



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GDxx-20xx

中国船级社

船舶直流综合电力系统检验指南

Guidelines for Survey of Ships Using DC Integrated Power System

(征求意见稿)

20xx

目 录

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 第 1 章 通则 | 1 |
| 第 1 节 一般规定 | 1 |
| 第 2 节 图纸和资料 | 2 |
| 第 3 节 产品检验 | 3 |
| 第 4 节 船舶检验 | 3 |
| 第 2 章 直流综合电力系统设计 | 6 |
| 第 1 节 一般规定 | 6 |
| 第 2 节 直流配电系统设计的要求..... | 6 |
| 第 3 节 交流日用配电系统设计的要求..... | 8 |
| 第 3 章 系统保护 | 9 |
| 第 1 节 一般规定 | 9 |
| 第 2 节 直流配电系统保护设计..... | 9 |
| 第 3 节 交流日用配电系统保护设计..... | 10 |
| 第 4 节 短路电流计算和保护电器选择..... | 11 |
| 第 4 章 控制和监测 | 13 |
| 第 1 节 一般规定 | 13 |
| 第 5 章 电磁兼容 | 15 |
| 第 1 节 一般规定 | 15 |
| 第 6 章 故障模式和影响分析 | 17 |
| 第 1 节 一般规定 | 17 |
| 第 7 章 短路保护计算方法 | 18 |
| 第 1 节 一般规定 | 18 |
| 第 2 节 基于熔断器保护的直流配电系统短路保护计算方法..... | 19 |
| 第 3 节 基于断路器保护的直流配电系统短路保护计算方法..... | 22 |
| 第 4 节 交流日用配电系统短路计算及保护方法..... | 23 |

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）适用于设有额定电压1.5kV及以下的直流综合电力系统，并为船舶主要电力负荷供电的船舶。

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》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，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：电源装置（包括发电装置和储能装置）经由直流母排向船舶主要电力负荷（如推进负荷、作业负荷、主要日用负荷等）实现供配电，其特征是船舶电源装置和主要电力负荷直接或通过变流器（整流器、推进变频器、作业变频器、日用逆变器等）均连接到直流母排。根据主要电力负荷的电制不同，直流综合电力系统一般包括直流配电系统和交流日用配电系统，分别为直流和交流负荷提供电力。

(2) 发电装置：能够为船舶负载提供电力来源，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汇流排，如交流发电机、直流发电机、燃料电池发电装置、太阳能光伏系统等。

(3) 储能装置：能够为船舶负载提供电力来源，也可由其他发电装置和/或储能装置进行充电，其特征是在正常的技术状态下，能量能够在储能装置和汇流排之间双向流动，如蓄电池（组）和超级电容器等。

(4) 直流母排：连接直流电源装置和直流负荷的汇流排。

(5) 变流器：系指转变电源电制、电压、频率、相数和其他电量或特性的电力电子设备，主要包括整流器（AC/DC）、逆变器（DC/AC）、交流变流器（AC/AC）和直流变流器（DC/DC）。

(6) 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主开关。

(7) 能量/功率管理系统：系指为船舶能量/功率获取及分配提供相应监测、控制和管理功能的自动化系统。

(8) 熔断器弧前时间：系指从施加足以熔化熔断器某一电流值，使熔体熔化到电弧出现瞬间的时间间隔。

(9) 熔断器飞弧时间：系指熔断器从出现电弧瞬间到电弧熄灭瞬间的时间间隔。

(10) 熔断器熔断时间：系指从施加足以熔化熔断器某一电流值开始到完全熔断的时间间隔，熔断时间包括弧前时间和飞弧时间。

(11) 泵升电压：系指驱动电动机的变流器，当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，此能量回馈到变流器直流侧电容引起的电压升高。

1.1.3 附加标志

1.1.3.1 对于设有直流综合电力系统的船舶，经船东或船厂/设计单位申请并经CCS审图与检验，

确认符合本指南第1章至第7章的相关规定后，可授予DC IPS^①附加标志。具体含义如下：

DC IPS：船舶设有直流综合电力系统，向全船主要电力负荷供电。

第2节 图纸和资料

1.2.1 送审图纸和资料

1.2.1.1 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)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)直流综合电力系统单线图；

(3)3.4.1 所要求的直流综合电力系统短路电流计算书，包括直流配电系统和交流日用配电系统2部分；

(4)3.4.3 所要求的直流综合电力系统选择性保护分析报告，包括直流配电系统和交流日用配电系统2部分；

(5)直流综合电力系统短路电流计算和选择性保护分析验证资料，对(3)和(4)的内容进行试验验证；

(6)直流综合电力系统控制和监测系统图；

(7)直流综合电力系统故障模式和影响分析（FMEA）报告（见第6章）；

(8)直流综合电力系统系泊和航行试验大纲。

1.2.1.2 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)直流综合电力系统电磁兼容风险分析和设计报告（见5.1.2）。

1.2.1.3 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^②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；

(2)直流综合电力系统单线图；

(3)3.4.1 所要求的直流综合电力系统短路电流计算，包括直流配电系统和交流日用配电系统2部分。用于计算短路电流的仿真/建模计算方法，应于首制船所采用的方法相一致；

(4)3.4.3 所要求的直流综合电力系统选择性保护分析报告，包括直流配电系统和交流日用配电系统2部分；

(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。

1.2.1.4 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^②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)直流综合电力系统电磁兼容风险分析和设计报告。

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

① 设有直流综合电力系统的船舶附加标志中的 DC IPS 为 DC Integrated Power System 的缩写。

② 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。一般的，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。

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，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 直流断路器、固态开关、直流接触器和直流快速熔断器等重要设备应满足CCS接受的标准^①，经CCS认可并取得CCS签发的产品证书，方可上船使用。

1.3.1.2 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。

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) 确认直流配电板和交流日用配电板各个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良好状态；

(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，在航行工况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：
 - 控制、监测和安全系统电源故障；
 - 控制、监测和安全系统可编程控制器故障；
 - 保护装置触发；
 - 保护装置故障；
 - 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和异步发电机组时，除应符合CCS《直流配

^① 如 JB/T5796《船用低压空气断路器》、CCS《混合动力船舶检验指南》第3章第2节固态开关、GB14048.3《低压开关设备和控制设备 第3部分：开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》、GB13539《低压熔断器》。

电系统检验指南》4.3.1和4.3.2的规定外，还需进行以下项目：

- ① 由机旁控制箱、配电板和PMS控制面板分别进行机组的启动和停止正常；
- ② 机组（连同变流器）并网预充电功能正常；
- ③ 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）的检查和起动/停止试验；
- ② 储能装置（连同变流器）并网预充电功能正常；
- ③ 逐一向直流母排投入每组储能装置（连同变流器）时，确认直流综合电力系统及在网储能装置处于良好状态；
- ④ 每组储能系统紧停功能的检查和试验；
- ⑤ 储能系统（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，应考核电池承受负载突加/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：

- 在系泊试验时应进行突加和突卸负载试验，选取电力负荷估算书中最大额定功率设备作为突加和突卸负载功率；
- 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 燃料电池发电装置系统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在PMS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变流器（逆变电源）供电时，需进行以下项目：

- ① 变流器的检查和起动/停止试验；
- ② 变流器带载运行的检查和试验；
- ③ 变流器停机自动转移负荷至另一台变流器的试验。

(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 由驾驶室推进操控面板和变频器分别进行推进电动机的启动和停止正常；
- ② 确认紧停功能正常；
- ③ 模拟故障情况下越控功能正常；
- ④ 确认空间加热器功能正常；
- ⑤ 模拟在网电源装置功率不足时，4.1.1.5 (8)功率限制功能有效。

(10)确认微电子控制器、工控机等电磁环境敏感的电子设备未与电动机、整流器、变频器、逆变器、变压器、开关柜紧邻布置；

(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5.1.3 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；
- (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，已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。

征求意见稿

第2章 直流综合电力系统设计

第1节 一般规定

2.1.1 功能要求

2.1.1.1 直流综合电力系统应能在船舶所有工况(包括正常航行、货物装卸、进出港和紧急情况)下,为船舶提供足够的电力。

2.1.1.2 直流综合电力系统的直流配电系统和交流日用配电系统应相互协调,以确保在所有正常和故障情况下旅客、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的同类船舶相当。

2.1.1.4 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。

2.1.2 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和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高的电压波动范围和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 直流配电系统设计的要求

2.2.1 供电与配电系统

2.2.1.1 直流配电系统可采用下列型式:

- (1) 双线绝缘系统;
- (2) 负极接地的双线系统(不采用船体作为负极回路);
- (3) 中线接地的三线系统(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类型的储能型直流电源装置时,不应使用2.2.1.1(2)和2.2.1.1(3)型配电系统。

2.2.2 绝缘配电系统和经高阻接地配电系统

2.2.2.1 对于绝缘系统和经高阻接地系统,应设有连续监测绝缘电阻,且能在绝缘电阻异常低时发出听觉和视觉报警的绝缘电阻监测报警器。

2.2.2.2 对于绝缘系统和经高阻接地系统,如第一次接地故障发生时线路上的开关设备不断开,则系统应设计为,在第一次接地故障清除之前发生第二次故障(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) 单极接地电流的大小应确保能触发系统接地监测和保护。

2.2.3 直流母排

2.2.3.1 直流母排应至少分成两个独立的分段，通常这些分段由熔断器、断路器或固态开关加以连接，并尽可能将电源装置和其他双套设备均分地连接于这些分段上。该连接应能实现故障保护和隔离，并能确保不同分段之间的选择性。不同分段中的任何故障都不应导致其他分段上的保护电器跳闸。

2.2.3.2 如采用分区供电，不连接的各直流母排独立分段应独立运行，不通过保护电器连接。各段独立运行的直流母排上均有电源装置接入和供电。

2.2.3.3 接入直流母排的电源装置类型可包括直流化学电源(如蓄电池、燃料电池、超级电容器)，固定频率和电压的交流整流电源或交流整流发电机组，变频率的交流整流电源或交流整流发电机组，和直流发电机组等。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和《钢质内河船舶建造规范》第3篇3.1.2.1的有关要求。

2.2.3.4 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2.2.3.3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。

2.2.3.5 接入直流母排并联运行的电源装置应手动或自动实现负荷分配。可以采用一台电源装置调节直流母排电压，所有其他的电压装置根据功率管理系统调节电流；或基于电源装置自身(或通过变流器模拟)的电压下垂特性实现负荷分配，并确保电源装置的输出功率不超过其最大可用功率。

2.2.3.6 电气系统各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。

2.2.3.7 如使用能量可双向流动的半导体变流器，应评估允许双向流动的能量的大小，配电系统的设计，应使得系统能承受能量输入输出不平衡带来的不利影响，如电压升高或降低。

2.2.4 电源装置

2.2.4.1 电源装置应能承受外部出现的短路故障不致损坏，当内部出现故障时，应能立即停止运行，并断开电源与母排的连接。

2.2.4.2 变速交流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。

2.2.4.3 发电机或储能装置出口线缆发生故障，发电机应能够依靠内部熔断器熔断或切断励磁停止输出，电池组依靠内部熔断器熔断停止输出。

2.2.4.4 对于永磁同步发电机，应设置相应的保护，用于在发电机至变流器/断路器之间的线路发生短路时，能够停止原动机和发电机的运行。

2.2.4.5 储能装置应通过DC/DC变流器和隔离开关接入直流母排。如各支路储能装置并不同时接入直流母排时，也不与其他发电装置并联时，可不设置DC/DC变流器。

2.2.4.6 每组储能装置应设有单独的保护，能够在直流母排或与其并联的其他蓄电池和超级电容器发生短路时切断回路。

2.2.4.7 每组储能装置的内部故障，不应影响与其并联的其他储能装置的正常运行。

2.2.4.8 储能装置或燃料电池发电装置如采用变流器向直流配电系统供电，当存在恒功率或恒电流供电的工作模式时，应具备相应措施以确保电源装置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。

2.2.5 变流器

2.2.5.1 直流母线系统中的变流器，应能承受直流母线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。

2.2.5.2 变流器应能实现对其内部支撑电容的预充电管理。

2.2.5.3 如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。

2.2.5.4 变流器应能通过功率半导体或独立的保护电器实现保护功能。

2.2.5.5 除必要的维护外，变流器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。

2.2.5.6 变流器应采用制动电阻或类似措施抑制或消耗制动能量（如推进电动机全速倒车产生的能量），避免电气系统或设备由于泵升电压过高导致损害。在电动机正常运行与电动状态时，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；或能提交证明文件，表明制动能量可回收不会导致直流电压泵升。

2.2.5.7 变频器可采用速度控制或功率控制等方式驱动电动机，并应限制变频器的输出转矩或电动机最高转速，保证航行安全。

2.2.6 岸电或其他外来电源

2.2.6.1 岸电或其他外来电源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综合电力系统运行造成严重影响。

2.2.6.2 岸电或其他外来电源应经过隔离开关接入直流母排。

2.2.7 推进电动机

2.2.7.1 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，避免在非推进状态下回馈的能量产生的高电压危及设备和人员安全。

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型式及绝缘监测，应符合《钢质海船入级规范》第4篇2.4.1-2.4.2和《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 交流日用配电系统电源装置包括连接至直流配电系统的逆变器和交流同步发电机组。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和《钢质内河船舶建造规范》第3篇3.1.2.1的有关要求。

2.3.1.3 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2.3.1.2中电源装置和用于其备用的电源装置同时失效。

2.3.1.4 直流配电系统应通过一个或多个逆变器、变压器（如适用）及滤波器（如适用）与交流日用配电系统连接。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。滤波器可由变压器漏抗和LC滤波器组成。

2.3.1.5 用于连接直流配电系统和交流日用配电系统的逆变器及变压器（如适用）应能防止环流的产生。

2.3.1.6 逆变器供电的系统中，正常工况下，逆变器应采用恒压恒频控制策略。短路故障后，应能立即切换至恒流恒频控制，并根据3.3.2 短路保护策略选择适当的电流幅值。恒流运行时间应与交流日用配电系统各层级保护电器短延时保护动作时间相适应，以实现短路保护和隔离故障的目的，一般不应超过0.5s。

2.3.1.7 交流日用配电系统失电后，应能自动启动备用的交流电源装置，并自动连接至交流主汇流排。必要时，无论交流日用配电系统上的发电机组是否可用，变流器均能够向交流负载提供稳定的电压和频率。

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节和CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第2章第2节的要求。对于某些特定情形（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隔离与分断。

3.2.1.2 电源装置应设有过载保护和短路保护功能：

(1) 过载保护整定值应根据电源装置的额定电流配置，并避开电源装置启动或并网时的冲击电流。

(2) 发生短路故障时，定速/变速发电机支路的保护由发电机自身切断励磁（如有时）功能和后端保护电器共同完成；

(3) 电池、超级电容器和燃料电池的高压盒内部应设置熔断器；

(4) 电源装置（或变流器）至直流母排之间应设置保护电器。保护电器应能及时分断，以防止储能装置通过DC/DC变流器开关器件反并联二极管向短路点馈送短路电流造成开关器件反并联二极管损坏。

3.2.1.3 变流器应具备独立的过载和短路保护功能。

3.2.1.4 负载应设有短路保护。发生短路故障时，负载输入端保护电器应动作，隔离故障。

3.2.1.5 变频器或逆变器支路，在发生直流母排短路故障时，应考虑当熔断器熔断前内部支撑电容电压降到开关器件反并联二极管钳位电压以下时，支撑电容通过开关器件反并联二极管放电的可能性，避免反并联二极管烧毁。

3.2.2 短路保护原则

3.2.2.1 除3.2.2.3-3.2.2.5 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和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 当无法满足3.2.2.1 要求时，经CCS同意可采用2.2.3.2 分区供电型式的直流综合电力系统，来实现配电系统的供电连续性。当采用分区供电型式时，则需要实现包括但不限于3.2.2.3 (1)、3.2.2.3 (2)、3.2.2.4 (1)、3.2.2.5 (1)和3.2.2.5 (2)的安全功能。

3.2.2.3 多段母线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) 立即断开母联开关（瞬动），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；

(4) 如达到上述(3)要求确有困难，应能在母联开关断开后立即自动恢复相邻母排上的供电和设备运行；

(5) 母联保护电器建议采用固态开关（数十或数百 μ s动作并隔离故障），当采用其他型式的保护装置时，应提交证明资料说明在任何工况下均能实现同样的安全性和可靠性。

3.2.2.4 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发电装置，进而造成的本段母排失电时，应能在失电后30s内自动启动备用电源装置，或经由相邻母排恢复该发电装置所在母排供电，最长不超过45s；

(3) 除母联开关之外，不应导致本段母排其他支路保护电器动作。如本段母排其他负载低压故障停机，应能在电压恢复后自动重新启动；

(4) 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。

3.2.2.5 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) 应能立即自动断开本支路保护电器（瞬动），不应导致本段母排电力中断和其他支路保护电器动作，并限制故障影响本段母排的持续时间和严重程度，如本段母排其他负载（日用逆变器除外）输入低压故障停机，应能在电压恢复后立即自动重新启动；日用逆变器应具备低电压穿越能力，在短路故障及保护动作期间，交流日用负荷不断电；

(3) 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。

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 交流电源装置出口应设有过载保护和短路保护功能。逆变器作为交流电源装置时，应在2.3.1.6要求的恒流输出工况结束后立即闭锁控制信号，限制逆变器输出。

3.3.1.2 负载应设有短路保护功能，重要负载配置过载保护功能。

3.3.2 短路保护

3.3.2.1 交流日用配电系统的短路计算和短路保护电器的选择，应满足CCS《钢质海船入级规范》第4篇2.5.2-2.5.4的要求。

3.3.2.2 逆变器供电的交流日用配电系统发生短路故障时，逆变器应能提供必要的电流及适当的维持时间，并保持至交流日用配电系统内保护电器动作。保护应能实现逆变器出口、交流主汇流排、汇流排联络支路以及交流负载入口保护电器动作时间的协调，重要电气设备电路的短路保护应实现完全选择性保护。

3.3.2.3 逆变器与发电机并联供电的交流日用配电系统发生短路故障，应设有合适的保护方式切除故障。

3.3.2.4 逆变器与发电机并联供电的交流日用配电系统的保护应当考虑短路后，逆变器与发电机输出特性差异大带来的保护整定问题。当系统由逆变器与发电机并联供电时，在最大工况和最小工况下均能实现与3.3.2.2同样的保护功能。

3.3.2.5 负载回路的保护电器应能实现对本支路短路的瞬动保护，确保短路故障后故障支路的快速切除。

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 应根据第7章 建模仿真的方法或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，以确定保护继电器、熔断器、半导体器件和断路器的整定值。应按照CCS《直流配电电力推进系统检验指南》4.2.2的要求在首次设计阶段对比仿真和选择性保护分析与试验结果的一致性。

3.4.1.2 直流配电系统的短路计算，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。

3.4.2 系统及电器的选择

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。

3.4.2.2 直流配电系统的导体及电器选择应符合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节和CCS《钢质内河船舶建造规范》第3篇第2章第3节的要求（可并联连接的电源装置总容量不大于250kVA的船舶无需提交短路电流计算书和保护电器协调动作分析）。

3.4.2.4 导体选择

- (1) 导体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小于回路的最高工作电压。由于回路阻抗较低且存在电容，还需考虑峰值过电压的影响；
- (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，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、不打火、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小于回路的最高工作电压。由于回路阻抗较低且存在电容，还需考虑峰值电压的影响；
- (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隔离开关电流耐受曲线范围内；

^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》。

(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电压。额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流;

(2)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;

(3)直流断路器的额定关合电流,不应小于短路电流最大冲击值;

(4)在上、下级保护装置均为断路器的配电系统中,若断路器设有长、短延时脱扣器,则在同一故障电流的作用下,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 主发电机输出端断路器若具备延时保护能力,则配置短延时保护,延时时间大于下一级断路器保护返回时间,保证其与下级断路器间的完全选择性保护;主发电机出口断路器若不具备延时保护能力,则应通过快速熔断器实现3.4.2.6 所要求的保护功能;

② 多段直流母排母联断路器配置瞬动保护,发生短路故障时,母联断路器应能够立即动作,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3.2.2.3 和3.2.2.4 的规定;

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。

(5)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电压。额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流;

(2)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;

(3)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;

(4)固态开关应能承受正常工作期间可能出现的过电流;

(5)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电压。额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流;

(2)直流接触器的断流能力不应小于最大可能的过负荷电流;

(3)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保护分析。

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3.2.2.3、3.2.2.4、3.2.2.5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,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。

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、变流器和保护电器状态进行监控，并指示出现故障的子系统或设备。

4.1.1.3 直流综合电力系统应至少设置表4.1.1.3 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和推进发电机、推进电动机、推进半导体变换器的组合报警。

直流综合电力系统监测和报警项目表

表 4.1.1.3

| 系统 | 监测参数 | 报警 | 显示 | 自动停车 | 备注 |
|--|------------------|----|----|------|--------------|
| 燃料 电池/ 锂电 池/超 级电 容器 半导 体变 换器 | 电压 | | √ | | |
| | 电流 | | √ | | |
| | 过载（大电流） | √ | | | 在保护电器动作前报警 |
| | 充放电指示 | | √ | | 适用于锂电池/超级电容器 |
| | 与 BMS 通讯状态 | √ | √ | √ | 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 |
| | 变流器冷却泵或风机故障 | √ | | | 如适用 |
| | 电抗器温度高 | √ | √ | | 安装电抗器时 |
| 滤波电路保护脱扣 | √ | | | 如适用 | |
| 日用 逆变 器 | 输入直流电压 | | √ | | |
| | 输入直流电流 | | √ | | |
| | 输出交流电压 | | √ | | |
| | 输出交流电流 | | √ | | |
| | 频率 | | √ | | |
| | 过载（大电流） | √ | | | 在保护装置动作前报警 |
| | 配电开关断开/闭合位置 | | √ | | |
| | 逆变器冷却介质温度高 | √ | √ | | 如适用 |
| | 逆变器冷却泵或风机故障 | √ | | | 如适用 |
| 电抗器温度高 | √ | √ | | | |
| 滤波电路保护脱扣 | √ | | | | |
| 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 |
| | 支路电流 | | √ | | 每一供电和馈电支路 |
| | 母联开关状态断开/闭合位置及动作 | √ | √ | | |

| | | | | |
|-------------------------|---|---|--|--|
| 逆变器/发电机支路保护电器断开/闭合位置及动作 | √ | √ | | |
| 负载支路保护电器断开/闭合位置及动作 | √ | √ | | |

注：

(1) 发电机组、推进电动机、发电机/推进电动机/船舶交流电网半导体变换器、直流配电板等监测和报警项目表同 CCS《直流配电电力推进系统检验指南》表 2.4.2 的有关要求。

(2) 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。

4.1.1.4 电池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。

4.1.1.5 直流综合电力系统应设置能量/功率管理系统，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、负载分配、降低/断开非重要负荷；功率储备分析、重载询问；

(2) 能量/功率管理系统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，能量/功率管理系统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，能量/功率管理系统应能发出报警，并自动切换到启动下一顺位的电源装置。

(4) 如设有变速交流发电机组，能量/功率管理系统在计算当前电源装置负荷率时，应考虑其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，能量/功率管理系统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；

(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，待在网电源装置功率恢复后再释放推进功率的限制；

(9) 应能监测直流综合系统故障，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 3.2.2.3 (4)、3.2.2.4 (2) 和 3.2.2.5 (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，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。

5.1.2 电磁兼容风险分析

5.1.2.1 由于直流综合电力系统技术尚在不断发展中，其面临的电磁环境可能会超出设备所能承受的范围，故直流综合电力系统装船时应进行电磁兼容风险分析，避免因电磁兼容问题导致不可接受的后果。

5.1.2.2 电磁兼容设计和风险分析应按照不低于CCS接受的标准^①对直流综合电力系统系统总体进行分析和评估，并形成电磁兼容风险分析和设计报告。

5.1.2.3 电磁兼容风险分析和设计报告应至少涵盖电磁环境分析、设备（系统）电磁干扰特性分析、设备（系统）电磁敏感特性分析、设备（系统）自兼容风险分析、设备（系统）间电磁兼容风险分析、电磁兼容设计措施及预期效果等内容。

5.1.2.4 直流综合电力系统的电磁兼容风险分析，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，在预见有可能出现电磁兼容风险时，应采取相应的设计措施消除风险，设计措施应确保能固化在产品中，并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。

5.1.2.5 直流综合电力系统电磁兼容设计应确保尽可能消除风险，不能完全通过设计消除的风险应结合电磁兼容试验进行评估，并设计相应预案，确保风险可控。

5.1.3 抗干扰设计

5.1.3.1 设备布置时，应将不敏感的大功率设备集中布置。在大功率设备集中的舱室内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。

5.1.3.2 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。

5.1.3.3 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，接地直流电阻应小于10mΩ。电子设备中的信号电路应接地，并与强电回路完全独立，隔离电阻应大于1MΩ，避免强电设备对弱电设备的干扰。

5.1.3.4 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（≥40dB），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。

5.1.3.5 电缆应成束对称布置。对于直流电缆，采用正极和负极电缆成束并排布置；对于三相交流电缆，则使用“品”字形成束布置，从而减小电缆向外产生的辐射干扰。

^① 参见 IEC 60533 《船舶电气和电子设施 电磁兼容性》。

5.1.3.6 弱信号线路应加屏蔽并在两端接地，在经过高电压（ $\geq 1\text{kV}$ ）大功率（ $\geq 100\text{kW}$ ）环境时，宜使用光纤传输。

5.1.3.7 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。

5.1.3.8 交流电路缆不应与信号接地线紧贴或近距离地平行敷设，相距不应小于 0.3m ，交叉时宜成直角。

5.1.3.9 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2.3.1.4 要求的隔离变压器，或仅对关键弱电设备采用隔离变压器供电。

5.1.3.10 存在电磁兼容风险的设备，应使用滤波措施，在弱电回路中，输入信号、输出信号、控制信号等均应经过滤波器滤波。

征求意见稿

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。在任何合理并可预见的故障发生后，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、保护电器、控制设备等故障发生时对船舶产生的影响，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。

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 如 CCS《故障模式和影响分析应用指南》（2017）。

第7章 短路保护计算方法

第1节 一般规定

7.1.1 一般要求

7.1.1.1 本章的目的是提供一种普遍适用的建模计算和保护方法供参考，其结果在偏于安全的前提下具有足够的精确性。若能给出相同的精度，可根据具体的情况采用其他特殊的计算方法。短路电流、电阻和电感也可以通过系统试验或模拟系统测量确定。在计算短路电流时，不考虑负荷电流。

7.1.1.2 完整的短路电流计算应能提供从短路开始到结束之间短路点电流随时间变化的细节。由于在没有通用计算公式的情况下，这种计算非常复杂。基于这种原因，在计算时，采用建模仿真的方式进行计算。

7.1.1.3 直流综合电力系统中存在大量分布电感、电容和电阻，应考虑分布参数和保护装置一致性对选择性的影响，对于首次安装系统应进行试验验证，应按照CCS《直流配电电力推进系统检验指南》4.2进行试验验证，对模型进行修正，并在后续安装系统中使用校正后的数据。

7.1.1.4 系统的建模应根据系统拓扑结构及不同运行工况下投入的设备，构建直流综合电力系统的仿真模型。

7.1.1.5 在计算本节短路电流时，考虑以下设备作为短路电源^①：

- (1) 交流同步发电机+不控整流；
- (2) 动力电池组（含超级电容）；
- (3) 变流器模块^②。

7.1.1.6 应计算两种不同幅值的短路电流：

(1) 最大短路电流：系统最大运行工况下的短路电流，用于校验电气设备的动稳定、热稳定及分断能力；

(2) 最小短路电流：系统最小运行工况下的短路电流，用于校验熔断器保护定值和灵敏度。

7.1.1.7 在计算最大短路电流时，应考虑以下的操作和运行条件：

- (1) 导体电阻为20℃的值；
- (2) 忽略各汇流排通过螺栓相互连接的接触电阻；
- (3) 动力电池组充电至满容量；
- (4) 需考虑熔断器或其他保护装置（如变流器、逆变器等）的限流作用。

7.1.1.8 在计算最小短路电流时，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；

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。

- (3) 动力电池组为制造商确定的放电终止电压；
- (4) 需考虑熔断器或其他保护装置（如变流器、逆变器等）的限流作用。

第2节 基于熔断器保护的直流配电系统短路保护计算方法

7.2.1 计算条件及假设

7.2.1.1 本节短路电流计算适用于双线绝缘系统发生极间短路的情形。

7.2.1.2 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) 母排及母排连接线缆极间短路故障；
- (3) 负载（含变流器）输入端极间短路故障等。

7.2.2 电气设备的建模计算方法

7.2.2.1 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。

7.2.2.2 三相交流同步发电机+不控整流

通常，三相交流同步发电机通过不控整流馈送的短路电流与变流器模块相比较小，在建模过程中，三相交流同步发电机可采用三相电压源模型，并填入制造商给出的短路电流水平和 X/R 值，整流器使用三相桥式电路模型。用于短路电流计算的等效电路模型如图7.2.2.2所示。

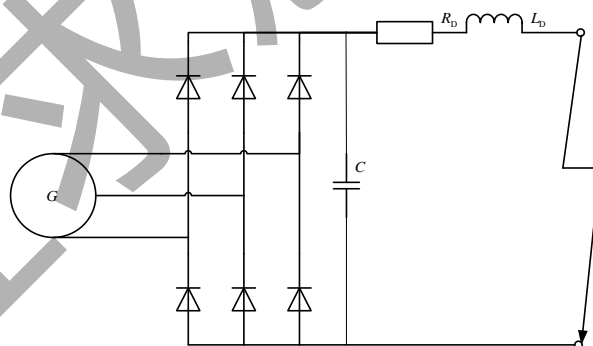


图 7.2.2.2 用于计算短路电流的三相交流同步发电机+不控整流器的等效电路模型

$$R_D = R_{DL}$$

$$L_D = L_{DL} + L_l$$

式中， R_{DL} 为整流器回路导体电阻， L_{DL} 为整流器回路导体电感， C 为的值为整流器直流支撑电容值，一般根据制造商提供的数据取值，如无直流支撑电容可取值为0。 L_l 为整流器回路串联的限流电感（如有时）。

7.2.2.3 动力电池组（含超级电容）建模

动力电池组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7.2.2.3 所示的戴维南等效电路模型表示。

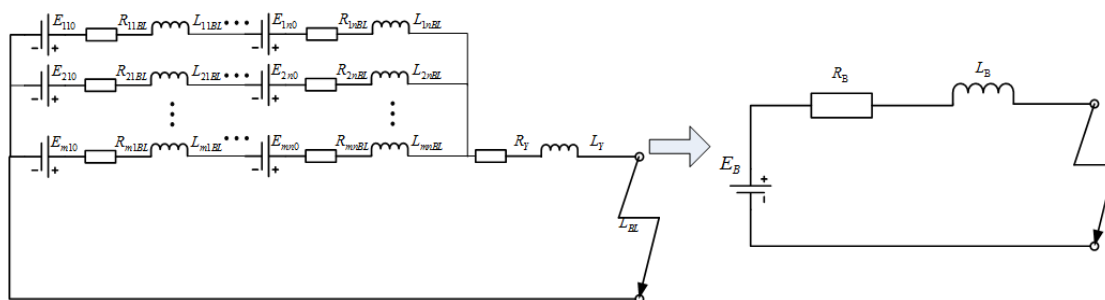


图 7.2.2.3 用于计算短路电流的动力电池组等效电路模型

$$E_B = nE_0$$

$$R_B = \frac{n(R_0 + R_{BL})}{m} + R_Y$$

$$L_B = \frac{n(L_0 + L_{BL})}{m} + L_Y$$

式中， m 表示电池组的并联数， n 表示单串电池组的串联数。 E_0 表示电池单体的开路电压， R_0 表示电池单体的内电阻， L_0 表示电池单体的内电感。 R_{BL} 为电池单体之间的导体电阻， L_{BL} 为电池单体之间的导体电感。 R_Y 为电池组并联后公共回路电阻（如有时）， L_Y 为电池组并联后公共回路电感（如有时）。

制造商可提供电池包阻抗值时，可使用电池包阻抗值加上公共回路阻抗来获得等效电路阻抗值。

7.2.2.4 变流器模块建模

变流器模块通常包括连接储能系统的DC/DC变流器、连接发电机的AC/DC整流器、连接永磁同步电动机或感应电动机的变频器。通常，DC/DC变流器可采用双向DC/DC变流器拓扑，AC/DC整流器采用十二相不控整流器或者三相桥式PWM整流器，推进变频器可采用三相桥式PWM逆变器拓扑。如变流器内部支撑电容瞬时馈送的短路电流通常远大于变流器额定电流，DC/DC变流器、AC/DC整流器和推进变频器可简化为支撑电容及其直流阻抗的模型。

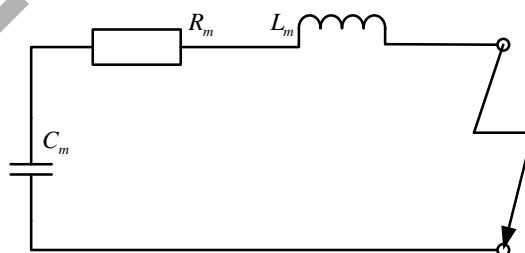


图 7.2.2.4 用于计算短路电流的支撑电容等效电路模型

$$R_m = R_C + R_{CL}$$

$$L_m = L_{CL} + L_l$$

式中，电容 C_m 的值为变流器模块直流电容值。如不知，可用 $C=1.2C_{ac}$ ， C_{ac} 是频率为100Hz

时的电容值。 R_C 为电容器内部等效串联直流电阻,若不知直流电阻,可用最大交流电阻值。 R_{CL} 为变流器回路导体电阻。 L_{CL} 为变流器回路导体电感。 L_l 为变流器回路串联的限流电感(如有时)。

7.2.2.5 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数倍的稳态直流电阻值,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值,如无法确定且必要时,等效电阻值应采用试验予以确定。

7.2.3 仿真计算及评判标准

7.2.3.1 分别根据各工况下系统仿真模型,针对7.2.1.2 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。

7.2.3.2 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及其总 I^2t 值,按照3.4.2.6 的规定校验快速熔断器的选型。

7.2.3.3 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3.4.3.2 的规定校验直流配电系统保护设计的合理性。

第3节 基于断路器保护的直流配电系统短路保护计算方法

7.3.1 计算条件及假设

7.3.1.1 本节短路电流计算适用于双线绝缘系统发生极间短路的情形。

7.3.1.2 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) 母排及母排连接线缆极间短路故障；
- (3) 负载（含变流器）输入端极间短路故障等。

7.3.2 电气设备的建模计算方法

7.3.2.1 供电源的建模

(1) 三相交流同步发电机+三相不控整流器的建模

该模型适用于交流同步发电机组经三相PWM整流器供电的电源。当发生直流配电系统极间短路时，PWM整流器通常会立即封锁脉冲，此后三相交流同步发电机将经过PWM整流器的反并联二极管向直流配电系统提供短路电流。采用仿真软件中三相交流发电机（Synchronous Machine）模型，并由二极管（Power Electronic Switch）模型搭建三相桥式不控整流器模型。

(2) 十二相交流同步发电机+十二相不控整流器的建模

该模型适用于十二相整流型发电机组。十二相整流型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极间短路时，十二相交流同步发电机可认为其4个三相定子绕组完全对称，将其等效为4台三相交流同步发电机（每台三相发电机的定子绕组电压、电流和阻抗参数与原十二相交流发电机单相参数相同；转子绕组电压参数与原十二相交流发电机相同、电流和阻抗参数是原十二相交流发电机的4倍）。采用仿真软件中三相交流发电机（Synchronous Machine）模型，并由二极管（Power Electronic Switch）模型搭建十二相桥式不控整流器模型。

7.3.2.2 变流器模块建模

变流器模块通常包括连接储能系统的DC/DC变流器、连接永磁同步电动机或感应电动机的推进变频器。通常，DC/DC变流器可采用双向DC/DC变流器拓扑，推进变频器可采用三相桥式PWM逆变器拓扑。当发生直流配电系统极间短路时，若DC/DC变流器拓扑不具备限流能力，则其储能装置会通过DC/DC变流器的反并联二极管向直流配电系统馈送短路电流，则采用7.2.2.2节动力电池组模型，并采用仿真软件中二极管（Power Electronic Switch）模型搭建DC/DC变流器反并联二极管模型；若DC/DC变流器拓扑具备限流能力，则可将DC/DC变流器用仿真软件中恒流源（CurrentSource）模型；推进变频器通常会配置止逆二极管，不会向直流配电系统馈送短路电流。

7.3.3 仿真计算及评判标准

7.3.3.1 分别根据各工况下系统仿真模型，针对7.3.1.2 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。

7.3.3.2 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3.4.2.6 的规定校验直流断路器的选型。

7.3.3.3 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3.4.3.2 的规定校验直流配电系统保护设计的合理性。

第4节 交流日用配电系统短路计算及保护方法

7.4.1 计算条件及假设

7.4.1.1 本节短路电流计算适用于包含逆变器供电的交流三线绝缘系统发生相间短路的情形。

7.4.1.2 计算方法遵循CCS接受的标准^①。

7.4.1.3 以下电源和负载推荐采用电气分析仿真/计算软件建模方法或同类方法：

- ① 逆变器；
- ② 交流发电机组；
- ③ 三相交流电缆；
- ④ 三相阻感负载和三相感应电机负载。

7.4.1.4 应根据系统特点选择可能全部出现短路点，一般应包括：

- (1) 交流主汇流排（如400V汇流排）及汇流排连接线缆相间短路故障；
- (2) 电力/照明分电箱汇流排（如230V汇流排）相间短路故障；
- (3) 交流负载（如400V、230V交流负载）输入侧相间短路故障。

7.4.2 交流配电系统主要设备的建模及仿真

7.4.2.1 供电源的建模

(1) 逆变器的建模

符合2.3.1.6 逆变器在短路故障后切换至恒流恒频控制，假设其额定电压为 U_n ，短路恒流输出电流为 I_{sc} ，则可采用下列方式之一：

- ① 等效电网（Pwwer Grid）模型，并将其额定值页中短路额定值（SC Rating）设置为：

$$MVA_{3p} = \sqrt{3} U_n I_{sc}$$

- ② 恒流源（CurrentSource）模型，并将其参数页中额定相电流有效值（AC:L-G, RMS）设置为 I_{sc} 。

(2) 交流发电机组的建模

交流发电机组可采用发电机（Synchronous Machine）模型。

(3) 三相交流电缆的建模

三相交流电缆可采用下列方式之一：

电缆（Cable）模型，并在其阻抗页输入基准温度下的阻抗值或电缆型号。

使用集中RL模型，即电阻（Resistor）和电感（Inductor）模型。

(4) 三相阻感负载和三相感应电机负载

三相阻感负载和三相感应电机负载可采用感应电机（Induction Machine）和等效负荷（Lumped Load/FixLoad）模型，并根据短路时的工况合理设置相应投运/退出状态。

7.4.3 仿真计算及校核

7.4.3.1 分别根据各工况下系统仿真模型，针对7.4.1.4 选取的短路点，依次进行相间短路故障设置，开展短路电流瞬时值的计算。

7.4.3.2 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3.4.3.3 校验直流配电系统保护设计和保护电器的选型。

^① 参见 IEC 61363-1《船舶和移动式及固定式近海设备的电气装置 第1部分:三相交流短路电流计算程序》。