

ICS 号 17.220.20
中国标准文献分类号 A55

团 体 标 准

T/CPSS 1008—2019

基于晶闸管的聚变电源用四象限整流系统 技术规范

Technical specification for four-quadrant thyristor
converter system for fusion power supply

2019-07-31 发布

2019-08-01 实施

中国电源学会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 使用条件	4
4.1 环境条件	4
4.2 电气条件	5
4.3 特殊运行条件	5
5 系统配置和设计	6
5.1 系统运行	6
5.2 系统设计原则	6
6 变流桥和旁通单元	7
6.1 总体要求	7
6.2 电气设计	8
6.3 保护配置	15
6.4 结构设计	18
6.5 冷却系统设计	19
6.6 旁通单元设计	20
7 变压器和电抗器	20
7.1 变流变压器	20
7.2 直流电抗器	22
8 隔离开关和导体连接	22
8.1 交流隔离和接地开关	22
8.2 直流隔离和接地开关	23
8.3 低压交流引线	23
8.4 直流连接排	25
9 运行监视和控制	25
9.1 控制	25
9.2 测量和监控	27
10 试验	27
10.1 总则	27
10.2 设备试验	27
10.3 系统试验	32

10.4 现场验收试验	33
图 1 12 脉波四象限运行变流系统	7
图 2 半导体器件热学网络模型（考尔模型）	13
图 3 半导体器件热学网络模型（福斯特模型）	14
图 4 磁约束核聚变超导磁体电源保护配置	16
图 5 变流系统主要过电压保护配置	17
图 6 并联晶闸管中电流分布规律	18
图 7 四象限运行时的运行区划分	26
表 1 冷却水水质的其他要求	4
表 2 冷却水的电导率分级和适用的电压等级	5
表 3 四象限运行中直流电压、电流及能量传输方向	6
表 4 常用大电流变流器电气连接和常用计算因数	9
表 5 变流器电流过载系数	12
表 6 波形系数 K_t	13
表 7 无镀层接头电接触面电流密度限值	23
表 8 封闭母线绝缘等级及对应的绝缘要求	24
表 9 高功率大电流变流器主要测量和监视信号	27
表 10 变流器设备试验项目列表	28
表 11 变流变压器特有试验项目	31
表 12 系统试验主要项目	33

前 言

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国电源学会提出,由中国电源学会特种电源专业委员会归口。

本部分主要起草单位:中国科学院等离子体物理研究所。

本部分参加起草单位:科华恒盛股份有限公司、九江赛晶科技股份有限公司、荣信电力电子股份有限公司。

本部分主要起草人:宋执权、傅鹏、李金超。

本部分参加起草人:苏先进、杨涛、欧阳峰、周奇。

中国电源学会 CPSS 台
全国团体标准
CPSS 团体标准

基于晶闸管的聚变电源用四象限整流系统技术规范

1 范围

本规范规定了基于晶闸管的聚变电源用四象限整流系统的使用条件、技术要求、关键部件、整体结构、加工工艺、试验验证以及其他要求。

本规范适用于脉冲或稳态高功率大电流运行的四象限变流系统,其典型应用为磁约束核聚变磁体电源系统和大电流综合交直流试验系统。具体应用中,该类型变流系统可实现数千安至上百千安的直流电流输出,系统直流电压多为数百伏至数千伏。

本规范也适用于两象限运行的大电流变流系统。

本规范中所述四象限变流系统,多采用晶闸管作为换流器件。

本技术规范不适用于直流输电及静止无功补偿等电网应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。被引用文件的条款,通过本规范的引用而成为本规范的规定条款。凡是注明日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,凡是不注明日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

- GB 311.1—2012 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则
- GB/T 311.2—2013 绝缘配合 第2部分:使用导则
- GB 1094.1—2013 电力变压器 第1部分:总则
- GB 1094.2—2013 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升
- GB 1094.3 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙
- GB 1094.5—2008 电力变压器 第5部分:承受短路的能力
- GB/T 1094.6—2011 电力变压器 第6部分:电抗器
- GB/T 1094.10—2003 电力变压器 第10部分:声级测定
- GB 1094.11 电力变压器 第11部分:干式变压器
- GB 1985—2014 高压交流隔离开关和接地开关
- GB/T 2900.33—2004 电工术语 电力电子技术
- GB/T 3859.1—2013 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-1部分:基本要求规范
- GB/T 3859.2—2011 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-2部分:应用导则
- GB/T 3859.3—2010 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-3部分:变压器和电抗器
- GB/T 5585.1—2005 电工用铜、铝及其合金母线 第1部分:铜和铜合金母线
- GB/T 5585.2—2005 电工用铜、铝及其合金母线 第2部分:铝和铝合金母线
- GB 5749 生活饮用水卫生标准
- GB/T 6892—2006 一般工业用铝及铝合金挤压型材
- GB/T 8349—2000 金属封闭母线
- GB/T 10236—2006 半导体变流器与供电系统的兼容及干扰防护导则
- GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差

GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变

GB 12668.501—2013 调速电气传动系统 第5-1部分：安全要求 电气、热和能量

GB 14048.1—2012 低压开关设备和控制设备 第1部分：总则

GB 14048.3—2008 低压开关设备和控制设备 第3部分：开关、隔离器、隔离开关以及熔断器组合电器

GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波

GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 16935.1 低压系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验

GB/T 17626.3—2006 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 17626.16—2007 电磁兼容 试验和测量技术 0Hz~150kHz 共模传导骚扰抗扰度试验

GB/T 17950—2000 半导体变流器 第6部分：使用熔断器保护半导体变流器防止过电流的应用导则

GB/T 18494.1—2014 变流变压器 第1部分：工业用变流变压器

GB 50255—2014 电气装置安装工程 电力变流设备施工及验收规范

GB 50150—2016 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

DL/T 5222—2005 导体和电器选择设计技术规定

JB/T 8636—1997 电力变流变压器

NB/T 25035—2014 发电厂共箱封闭母线技术要求

NB/T 25036—2014 发电厂离相封闭母线技术要求

IEC 60071-2 Insulation co-ordination – part 2 application guide

IEC 60146-1-1—2009 Semiconductor converters – General requirement and line commutated converter

– Part 1-1: Specification of basic requirements

IEC 60146-1-2—2011 Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide

3 术语和定义

除本章节给出的术语定义外，GB/T 2900.33—2004中所界定的术语及定义同样适用于本规范。

3.1

(6脉波)变流器 (6-pulse) converter

以晶闸管为换流器件的6脉波变流桥，是构成四象限变流系统的基本单元。为了实现直流大电流变换，通常采用非同相逆并联、同相逆并联、双反星形连接等拓扑结构。

3.2

四象限运行 four-quadrant operation

变流系统能够实现直流电流和直流电压的双向可变输出，两个方向的直流电压和两个方向的直流电流相联系，构成变流系统四种不同的运行状态，同时实现直流电能两个可能方向流动。

3.3

(高功率大电流)四象限变流模块 (high-power high-current) four-quadrant converter module

变流模块 converter module

由多个变流桥及其附属控制设备构成、能够实现四象限运行的高功率大电流变流模块，该模块是实现交直流能量变换的核心设备，也是四象限变流系统的主要组成部分。在本规范中，高功率大电流四象限变流模块有时也简称变流模块。

3.4

**(高功率大电流) 四象限变流系统 (high-power high-current) conversion system
变流系统 conversion system**

由变流模块、变流变压器、旁通单元、金属屏蔽母线、直流电抗器、交流隔离开关、直流隔离开关、直流连接排及其他附属设备构成的高功率大电流四象限变流系统。在本规范中，高功率大电流四象限变流系统有时也简称变流系统。

3.5

旁通 (单元) bypass

旁通单元是以晶闸管为控制器件的双向通流设备，旁通单元开通后，能够在变流模块和负载之间提供一个电流通路，阻断变流模块和负载之间的电能交换，实现直流电流续流。

3.6

交流排 AC busbar**快熔排 fuse busbar**

6脉波变流桥的桥臂中，以晶闸管为分界点，位于交流侧的导体排，一般将快速熔断器压装在交流排。本规范中，也称为快熔排。

3.7

直流排 DC busbar**晶闸管排 thyristor busbar**

6脉波变流桥的桥臂中，以晶闸管为分界点，位于直流侧的导体排，并联晶闸管通常压装在直流排上。本规范中，也称为晶闸管排。

3.8

直流汇流排 DC confluent busbar

6脉波变流桥中连接相同极性组三个直流排的母排，通常分正负两套，通常，正负母排宜预留各自的直流输出端。

3.9

交流接入排 AC connecting bar

6脉波变流桥中，交流接入排是连接变流变压器交流输出的导体排。其一端连接对应相的交流排，另一端连接低压交流引线。

3.10

(交流) 金属封闭母线 metal enclosed busbar

连接变流变压器和变流桥、带金属屏蔽外壳的交流导体排。

3.11

均一联结 uniform connection

所有主臂都可控或都不可控的一种联结。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-15-15]

3.12

模块化 modularization

借助简洁和清晰的接口定义,以及标准化和均一化功能和结构设计,将复杂的系统分解成不同功能及结构模块的组合,从而显著降低现场安装、调试、管理和维护,并且提高设备可靠性、可用性、可操作性及零部件通用性的设计思想。

4 使用条件

4.1 环境条件

变流系统的环境条件主要包括室内/外、海拔 ($\leq 1000\text{m}$)、气温范围 (室内: $-5\text{℃}\sim 40\text{℃}$; 室外: $-10\text{℃}\sim 45\text{℃}$)、相对湿度范围 (15%~无凝露条件下的最大相对湿度)、污秽等级、地震等级等条件。订货商应根据变流系统的实际使用环境,提供上述环境条件。

对于室外运行的设备,除了上述主要环境条件,订货商还要提供相应的雪载、风速、覆冰厚度等条件。

污秽等级的确定,应根据标准 IEC 60071-2 中的相应条款进行,对于特殊的应用条件,可参考 GB/T 16935.1 的相应条款。

设备抗震要求应由需方根据当地历史地震记录给出具体的要求 (地震烈度、峰值加速度、动态安全系数等),同时应给出当地地震响应谱及相应的加速度分布。

4.2 冷却条件

4.2.1 冷却介质

订货商需要规定变流系统主要的设备的冷却介质。大型变流系统中,变流桥、旁通单元、直流电抗器和其他交直流连接设备采用水或空气作为冷却介质,变流变压器采用油 (油浸式变压器) 或空气 (干式变压器) 作为冷却介质。

4.2.2 冷却水的水质

供应商应提供冷却水的主要参数,冷却水质在溶解性总固体、pH 值、硬度、氯化物、硫酸盐等其他方面的要求,应不低于标准 GB 5749 的相关要求,见表 1。

表1 冷却水水质的其他要求

参数	要求值
溶解性总固体含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 1000
PH 值范围	$6.5 \leq \text{ph} \leq 8.5$
硬度 (以 CaCO_3 计) / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 450
氯化物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 250
硫酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 250

4.2.3 冷却水主要电气参数

不同绝缘电压等级的交流系统，其冷却水的水质和电导率（在 25℃ 条件下）的选择应符合表 2 中的规定。

表2 冷却水的电导率分级和适用的电压等级

水质级别	电导率 mS/m	阀侧额定电压 U_{VN} V
I	5	$U_{VN} \leq 630$
II	1	$630 < U_{VN} \leq 1250$
III	0.2	$1250 < U_{VN} \leq 10000$
IV	0.05	$U_{VN} > 10000$

4.2.4 设备腐蚀和介质品质管理

如果交流系统和其他设备共用冷却水系统的可能，订货商应提供其他共享水路设备的材料属性，以避免交流系统和其他设备之间发生电化学腐蚀的风险。对于水冷湿面中有铜材料的情况，还应注意水冷系统中的溶解氧含量（ ≤ 50 ppb）。

对于油浸式交流变压器，应对油品材料特性、杂质含量、绝缘性能、可燃性等参数进行规定。

4.2.5 冷却方式

采用水冷方式的交流设备，订货商应给出设备水冷系统的进口水压、出口水压、水温范围、允许流量范围、水管道接口等参数。

对于交流变压器也应考虑变压器的冷却方式或空气循环方式。

对于控制柜等附属设备，如果现场无法满足运行条件，可以考虑加装空调或风扇等降温设备。

4.3 电气条件

4.3.1 电网条件

电网条件包括电网电压及波动范围、电网频率及波动范围、最大过电压倍数/时间及其次数、最大和最小运行模式条件下的系统容量、负荷等级等。如果供需双方没有特殊要求，具体技术指标可以依据 GB/T 3859.1—2013 中 5.3.2 的相应内容。

4.3.2 电能质量要求

订货商应对交流系统引起的电网电压波动、电压闪变、电压不平衡、电压偏差和电网谐波给出具体的规定。若无特殊要求，可以参照标准 GB/T 12325、GB/T 12326、GB/T 14549 和 GB/T 15543 中的相应条款。

4.3.3 抗扰度等级

对于大电流应用环境，应根据实际应用需求规定设备的抗扰度等级，各参量可选择不同的抗扰度等级。

4.4 特殊运行条件

对于特殊运行条件，供需双方应协商根据相关标准进行等效折算。主要的特殊运行条件，标准 GB/T

3859.1—2013 中 5.4 条款给出具体说明。

5 系统配置和设计

5.1 系统运行

5.1.1 系统构成

四象限变流系统通常由交流隔离开关、变流变压器、变流模块、低压交流引线、直流连接排、旁通单元、直流电抗器、直流隔离开关以及控制、测量装置等主要设备和仪器仪表构成。在实际的工程应用中，为了满足更大的直流电流输出和对纹波电流的限制，有时也采用更多的变流器构成 18 脉波、24 脉波等更多脉波数的变流系统。

5.1.2 运行特性

根据变流系统中能量和电流方向关系，变流系统运行区间可以分为四个象限。表 3 给出了变流系统四个运行象限中，直流电压、电流及能量传输方向。直流侧的电压和电流，可以根据负载运行需求，实现直流电压、电流的双向输出。本规范中，变流系统通常运行于整流状态，实现电网向直流负载的单向功率输出，工作于逆变状态的变流系统，实现负载侧能量回馈电网。聚变电源变流系统运行于整流和逆变状态，实现磁体能量和电网之间的双向流动，根据等离子控制的需求，对磁体电流进行控制。

表3 四象限运行中直流电压、电流及能量传输方向

象限	直流电压	直流电流	电能传输方向	运行状态
I	(+)	(+)	电网→变流系统→直流负载	整流
II	(-)	(+)	直流负载→变流系统→电网	逆变
III	(-)	(-)	电网→变流系统→直流负载	整流
IV	(+)	(-)	直流负载→变流系统→电网	逆变

5.2 系统设计原则

5.2.1 技术条件

不同负载运行特性对变流系统的设计和运行要求各不相同。变流系统的系统设计应从设计输入条件和系统运行工作制开始，订货商需要提供变流系统的额定电压、额定电流、直流纹波、电压响应时间、系统损耗和变换效率、并联变流桥之间平衡系数等主要运行参数，以及负载特性和运行工作制。对于变流变压器，订货商需要提供各次谐波含量作为变压器设计参考。磁约束核聚变磁体电源系统的负载多为大电感或超导电感，电感值高达亨级。磁约束核聚变运行中，有的磁体负载要求稳定的磁体电流，有的磁体负载处于脉冲功率运行，并且要求输出电压或电流有快速的响应速度。对于大电流的综合交直流试验系统，其运行特性则根据被试设备和具体的而定，系统参数配置时，应充分考虑试验系统所规定的功能范围。

订货商应参考 GB/T 3859.1—2013 中 6.5 给出的工作制等级，提供变流系统的运行工作制，如果在 GB/T 3859.1—2013 中表 14 中难以找到合适的工作制登记，供需双方须协商确定等效工作制并选择相适应的额定电流。

5.2.2 选型原则

大电流变流系统的设计选型时，应遵循如下的基本原则，确保满足上述设计输入的同时，做到变流系统的优化设计：

- 提高变流变压器的容量利用率，并且避免铁芯出现不平衡磁动势；
- 选择合适的变流器拓扑结构，提高并联晶闸管的电气容量；
- 增加变流器的并联数目和直流输出脉波数，增大直流输出并抑制系统谐波；
- 优化控制系统，降低运行损耗。

标准 GB/T 3859.2—2013 中表 1 给出了多种电气连接及其相应的计算因子，可供大电流变流系统电气结构选型时参考。

5.2.3 系统拓扑

图1给出了一个12脉波四象限变流系统的电气接线图。图中，两个6脉波变流桥直流侧经直流电抗器（L1&L2或L3&L4）反并联，两组反并联变流桥对分别由两组移相30°的变流变压器供电，构成一套基于晶闸管的12脉波四象限运行高功率大电流变流系统。变流桥直流输出端串接的直流电抗器，用以吸收移相相位差引起的瞬时电压差，平抑变流器之间的脉动环流，因此也称环流电抗器。

如果单个变流单元无法满足直流电压要求，宜采用多个变流单元（如图1所示）串联增压。从安全性和可靠性考虑，应避免采用晶闸管直接串联或6脉波变流桥直接串联的方式获得更高的直流电压输出。

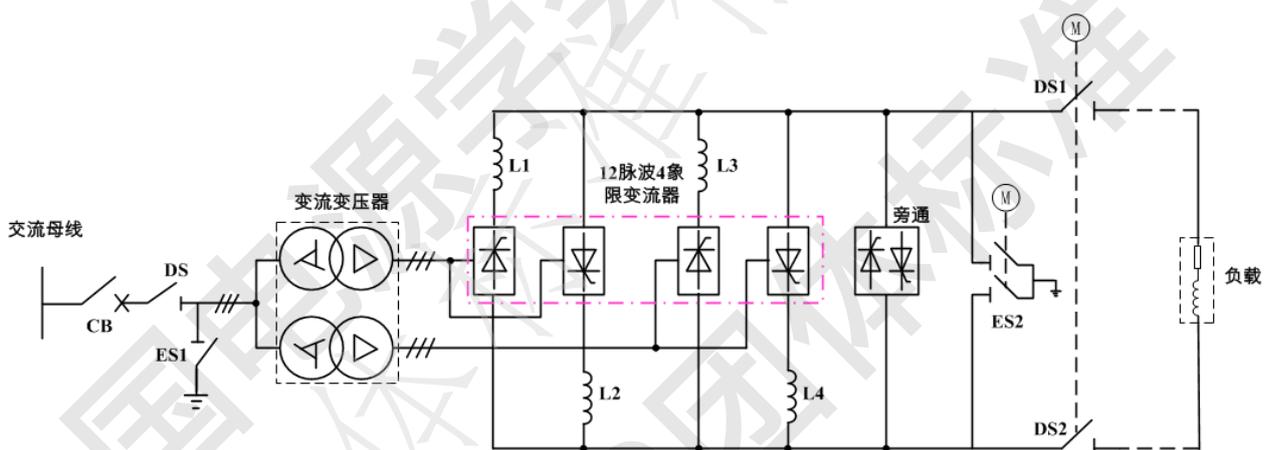


图1 12脉波四象限运行变流系统

5.2.4 主要系统参数

变流系统进行系统设计时，应根据设计输入初步确定系统的绝缘等级、额定电流、额定电压、变流桥拓扑、旁通单元拓扑、变流桥连接方式、晶闸管型号、晶闸管并联数目、快速熔断器、直流电抗器阻抗、变流变压器额定容量、变压器连接组别和连接方式、变压器容量、电压比、短路阻抗、导体材料等主要参数或信息。

6 变流桥和旁通单元

6.1 总体要求

变流桥和变流模块的设计宜符合标准化和模块化的原则，器件、配件、线缆宜采用成熟稳定的标

准型号，导体、绝缘件及其他结构件的设计加工宜采用标准化的型材和结构设计。设计过程中，宜根据通用性原则，合并和减少组件的型号和结构件的种类，简化生产维护管理和相应的工艺流程，提高系统和设备的可靠性、可用性、可维护性和可检查性。

6.2 电气设计

6.2.1 变流桥拓扑结构

6.2.1.1 拓扑选型

双反星形、同相逆并联和非同相逆并联等拓扑结构，适用于高功率大电流应用中变流桥电气结构。双反星形结构适合于低压大电流的应用，设备投资成本较低；同相逆并联结构也适用于低压大电流的应用，该结构换流效率高，对周围环境电磁干扰相对较小，双反星形和同相逆并联结构都需要同相逆并联变压器相配合。非同相逆并联结构，适合于大电流的应用，该结构可以承受较高电压，整流变压器投资相对较低，设备结构和布局相对简单。四象限变流系统设计中，宜根据具体的应用需求，从上述三种结构中选取，也可从标准 GB/T 3859.2—2013 的表 1 中选取合适的变流桥拓扑结构。

6.2.1.2 基本参数计算

本规范关于变流系统参数计算，所采用的参数符号和标记引用自标准 GB/T 3859.1—2013 中的表 1。本部分的计算基于如下的假设条件：

- 变流桥采用均一联结；
- 负载为无限大直流电感，即忽略直流电流纹波；
- 变流桥脉波数 $p=6$ ，换相数为 $q=3$ ；
- 忽略交流三相电压不平衡；
- 稳态运行，即直流电流和电压为常数；
- 换相重叠角 μ 小于一个脉波宽度 $2\pi/p$ 。

对于一个给定直流电压和直流电流的 6 脉波变流桥，根据下列公式可算出以下主要参数的近似值：
有功功率：

$$P = U_d \times I_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

基频视在功率/表观功率：

$$S_1 = U_{di} \times I_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

位移因数：

$$\cos \varphi_1 = P / S_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

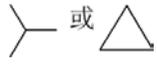
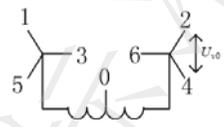
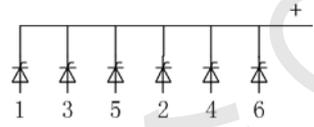
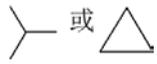
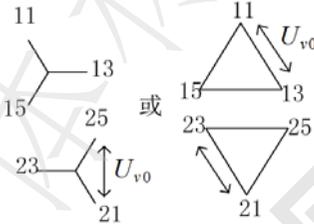
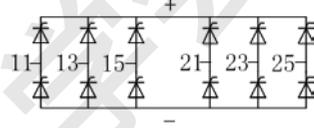
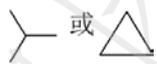
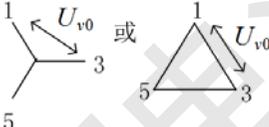
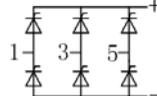
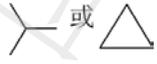
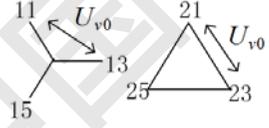
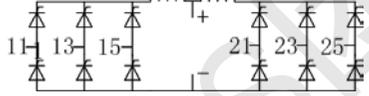
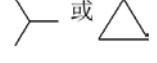
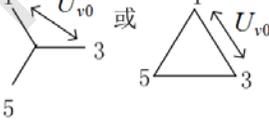
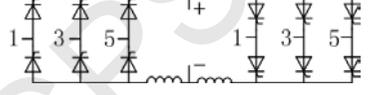
基频无功功率：

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

表 1 给出了常用大电流变流桥或桥对的电气连接和计算因数。其中，电流系数 I_d/I_d 为阀侧交流线电流和直流电流的比值，电压系数 $\frac{U_{di}}{U_{v0}}$ 为直流侧理想直流电压和阀侧交流线电压的比值，调整系数 $\frac{d_{x1N}}{e_{xN}}$ 中 d_{x1N} 是由变流变压器电抗引起的直流电压调整值，该值是以 U_{di} 为基值的标么值， e_{xN} 是变流变压器短路压降中的感性分量，也是标么值。对于连接方式 2 和 4，如果变流变压器采用两个相互独立变流变压器供电，则其 $\frac{d_{x1N}}{e_{xN}}$ 分别应为 0.5 和 0.519。

更多的变流系统电气连接和常用计算因数，可以参考标准 GB/T 3859.2—2013 的表 1。

表 1 常用大电流变流器电气连接和常用计算因数

序号	变压器结构		变流器结构	脉波数 p	换相次数 q	电流系数 I_v/I_d	电压系数 U_{dv}/U_{v0}	调整系数 d_{xN}/e_{xN}
	原边	副边						
1				6	3	0.289 $\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)$	0.675 $\left(\frac{3}{\pi\sqrt{2}}\right)$	0.5
2				6	3	0.408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0.25
3				6	3	0.816 $\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0.5
4				12	3	0.408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0.259 ^a
5				6	3	0.816 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0.5

^a 调整系数 d_{xN}/e_{xN} 计算中, e_{xN} 是基于整流变压器额定网侧电流 (而非一半) 计算。

6.2.1.3 直流电压相关计算

对于 6 脉波变流桥，直流电压和理想直流电压之间存在如下关系：

$$U_d = U_{di} \times \cos \alpha - U_{T0} - (U_{drN} + U_{dxN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}} \quad (\text{整流状态}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$U_d = U_{di} \times \cos(\alpha + \mu) - U_{T0} - (U_{drN} - U_{dxN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}} \quad (\text{逆变状态}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- U_d ——实际直流电压；
- U_{di} ——理想直流电压，可以根据阀侧交流线电压 U_{v0} 和表 4 中的电压系数求得；
- α ——为相控触发角；
- U_{T0} ——变流回路中所有串联半导体器件的门槛电压之和；
- U_{drN} ， U_{dxN} ——分别是额定直流电流条件下，电阻性直流电压调整值和电感性直流电压调整值，具体的计算可以参考标准 GB/T 3859.2—2013 中 5.1.4.1 的内容；
- μ ——换相重叠角。

6.2.1.4 位移角

位移角 φ_1 和相控触发角 α 及换相重叠角 μ 之间存在如下关系式：

$$\tan \varphi_1 = \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin[2(\alpha + \mu)]}{\cos 2\alpha - \cos[2(\alpha + \mu)]} \quad \dots\dots\dots (7)$$

其中， μ 的角度以弧度计算。用式 (8) 也能获得位移因数。

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_d + U_{T0} + U_{drN} \times I_d / I_{dN}}{U_{di}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

6.2.1.5 有功功率和无功补偿

变流系统的功率消耗计算，应从其负载工作制的分析入手。对于负载工作制的确定和分级可以参考标准 GB/T 3859.1—2013 中 6.5 的相关内容。负载工作制反应变流系统实际的工作需求。有功负荷和无功负荷的计算和统计中，应以长期最经常出现的工作为基础确定基本工作制。

对于 6 脉波及以上的大电流变流应用，位移因数和全功率因数数值差别不大。可以通过有功功率和位移因数角获得无功消耗，即：

$$Q = P \times \tan \varphi_1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

而需要补偿的无功容量可以根据式 (10) 获得。其中， P 为前述所得变流系统的有功功率， φ_1 为没有补偿时的位移因数角， φ_2 无功补偿后的位移因数角。

$$Q_C = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

对于大电流的直流试验平台系统和磁约束核聚变电源系统，其应用需求和运行工况很不稳定。推荐采用预测和统计计算的方式求得变流系统的无功和有功功率，从而为其变流系统的电源配置和设计提供依据。

6.2.1.6 谐波计算

关于变流桥网侧谐波的分析 and 计算，可以参照标准 GB/T 10236—2006 中 4.2 的内容。

6.2.2 短路电流计算

6.2.2.1 直流侧短路

变流系统根据短路点位置，可分为变流桥内部短路和外部短路。内部短路主要发生在变流桥臂，外部故障主要发生在直流侧输出端。

各种短路故障中，直流侧短路可能导致更加严重的破坏。短路电流的波形和短路电流值决定于短路回路内的电气参数，短路电流的上升率仅被回路中的阻抗所延迟，其稳态值取决于变流装置的阻抗压降、变流系统配置和短路回路内的电阻值。对于多个 6 脉波变流桥并联输出的大电流系统，如果某个变流桥直流侧发生短路，其他并联变流桥短路电流贡献及其连接回路的阻抗也应进行分析计算。

6.2.2.2 电抗器后短路

对于配置平衡电抗器（或相间变压器）的变流系统，如果短路故障发生在平衡电抗器下游回路，则平衡电抗器能够显著抑制瞬时短路电流的冲击。单个 6 脉波变流桥构成的变流系统，电抗器下游短路的破坏相对较小；对于由多个 6 脉波变流桥并联组成的变流系统，直流侧短路的危害，需根据具体的系统配置进行分析。

标准 GB/T 3859.2—2013 中表 16，给出了该标准中表 1 所列部分变流拓扑结构的直流侧短路时的短路电流值，可以用于直流侧短路电流的估算分析。

6.2.2.3 变流桥臂短路

变流桥臂晶闸管器件反向击穿，易引起变流桥臂内部短路故障。多并联器件的变流桥，发生单个（或少量）器件反向阻断特性失效，其串联快速熔断器应能够可靠熔断，从而防止故障扩大。

三相桥式（同相逆并联和非同向逆并联等结构）变流桥，桥臂内短路本质上是交流两相短路和交流三相短路相互交替的相间短路，非故障相向故障向贡献故障电流。桥式结构上下串联的两个/组晶闸管器件接在直流正负母线之间，变流桥个别桥臂短路，不会导致正负母线的直接连通，其短路特征也不同于直流侧短路。

双反星形带平衡电抗器（又称相间变压器）的变流系统，如果发生桥臂短路，则同时构成交流回路和直流回路的短路。非故障桥臂、并联运行的其他变流桥、以及反电动势的直流负载，都会向故障点贡献故障电流。双反星形结构变流桥并联成的交流系统，如果发生桥臂短路故障，其故障电流和对系统的危害，将比相同配置的其他变流系统更严重。

6.2.2.4 短路时刻的影响

直流侧短路或桥臂内部短路，都会在短路点叠加交流分量，不同的短路时刻，短路电流交流分量的冲击系数不同。如果短路发生时刻，某相交流电压在过零点附近，短路电流交流分量将获得较大的短路冲击值，变流桥结构的电磁力冲击更大。变流桥结构设计中，应重点分析最严重短路时刻的电磁力冲击，考虑短路电流交流分量和直流分量的叠加作用，并做好相应的结构设计和故障抑制措施。

6.2.3 晶闸管选型

6.2.3.1 器件参数初选

晶闸管是大电流变流系统的关键器件，其性能参数的选择将显著影响变流系统的运行性能和安全性。

器件参数选择的分析和计算，应以 6 脉波变流桥为单位。根据已经确定变流变压器阀侧额定线电压 U_{v0} ，合理确定晶闸管的断态反向重复峰值电压 U_{RRM} 和断态正向重复峰值电压 U_{DRM} ， U_{RRM}/U_{DRM} 取正常峰值电压的 2~3 倍，以确保足够的安全裕量。

大电流变流桥中，器件额定电流 $I_{T(AV)M}$ 和并联数目是两个相互关联的参数，参数计算和选型，需要同步进行，综合考虑变流桥运行特性、均流性能和成本，选择比较均衡的器件参数和并联数目。

根据变流系统最经常的工作制等级和运行需求，确定变流桥的基本运行工况，然后计算出 6 脉波变流桥的额定直流电流。而根据式 (11) 计算单个桥臂的平均电流 $I_{A(AV)}$ 。

$$I_{A(AV)} = \frac{sI_{dN}}{p} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- s ——串联换相组数，对于三相桥式为 $s = 2$ ，对于双反星形为 $s = 1$ ；
- I_{dN} ——为变流桥额定直流电流；
- p ——为桥臂数目，对于双反星形、同向逆并联、非同向逆并联结构也是脉波数。

6 脉波变流桥并联器件数目，由桥臂平均电流 $I_{A(AV)}$ 、备选器件的平均通态电流 $I_{T(AV)M}$ 、均流系数、电流波形、海拔、散热条件等因素影响和制约。

$$n_p = \frac{I_{A(AV)} \cdot K_R \cdot K_{AI}}{I_{A(AV)M} \cdot K_{CI} \cdot K_I \cdot K_t \cdot K_\theta \cdot K_V \cdot K_h} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- K_R ——变流桥电流过载系数，可以根据表 5 中的工作制等级查询使用；
- K_{AI} ——电流设计的安全裕量，根据可靠性要求取 1.1~1.5；
- K_{CI} ——与 K_R 和结温相关的允许过载倍数，晶闸管的运行结温应不能超过最高规定结温（125℃）。正常运行时，器件结温为 T ，则 $T \sim 125^\circ\text{C}$ 的温度区间，可以被过载运行利用，只要过载过程和结束后，结温不超过 125℃。如果允许过载运行利用该温度区间，则 $K_{CI} = \frac{K_R \cdot I_{T1}}{I_{T(AV)M}}$ ，其中 I_{T1} 为连续工作时器件的平均电流，如果不允许过载利用 $T \sim 125^\circ\text{C}$ 的温度区间，则 $K_{CI} = 1$ ；
- K_I ——均流系数，根据设计要求可取 0.8~0.9；
- K_t ——晶闸管电流波形系数，决定于器件的工作方式和负载特性；可查询表 6；
- K_θ ——环境温度系数，大电流变流系统的晶闸管器件基本都采用水冷， $K_\theta = 1$ ；
- K_V ——对于水冷却设备的介质流速系数，取 $K_V = 1$ ；
- K_h ——海拔系数，对于低于 1000m 应用环境的设备，取 $K_h = 1$ ；高于 1000m 的设备应用，请参考其他标准或手册校正。

表5 变流器电流过载系数

工作制等级 i	K_R	典型用途
I	1.0	电化学工艺等
II	1.5	电化学工艺等
III	2.0	轻工业和轻型牵引站应用
IV	2.0	工业应用，重载工作制
V	2.0	中型牵引站和矿山
VI	3.0	重型牵引站

注：该表中的工作制等级引用标准GB/T 3859.1—2013中表15的工作制等级的定义。

表6 波形系数 K_t

器件通流波形	器件导通角 λ				备注
	30°	60°	90°	120°	
	0.15	0.64	0.91	1.11	电感 $L_d = \infty$ 的情况
	0.15	0.64	0.89	1.0	电感 $L_d = 0$ 的情况 ($\alpha + \gamma < \pi$)
	0.27	0.56	0.86	1.0	电阻负载情况下的 交流相控开关 ($\alpha + \gamma = \pi$)

6.2.3.2 晶闸管参数细化和校验

晶闸管额定电压 U_{RRM}/U_{DRM} 的参数选型，应根据变流变压器和变流桥电压参数，不断迭代细化，直至最终定型。

器件参数的校核和变流桥电气参数的细化，要对晶闸管器件的结温分析计算。器件选型、并联数目确定以及电气设计校核，需要从正常运行和故障情况两方面，分析验证器件的结温和热效应：

a) 结温的分析验证

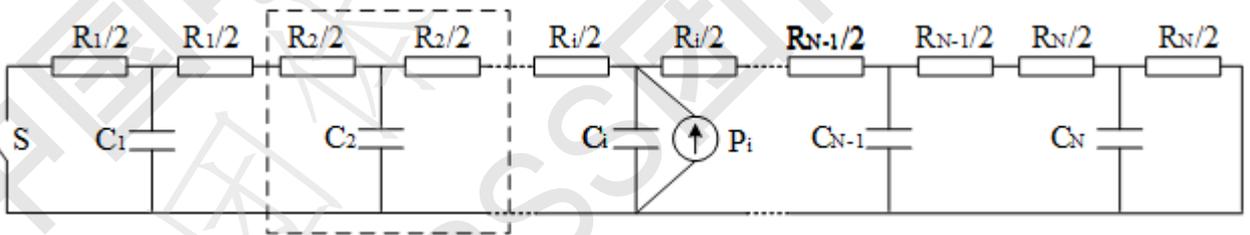


图2 半导体器件热学网络模型（考尔模型）

图2 给出半导体器件及其冷却系统的热学网络模型，在图中，

$$C_i = C_{thi} \rho_i V_i \quad [J / K] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$R_i = \frac{1}{\sigma_i} \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} \frac{dx}{S_{eff_i}(x)} \quad [K / W] \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- C_{thi} ——为材料的比热容， $J/(K \times kg)$ ；
- ρ_i ——材料密度， kg/m^3 ；
- V_i ——单元体积， m^3 ；
- σ_i ——传热系数， $W/(K \times m)$ ；

Δx ——单元厚度, m;

$S_{\text{eff},j}$ ——热流量有效区域面积, m^2 。

图 2 中的每个基本单元代表半导体器件传热回路中的一个零件的集中参数模型。 P_t 为半导体器件总功率损耗, 左侧开关 S 打开, 图中所示考尔模型可以模拟器件单面冷却的热学模型, S 闭合可以模拟器件双面冷却。

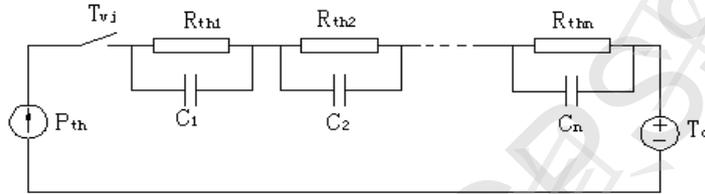


图3 半导体器件热学网络模型 (福斯特模型)

$$Z_{\text{thjc}}(t) = \sum_{i=1}^n R_{\text{th}i} (1 - e^{-t/\tau_i}) = R_{\text{th}1} (1 - e^{-t/\tau_1}) + R_{\text{th}2} (1 - e^{-t/\tau_2}) + \dots \dots \dots (15)$$

$$\dots + R_{\text{th}i} (1 - e^{-t/\tau_i}) + \dots + R_{\text{th}n} (1 - e^{-t/\tau_n})$$

式中:

P_{th} ——半导体器件的总功率损耗, W;

T_{vj} ——虚拟结温, $^{\circ}\text{C}$;

T_c ——外壳温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

图 3 为晶闸管器件传热的福斯特模型, 各部分的参数可以从晶闸管器件的技术说明书中直接查询。代入典型工作制中器件的总发热功率, 即可计算器件传热回路中各点的温度分布。另外, 结温的校验也需要考虑变流桥故障时的瞬时发热功率波形, 从而校验器件结温变化曲线, 确保变流桥在最严重的短路故障情况下, 不致发生严重损害。

晶闸管结温校验, 也可以根据标准 GB/T 3859.2—2013 中 7.3 所推荐的方法进行。

b) 热效应 (i^2t) 校验

热效应 (i^2t) 校验主要用于短路故障情况下的安全性能分析。先借助仿真或计算手段, 获得短路故障情况下的晶闸管器件的电流波形, 然后根据电流波形, 计算器件的热效应变化曲线。这种瞬时能量的分析中, 忽略器件的散热。最后, 通过对比器件瞬时热效应曲线和给定的器件热效应曲线, 验证器件在短路故障情况下的安全性。

6.2.3.3 晶闸管器件其他参数

除上述参数外, 并联器件的伏安特性曲线和反向恢复电荷等参数的分散性, 对变流桥的均流特性有较大影响。可以根据设计需求, 对这些参数的分散性进行限制。另外, 擎住电流 I_L 、维持电流 I_H 、换流关断时间 t_q 、门极驱动功率等参数也是晶闸管选型时的重要参考数据。

6.2.4 快速熔断器选型

快速熔断器主要用于限制变流桥过流, 并抑制故障扩大。在大电流的 6 脉波变流桥中, 快速熔断器基本采用臂接的方式, 每个并联晶闸管支路串接一个快速熔断器。

快速熔断器的额定电压 U_{FN} , 应大于线路正常运行时工作电压有效值, 并保留适当裕量。如无特殊规定, U_{FN} 应不小于变流变压器阀侧线电压有效值。

$$U_{\text{FN}} \geq 1.1 \times U_{\text{v0}} \dots \dots \dots (16)$$

快速熔断器额定电流选取时，应考虑并联器件之间电流的不平衡。其额定电流应不低于桥臂内最大电流支路电流有效值的 1.3 倍。

$$I_{FN} \geq 1.3 \times I_{\max} \quad \dots\dots\dots (17)$$

快速熔断器参数选型时，还应对其热效应 (I^2t) 进行校验。其热效应 (I^2t) 宜不大于串联半导体器件的热效应 (I^2t)。

$$(I^2t)_{\text{fuse}} \leq (I^2t)_{\text{th}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

6.3 保护配置

6.3.1 保护种类

变流系统的保护设备主要确保电路、设备、重要负载和电力电子器件在非正常电气条件下的可靠性，并且确保电力电子器件免于损坏。如果器件或设备故障难以避免，保护设备应能恰当限制故障范围，阻止故障的发展扩大。对于大电流变流系统，主要的故障包括短路故障、过电压故障、支撑系统故障等。

6.3.2 配置原则

变流系统的保护除了根据具体的故障特点进行功能配置外，还用遵守以下的基本原则：

- a) 保护应能迅速可靠切除或抑制故障；
- b) 根据实际的运行需求，保护配置应能同时兼顾灵敏性和可靠性；
- c) 保护的出发点在于，保护相对脆弱的晶闸管器件免于故障损坏，即使主保护功能失效，后备保护应能够可靠抑制故障进一步的发展和扩大；
- d) 保护配置应能够兼顾人员、本身设备和负载的安全。对于极端重要的特殊负载，变流桥保护应能够和其他专门保护协同保护负载；
- e) 保护系统应具备监控功能，故障发生和保护动作后，能够实现故障点定位和初步的故障分析，提高变流系统的可维护性和可用性。

6.3.3 过流或短路故障保护

6.3.3.1 短路保护配置

晶闸管器件热容小，承受浪涌电流冲击的能力差，在变流系统过电流保护中，晶闸管是首要保护对象。此外，也要防止极端严重短路故障，对变流桥和变流变压器机械结构的电磁力冲击。

大电流四象限变流系统通常配置交流短路保护、直流短路保护、桥臂短路保护以及过负荷保护等功能。这些保护有各自的保护对象和范围，即可以独立动作实施保护，也可以多种保护协同承担保护功能。

6.3.3.2 交流侧短路故障保护

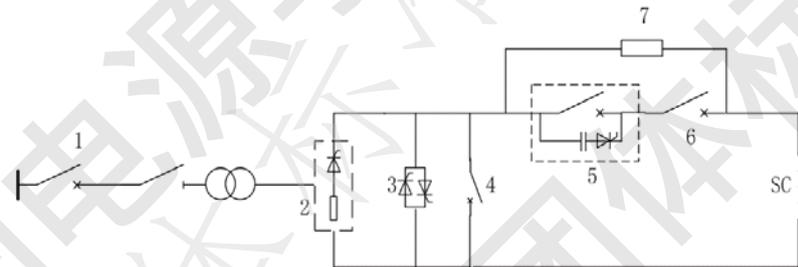
变流变压器网侧馈线的交流断路器，在设置保护区间时，须覆盖交流馈线及以下的变流变压器和变流桥。该断路器的触发跳闸信号主要来源于三个保护回路：交流馈线保护（过流速断保护、过流带时限、过负荷等）、变压器保护（变压器过流保护、瓦斯保护）和变流桥保护输出的外部跳闸信号（配合切除交流输入）。

交流侧短路保护定值的计算和整定，应考虑变流系统的工作制等级及具体的运行工况。还应根据变压器励磁涌流的具体特性，从保护逻辑和定值整定的角度（例如增加二次谐波制动），正确区分短路故障和变压器励磁涌流，避免励磁涌流引起保护的误动作。

6.3.3.3 直流侧过流/短路故障保护

工业应用中，大电流的变流桥不配置直流断路器，通过简化直流侧连接，提高系统运行可靠性，从而明显抑制故障概率的方法。直流电流不太大且带阻性负载的变流应用，在成本和直流分断技术允许的前提下，可采用直流断路器实现直流侧过流或短路故障保护。这种保护配置，需要保护分区和配合。如果变流桥内部（直流断路器前）直流故障，即直流正负母线短路、桥式结构发生上下桥臂穿通故障，或双反星形结构发生桥臂短路，交直流断路器均应动作，而晶闸管器件串联的快速熔断器不发生熔断。如果发生变流桥外（直流断路器后）正负母线短路，直流断路器动作，以切断变流桥对故障点的电流馈入。而对于桥式结构，如果仅发生单个桥臂绝缘故障，则只需分断交流断路器并封锁触发脉冲（对晶闸管变流桥）即可，无需分断直流断路器。

对于磁约束核聚变磁体电源中四象限或两象限变流系统，或其他大电感性负载的变流应用，其直流故障保护，需要考虑巨大负载储能的泻放回路。在这类应用中，变流系统的负载为超大电感负载，并且这些负载对整个实验装置具有极端的重要性。故障发生时，必须有专门的保护系统，切除故障并且实现负载储能安全泻放。这些专门保护设备和变流系统自身的保护相配合，完成超大电感负载放电和变流系统故障保护，其简化保护配置如图4所示。负载故障或直流侧短路发生时，变流系统同时启动电子保护和交流断路器跳闸，外旁通和合闸保护开关启动续流，为磁体电源泄能提供闭合回路，同时隔离供电电源和负载回路，直流分断开关借助人工过零技术可靠分断，负载电流改道泄能电阻，完成电感负载储能的安全泻放。



说明：

- 1——交流断路器；
- 2——快速熔断器；
- 3——晶闸管外旁通；
- 4——保护闭合开关；
- 5——直流分段开关；
- 6——后备爆炸开关；
- 7——泄能电阻。

图4 磁约束核聚变超导磁体电源保护配置

6.3.3.4 变流桥臂内部短路故障保护

快速熔断器主要用于保护晶闸管器件，即使在晶闸管失效的条件下，能够可靠动作，切除故障支路，抑制故障扩大。快速熔断器保护的原则为：能够承受交流侧或直流侧故障，可靠不动作；发生单个支路过流或器件失效（正向或反向击穿），快速熔断器应能迅速可靠切断故障电流。

关于快速熔断器的参数选型可以参考本规范 6.1.4 或标准 GB/T 17950 的相关内容。

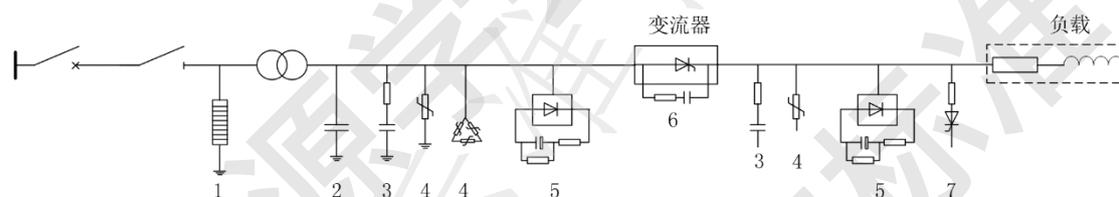
6.3.4 过电压保护配置

晶闸管对电压应力敏感,很短时间的过电压即足以使器件发生转折导通、性能下降甚至永久性损坏,尤其,瞬时过电压对器件造成更大危害。引起变流桥过电压的原因包括:

- a) 雷电冲击过电压;
- b) 开关操作过电压;
- c) 变流桥换相过电压;
- d) 直流过电压。

图5给出了过电压抑制电路的常用配置。对于周期性频繁的换相过电压,通常采用RC阻尼电路,阻尼并吸收换相过电压能量对器件的频繁冲击。对于雷电冲击过电压,除了高电压等级交流电网配置的前级避雷设备,变流变压器原边需加装避雷器,进一步衰减和吸收雷击过电压的残压。交流侧的开关操作过电压,宜采用RC吸收回路、电压限制性电涌保护器等综合方法,对过电压能量进行吸收和限制。根据实际需求,交流侧操作过电压保护,可以分别设置星形接法和三角形接法的保护回路,对相地和相间操作过电压分别进行防护。

直流侧过电压主要因为开关分合或负载电压波动,也可以采用和交流侧开关操作过电压类似的保护措施。



说明:

- 1——避雷器;
- 2——静电感应抑制器;
- 3——交流 RC 阻尼电路;
- 4——电压限制性电涌保护器 (例如: 金属氧化物电阻);
- 5——整流式 RC 阻尼电路;
- 6——换相过电压 RC 阻尼电路;
- 7——电压开关型电涌保护器 (例如晶闸管电涌保护器)。

图5 变流系统主要过电压保护配置

6.3.5 支撑系统故障保护

6.3.5.1 冷却系统故障保护

大功率变流系统通常采用水冷方式。水冷系统不会直接输出跳闸信号,但是水冷系统的进出口的水温、水压、水流量需进行实时监测。如果水冷系统故障,监测传感器会以告警信号上传,提醒运行人员进行相应的处理。

6.3.5.2 配电系统故障保护

配电系统为变流系统的控制、测量、保护等设备提供装置电源。为了提高配电系统的可靠性,一方面,需要合理配置配电系统的容量和负荷,根据重要负荷的容量,合理配置备用电源或不间断电源;另一方面,配置相应的电源保护和状态监视,如果配电系统故障,保护系统能及时动作或发出告警以提

醒运行人员。

6.4 结构设计

6.4.1 结构设计总体要求

结构设计中，6 脉波变流桥应依据模块化和标准化的原则，同一系统内变流桥采用均一化的结构和布局。型材、零配件宜尽量采用标准规格，结构设计应考虑设备结构的可加工性和可维护性，简化工艺流程，提高设备对现场安装、运行及维护的适应性。

6.4.2 电磁结构

6.4.2.1 桥臂均流结构设计

多并联支路的桥臂结构，根据其不同的连接情况，各并联晶闸管的载流呈现不同的分布规律。如图 6 所示。

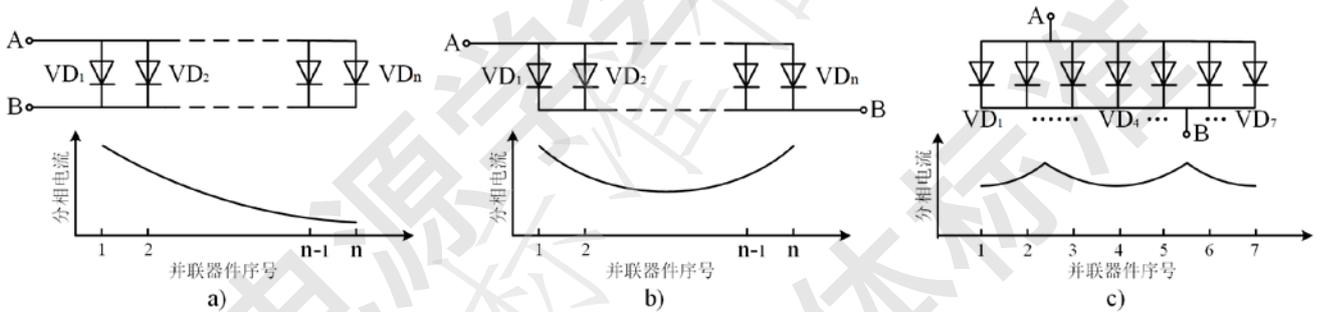


图6 并联晶闸管中电流分布规律

均流系数是衡量变流桥桥臂的均流性能的重要参数。均流系数可以通过式 (19) 计算。

$$K_1 = \frac{\sum I_i}{n \cdot I_m} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

I_i ——为并联晶闸管电流平均值， $\sum I_i$ 桥臂中各并联晶闸管平均电流之和；

n ——为并联晶闸管数目；

I_m ——为桥臂各并联晶闸管平均电流之最大值。

桥臂的均流系数过低，则反映并联晶闸管容量利用率低，而且过流或短路情况下，变流桥的安全性会显著恶化。大电流变流桥臂的均流系数，是变流桥结构设计的一项重要考核指标。

6.4.2.2 变流桥臂的结构设计

双反星形或同向逆并联结构，电流相反支路的磁场抵消，有利于改善桥臂的均流特性。而非同向逆并联结构，如果并联晶闸管过多，可以将一相桥臂分多段，以减少每段的并联数目来改善均流。但是这种方法牺牲转换能量密度，同时增大变流桥安装空间。单段的非同向逆并联桥臂，也可以通过优化并联器件的电磁结构，利用紧凑布局，改善均流，提高变流桥能量转换密度，也节省安装空间。

从磁场分布的角度，紧凑的器件布局和导体排布，可以减少并联晶闸管支路之间电磁分布的差异，减小回路阻抗差异。此外，也可以采用异形并联支路结构，或安装磁环等手段，增加大电流分量支路的

回路阻抗以抑制分流，改善桥臂均流。

圆盘结构作为桥臂晶闸管的一种布局方案，能够保证并联器件和并联支路获得均一的磁场分布，从而获得理想的均流特性。但装配和维护困难，并且占用空间较大。宜综合变流系统的各项设计输入和制约条件，合理选取桥臂的均流结构。

此外，加强触发模块的同步性、限制并联晶闸管导通压降和反向恢复电荷等个体参数的差异，也是改善变流桥均流特性的常用方法。

6.4.2.3 主体结构 and 电磁影响

大电流变流桥大多采用开放式结构，以提高设备的散热能力，并抑制磁致发热。其结构框架宜采用大截面焊接技术，将同一极性组的桥臂焊接成一个整体，既满足了导体的导电载流需求，又为设备框架提供牢固的支撑。变流桥主体结构设计中，还应在不同桥臂之间预留适当的距离，以避免或削弱导体排瞬态磁场变化对暂态均流特性的影响。

变流桥主体结构设计还应考虑导体磁场的空间分布，为控制测量装置在变流桥中的安装布局提供技术参考。邻近大电流变流桥的混凝土地基、支撑结构的设计，应考虑变流桥磁场变化对钢筋等贴磁材料的磁致发热问题。其影响需要进行分析 and 评估，如有必要，可以制定相应的防护措施。

6.4.3 绝缘要求

6.4.3.1 设计准则

绝缘电压等级的选取和绝缘结构的设计准则，应按照标准 GB 311.1—2012 和 GB 311.2—2013 执行。具有结构支撑功能的绝缘件，还需要进行机械强度校验，确保设备整体结构能够承受设计输入规定的地震烈度（若有）以及最严重短路故障情况下的电磁力冲击。

6.4.3.2 工艺要求

变流桥导体的加工制造过程中，应对导体的棱角做相应的倒圆角处理，螺栓、螺帽应套接相应的绝缘套或绝缘帽。交流排和直流排之间应该合理设计绝缘板，实现交直流系统的隔离，同时抑制晶闸管或快熔故障引起的喷弧。连接不同绝缘电位的环氧支撑，应采用伞状外形结构，增加爬电距离，抑制积灰或凝露引起的绝缘下降或放电。变流桥应具备顶部防护部件，防止坠物破坏或引发故障。

6.5 冷却系统设计

6.5.1 耐腐蚀和抗老化

冷却系统的所有部件的选型与设计应和冷却液相适应。这些部件应具备满足使用要求的耐腐蚀、抗老化特性。在供需双方约定的使用寿命内，不应当因腐蚀或老化而导致品质或特性下降。水冷部件的维护、检修及更换计划由供需双方协商确定。

6.5.2 密封性要求

冷却系统的阀、管道、接头、弯头、法兰等部件，在规定的使用寿命内和压力偏离范围内，均应保持应有的密封性。整个水冷系统需经过密封性试验验证（见 10.2.1.4）。

6.5.3 冷却水管的绝缘

连接不同绝缘电位的冷却水管，其绝缘水平应符合标准 GB 311.1—2012 和 GB 311.2—2013 的相关条款。管路的外形结构设计应采取适当措施，抑制管壁外表面凝露和积灰风险。对于污秽等级较高（ ≥ 3 级，据 IEC 60071-2 分级）的使用环境，应在管壁外围套接绝缘伞裙。

水冷管道的设计，应合理预留管道外壁凝露的收集部件，避免因凝露积水导致绝缘下降或装置损坏。

6.5.4 防泄漏要求

水冷系统的密封圈的选型需满足设备使用寿命的要求。在设备维护期间应检查水冷接头是否松动。变流器结构和布局设计时，应采取适当措施，避免冷却水泄漏时直接滴落或喷溅到带电部件。对于关键的控制装置，应配备防水罩。

6.5.5 泄水孔和排气孔

水冷系统设计应合理预留泄水孔，用于检修维护期间泻放水路积水。还应预留排气孔，便于调试期间排出水冷管道中的气泡。泄水孔和排气孔应具备和水冷系统同等的密封能力，并应经过水冷系统密封性试验验证。

6.6 旁通单元设计

6.6.1 方案选型

变流桥的桥臂以旁通方式运行，实现旁通功能，即内旁通方案。也可以配置专门的旁通单元，并联与变流模块的支流端，即外旁通方案。外旁通方案具有更高的安全性和可靠性，但会导致相应的成本和占地的增加。系统配置时，应综合运行需求、成本控制和安装空间等因素，合理选择。

6.6.2 基本元件

外旁通单元选择以晶闸管为电力电子器件，其参数选型和设计可以参考变流桥设计的相应条款执行。

6.6.3 匹配电阻

为了保证外旁通单元所有并联晶闸管能够可靠开通，外旁通单元需配置相应的匹配阻抗。阻抗值的选取须保证单个晶闸管以最小分流导通情况下，该支路压降（含管压降）应满足其余晶闸管开通电压要求。

6.6.4 控制保护

旁通的保护和控制系统，应建立合理的触发控制逻辑，明确旁通单元触发开通的条件，并建立和变流桥及控制系统保护信号联系。

7 变压器和电抗器

7.1 变流变压器

7.1.1 额定参数计算和选取

本规范只对变流变压器和直流电抗器的特殊要求项目进行说明，至于通用性要求和规范，将直接引用相应标准的条款。

变流变压器的阀侧额定电压和额定电流，由变流桥的额定输出决定。根据 6.1.1.2 中的公式，可以计算出变流桥的理想直流电压 U_{di} ，查询表 1 可以算出变流变压器阀侧额定电流和额定电压。变流变压器网侧额定电压，优先采用相关标准推荐的电压等级，如有特殊电压配置，网侧电压等级需供需双方协商确定。变压器的容量按照式（20）计算。

$$S_{LN} = \sqrt{3} \times U_{LN} \times I_{LN} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

S_{LN} ——变流变压器额定容量；

U_{LN} ——变压器网侧线电压的额定基波分量；

I_{LN} ——变压器网侧线电流的额定基波分量。

变压器短路阻抗 X_{LN} 的选取，宜根据运行需求和系统参数确定， X_{LN} 太大，将导致较大的电压降落，并且使得换相重叠角 μ 相应增大，影响触发控制角 α 的范围和运行稳定性；如果 X_{LN} 选取太小，发生阀侧或变流桥短路故障，变压器对短路电流的抑制作用减弱。

变流变压器和变流桥的额定参数选取，需要根据运行需求，进行多次迭代计算获得，其优化过程可参考标准 GB/T 3859.2—2013 中 5.2.3。

7.1.2 电气连接和移相

为实现更大的直流电流输出和减小直流纹波，变流系统通过变流桥移相并联可以构成 12、18、24 脉波的直流输出。其对应变流变压器分别对应 30° 、 20° 、 15° 的移相角度。移相方式包括在变流变压器前接入专用移相变压器、变流变压器原边 Z 形绕组接线、变流变压器原边延边三角形移相，变流变压器原边 Y/D 连接移相等。变流变压器的电气连接可以参考表 4 或标准 GB/T 3859.2—2013 中表 1。

变流变压器的移相角度和对应的电压比的误差需严格控制，并需要在出厂试验中进行准确测量。

7.1.3 结构设计要求

7.1.3.1 温升

油浸式变流变压器内部结构设计中，温升相关的要求应符合标准 GB 1094.2—2013 的规定，干式变压器应符合标准 GB 1094.11 的相关规定。

7.1.3.2 绝缘

油浸式变流变压器的绝缘结构设计，应符合标准 GB 1094.3 的相关要求，干式变压器绝缘要求，参照标准 GB 1094.3 和标准 GB 1094.11 执行。如果对绝缘设计有特殊要求，订货商和供应商应在订货时提前协商确定。

7.1.3.3 结构强度

原副边电压比高，副边电流大，是变流变压器的显著特征。变压器设计过程中，应确保绕组、阀侧绝缘套管和其他副边支撑的机械强度和抗短路能力。由于副边电压低、电流大，副边绕组通常只有数匝筒式或并联饼式绕组，对于移相并联的变压器结构，应注意保持副边绕组和引线设计的阻抗平衡。

7.1.3.4 短路试验

变流变压器的短路承受能力试验、频率响应测量等特殊试验，订货商如有要求，需在订货时向供应商提出，并经供需双方协商确定。

7.1.4 谐波和损耗

变流变压器绕组中流通的电流为周期性近似方波的交流波形，含有大量的谐波分量。订货时，订货商应向供应商提供变流系统的谐波分布及相应的谐波含量，以便于设计过程中，考虑谐波对变压器损耗和噪声的影响。

变流变压器的负载损耗测量和计算，以及对额定正弦电流负载下的变压器损耗值进行补偿校正方

法，可以参考标准 JB/T 8636 中附录 A 和附录 B 提供的方法和实例。

7.1.5 允差表

变流变压器技术参数的允许偏差，应符合标准 JB/T 8636 表 5 中的规定。如果订货商有特殊需求，需在订货时提前和供应商协商确定。

7.1.6 铭牌

变流变压器的铭牌应按照标准 GB/T 1094.1—2013 的 8.2 规定项目提供设备信息。若有特殊要求，订货商应在订货时提出。

7.2 直流电抗器

7.2.1 直流电抗器选型

直流电抗器根据功能的差异可以分为环流电抗器、平波电抗器和平衡电抗器。这些电抗器连接在变流桥的直流输出端，达到平波或限流的目的。在有环流运行的四象限变流系统，直流侧接入环流电抗器，当逆变换相失败时，能够抑制短路电流的上升率，为直流侧保护开关等设备动作争取时间。平波电抗器主要用于限制直流电流脉动或维持直流电流的连续性。平衡电抗器位于移相并联的不同换相组或整流桥之间，用于吸收瞬时移相电压差，抑制并联组之间的电流脉动。在具体的工程应用中，一个直流电抗器可以同时实现上述多种功能，变流系统中的环流电抗器，同时具备上述功能。

7.2.2 额定值

订货商需按照标准 GB/T 1094.6—2011 的 12.2 中的要求，向供应商提供电抗器的额定设计参数。如有特殊要求，需要双方协商确定。

7.2.3 温升要求

大电流变流系统一般采用水冷电抗器，其温升相关要求，可参照标准 GB 1094.2—2013 对于液浸式变压器温升限值的规定。对于采用干式电抗器，其温升要求，可以依据标准 GB 1094.11 中的规定。这些限值适用于额定持续直流和额定持续电流频谱的负载应用。若有明确规定，上述温升限值也适用于短时过载直流、电流频谱以及规定电流持续时间或负载周期等情况。

7.2.4 绝缘要求

直流电抗器绝缘要求，参照标准 GB/T 1094.6—2011 中 12.6 的相关要求，订货商若有特殊要求，须经双方协商确定。

7.2.5 铭牌

电抗器的铭牌应按照标准 GB/T 1094.6—2011 的 12.7 规定项目提供设备信息。若有特殊要求，订货商应在订货时提出。

8 隔离开关和导体连接

8.1 交流隔离和接地开关

交流隔离和接地开关的具体要求，应参照标准 GB 1985—2014 和 GB/T 11022—2011 的相关规定，订货商若有特殊要求，订货时应和供应商协商确定。

8.2 直流隔离和接地开关

直流隔离和接地开关的具体要求，应参照标准 GB 14048.1—2012 和 GB 14048.3—2008 的相关要求，订货商若有特殊要求，订货时须和供应商协商确定。

8.3 低压交流引线

8.3.1 低压交流引线分类

低压交流引线连接交流变压器阀侧交流输出端和变流桥的交流接入排。大电流变流系统的低压交流引线通常采用金属封闭母线，以铝、铝合金或铜作为载流导体，铝合金及绝缘配件作为屏蔽外壳。电流较小的交流系统，也可直接采用敞露母线排作为低压交流引线。

8.3.2 敞露母线排

8.3.2.1 材料选取

大电流变流系统阀侧交流电流高达数十千安，而且母排的布局空间狭小紧凑。现场污秽可能对铝及铝合金造成严重的腐蚀，故敞露母线排多采用铜材料作为导体。且导体正常工作温度不超过 70℃。如果导体接触面由锡镀层覆盖，其正常工作温度限制可以提高到 85℃。

8.3.2.2 截面尺寸和并联数量

导体的截面尺寸规格，可参照标准 GB/T 5585.1—2005 和 GB/T 5585.2—2005 的相关规定。如果单根导体难以满足载流要求，可采用多导体并联的方案。但应注意多导体并联情况下，集肤效应、邻近效应和热屏蔽对导体排载流的影响。

8.3.2.3 导体截面形状

导体的截面形状，工作电流小于 4kA 时，可选用矩形截面；工作电流 4~8kA 时，宜选用槽形导体；大于 8kA 的情况，选用圆管形导体。导体载流密度计算，推荐采用经济电流密度算法，具体计算方法参阅标准 DL/T 5222—2005 中附录 E。导体的截面结构尽量采用标准规格，若无法找到合适的尺寸规格，可依据经济电流密度算法，求取截面尺寸，然后降一档选用标准规格。

8.3.2.4 导体连接

低压交流引线和变压器阀侧端子，以及变流桥交流接入排端子之间的连接，应采用金属软连接实现。导体接头的搭接长度不应小于导体的宽度，导体没镀层情况下，接触面的电流密度不应超过表 7 的规定。

表7 无镀层接头电接触面电流密度限值

工作电流 A	电流密度 J_{Cu} (Cu-Cu) A/mm ²	电流密度 J_{Al} (Al-Al) A/mm ²
< 200	0.31	$J_{Al}=0.78J_{Cu}$
200~2000	$0.31-1.05 \times (I-200) \times 10^{-4}$	
> 2000	0.12	

注：I为导体工作电流。

8.3.2.5 动稳定性和热稳定性

低压交流引线自身及支撑结构的机械强度需要分析计算，也可以采用试验的方式对交流引线的短路

承受能力进行验证。具体验证方式，供需双方可以协商确定。

分析验证中，铜最大许用应力为 120 MPa，硬铜为 170 MPa。由于铝及铝合金的牌号和各种加工状态较多，其最大的许用应力，可参考 GB/T 6892—2006 的表 4 中各种铝合金的力学特性。

敞露式交流导体排的热稳定校验，应参考标准 DL/T 5222—2005 的 7.1.8 中的相关内容。如需采用试验的方式对交流引线进行热稳定性校验，供需双方应提前协商确定。

8.3.2.6 冷却方式

低压交流引线的导体可采用水冷、强迫风冷或空气自然冷却方式。如果采用水冷方式，其具体要求，宜参考本规范的 6.4 条相关内容，强迫风冷和空气自然冷却，可参考相关标准的要求。

8.3.3 金属封闭母线

8.3.3.1 封闭母线选型

金属封闭母线分为共箱式封闭母线和离相封闭母线。共箱式封闭母线主要用于电压低于 10 kV，额定电流低于 6300 A 的交流引线，离相封闭母线，更适用于更高电压或更大电流的交流应用。大电流交流系统中，通常采用离相封闭母线作为交流引线。

8.3.3.2 绝缘

常规应用中的金属封闭母线，标准 GB/T 8349 给出了具体的绝缘等级和相应的绝缘试验要求，见表 8。

表8 封闭母线绝缘等级及对应的绝缘要求

单位为kV

额定电压（有效值）	最高电压（有效值）	绝缘水平		
		额定 1 min 工频耐压试验（有效值）		额定雷电冲击耐压（峰值）
		湿式	干式	
1	1.2	/	4.2	8
3.15	3.6	18	25	40
6.3	7.2	23	32	60
10.5	12	30	42	75
13.8	15.8	36	51	95
15.75	18	40	57	105
18	21	45	61	115
20	24	50	68	125
24	27.6	60	75	150
35	40.5	80	100	185

用户若有表 8 所列电压之外的应用需求，订货时，供需双方需协商确定。

8.3.3.3 温升

金属封闭母线各部件的最高允许温度和温升要求，应参考标准 GB/T 8349—2000 的表 3。绝缘耐热等级和最高允许温度，应参考标准 GB/T 8349—2000 的表 4。

对强迫冷却离相封闭母线，供应商应分别提供强迫冷却和自然冷却方式下，母线各部位不超过允许温度/温升时，封闭母线能够持续运行的额定电流值。

8.3.3.4 短路承受能力

对于封闭母线动稳定性试验和热稳定性试验，针对不同的额定运行电流，标准 GB/T 8349—2000 的表 2 给出了相应的试验参数要求。

试验后，金属封闭母线各部件不能出现如下现象：

- a) 母线导体、金具、外壳、支撑等零部件明显变形；
- b) 绝缘子、套管及其他绝缘部件，因损伤而引起绝缘性能下降（如有争议，可用相应绝缘性能试验结果判断）；
- c) 接头熔焊，或造成影响正常工作的烧伤（如有争议，则以额定电流下，温升不得大于规定值来判断）。

8.3.3.5 冷却要求

离相封闭母线可采用自然冷却或强迫冷却，当离相封闭母线的额定电流不超过 28kA 时，宜采用自然冷却。当离相封闭母线的额定电流大于 28kA 时，宜采用强迫冷却。如果空间布局受限，且额定电流不小于 25kA，也可采用强迫冷却。具体冷却方式，应结合上述原则和具体应用需求而定。

大电流变流系统的金属封闭母线若采用水冷方式，其水冷系统的相关要求，应参考本规范的 6.4 条相关内容；若采用其他冷却方式，应参考相关标准。

关于金属封闭母线，本规范未涉及内容，宜参考标准 GB/T 8349—2000 和 NB/T 25036—2014 的相关内容。

8.4 直流连接排

直流连接排主要实现变流桥、直流电抗器、外旁通（若有）、直流隔离开关等设备之间，以及变流系统和负载之间的电气连接。根据应用需要，可以采用铝、铝合金或铜作为导体材料。其冷却方式可以采用水冷或空气自然冷却。

具体要求或规定，可参考标准 GB/T 5585.1—2005、GB/T 5585.2—2005 或标准 DL/T 5222—2005 中的相关内容。

9 运行监视和控制

9.1 控制

9.1.1 四象限运行

大电流变流系统通常以负载某一运行参数为控制参考，采用开环或闭环方式，实现系统的运行控制。四象限运行方式，常见于工业用电动机驱动电源系统和聚变磁体电源系统。为保障四象限变流系统的安全稳定运行，应根据输出电流值划定不同的运行区间，合理安排各变流桥的投退及环流运行，避开变流桥的运行死区。确保变流桥的可靠运行和变流系统在各运行区间的平滑过渡。图7给出12脉波四象限变流系统的运行区间划分。各运行区间以直流电流作为划分依据，图7虚线标识了各运行区间的电流限值。其他配置的四象限变流系统的运行区间，也可以采用类似的方法进行划分。

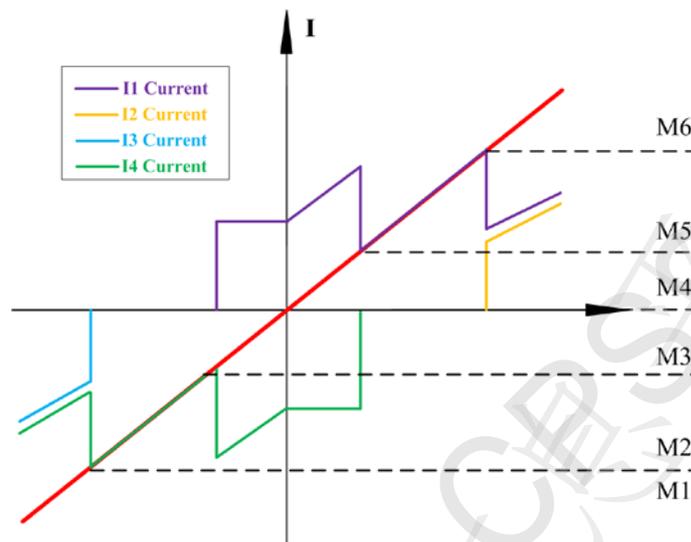


图7 四象限运行时的运行区划分

9.1.2 控制方式

为了满足对控制精度的要求，并保证系统运行的稳定性，绝大多数变流系统采用闭环控制。采用直流电流作为为目标控制量，利用反馈环节和目标控制量的参考值进行比较，以其差值作为控制输入量对系统运行进行控制。

为了达到控制效果的要求和控制系统的可实现性，可以采用多环嵌套的方式对多个目标参数进行闭环控制。这种方式可以把一个复杂的控制系统，简化成几个部分进行反馈控制，既简化了控制系统，又简化了调节电路，同时保证规定的控制效果。

9.1.3 控制特性

9.1.3.1 稳定性

变流系统可以配置内部或外部闭环控制系统，或者其他稳定其输出量的闭环装置。如果变流系统具有内部闭环控制，该系统的基准值可以电气参数、机械参数或其他任何形式的参数引入变流系统。

如果变流系统是外部闭环的一部分，引入变流系统的是来自该闭环的控制信号，而变流系统可视为放大器，作为设备总控制系统的一个组成环节。

9.1.3.2 静态特性

控制系统的静态特性，是在目标控制量（或要抵消的量）突然变化引起的瞬态过程消失后的那些特性。如果变流系统有内部稳定装置，应针对所有要抵消的影响量（例如网侧电压、交流系统条件、负载特性等）的规定变化量，确定其静态特性。

如果变流系统是外部闭环控制的一部分，在规定某些参数的条件下，静态特性由变流系统输入信号与输出之间的关系给出。这些参量是指那些可能影响这种关系的量，如网侧电压、交流系统条件、负载特性等。

9.1.3.3 动态特性

控制系统的动态特性，由相对于某个阶跃变化量的时间响应或频率响应给出，或以供需双方达成一致的任何其他适当方式给出。

动态特性应反映输出特性对主要影响量的变化，尤其要反映负载特性和某给定值（或控制信号）的

动态变化关系。

控制系统中，那些对输出特性影响甚微的控制量，无需进行动态特性的分析或研究。

9.2 测量和监控

大功率大电流变流系统及其附属设备的运行状态，需要进行跟踪测量。这些状态量分为模拟量（例如电压、电流）和状态量（开关位置、保护动作信号）。大功率大电流变流系统主要的测量和监视信号如表9所示。

表9 大功率大电流变流器主要测量和监视信号

设备/系统	主要模拟量和状态量
变流器变压器	电压、电流、开关/隔离开关位置、变压器油温（油浸式变压器）、绕组温度（可选）、本体保护信号、风扇工作状态等。
变流器	直流电压、直流电流、触发系统状态、保护（过压、过流）动作信号、导体温度开关、控制系统电源状态、绝缘监视、冷却水流量、冷却水进口温度、冷却水进口水压、直流位置隔离开关（可选）等。

工程应用中，可根据具体的需求，调整和配置具体的测量和监视信号列表。

10 试验

10.1 总则

试验是检验电力设备或电力系统功能设计和生产质量的重要手段。

设备层面的试验可以分为型式试验和出厂试验，还有根据订货商的特殊要求而增加的特殊试验。型式试验为了验证新产品的设计符合规定的性能要求，另外，对于定型产品，在规定的时间内，也会对规定数量的样品进行型式试验，以检验产品的性能能否保持。出厂试验对出厂的每一件产品的性能进行试验验证，试验合格后，应出具出厂试验合格证明。特殊试验是为了检验产品的特殊性能要求，订货商和供应商协议增加的试验项目，试验流程和合格标准需要双方提前协商确定。

系统试验为了验证整个系统的集成功能和运行性能而进行的试验。如果需要，订货商和供应商应提前协商确定，确定系统试验的必要性、试验内容和相应合格标准。

现场验收试验是在设备或系统安装完成后，验证其具备规定功能和性能的试验。

10.2 设备试验

10.2.1 变流桥（含旁通单元）试验

10.2.1.1 试验项目清单

变流系统设备试验是以单个6脉波变流桥为试验对象的试验。

大电流变流桥主要试验项目如表10所示，如果变流系统中，配置晶闸管外旁通设备，其试验项目应参考变流桥，由供应商和订货商协商确定。

表10 变流器设备试验项目列表

序号	试验项目	型式试验	出厂试验	特殊试验	检索章节
1	外观检查	★	★		10.2.1.2
2	绝缘试验	★	★		0
3	水冷回路密封性试验	★	★		0
4	水路压降测量	★	★		0
5	控制和保护装置检查	★	★		0
6	辅助设备检查	★	★		0
7	轻载试验和功能试验	★	★		0
8	额定电流试验和均流试验	★	★		10.2.1.9
9	固有电压调整值测量			★	0
10	电压响应试验			★	0
11	纹波电压和电流测量			★	0
12	谐波电流测量			★	0
13	组件和设备功率损耗测量	★			0
14	温升试验	★			10.2.1.15
15	短路承受能力试验			★	0
16	功率因数测量			★	0
17	抗扰度试验			★	0
18	射频辐射和传导骚扰试验			★	0
19	可听噪声测量			★	10.2.1.20

10.2.1.2 外观检查

本试验作为型式试验和出厂试验。

作为型式试验，主要检查变流桥的电气设计、结构布局和生产加工是否存在明显缺陷、瑕疵或其他不符合设计要求的问题。

作为常规试验，主要检查标识、警告、安全提示或保障措施是否完善。

变流桥结构设计和布局外观，没有不符合设计要求或相关标准之处，警告或安全标识完备，则视为合格。

10.2.1.3 绝缘试验

变流桥设备的绝缘试验参照标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.2 的相关要求执行。绝缘试验是型式试验，也是出厂试验，试验中试验电压和试验持续时间并不相同，具体要求参考标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.2.2.3 和 7.2.2.5。

雷电冲击试验为特殊试验，若有特殊要求，订货时，需要供需双方协商确定。雷电冲击试验的操作流程和试验要求参照标准 GB 12668.501—2013 的 5.2.3.1。

10.2.1.4 水冷回路密封性试验

水冷回路密封性试验既是型式试验，也是出厂试验。

水冷回路密封性试验通过注入冷却水，检验冷却水系统的密封性。即在进水口注入冷却水的同时密封出水口，施加规定的水压，并保持压力不变 1h 以上。施加水压为额定运行情况下，最大进口水压的

1.5 倍。

试验过程中，水冷回路没有发生明显泄漏或压力损失，则视为试验合格。

10.2.1.5 水路压降测量

水路压降测量既是型式试验，也是出厂试验。

试验要对变流桥水冷系统的进水口和出水口之间的水路压降进行测量。测试应在工厂环境温度下（5~40℃）进行，水冷系统的所有器件（管道、软管、接头配件、阀、仪表等）按照其运行状态装配。试验中，进口水压、水温、流量等参数应保持额定运行参数。

10.2.1.6 控制和保护装置检查

本试验既是型式试验，也是出厂试验。

具体的试验要求参考标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.5.2 和 7.5.3。

10.2.1.7 辅助设备检查

辅助设备检查既是型式试验，也是出厂试验。

该项试验的实施步骤和要求参照标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.5.1。

10.2.1.8 轻载试验和功能试验

轻载和功能试验既是型式试验，也是出厂试验。

具体试验要求参考标准 GB/T 3859.1—2013 中 7.3.1。

10.2.1.9 额定电流试验和均流试验

额定电流和均流试验既是型式试验，也是出厂试验。额定电流试验的试验流程和试验要求参照标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.3.2。

额定电流试验中，借助电流传感器（如罗氏线圈）同时测量变流桥臂中各并联晶闸管的电流波形，根据式（13）计算各个桥臂在额定电流情况下的均流系数。

变流桥及其附属设备在额定电流条件下，运行性能良好，且各桥臂的均流系数满足设计输入要求，则视为该项试验合格。

10.2.1.10 固有电压调整值测量

固有电压调整值测量是一个特殊试验，根据实际需求由订货商和供应商协商确定。如果需要，该项试验可作为一项型式试验。其具体要求可参考标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.3.4。

10.2.1.11 电压响应试验

电压响应试验是一项特殊试验。应根据实际需要，双方协商确定试验要求和实施步骤。该项试验主要检验变流桥在额定输入电压和额定运行条件下，直流侧输出电压的动态响应特性。

参考电压波形为额定阶跃电压信号，或是正负额定电压间的输出转换。如果直流电压的动态响应参数满足设计要求，则视为该项试验合格。

10.2.1.12 纹波电压和电流测量

纹波电压和电流测量是一项特殊试验。应根据实际需求，双方协商确定。试验流程和试验要求应参考标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.3.5。

10.2.1.13 谐波电流测量

谐波电流测量是一项特殊试验。应根据实际需求,由订货商和供应商协商确定。具体的试验流程和试验要求应参照标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.3.6。

10.2.1.14 组件和设备功率损耗测量

组件和设备功率损耗测量是一项型式试验。该试验的实施步骤和要求参照标准 GB/T 3859.1—2013 中 7.4.1。

10.2.1.15 温升试验

6 脉波变流桥的温升试验是一项型式试验。温升试验的具体要求和实施步骤参考标准 GB/T 3859.1—2013 的 7.4.2。其中,变流桥各部件的温升限值,可以参照标准 GB/T 3859.1—2013 的表 19。

温升试验过程中,对于某个测温点,间隔固定的时间记录各点的温度。如果在前面经过的试验持续时间的 10% (该时段不小于 10min) 内,该测温点温度读数显示无温度变化,则视为该测温点温度达到热稳定状态。

无温度变化指的是,任何 3 个连续读数之间,相对于环境温度变化不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

变流桥温升试验中,环境温度是一项重要的温度参考。关于环境温度的测量方法和要求,可参考标准 GB 1094.2—2013 的 7.2.1。对于水冷变流桥,也可采用冷却水温度作为参考温度(需经双方协商确定),冷却水温的测量要求见标准 GB 1094.2—2013 的 7.2.2。

如果各测温点均达到热稳定状态,各点温升满足相关设计要求,并且试验过程中,变流桥运行正常,热传感器、温度开关及过载监测器件等没有发生故障告警,则视为温升试验合格。

10.2.1.16 短路承受能力试验

变流桥短路承受能力试验是一项特殊试验。该项试验实施步骤和具体试验要求可以由订货商和供应商协商确定。

试验电路和相关试验方法可以参考标准 GB 1094.5—2008 中变压器三相短路试验中的相关接线方法。变流桥直流侧的短路连接,可以采用试验中开关控制短接,或试验前短接两种方案。开关短接的方法是在试验中,借助串接在直流侧的选相合闸开关选择精确合闸时间,准确合闸,模拟直流侧短路。

试验前短接方法具有更大的适用性,在试验前短接要模拟的短路点(直流侧或变流桥臂等),借助试验变压器高压侧选相合闸开关,选择精确的合闸时刻,准确合闸,模拟相应的短路故障。

由于变流桥的设计思路和实际应用需求可能不同。具体的试验次数,试验电流和短路方式由订货商和供应商协商确定。

变流桥的机械结构没有发生变形或损坏,晶闸管的正反向阻断特性和漏电流没有发生明显变化,则视为试验合格。

10.2.1.17 功率因数测量

功率因数测量是一个特殊试验项目。如有特殊要求,订货商订货时,需要跟供应商提前协商确定。

对于 6 脉波及以上的变流桥或系统,其功率因数 λ 和基波功率 $\cos\varphi_1$ 误差很小,因此,按照标准 GB/T 3859.1—2013 的 6.2.3 中的要求测得 $\cos\varphi_1$ 即可。

10.2.1.18 抗扰度试验

抗扰度试验是一项特殊试验。如果合同要求,变流桥抗扰度试验可作为一项型式试验。试验应尽可能在额定的电气运行条件下进行。

抗扰度试验的程序和相关要求,可参考标准 GB/T 10236—2006 的相应条款执行。

10.2.1.19 射频辐射和传导骚扰试验

本试验是一项特殊试验。如果合同要求，可以作为型式试验。订货商和供应商应根据负载情况，对射频辐射和传导干扰给出具体的试验要求。具体的试验要求和程序，可参考标准 GB/T 17626.3—2006 和 GB/T 17626.16—2007 中的相关内容。

10.2.1.20 可听噪声测量

可听噪声测量试验是变流桥的一项特殊试验。由订货商和供应商协商确定。

试验程序和限值应根据实际的应用需求确定。另外，设置噪声限值时，需要明确被测设备的确切范围（单独组件或保护附属设备）和被测设备的运行条件。具体的噪声测量流程和测量结果的计算和评价，可参考标准 GB/T 1094.10—2003 中的具体说明。

10.2.2 变流变压器设备试验

10.2.2.1 总体要求

变流变压器设备试验的主要试验项分为出厂试验、型式试验和特殊试验。

变流变压器的设备试验主要由两部分组成，一部分是适用于大部分变压器的通用试验项目，另一部分为变流变压器特殊的试验项目。

通用的变压器试验项目按照标准 GB 1094.1—2013 的 11.1.2（例行试验）、11.1.3（型式试验）和 11.1.4（特殊试验）中所列内容，由订货商和供应商根据实际需求商定试验项目，具体试验内容和要求，可以参考对应的标准章节或标准编号。

对于变流变压器的具体应用，其试验内容或程序也有特殊的规定和要求，其中特有的试验项目见表 11。

表11 变流变压器特有试验项目

序号	试验项目	型式试验	出厂试验	特殊试验	检索章节
1	换相电抗的测量和电感性电压降的确定	★			10.2.2.1
2	短路试验	★	★		10.2.2.2
3	电压比测量和相位移校验	★	★		10.2.2.3
4	温升试验	★			10.2.2.4

10.2.2.2 换相电抗的测量和电感性电压降的确定

换相电抗的测量和感性电压降的确定，是变流变压器的一项型式试验。具体的试验要求和相应参数的计算方法，可参照标准 GB/T 3859.3—2013 的 5.2。

10.2.2.3 短路试验

变流变压器的短路试验既是型式试验，也是出厂试验。本试验的目的是获得变压器绕组的短路阻抗和总损耗。

试验的具体要求和实施步骤参照标准 GB/T 3859.3—2013 的 5.3。

10.2.2.4 电压比测量和相位移校验

电压比测量和相位移校验既是型式试验，也是出厂试验。本试验要求对变流变压器的每个分接都进

行电压比测量，检定变流变压器三相绕组的连接方式，并且精确检定变压器原边和副边的移相角度。

10.2.2.5 温升试验

温升试验是变流变压器的一个型式试验。由于谐波电流的影响，变流变压器绕组电流为非正弦电流，有别于常规电力变压器的正弦电流。因此，具体的温升试验应参照标准 GB/T 18494.1—2014 中 6.4 所述适用于变流变压器的试验要求和流程。

10.2.3 电抗器试验

变流桥直流侧连接的平衡电抗器、平波电抗器或环流电抗器试验项目及相应的试验要求参照标准 GB/T 1094.6—2011 中 12.8 的规定。试验中合格标准相关的容差，应参照 GB/T 1094.6—2011 中 12.9 的内容。对于超出 12.8 和 12.9 规定内容的试验需求，其试验程序和验收标准需要订货商和供应商协商制定。

10.2.4 隔离开关试验

10.2.4.1 交流高压隔离和接地开关

大电流变流系统采用的交流隔离开关和接地开关为常规电力设备，其具体的电压等级和相关要求，根据变流系统的交流电网配置而定。该隔离开关的试验要求和试验程序应参照标准 GB 1985—2014 和标准 GB/T 11022—2011 中的相关内容。如果订货商有特殊要求，订货时应和供应商提前协商。

10.2.4.2 直流大电流隔离和接地开关

直流隔离开关和接地开关的试验项目和试验要求应参照标准 GB 14048.3—2008 和 GB 14048.1—2012 中的内容。如果该隔离开关有特殊配置或要求，订货时，订货商和供应商应提前协商，确定相应的试验方法和要求。

10.2.5 交直流连接排试验

10.2.5.1 交流封闭母线

如果变流变压器和变流桥之间的交流引线，采用金属封闭母线的连接方式。其试验项目、试验流程和试验要求应参照标准 GB/T 8349—2000、NB/T 25035—2014 和 NB/T 25036—2014 中的相应内容。如果实际工程应用有特殊的设计或试验要求，订货商和供应商应提前根据相关标准协商确定。

10.2.5.2 通用大电流连接排

交流侧或者直流侧的连接排，如果采用普通大截面结构铜或铝材料的导电排。相应的试验要求和试验程序应参照标准 GB 50255—2014 和 GB 50150—2016 中的相应要求。若有特殊要求，须经订货商和供应商提前协商确定。

10.3 系统试验

通常情况下，系统试验安排在现场和现场验收试验合并实施。个别系统需要专门的样机系统对其系统性能进行验证。系统试验用于验证系统的集成功能和性能。表 12 给出大电流变流系统的系统试验中，主要试验项目和试验内容。具体的试验程序和试验要求，应根据具体的系统配置和运行要求，由订货商和供应商协商确定。

表12 系统试验主要项目

序号	项目名称	试验内容
1	控制联调试验	信号检查、控制调试、通讯联调、数据传输、授时检查等
2	保护功能集成试验	保护逻辑检查、动作时序检查、故障模拟、保护功能验证等。
3	操作连锁功能调试	开关闭锁逻辑检查、操作连锁检查。
4	系统运行试验	环流、单桥、并联模式切换、整流逆变运行等。

10.4 现场验收试验

大电流变流系统的现场试验, 主要对安装后变流设备和系统功能和性能的试验验证。标准 GB 50255—2014 和 GB 50150—2016, 给出了电力设备和变流设备现场验收试验的具体试验流程和试验要求。