温度在允许限值内；

(4)整流二极管/晶闸管采用水冷时，水路与机壳间应采用绝缘管连接以防漏电；

(5)整流二极管/晶闸管对短路电流的耐受能力应与本指南第1章 1.3.3.3 规定的维持时间相适应。

3.2.6 异步发电机的特殊要求

3.2.6.1 异步发电机连同执行其电压控制功能的变流器，在稳态与瞬态工况下，电压控制特性应符合CCS接受的标准[①]中对直流发电机的要求。

3.2.6.2 异步发电机应由独立的变流器进行电能变换和控制。

3.2.6.3 异步发电机应具备下列功能：

(1)连同储能系统（如有时），能使船舶从全船失电状态恢复供电；

(2)可提供足够的故障电流，或采取替代性保护方案，以实现直流综合电力系统保护的选择性。

3.2.7 变速运行发电机的特殊要求

3.2.7.1 变速运行发电机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。

3.2.7.2 变速运行发电机的原动机调速装置应能在本地和有人值班的位置进行控制。

① 参见 IEC60092-301《船舶电气设施 第 301 部分:设备 发电机和电动机》。

第3节 燃料电池

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 除满足本节规定外，燃料电池还应符合CCS《船舶应用氢燃料指南》第2篇第4章的有关要求。

3.3.1.2 应根据燃料电池制造商提供的动态响应指标，合理设计直流配电系统主电源的构成，以实现本指南第5章5.2.1.8 的要求。

3.3.1.3 燃料电池工况发生可能导致最大实际输出功率能力低于额定功率的变化时，应向PMS/EMS提供当前实际最大可用功率。

3.3.1.4 燃料电池接入配电系统时，应采取措施保证能量仅能由电源装置单向流入配电系统，防止逆功率损坏设备，可采用单向DC/DC接入配电系统。

3.3.1.5 当主汇流排上发生短路时，应设有保护措施以确保燃料电池不会受到危害。

3.3.1.6 应设置保护电器作为燃料电池的过载和短路保护。燃料电池与斩波器之间的线路发生过载或短路时，应能依靠燃料电池高压盒内部保护电器实现保护功能。在保护电器的任何延时脱扣时间/熔断时间内，燃料电池应能耐受短路电流所产生的机械应力和热效应。

3.3.1.7 燃料电池发电装置的短路电流应足以使本支路的短路保护装置动作。

3.3.1.8 燃料电池变流器宜采用隔离型变流器。

第4节 储能装置

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 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。

3.4.1.2 若各储能装置始终独立运行（指非并联运行），或采用了其他防止各储能装置之间形成足以影响储能装置安全的环流的措施（如在储能装置之间电压差过大时无法执行并联操作等），且能满足系统功能要求，可经保护电器直接接入直流母排，从而不必满足本节3.4.1.1 的要求。

3.4.1.3 采用本节3.4.1.2 规定的方式接入直流母排的储能装置，应具有与系统相适应的惯性支撑能力。当进行储能装置切换或负载瞬时波动时，母排和蓄电池电压波动范围和持续时间应符合本指南第2章表2.1.2.2 规定的电能质量短时瞬态要求，连接到直流配电系统的设备仍能保持正常运行，且不危及船舶航行安全。系统应能通过储能装置的放电特性实现自然恢复与稳定运行。

3.4.1.4 储能装置的系统接地方式应与直流配电系统和充电系统的系统接地方式相一致。

3.4.1.5 储能装置（连同其管理系统）应能向为储能装置充电的变流器传递必要信息，确保充电过程中每一电池单体不超过制造商规定的电压、电流及温度限值。

3.4.1.6 储能装置放电至制造商规定的运行下限时应报警，当达到危及电池安全的极限值时，应自动停止放电，并断开与变流器或直流母排的连接（如适用）。

3.4.1.7 储能装置的内部故障不应影响直流综合电力系统其余部分。

3.4.1.8 储能装置的内部单点接地故障不应引起短路。

3.4.1.9 储能装置故障时应能与直流配电系统隔离，这可以由具有隔离功能的断路器，或配有隔离开关的变流器予以实现。

3.4.1.10 储能装置（连同其管理系统）应能向PMS/EMS传递必要信息，以实现能量优化及充放电管理。

3.4.1.11 储能装置起动时的冲击电流水平应与其所连接的配电系统设备的载流能力相适应。

3.4.1.12 储能装置起动时间应满足本指南第4章4.2.2.5 (5)和4.3.2.4 (2)恢复供电时间的要求。热备用状态下，储能装置自接收到PMS/EMS控制信号起，至放电功率首次达到90%额定功率的时间应不超过0.2s，至放电功率达到100%额定功率且功率偏差始终控制在额定功率±1%以内的时间应不超

过1s。

3.4.2 保护

3.4.2.1 储能装置与相应斩波器（如有时）之间，或储能装置与直流配电板之间的线路发生短路时，应能依靠高压盒内部或安装位置附近熔断器熔断实现保护功能。

3.4.2.2 每一串联的蓄电池簇应设置独立的保护电器，以限制蓄电池单体或单串的内部短路。

3.4.2.3 一般的，蓄电池单串故障不应导致整组蓄电池退出运行，如因特殊工况需要，应经CCS批准。

3.4.2.4 不应越控蓄电池管理系统激活保护功能。

3.4.3 蓄电池的特殊要求

3.4.3.1 除满足本节3.4.3.2 -3.4.3.7 规定外，锂离子蓄电池还应符合CCS《船舶应用电池动力规范》的有关要求。

3.4.3.2 同一蓄电池系统内仅允许接入相同型号、同一生产线制造的蓄电池，后续维修和更换也应评估和采用与原有设备性能接近的蓄电池。

3.4.3.3 应设置仅允许授权人员方可打开和进入蓄电池机柜或模块的措施。

3.4.3.4 除蓄电池系统本身的供电、控制和通讯电缆以及维持电池系统正常运行的附属系统外，蓄电池舱内不应布置用于保障船舶处于正常操作状态和满足正常居住条件所必需的电力设备（含电缆）。

3.4.3.5 用于实现本指南第2章2.2.5.1 所要求冗余性的蓄电池系统不应安装于同一电池箱柜或电池舱内。

3.4.3.6 蓄电池应在其处所外就近设置用于停止蓄电池运行的紧急停机装置。

3.4.3.7 紧急停机装置应为独立于控制和监测系统的硬线电路。

3.4.4 超级电容器的特殊要求

3.4.4.1 除满足本节3.4.4.2 -3.4.4.9 规定外，超级电容器还应符合CCS《船舶应用电池动力规范》的有关要求。

3.4.4.2 超级电容器的充电电流引起的电压降不应导致直流综合电力系统不稳定。

3.4.4.3 超级电容器与其他电源装置并联放电时，不应导致直流综合电力系统过压和发电机超速。

3.4.4.4 超级电容器应在其处所外就近设置紧急停机装置。

3.4.4.5 紧急停机装置应为独立于控制和监测系统的硬线电路。

3.4.4.6 超级电容器为船舶推进和操舵装置供电时，还应在推进遥控位置增设紧急停机装置。

3.4.4.7 应在装置各适当位置设置警示标识，提示操作风险。

3.4.4.8 应设置联锁机构等装置，防止正常运行、维护、测试、维修及更换时人员触电。

3.4.4.9 超级电容器装置的前面板应配置绝缘扶手或把手。若需后部操作，其支架/组件的后部也须设置。

第5节 光伏发电系统

3.5.1 一般要求

3.5.1.1 除满足本节规定外，光伏发电系统还应满足CCS《太阳能光伏系统及磷酸铁锂电池系统检验指南》第2章第2节的有关要求。

3.5.1.2 同一光伏组件串中各光伏组件的关键电性能参数（如开路电压、短路电流、峰值功率等）应保持一致。

3.5.1.3 光伏汇流箱应设置防雷保护。

3.5.1.4 同一个变流器接入的光伏组件串的电压、方阵朝向、安装倾角应一致。

3.5.1.5 接入直流配电系统的并网型光伏发电系统，在满足下列要求之一的前提下，并网型光伏发电系统容量可高于直流配电系统在网电源装置总容量的10%：

(1)能提供证明材料说明其在合理可预期的工况下投入/脱离直流配电系统时，系统电能质量仍能满足本指南第2章2.1.2 的要求；

(2)光伏发电系统能够接受PMS/EMS管理和调度；

(3)光伏发电系统应具有限制输出功率变化率的能力，输出功率变化率和最大功率的限值不应超过PMS/EMS当前给定的限值，但因太阳光辐照度快速减少引起的光伏发电系统输出功率下降率不受此限制。

3.5.1.6 接入交流日用配电系统的并网型光伏发电系统，应满足下列要求：

(1)光伏发电系统的设计能保障交流日用配电系统安全稳定运行；

(2)接入点的电压偏差和谐波含量应符合CCS相关规范关于电能质量的有关要求；

(3)接入并网型光伏系统后，交流日用配电系统各母线节点在最大运行方式下，短路电流不超过断路器开断电流限值；

(4)光伏发电功率应优先在交流日用配电系统就地消纳，最不利的情况下，通过交流日用逆变器向直流配电系统反送功率，应不超过该逆变器支路各设备和线缆的额定值的80%。

3.5.2 保护

3.5.2.1 光伏发电系统应能检测直流配电系统的电压偏差，在偏差超限时应能将光伏发电系统与直流配电系统安全断开。

3.5.2.2 当光伏发电系统并入的直流配电系统失压时，应将光伏发电系统与直流配电系统断开（可延时），防止出现孤岛效应。

3.5.2.3 如由于电压超限导致光伏发电系统停止运行，在直流配电系统电压恢复后，应设置一定延时方可恢复光伏发电系统供电。

3.5.2.4 光伏发电系统对直流配电系统应设置短路保护。在发生短路时，变流器应具备限流功能。

3.5.2.5 光伏发电系统与直流配电系统连接处应设置具备可视断点的机械式开关。

3.5.2.6 光伏发电系统应设置逆功率保护。

第6节 变流器

3.6.1 一般要求

3.6.1.1 本节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。

3.6.1.2 除满足本节规定外，变流器还应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇第3章第8节的有关要求。

3.6.1.3 变流器谐波、功率因数、纹波等技术性能应满足接入交/直流电网的要求。

3.6.1.4 用于向交流负载供电的变流器，应在其额定功率运行范围内具备提供无功功率的能力。

3.6.1.5 变流器一般应具备一定短时过载能力，110%额定功率下的可靠工作时间宜不小于1min。

3.6.1.6 变流器的功率元件应便于更换和维护。

3.6.1.7 变流器控制系统应确保功率元件在正常运行工况下不会超出允许电流限值。

3.6.1.8 变流器应具有故障诊断功能，在异常时能够提示可能的故障位置。

3.6.1.9 对于变流器负载比例高于70%的直流配电系统，且未采用本指南第2章2.2.5.3 (2)的并联方式，变流器应能通过合理控制，避免引发负阻抗振荡。

3.6.1.10 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，应考虑正常及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。

3.6.1.11 变流器应具备防止直流母排向发电机倒送功率的功能。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。

3.6.1.12 变流器支路的保护电器应设置运行状态监测功能。应设置适当的措施抑制变流器接入电网中产生的操作过电压和操作过电流，不应造成变流器停机或其支路保护电器的损坏。

3.6.1.13 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。

3.6.1.14 电源装置变流器一般应从电源装置侧取电，负载变流器一般应从直流母线侧取电。

3.6.1.15 变流器柜门仅应在内部电容器电压低于50V时允许被打开，若无法满足此条件时，柜门必须使用工具或钥匙才能打开，并应按 IEC 61800-5-1第6.5.2条进行警示标识。

3.6.2 冷却

3.6.2.1 变流器为强制冷却时，应设置冷却系统运行状态的监测装置。冷却系统发生故障时，应采取保护措施避免变流器损坏，并触发报警信号。报警信号可通过冷却介质流量监测或半导体元件温度监测实现，流量监测可采用进出口温差的方式替代。

3.6.2.2 100kW以上的变流器应尽可能采用液冷系统。

3.6.2.3 采用液冷式散热器的变流器，应设置冷却液泄漏监测装置。

3.6.2.4 功率元件采用液冷时，每一变流器的液冷支路应各自独立。

3.6.2.5 变流器冷却系统的单一故障不应导致直流综合电力系统所有变流器跳闸，船舶应具备基本操纵能力。

3.6.3 保护

3.6.3.1 变流器应设有过电压和欠电压保护，并能满足下列要求：

(1)当电压升高至130%额定电压（或制造商规定的其他值）及以上时，应延时5ms后动作；

(2)当电压降低至70%额定电压（或制造商规定的其他值）及以下时，应延时1ms后动作，且与系统选择性保护要求相适应。日用逆变器的动作时间还应满足本指南第4章4.3.1.4 的规定。

3.6.3.2 变流器输出端发生直接短路故障时，功率元件不应损坏。

3.6.3.3 电源装置变流器一般应具备速断和反时限两种过流保护功能，并应允许对反时限保护特性进行调整。本指南第2章2.3.2.2 规定的短路故障穿越功能可以视作一种反时限过流保护的特殊形式。

3.6.3.4 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。

3.6.3.5 负载变流器（如变频器、日用逆变器等）应能控制电流，以确保在负载变流器内部、交流侧馈电线路或负载发生过载时，不会损坏任何部件，必要时，应在直流母线与负载变流器之间设置后备短路保护装置。

3.6.3.6 必要时，电源装置的变流器应具有故障限流功能。故障电流有效值和限流时间应大于继电保护故障定位所需的故障特征电流值和持续时间（断路器脱扣动作时间或熔断器熔断时间）。变流器应具备限流工作模式自动切换功能，当其运行电流超出正常工作电流范围时，变流器应自动进入限流工作模式；当其运行电流由故障电流恢复至正常工作电流时，变流器应自动退出限流工作模式。

3.6.4 驱动推进电动机的变频器特殊要求

3.6.4.1 变频器的设计应基于推进电动机的额定转矩，且在承受推进电动机短时过载及由此产生的功率波动时，不应触发停机保护。

3.6.4.2 变频器应具备起动电流控制功能，在推进电动机堵转工况下起动时仍能确保功率元件不发生损坏。

3.6.4.3 应采用储能装置、制动电阻或类似措施消耗或抑制推进电动机制动能量（如螺旋桨从全速正车切换至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和保护电器由于逆功率导致脱扣，或能提交证明文件，表明推进电动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。

3.6.4.4 变频器可采用转速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。

3.6.4.5 当变频器向永磁电动机供电时，本章3.7.6.1 中所要求的具有分断能力的开关装置，在逆变器故障时应能自动分断。

第7节 推进电动机

3.7.1 一般要求

3.7.1.1 除满足本节规定外，推进电动机还应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇第3章第2节的有关要求。

3.7.1.2 电动机连同相应变流器的配置和数量应满足CCS《钢质内河船舶建造规范》第8篇第2章2.2.1.1的要求或CCS《钢质海船入级规范》第8篇第15章15.2.1.6-15.2.1.8的要求。

3.7.1.3 推进电动机的外壳防护等级应不低于IP23。高压（相间额定电压超过1kV的交流，或极间额定电压超过1.5kV的直流）电动机的外壳防护等级应不低于IP44。

3.7.1.4 变流器供电的电动机，其设计应满足谐波特性要求，并针对总谐波畸变引起的附加温升预留足够裕量。

3.7.1.5 电动机与轴系应能承受所有负载工况。必须考虑电气部件产生的扭转激励对系统的影响，并通过扭转振动计算提供证明，确保所有应力均不超过设计应力。应特别考虑非对称故障（如两相短路）时可能产生的最大交变扭矩，以及对称故障（如三相短路）时可能产生的最大峰值扭矩。

3.7.1.6 具有独立励磁回路的推进电动机，其励磁回路应与定子绕组供电取自同一配电板区段或电源装置。

3.7.1.7 推进电动机应具备在全部工况下输出端发生直接短路的耐受能力。

3.7.1.8 不同推进电动机的电缆应相互远离。电缆的敷设方式应确保任何单一的电气故障、局部火灾及后续安全系统的动作均不会造成船舶推进能力完全丧失。

3.7.2 轴承及润滑

3.7.2.1 推进电动机的轴承及润滑系统除满足本章3.2.2 发电机轴承技术要求外，采用强制润滑系统时，其轴承应配置冗余泵组。

3.7.3 冷却

3.7.3.1 推进电动机的冷却系统除满足本章3.2.3 发电机冷却系统技术要求外，还应满足以下要求：

(1)应确保冷却系统在所有负载及转速工况下均能有效运行；

(2)绕组及冷却介质温度监测装置应在温度超过设定限值时触发报警；

(3)当推进电动机冷却系统故障时，必要时应能短时维持基本推进能力，允许操作人员越控并采取紧急干预措施（如适用）。

3.7.4 防冷凝

3.7.4.1 推进电动机应配置电加热装置，其设计应满足机内温度始终高于环境温度至少3℃。

3.7.5 保护

3.7.5.1 主回路及励磁回路（如有时）的过电流保护设定值应避开船舶机动航行、恶劣工况或浮冰中航行时所产生的瞬时过电流。

3.7.5.2 推进电动机短路及过电流保护可由变流器实现。

3.7.5.3 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，推进电动机通过变频器反并联二极管向短路点放电的可能性，避免推进电动机及变频器受损。

3.7.5.4 推进电动机应设置超速保护装置。超速保护装置的整定范围需与船舶推进系统动态特性相匹配。

3.7.5.5 推进电动机结构设计应能承受超速保护装置整定值所对应的极限转速，而不发生机械损伤。

3.7.6 永磁电动机的特殊要求

3.7.6.1 应具有能够将永磁电动机与向其供电的变流器可靠隔离的措施。此外，应设置包括但不限于以下措施之一，避免推进电动机在非推进状态下（如船舶被拖曳时）回馈的能量，在推进电动机电气端口处产生的高电压危及人员安全。

(1)锁轴装置、制动装置或其他等效措施，能够在拖曳条件下固定主轴；

(2)电机轴与主轴解耦，能够确保电机轴保持静止。

3.7.6.2 永磁电动机内部发生短路故障时，应由断路器切断其三相绕组供电。

3.7.6.3 永磁同步电动机在稳态短路电流工况下，应能使得：

(1)电动机本体不应发生热损伤；

(2)载流部件（包括电缆、滑环等）的温升不得超过制造商规定的限值。

3.7.7 维护性

3.7.7.1 应设置检修通道，能对定子及转子绕组进行检查、拆卸及更换；

3.7.7.2 应设置轴系支撑装置，以使得轴承拆检与更换时能够固定转轴。

3.7.7.3 应提供足够的维修空间，以具备滑环表面修磨，以及电刷、旋转整流器及保护设备调整和更换的条件；

3.7.7.4 联轴器应采用整体式结构，其设计应能实现无需驱动轴与从动轴进行轴向移动，或拆卸磁极部件即可进行整体拆装。

第8节 谐波滤波装置

3.8.1 一般要求

3.8.1.1 如设置用于抑制交流日用配电系统电网谐波畸变的谐波滤波装置，应满足本节的要求。

3.8.1.2 每个独立滤波回路应配置过电流及短路保护装置，并设置滤波装置故障监测功能。

3.8.1.3 滤波回路保护电器动作时，应触发报警信号。

3.8.1.4 滤波装置应采用三相整体式结构，各相独立设置保护装置。任一相保护电器动作时，应自动切断整组滤波器；

3.8.1.5 除过电流保护外，应配置独立的电流不平衡检测系统，异常时发出预警。

3.8.1.6 滤波系统单一故障不应导致交流日用配电系统失效。

3.8.1.7 滤波装置的设计应涵盖所有可能的电网运行工况，所有负载工况及发电装置的组合均不应出现自谐振现象。

3.8.1.8 谐波滤波装置柜体设计应符合相关规范对主配电板的要求。

第4章　系统保护

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保护应能最大限度减少供电中断和设备损坏的可能性。

4.1.1.2　母联保护电器闭合运行时，允许部分扰动（如短路引起的电压暂降）向相邻母排传播，但需根据应用场景及船舶运行要求评估相邻区段的扰动持续时间及严重程度。

4.1.1.3　单母线分段系统应能实现单段母排故障不影响相邻母排运行。

4.1.1.4　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。隔离开关的位置可根据需要设置，并在其附近设有相应标识以指示切断了何处的电气连接。

4.1.1.5　除满足本章的要求外，系统保护还应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇第2章第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

4.2.1　一般要求

4.2.1.1　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。变流器也可作为实现保护功能的一部分。

4.2.1.2　应采用能同时分断所有绝缘极的保护电器实施母联保护。作为替代，可采用主保护电器加后备保护电器作母联保护，其中主保护电器应至少能够分断单极系统的单极，以及双极、伪双极系统中的正极和负极；后备保护电器应能够分断所有绝缘极（含正极、负极、中性线、金属回路）；保护电器动作后应能够自动断开所有绝缘极与母排的连接（如通过线路上的直流接触器实现）。

4.2.1.3　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。

4.2.1.4　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。

4.2.1.5　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)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。

4.2.1.6　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。

4.2.1.7　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动作，隔离故障后，其他配电支路均能继续正常供电。

4.2.2 选择性保护原则

4.2.2.1 除本节4.2.2.2 -4.2.2.6 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。

4.2.2.2 直流配电系统保护应与交流日用配电系统保护相协调，相邻保护范围之间应重叠，不应存在保护死区。

4.2.2.3 直流配电系统内各电气装置应按照本指南第3章 的要求，针对不同特性配置完备的本体保护，保证电器装置内部故障时可靠切除。

4.2.2.4 多段直流母排中的一段母排发生短路故障时：

(1)不应使得本段和相邻母排上的电源装置和负载装置发生损坏；

(2)保护装置应能就地复位，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，应能在最迟不高于0.4s内断开母联保护电器，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，应能立即自动执行恢复相邻段母排上的供电和设备运行的操作；

(4)若系统采用集中式拓扑，母联保护电器建议采用固态开关（数十或数百μs动作并隔离故障），采用其他型式的母联保护电器时，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；

(6)如为周期无人值班机器处所，应能实现备用电源自动起动并自动连接配电板。

4.2.2.5 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，以限制短路对故障支路设备的影响；

(2)短路保护应能在最迟不高于0.6s内完成故障电源装置配电支路保护电器动作；

(3)不应使得本段和相邻母排上的其他电源装置和负载装置发生损坏；

(4)除母联保护电器外，本地和相邻母排其他支路保护电器不得动作（不包括自动卸载非重要负荷等情形）；

(5)如故障支路电源装置为直流配电系统唯一在网的供电电源，因短路故障及保护动作后导致直流配电系统失电时，应能在失电后30s内自动起动备用电源装置（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），恢复直流配电系统供电，最长不超过45s；

(6)如直流配电系统还有其他并联运行的电源装置，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情形）。如出于限制故障影响范围等因素考虑，允许母联保护电器动作，以减少对相邻段母排的影响；

(7)如直流配电系统还有其他并联运行的电源装置，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；在故障电源装置所在配电支路保护电器动作期间，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；在故障电源装置所在配电支路保护电器动作完毕后，随着供电电压恢复，非故障设备应能自动恢复为正常工作状态；日用逆变器应具备本章4.3.1.4 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；

(8)如为周期无人值班机器处所，应能实现备用电源自动起动并自动连接配电板。

4.2.2.6 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，本段和相邻母排电源装置应持续可用；

(2)短路保护应能在最迟不高于0.2s内完成故障负载支路保护电器动作；

(3)不应使得本段和相邻母排上的其他电源装置和负载装置发生损坏；

(4)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，允许母联保护电器动作，以减少对相邻段母排的影响；

(5)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电器动作期间，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，非故障设备应能自动恢复为正常工作状态；日用逆变器应具备本章4.3.1.4 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

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 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。

4.3.1.2 逆变器单独作为交流日用配电系统供电电源时，发生交流短路故障时，应按本指南第2章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。

4.3.1.3 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，发生交流短路故障时，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本节4.3.1.2 以恒流输出运行。

4.3.1.4 若发生本节4.2.2.5 和4.2.2.6 故障，会导致直流母排电压低于逆变器欠压保护停机阈值时，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本章4.2.2.5 (6)和4.2.2.6 (4)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。

4.3.1.5 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。

4.3.1.6 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。

4.3.2 选择性保护原则

4.3.2.1 除本节4.3.2.2 -4.3.2.5 另有规定者外，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。

4.3.2.2 交流日用配电系统发生故障时，应由交流侧保护电器选择性切除故障，尽量避免日用逆变器停机，且不应引起直流配电系统保护误动。

4.3.2.3 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)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电器，避免其他段母排上各支路保护电器动作和设备停止运行。

4.3.2.4 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内自动起动备用电源装置（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，短路故障及保护动作不应导致全部交流母排失电。建议使用差动保护或类似方式，使故障电源装置所在配电支路保护电器优先分断，且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）。

4.3.2.5 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

4.4.1 短路电流计算

4.4.1.1 可根据本指南附录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。

4.4.1.2 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。

4.4.1.3 各电源装置的短路电流贡献应基于制造商提供的电气模型及特性运行参数计算，对于储能装置，还应考虑实际荷电状态、老化情况等因素的影响。

4.4.1.4 直流综合电力系统应根据本章4.2.2 和4.3.2 原则制定保护电器动作的选择性，以确定熔断器、半导体器件及断路器的整定值。

4.4.1.5 应按照本指南第1章 1.3.2.5 和1.3.6.3 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。

4.4.2 保护电器的选择

4.4.2.1 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。

4.4.2.2 直流配电系统的导体及保护电器选择应符合本节4.4.2.4 -4.4.2.9 的要求。

4.4.2.3 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。

4.4.2.4 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。

4.4.2.5 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。

4.4.2.6 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；

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》。

(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，应不低于安装位置所应分断的最大预期短路电流；

(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值应尽可能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)快速熔断器应带有报警触点；

(7)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。

4.4.2.7 直流断路器选择

(1)直流断路器应具有过流保护、电气隔离和直流灭弧功能；

(2)直流断路器的额定电压不应低于系统的最高工作电压；

(3)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；

(4)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；

(5)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；

(6)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本章4.2.2.4 和4.2.2.5 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。

(7)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；

(8)连接储能装置的直流断路器额定电流应根据储能装置充放电电流选择，并按事故初期放电电流校验保护动作的安全性，并应与上下级回路（如有时）保护电器相配合。

4.4.2.8 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。

4.4.2.9 直流接触器（负荷开关）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，并具备耐受直流配电系统暂态过电压能力；

(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，1min过负荷能力应不小于1.5倍额定电流；

(3)直流接触器的断流能力不应小于最大预期过负荷电流，至少具备支持一次重合功能的能力；

(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。

4.4.3 选择性保护分析

4.4.3.1 直流综合电力系统应进行选择性保护分析并提交报告。

4.4.3.2 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本章4.2.2.4 、4.2.2.5 、4.2.2.6 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，确认其符合本章4.2.2 短路保护原则。

4.4.3.3 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本章4.3.2.3 、4.3.2.4 、4.3.2.5 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，确认其符合本章4.3.2 短路保护原则。

4.4.4 系统首次安装的试验和验证

4.4.4.1 获得CCS原则认可（具有设计认可证明文件或原则认可证书），且在认可过程中进行了本节4.4.4.2 中规定的全部或部分试验验证的直流综合电力系统，无需重复进行本节4.4.4.2 中规定且已在原则认可期间完成的试验。

4.4.4.2 直流综合电力系统应进行以下试验：

(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电器（如有时）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电器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，直流配电系统应能在45s内恢复供电（故障电源装置为唯一在网供电电源时）；直流配电系统不失电，非故障设备不欠压停机，日用逆变器应在低电压穿越期间保证交流负载不断电（存在其他并联运行电源装置时）；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，故障负载支路保护电器应动作；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电器（如有时）动作、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，在母联保护电器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；交流日用配电系统应能在45s内恢复供电（故障电源装置为唯一在网供电电源时）；交流日用配电系统不失电（存在其他并联运行电源装置时）；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。

直流配电系统采用分布式拓扑时，无需进行上述(1)规定的试验和验证。

仅使用三相交流同步发电机组作为交流日用配电系统供电源时，无需进行上述(4)-(6)规定的试验和验证。

交流日用配电系统各母排分段独立运行时，无需进行上述(4)规定的试验和验证。

4.4.5 同型式系统的试验和验证

4.4.5.1 同型式指系统拓扑结构、保护原理和控制逻辑无原则性变化。申请按照同型式系统进行试验和验证时，应提供证明材料，材料应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，并依据本节4.4.5.2 和4.4.5.3 逐项证实其与首制系统具有高度一致性。

4.4.5.2 满足以下条件的直流配电系统，可认为是同型式直流配电系统：

(1)直流母排分段数未发生变化；

(2)直流配电系统支路的保护电器类型（如直流断路器、快速熔断器、固态开关），且快速熔断器制造商未发生变化和变更；

(3)直流配电系统的电源装置类型未发生增加；

(4)直流配电系统中变流器规格未发生变化；

(5)直流配电系统每段母排上能够作为短路电源（见本指南附录1第2节2.1.2）的支路数量未发生减少；

(6)直流配电系统保护策略（见本章4.2.2 ）未发生原则性变化；

(7)用于计算短路电流的仿真/建模计算方法，应与首制系统所采用的方法相一致。

4.4.5.3 满足以下条件的交流日用配电系统，可认为是同型式交流配电系统：

(1)交流母排分段数未发生变化；

(2)日用逆变器主要保护功能（见本指南第2章2.3.2 ）和制造商未发生变化和变更；

(3)正常运行工况下日用逆变器投入运行数量未发生变化；

(4)交流配电系统保护策略（见本章4.3.1.4 和4.3.2 ）未发生原则性变化；

(5)用于计算短路电流的仿真/建模计算方法，应与首制系统所采用的方法相一致。

4.4.5.4 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，无需进行本节4.4.4.2 中规定且已在首次安装期间完成的试验。此类系统的试验尚应满足船旗国主管机关的有关要求（如有时）。

第5章　控制和监测

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。

5.1.1.2　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、保护电器等进行状态监控，并指示出现故障的子系统或设备。

5.1.1.3　控制系统设计应满足以下要求：

(1)控制系统架构应实现系统最大可用性、可靠性、可维护性及容错能力；

(2)网络拓扑应尽可能采用冗余星型或冗余环形结构；

(3)在所有航行条件和船舶操纵工况下均能控制直流综合电力系统，即使任何系统发生单一故障时；

(4)自动控制功能故障不应导致就地手动控制失效；

(5)系统应具备自检功能，当系统或供电电源故障时应发出报警；

(6)船舶推进或操纵能力不得受其他船载控制系统故障或误操作的影响；

(7)推进控制系统仅执行与推进相关的功能，不得干扰其他系统；

(8)控制系统的电磁兼容性应满足本指南第6章 要求。

5.1.1.4　控制系统应设置必要的联锁保护装置，以防止误操作导致的损坏。

5.1.1.5　执行安全动作应限制故障影响范围和后果，并遵循故障安全原则。

5.1.1.6　所有遥控和就地可操作位置均应设置独立于控制系统的紧急停止装置。紧急停止装置应设置防误触发保护。

5.1.1.7　PMS/EMS应与推进控制系统独立。

5.1.2　监测和报警要求

5.1.2.1　直流综合电力系统应至少设置表5.1.2.1 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 5.1.2.1

系统	监测参数	无附加标志			BRC、MCC、AUT-0 标志			备注
		报警	显示	自动停车	报警	显示	自动停车	
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
	电压极限报警（高/低）		√		√	√		读取所有相；异步发电机不适用
	频率或转速极限报警（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		√			√		在驾驶室和集控室（如有时）显示消耗功率和推进可用功率
	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				√			
	备用发电机转换				√			
	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
	发电机冷却水泄漏	√			√			如适用时
	励磁电压和电流		√			√		异步发电机和永磁同步发电机不适用
	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）	√	√	√	√	√	√	
	电压极限报警（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。
	励磁电压					√		异步电动机和无外部励磁电源的永磁同步电动机不适用
	频率极限报警（高/低）				√	√		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		√			√		异步电动机和无外部励磁电源的永磁同步电动机不适用
	定子绕组温度（高）	√			√	√		读取所有相；仅适用于电机功率>500kW 的交流电动机
	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3.7.6.1 永磁同步电动机隔离开关状态。
	电动机运行		√			√		
	电动机超速	√	√	√	√	√	√	自动停车仅适用于直流推进电动机
	在网电动机故障				√			

	备用电动机转换				√			
	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
	差动保护或类似保护功能	√			√			电动机额定功率≥1500kW
	锁轴装置、制动装置或能够将电机轴与主轴解耦的装置		√			√		仅对永磁同步电动机
变流器	输入电压极限报警（高/低）	√	√		√	√		在保护动作前报警
	输入电流极限报警（高）	√			√			在保护动作前报警
	输出电压		√			√		适用于电源装置变流器，包括日用逆变器
	输出电流		√			√		适用于电源装置变流器，包括日用逆变器
	输出频率		√			√		适用于日用逆变器
	过载（大电流）	√			√			在保护装置动作前报警
	预充电故障	√			√			如有时
	充放电指示		√			√		适用于储能装置变流器
	与 BMS 通讯状态（正常/故障）	√	√	√	√	√	√	适用于储能装置变流器
	外部紧急切断请求	√		√	√		√	如有时
	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
	变流器冷却水泄漏	√			√			如适用时
	变流器功率器件/功率模块温度（高）				√		√	在停机保护动作前报警
	相间电抗器温度（高）				√	√		如有时
	滤波电路保护脱扣	√			√			如适用时
交/直流配电板	母排电压极限报警（高/低）	√	√		√	√		每一独立分段
	母排频率极限报警（高/低）	√	√		√	√		仅适用于交流日用配电板
	自动降功率/卸载动作	√			√			
	主开关自动合闸失败				√			
	主开关自动脱扣				√			
	负载分配失败				√			如采用负载自动分配功能时设置
	母排绝缘电阻(正常/异常)	√			√			每一独立分段
	配电板冷却系统综合故障	√			√			如适用时
	配电板内冷却系统介质泄漏				√			如适用时
	功率/能量管理系统综合故				√			

	障							
其他	励磁电路接地故障	√			√			无刷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		√			√		

5.1.2.2 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《船舶应用电池动力规范》的要求。

第2节 PMS/EMS 设计要求

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 直流综合电力系统应设置PMS/EMS，以保证在船舶正常操作工况供给足够的电力。

5.2.1.2 应能自动进行电源装置的管理，确保船舶航行期间维持足够的发电能力。当船舶处于机动性要求较高的工况（如靠离码头）时，应自动或手动向PMS/EMS发送此工况信息，此时PMS/EMS不应基于负荷率自动断开电源装置。

5.2.1.3 应能实现直流综合电力系统结构优化与能耗控制（包括原动机单位油耗及储能装置充放电循环）。

5.2.1.4 应向操作人员提供所有电源装置、推进装置、保护电器和隔离开关的运行状态，包括变流器及必要的辅助系统。

5.2.1.5 应向操作人员提供运行状态监测、运行模式切换、故障指示及故障期间替代方案提示。

5.2.1.6 应能自动进行电源装置的启/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。

5.2.1.7 PMS/EMS任何功能故障不应影响电源装置的启/停管理、电源装置并网/解列和负载功率分配的就地控制。

5.2.1.8 负载功率分配应考虑不同电源装置的电压稳态波动及瞬态响应能力。

5.2.1.9 负荷分配差度超过电源装置安全裕度时，应触发报警。

5.2.1.10 电源装置轻微故障可由PMS/EMS进行预报警和延时停机，并提供能够在停机前进行手动干预的功能，且应满足本指南第3章3.4.2.4 的要求。

5.2.1.11 应在以下情况下，自动起动作为备用的主电源装置：

(1)主汇流排失电（此情况下应限制初始在网负荷）；

(2)持续电压跌落，且超过本指南第2章表2.1.2.2 规定的限值，但持续时间短于1.5s的电压跌落不应立即触发备用电源装置的自动起动；

(3)交流日用配电系统持续频率跌落，且超过本指南第2章表2.1.2.2 规定的限值；

(4)运行机组预期停机（如延时停机等情况）；

(5)电源装置负荷率高或过载；

(6)电力需求增加（如大功率负荷启动信号），且预期会导致电源装置负荷率高或过载；

(7)发电装置或储能装置故障。

5.2.1.12 如船舶处于仅由单一电源装置供电状态时，应自动完成备用电源装置备车，必要时，应设定预热、冷却的时序控制。

5.2.1.13 由自身故障处于停机状态的电源装置不应自动重新接入直流综合电力系统。

5.2.1.14 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。

5.2.1.15 如多个电源装置设置了自动启动，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，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。

5.2.1.16 各电源装置对于失电直流汇流排的预充电次数不得超过1次。

5.2.1.17 如设有变速运行发电机组，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。

5.2.1.18 如设有燃料电池发电装置，PMS/EMS应能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。

5.2.1.19 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，在电源装置平均负荷率超过90%时，应投入新的电源装置或适当限制推进功率。

5.2.1.20 PMS/EMS应对储能系统充放电实施控制。储能系统对船舶推进和操舵系统供电时，还应监测储能装置的可用能力和可用功率，并能估算当前工况下的剩余时间/航程。

5.2.1.21 在执行电源装置解列时，应防止剩余在网电源装置过载。

5.2.1.22 PMS/EMS、配电板或变流器应具有功率限制功能，当重载运行的船舶电站因单台或多台电源装置故障停机，导致其他在网电源装置面临不可接受的过载，且故障恶化速度过快超出人工干预能力时，PMS/EMS、配电板或变流器应立即限制推进功率并发出报警，防止造成全船失电。功率限制应持续至有足够主电源投入运行为止，随后PMS/EMS、配电板或变流器可解除限制，并将推进负载调整至目标功率值。功率限制不应因PMS/EMS失效而失去功能。

5.2.1.23 应能监测直流综合电力系统故障，当非故障段线路上的系统和设备供电中断时，应能自动执行本指南第4章4.2.2.4 (3)、4.2.2.5 (7)、4.2.2.6 (5)和4.3.2.4 (2)等类似措施恢复系统和设备供电。

5.2.1.24 PMS/EMS自身故障应能在有人值班位置进行报警，且不得导致主电源失电和推进、操舵系统失效。

第3节 推进控制系统

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 在所有航行工况下，应能从驾驶室对推进器的转速、方向和螺距（如适用）实施完全控制。

5.3.1.2 当推进控制系统发生故障时，在推进器转为就地控制模式之前，系统应保持当前的推进转速与转向不变。

5.3.1.3 遥控系统应实现从驾驶室对每台推进器的独立控制。全船失电后，应能在驾驶室重启推进系统。

5.3.1.4 多台推进器采用联动控制时，应在任一位置控制功能异常时，自动切换为独立控制。

5.3.1.5 遥控系统与就地控制应相互独立。遥控系统发生故障、功能异常或断电导致失效时，仍能维持或恢复推进的就地控制功能，反之亦然。

5.3.1.6 应在变流器或推进电动机机旁实现对推进器的就地控制，就地控制具有最高优先级。

5.3.1.7 每一推进器的就地控制与主控制器的通讯应使得任何单一故障时，就地控制仍能获得必要的显示和报警信息。

5.3.1.8 除非可能导致直流综合电力系统严重损坏或完全故障的情况，否则应允许设置越控功能，以避免推进系统停机。

5.3.1.9 推进控制系统应设置联锁，当存在可能导致停机的故障或起动推进电动机的过程可能导致装备损坏时，应禁止起动。应至少包括以下联锁功能：

(1)锁轴装置未释放；

(2)变频器冷却系统失效；

(3)推进电动机冷却系统失效（可越控）；

(4)励磁装置（如适用）故障；

(5)变频器严重故障；

(6)直流配电板未备妥；

(7)紧急停车功能触发；

(8)推进电动机转速设定值未归零；

(9)推进电动机轴承滑油压力过低（如适用）；

(10)冷却介质导电率过高（如适用）；

(11)电源装置与推进系统保护电器动作。

5.3.1.10 推进控制系统或变频器控制系统应能快速限制推进电动机功率，以配合PMS/EMS或配电板实现本章5.2.1.22 的功率限制功能。

第6章　电磁兼容

第1节　一般规定

6.1.1　一般要求

6.1.1.1　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。

6.1.1.2　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。

6.1.1.3　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。

6.1.1.4　直流综合电力系统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，各工况下其产生的瞬态电压、共模电压、电流的波动不会引起其他系统的误动作。

6.1.1.5　直流综合电力系统应考虑变流器在系统内部产生的所有干扰影响。

6.1.1.6　交流日用配电系统的电缆及布线、变压器和保护电器的设计应考虑谐波电流畸变水平引起的附加损耗及发热效应。

第2节　电磁兼容设计和分析要求

6.2.1　一般要求

6.2.1.1　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。

6.2.1.2　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。

6.2.1.3　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。

①参见 IEC 60533《船舶电气设备和电子设备的电磁兼容性》。

第3节 抗干扰设计原则

6.3.1 布置及电缆敷设

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

6.3.1.2 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；弱电信号线路应加屏蔽并在两端接地，在经过高电压（≥1000V）大功率（≥100kW）环境时，宜使用光纤传输。

6.3.1.3 电力电缆应远离信号控制电缆。电子设备的信号控制电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、垂直交叉走线等防护措施。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。

6.3.1.4 与变频器无关的电缆应与变频器相互远离，以免受到推进变频器输出的干扰。

6.3.1.5 电机（变频）电缆应独立于其它电缆走线。电机（变频）电缆、变频器输入电缆和控制电缆应安装在不同的电缆槽中，以避免电机（变频）电缆和其它电缆长距离的并行走线，进而减少推进变频器输出电压瞬变产生的电磁干扰。

6.3.1.6 电机（变频）电缆敷设时应尽可能短，如果需要敷设较长电缆时，应在变频器输出加装du/dt滤波器。电机（变频）电缆不应采用单芯电缆。

6.3.1.7 其他三相交流系统应尽可能避免采用三根单芯电缆，应设法减少成组单芯电缆间的电磁效应。可通过将三根单芯电缆错位排列以达到一根三芯电缆的效应，每隔不超过15m错位排列一次，电缆长度小于30m则无需错位排列。

6.3.1.8 电缆的敷设应避免靠近单芯交流电缆，同一电路不同相线的电缆间，不允许设有磁性材料。单芯交流电缆与平行的磁性材料间的距离应大于76mm。

6.3.1.9 直流与交流电缆平行敷设时，最小间距应不小于300mm；交叉敷设时需采用绝缘隔板隔离，间距应不小于100mm。若直流电压超过1kV，间距需额外增加20%。

6.3.2 隔离和滤波

6.3.2.1 电力推进系统的辅助用电应避免与通讯和导航设备使用同一电源适配器（开关电源）供电，必要时需采取隔离和滤波措施加以抑制。

6.3.2.2 交流逆变器后端宜增加隔离变压器，直流电源除带继电器、接触器、指示灯外，特殊用电采用开关电源隔离。

6.3.3 屏蔽

6.3.3.1 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，柜门和柜体之间宜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宜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。

6.3.3.2 船舶上的电力电缆尽可能靠近金属船体或舱壁敷设，应尽可能利用金属舱壁和甲板进行屏蔽。

6.3.3.3 电力电缆应尽可能采用铠装屏蔽电缆，其敷设应使得电力电缆带来的干扰尽量小，减少互相之间的感应和耦合。

6.3.3.4 重要的控制和通信电缆宜选带屏蔽层和金属铠装层的双绞电缆，双绞电缆的绞距宜小于

50mm。

6.3.3.5 模拟信号和低压数字信号用控制电缆必须采用屏蔽型电缆。对于模拟信号，应采用双绞-双屏蔽线，且对于每个信号采用单独的屏蔽绞线，不同的模拟信号不能使用同一根公共返回线。低压数字信号线宜使用双屏蔽电缆线，也可使用单屏蔽的多对双绞线。电压较高的开关量以及其他继电器信号用双绞线连接，并单独走电缆管或电缆槽。模拟信号和数字信号应使用分开的屏蔽电缆。

6.3.3.6 电缆屏蔽层应在接线盒或电缆引入盒内连接。除了同轴电缆的外导体外，电缆屏蔽层不能用作工作电路的回线。

6.3.4 接地

6.3.4.1 接地连接应符合以下要求：

(1)较低的高频阻抗；

(2)长度尽可能短（小电感）；

(3)连接器和导体防震；

(4)防腐蚀；

(5)便于常规检查。

6.3.4.2 所有接地接触面的金属应清洁，无油漆、氧化物或其他绝缘层。宜在最终装配前对每个接触点使用防腐蚀喷雾或涂胶。

6.3.4.3 接地应采用最小长度的实芯金属条代替软编织带，保持接地回路最短。

6.3.4.4 接地导体与设备或船体之间的连接应采用螺栓连接或焊接。

6.3.4.5 强电设备（如变频器、推进电机）和弱电设备（如控制器、交换机）分别设置接地点就近单点接地，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。

6.3.4.6 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，它们之间宜采用光纤或数字通信接口互连，避免由于电位差和空间电磁场干扰带来的影响。

6.3.4.7 金属门、防护盖等应采用短的、独立的、尽量软的导体连接到各自的壳体上。

6.3.4.8 铠装屏蔽电力电缆内屏蔽层一端接地，抑制电容性耦合；铠装层作外屏蔽层，两端或多端接地，抑制电感性耦合；两屏蔽层间应绝缘，内屏蔽层和金属铠装层均可抑制辐射耦合及强磁场耦合。

6.3.4.9 电机（变频）电缆应选用带铠装和屏蔽层的多芯对称电缆，且应保证两端实现360度接地。电机电缆的未屏蔽部分应尽可能短。

6.3.4.10 除在电源终端已接地的分支电路外，电缆的所有的金属保护层应保证其在整个长度范围里的电气连续性，且在电缆的两端应与金属船体进行有效地连接；金属编织物或护套应在电缆进入设备外壳的密封盖或接头处截止，并应与外壳有良好的电气连接。

6.3.4.11 电缆引入位置的安装应尽可能减少电磁干扰（如采用电缆屏蔽层在电缆接头处接地），以限制由变流器产生的高频纹波电流带来的影响。

6.3.4.12 信号电缆屏蔽层应采用单点接地。

6.3.4.13 电缆托架、电缆防护管之间应保持电气连接，并与船体之间应有尽可能多的电气连接。

6.3.4.14 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本指南第2章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7章　故障模式和影响分析

第1节　一般规定

7.1.1　一般要求

7.1.1.1　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是否会导致不可接受的后果。

7.1.1.2　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、推进电动机、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，包括但不限于：

(1)任何正常及可合理预见的异常运行状况，例如启动、正常停机、未投入使用以及保护对系统的影响；

(2)设备布局、布置和位置对系统的影响；

(3)由于短路、接地故障、火灾（如适用）、水淹（如适用）、冷却失败和超出设计运行参数的操作而引起的机械、电气和人为故障；

(4)发电装置、储能装置、保护电器、电动机、变流器、母排等发生故障；

(5)动力电源、控制电源、冷却/辅热系统、通讯系统等发生故障。

7.1.1.3　FMEA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、起火、爆炸、其他非预计发生的化学反应和断电。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。

7.1.1.4　对单一故障发生的概率进行划分时，直流综合电力系统可参考以下原则：

(1)有时发生：在产品服役期间内可能发生几次；

(2)偶尔发生：在产品服役期的某一时间（例如调试期、服役期的前半年或即将结束服役期）可能发生；

(3)很少发生：不太可能发生但存在可能性；

(4)极少发生：完全不太可能发生（大多数情况下，从未在实际项目中发现此类故障）。

7.1.1.5　对单一故障严重度进行划分时，混合动力系统可参考以下原则：

(1)灾难性的：故障发生后导致电力供应或推进操舵系统发生严重故障，无法维持供电或无法继续保持船舶推进/操舵动力，船舶处于失控或濒临失控状态，产生灾难性影响；

(2)严重的：故障发生后导致电力供应或推进操舵系统发生故障，供电能力降低或推进/操舵动力降低，导致船舶动力性能水平降低，产生严重影响；

(3)临界的：故障发生后导致电力供应或推进/操舵系统冗余性丧失，但可正常供电或推进/操舵，不会产生严重影响；

(4)轻微的：故障发生后不影响电力供应或推进/操舵系统正常供电及其冗余性，仅产生轻微影响。

7.1.1.6　如分析结论表明直流综合电力系统特定故障发生概率和故障严重度程度很高，可通过增加母排分段数量或每段母排的电源支路数方式，提升电源装置的冗余度。可采用以下方法评估直流综合电力系统的可靠性指标，识别影响供电可靠性的薄弱环节，并提出针对性改进方案，如优化检修策略、增加检修频次等，以提高系统可靠性。

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

(1)根据直流综合电力系统的电网结构、典型运行方式等要素进行系统定义；

(2)根据分析目的、系统故障判据，确定与系统有关的不希望发生的事件，记为顶事件；

(3)识别引起顶事件发生的直接的必要和充分的原因(底事件)，将所有直接原因作为输入事件，并根据这些事件实际的逻辑关系建立规范化的故障树[①]。

(4)底事件的故障率可采用制造商同类设备的历史数据进行估计，在所有底事件相互独立的条件下，可根据实际需要，选择推进电动机停机概率、推进电动机平均停用时间、推进电动机降额运行概率、推进电动机平均降额运行时间、日用负荷降额运行概率、日用负荷平均降额运行时间等作为重要指标进行定量计算。

① 参见 GB/T 7829《故障树分析程序》。

第8章　小型船舶应用直流综合电力系统的补充规定

第1节　一般规定

8.1.1　适用范围

8.1.1.1　本章适用于船长小于20m[①]、设有直流综合电力系统的船舶。

8.1.1.2　除满足本章要求外，船舶还应满足CCS《小型海船入级规范》或《内河小型船舶建造规范》的有关要求。

8.1.2　图纸和资料

8.1.2.1　船舶送审图纸和资料应满足本指南第1章1.2.1.1 的要求。

8.1.2.2　船舶备查图纸和资料应满足本指南第1章1.2.1.2 (1)的要求。

8.1.3　产品检验

8.1.3.1　产品检验应满足本指南第1章 第3节 的要求。

8.1.4　船舶检验

8.1.4.1　建造中检验

⑴直流综合电力系统功能性验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (1)的要求。

⑵控制和监测系统的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (4)的要求。

⑶发电机组的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (5)①-③、⑤-⑧的要求。

⑷储能装置的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (6)①-⑥的要求。

⑸燃料电池发电装置的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (7)①-④的要求。

⑹交流日用逆变器的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (8)①-②的要求。

⑺推进电动机的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (9)①-④的要求。

⑻光伏发电系统的验证应满足本指南第1章1.4.2.1 (10)①-④的要求。

8.1.4.2　建造后检验

⑴年度检验应满足本指南第1章1.4.3.1 (1)-(4)的要求。

⑵特别检验应满足本指南第1章1.4.3.3 (1)-(7)的要求。

8.1.5　直流配电系统的设计

8.1.5.1　系统线制应满足本指南第2章2.2.2 的要求。

8.1.5.2　绝缘配电系统和经高阻接地配电系统应满足本指南第2章2.2.3 的要求。

8.1.5.3　接地配电系统应满足本指南第2章2.2.4 的要求。

8.1.6　交流日用配电系统的设计

8.1.6.1　交流日用逆变器应满足本指南第2章2.3.2.2 和2.3.2.3 的要求。

8.1.7　电气装置

8.1.7.1　发电机应满足本指南第3章 第2节 的要求。

8.1.7.2　燃料电池应满足本指南第3章 第3节 的要求，3.3.1.2 和3.3.1.3 除外。

8.1.7.3　储能装置应满足本指南第3章 第4节 的要求，3.4.1.12 和3.4.3.5 除外。

8.1.7.4　光伏发电系统应满足本指南第3章 第5节 的要求，3.5.1.5 除外。

8.1.7.5　变流器应满足本指南第3章 第6节 的要求，3.6.1.5 和3.6.1.8 除外。

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。

8.1.7.6 推进电动机应满足本指南第3章 第7节 的要求，3.7.1.2 和3.7.6 除外。

8.1.8 系统保护

8.1.8.1 直流综合电力系统应满足本指南第4章4.1.1.1 -4.1.1.4 的要求。

8.1.8.2 直流配电系统

⑴保护电器及保护功能应满足本指南第4章4.2.1.1 -4.2.1.7 的要求。

⑵短路保护原则应能实现：

① 单母线系统直流母排发生短路故障时：

(a) 不应使得电源装置和负载装置发生损坏；

(b) 保护装置应能就地复位，如使用熔断器，其结构和布置应便于更换；

(c) 所有在网电源装置配电支路的保护电器应动作。

② 单母线分段系统中的一段母排发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.2.2.4 (1)、(2)和(5)的要求；

(b) 若系统采用集中式拓扑，应自动断开母联保护电器，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1.5s内断开母联保护电器，并能自动或手动恢复相邻段母排上的供电和设备运行。

③ 任一电源装置（含变流器）输出端发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.2.2.5 (1)、(3)、(4)和(6)的要求；

(b) 如故障支路电源装置为直流配电系统唯一在网的供电电源，因短路故障及保护动作后导致直流配电系统失电时，应能在失电后自动或手动起动备用电源装置；

(c) 如直流配电系统还有其他并联运行的电源装置，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电器动作期间，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。应能在2s内完成故障电源装置配电支路保护电器动作，并自动或手动恢复非故障设备为正常工作状态。

④ 任一负载（含变流器）输入端发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.2.2.6 (1)、(3)和(4)的要求；

(b) 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电器动作期间，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。应能在1s内完成故障负载支路保护电器动作，并自动恢复非故障设备为正常工作状态。

8.1.8.3 交流日用配电系统

⑴保护功能应满足本指南第4章4.3.1.1 -4.3.1.3 、4.3.1.5 和4.3.1.6 的要求。

⑵短路保护原则应能实现：

① 交流母排发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.3.2.3 (1)和(2)的要求；

(b) 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电器，避免其他段母排上各支路保护电器动作和设备停止运行。

② 任一电源装置输出端发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.3.2.4 (1)和(3)的要求；

(b) 如电源装置为交流日用配电系统中唯一在网的供电电源，因短路故障及保护电器动作后导致交流母排失电时，应能在失电后自动或手动起动备用电源装置。

③ 任一负载输入端发生短路故障时：

(a) 本指南第4章4.3.2.5 的要求。

8.1.8.4 短路电流计算和保护电器选择应满足本指南第4章4.4.1.1 -4.4.1.4 和4.4.2 的要求。

8.1.9 控制和监测

8.1.9.1 控制和监测的一般要求应满足本指南第5章5.1.1 的要求，5.1.1.7 除外。

8.1.9.2 控制站应至少设置表8.1.9.2 要求的报警和显示项目。

小型船舶监测和报警 表 8.1.9.2

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		√		读取所有相；异步发电机不适用
	电流		√		读取所有相；异步发电机不适用
	功率		√		在驾驶室和集控室（如有时）显示消耗功率和推进可用功率
	励磁电压和电流		√		异步发电机和永磁同步发电机不适用
	发电机运行		√		
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。
	电枢电流		√		读取所有相
	励磁电流		√		异步电动机和无外部励磁电源的永磁同步电动机不适用
	电动机运行		√		
变流器	输入电压极限报警（高/低）	√	√		在保护动作前报警
	输入电流极限报警（高）	√			在保护动作前报警
	输出电压		√		适用于电源装置变流器，包括日用逆变器
	输出电流		√		适用于电源装置变流器，包括日用逆变器
	输出频率		√		适用于日用逆变器
	预充电故障	√			如有时
	充放电指示		√		适用于储能装置变流器
	与 BMS 通讯状态（正常/故障）	√	√	√	适用于储能装置变流器
	外部紧急切断请求	√		√	如有时
配电板	母排电压极限报警（高/低）	√	√		每一独立分段
	母排频率极限报警（高/低）	√	√		仅适用于交流日用配电板
	母排绝缘电阻(正常/异常)	√			每一独立分段

8.1.9.3 PMS/EMS应满足本指南第5章5.2.1.1 -5.2.1.10 的要求。

8.1.9.4 推进控制系统应满足本指南第5章5.3.1.1 -5.3.1.9 的要求。

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) 为必要时选择适当限流设备提供依据，确保短路电流限制在保护电器的分断能力之内。

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本指南第4章 4.4.4 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0.5μs；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50μs。

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，应按照本指南第4章 4.4.4 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℃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）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℃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）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) 发电机+整流器；

(2) 动力电池组（或超级电容）、燃料电池及其接入的DC/DC变流器；

(3) 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）；

(4) 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向短路点提供放电电流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}。

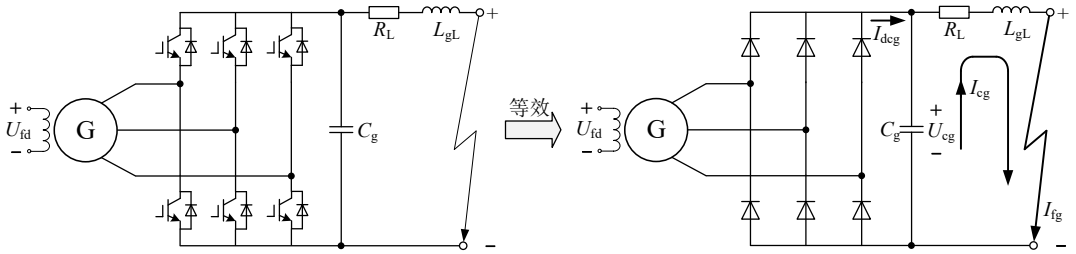


图 2.2.1-1 三相交流同步发电机+三相可控整流器的原理图及等效电路图

图2.2.1-1中，R_L为整流器输出电缆导体电阻；$L_{gL}=L_L+L_g$，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

---

① 1.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。

2.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。

3.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，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。

软件中的同步发电机模型（Sycchronous Machine）、二极管模型（Power electronic switch），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。

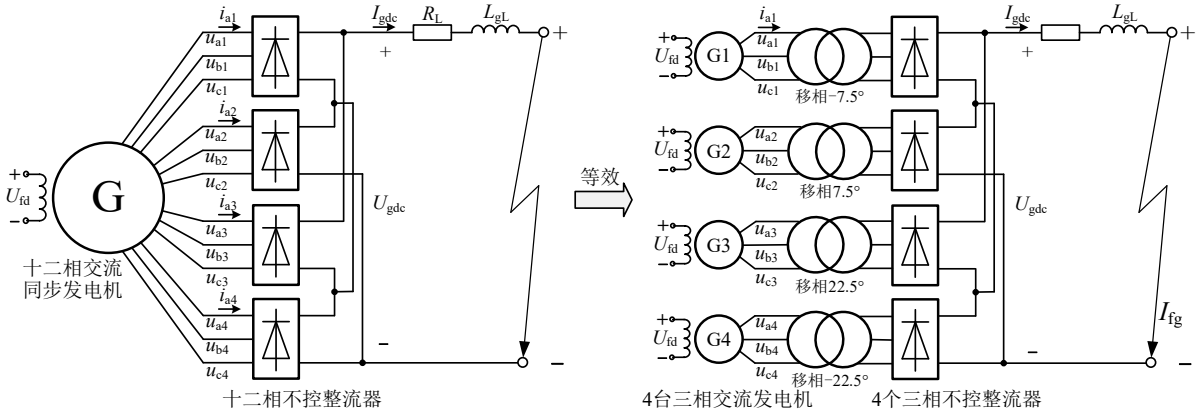


图 2.2.1-2 十二相交流整流发电机的原理图及等效电路图

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；$L_{gL}=L_L+L_g$，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（Sycchronous Machine）、二极管模型（Power electronic switch），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) 三相交流异步发电机+变流器

同2.2.3“变频器和电动机的建模”部分。

(4) 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电堆为例，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I_{fc}的函数，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，R_W为浓度损失等效阻抗（通常认为制造商提供的操作工况区间已避开了浓差极化），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。

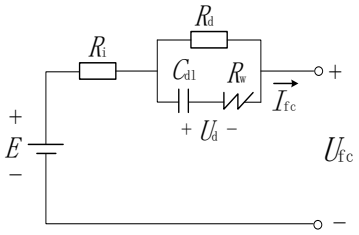


图 2.2.1-3 燃料电池电堆的等效电路模型

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容量较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。

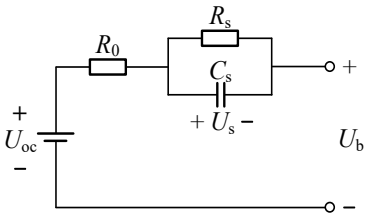


图 2.2.2-1 动力电池储能装置的等效电路模型

(2) 超级电容储能装置

超级电容储能装置通常由容量较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。

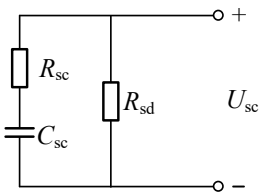


图 2.2.2-2 超级电容储能装置的等效电路模型

(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向短路点提供放电电流I_{cb}；2）当电容电压U_{cb}降至低于输入电压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向短路点提供放电电流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}向短路点提供放电电流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}向短路点提供放电电流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。

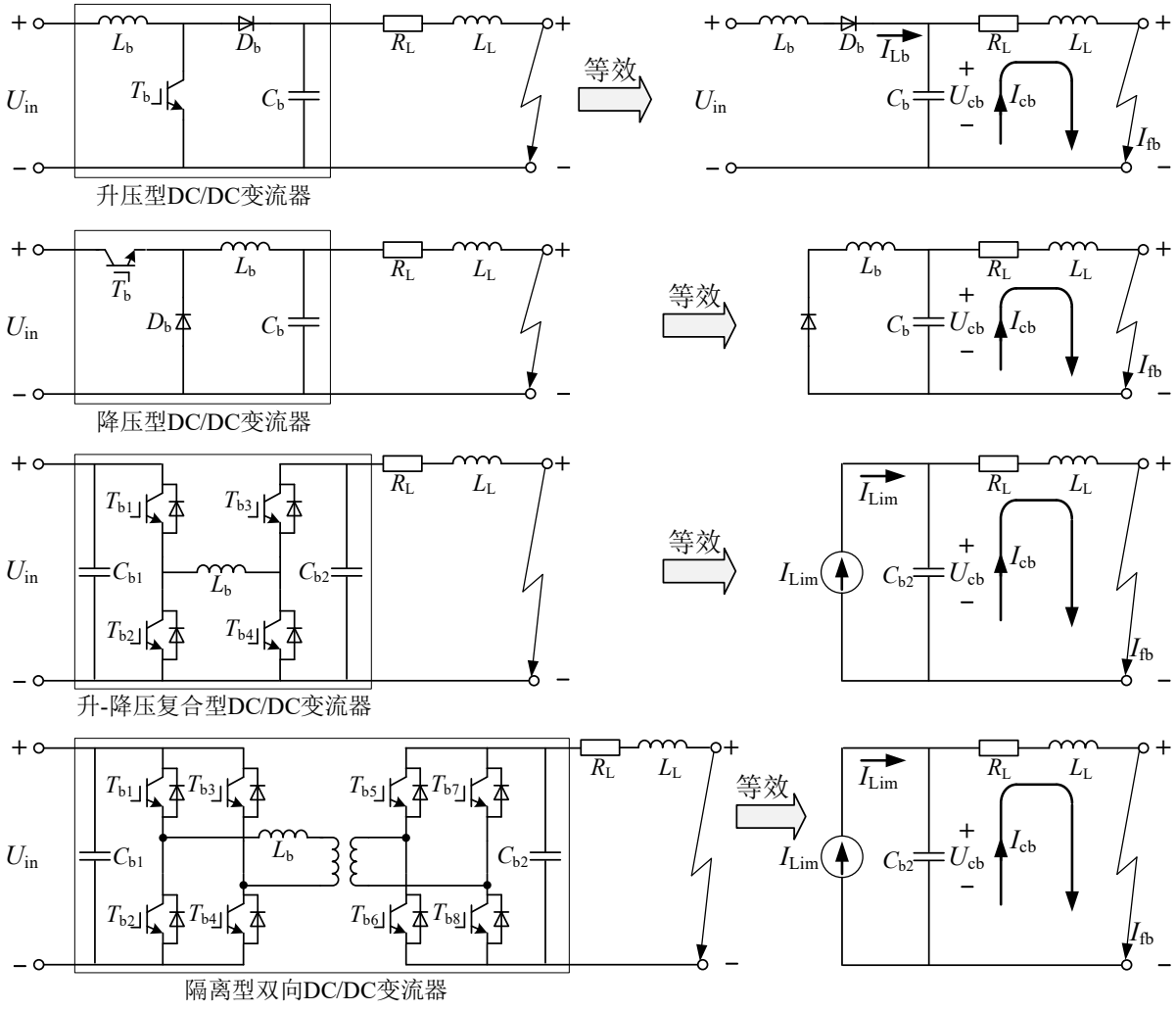


图 2.2.2-3 四类 DC/DC 变流器的等效电路模型

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），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动机、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。

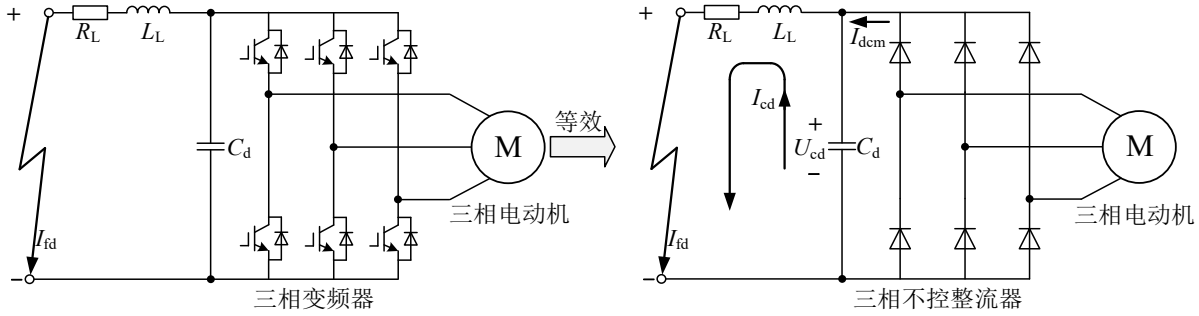


图 2.2.3-1 三相变频器+三相电动机的原理图及等效电路图

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向短路点提供放电电流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），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μs-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向短路点提供放电电流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向短路点提供放电电流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向短路点提供放电电流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，按照本指南第4章 4.4.2.6 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，按照本指南第4章 4.4.3.1 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方式下系统仿真模型，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，按照本指南第4章 4.4.2.6 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，按照本指南第4章 4.4.3.1 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，则将按照本指南第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。

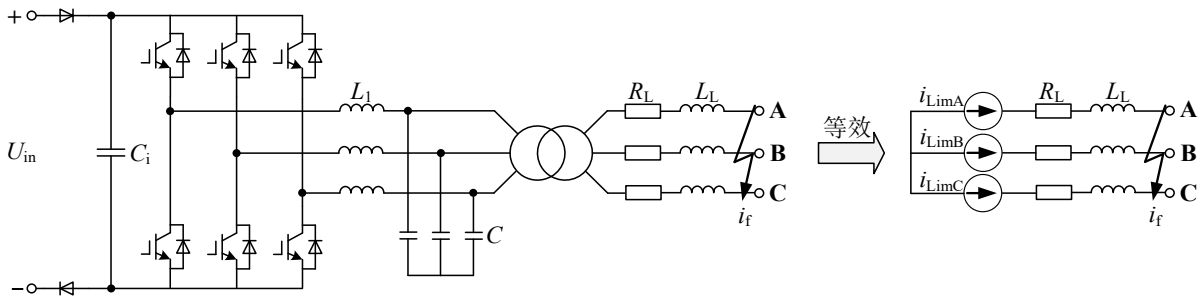


图 3.2.1 日用逆变器的原理图及等效电路图

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），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（Sycchronous Machine）、电阻模型（Resistor）、电感模型（Inductor）、感应电动机模型（Induction Machine），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方式下系统仿真模型，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，按照本指南第4章 4.4.3.3 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：

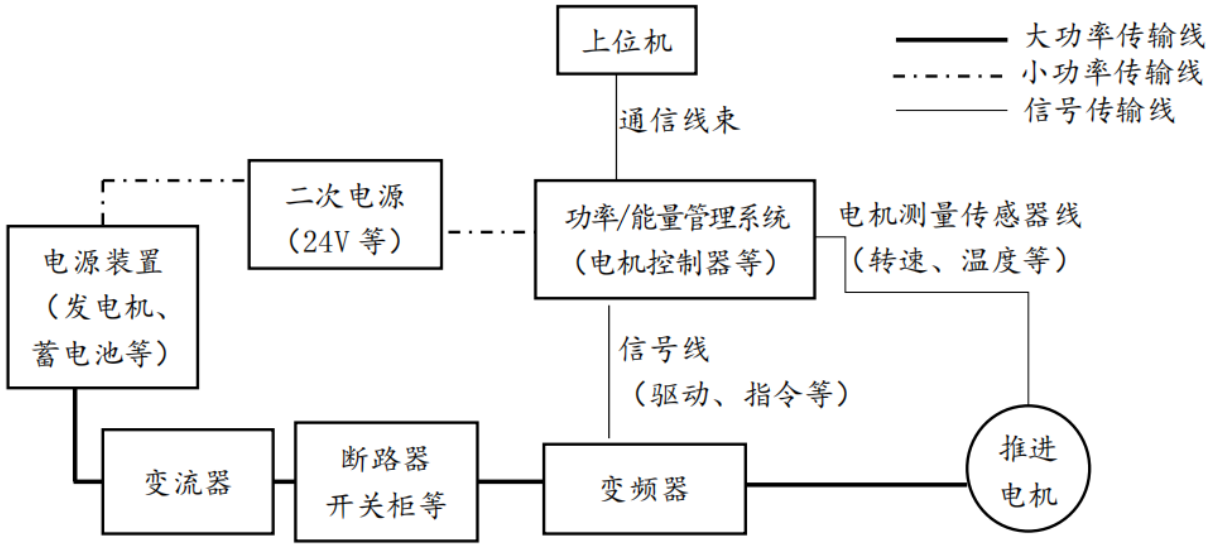


图 1.2 直流综合电力系统组成框图

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、PMS/EMS。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动机；处于船体艉部机舱，主要干扰源来自变频器；

PMS/EMS：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（140dBμV）到高频段的mV级（60dBμV）；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100~134dBμV）。

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1V~10V（即120~140dBμV）。

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，在矩阵中用符号“⊕”，若表明会出现干扰，用符号“#”。

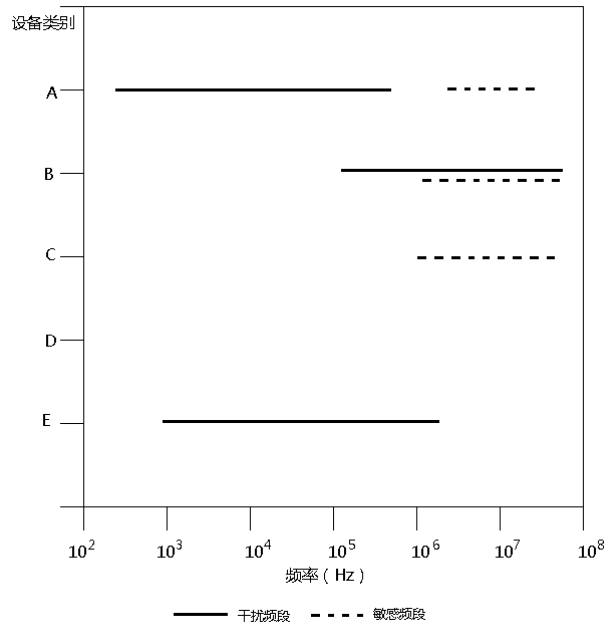


图 3.4-1　设备干扰频率分布图（实线：设备发射频率，虚线：设备敏感频率）

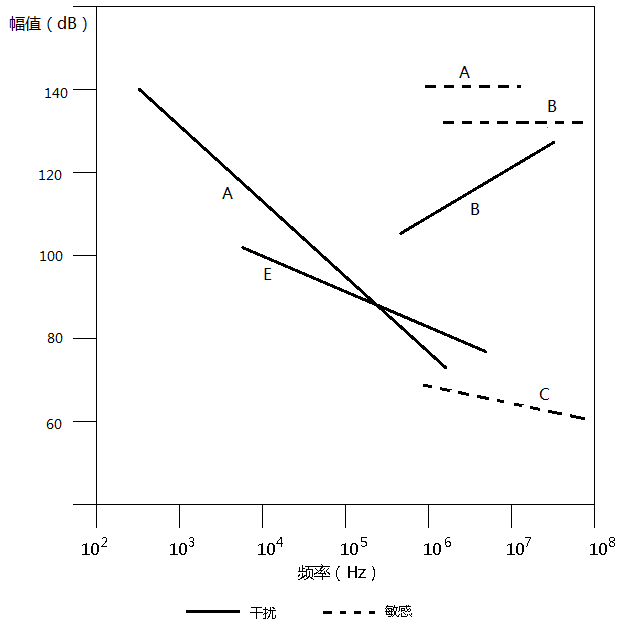


图 3.4-2　设备干扰幅值分布图（实线：设备发射幅值，虚线：设备敏感幅值）

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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	⊕	-	#	#	-		-	-	-	-	-	#	-
B3	⊕	-	#	#	-	-	-	-	-	-	-	#	-
C1	⊕	⊕	#	⊕	-	-	-	-	-	-	-	#	⊕

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

提供本指南附录2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：

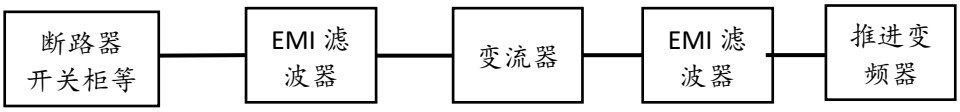


图 5.1-1 EMI 滤波器位置示意图

滤波器结构：

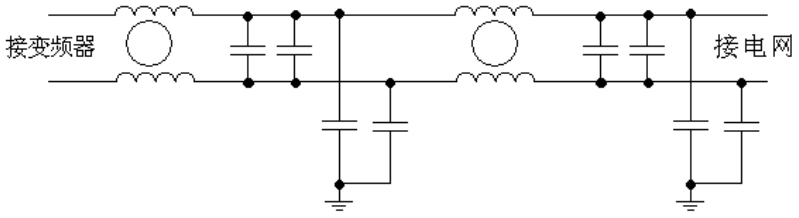
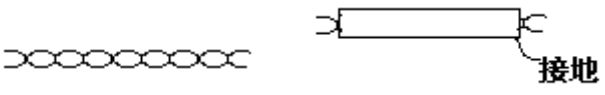


图 5.1-2 EMI 滤波器结构示意图

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，展示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。