



山东泰开直流技术有限公司
Shandong Taikai DC Technology Co., Ltd.

固态式断路器全流程开发与工程实践

主讲人：李祖磊

2026年8月27号

目录

- 1 面向工程的拓扑选型
- 2 功率器件工程选型原则
- 3 样机研制及试验测试
- 4 工程实践

01

面向工程的拓扑选型

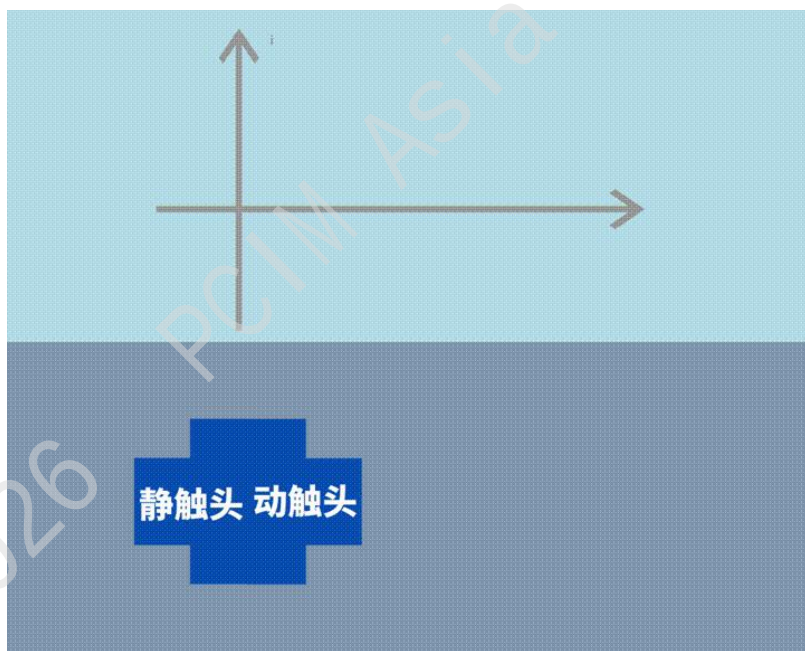
1.1 发展背景



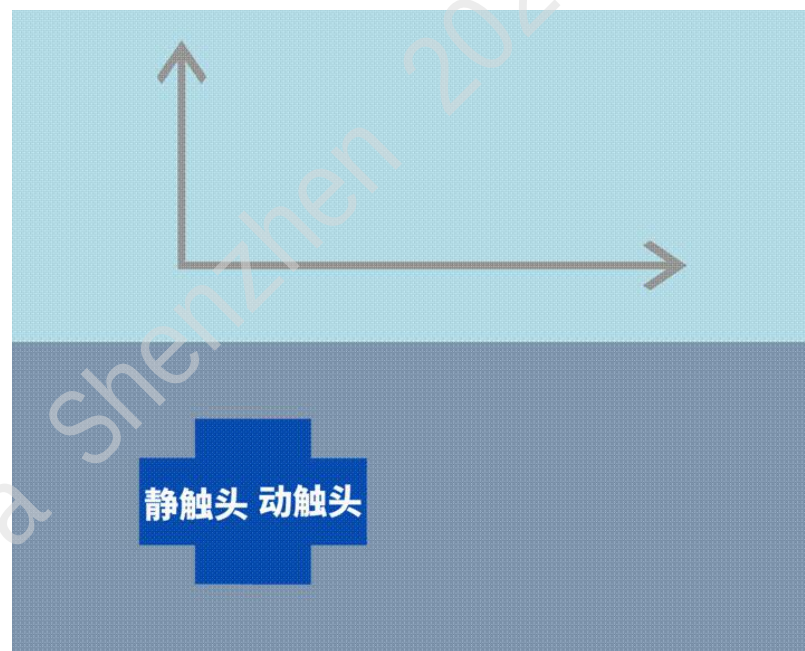
CIGRE报告：“大容量直流开断是一个世界性的难题”

难题一

➤ **直流电流不存在自然过零点，电弧难以开断**



交流电流有过零点，电弧过零点
处熄弧



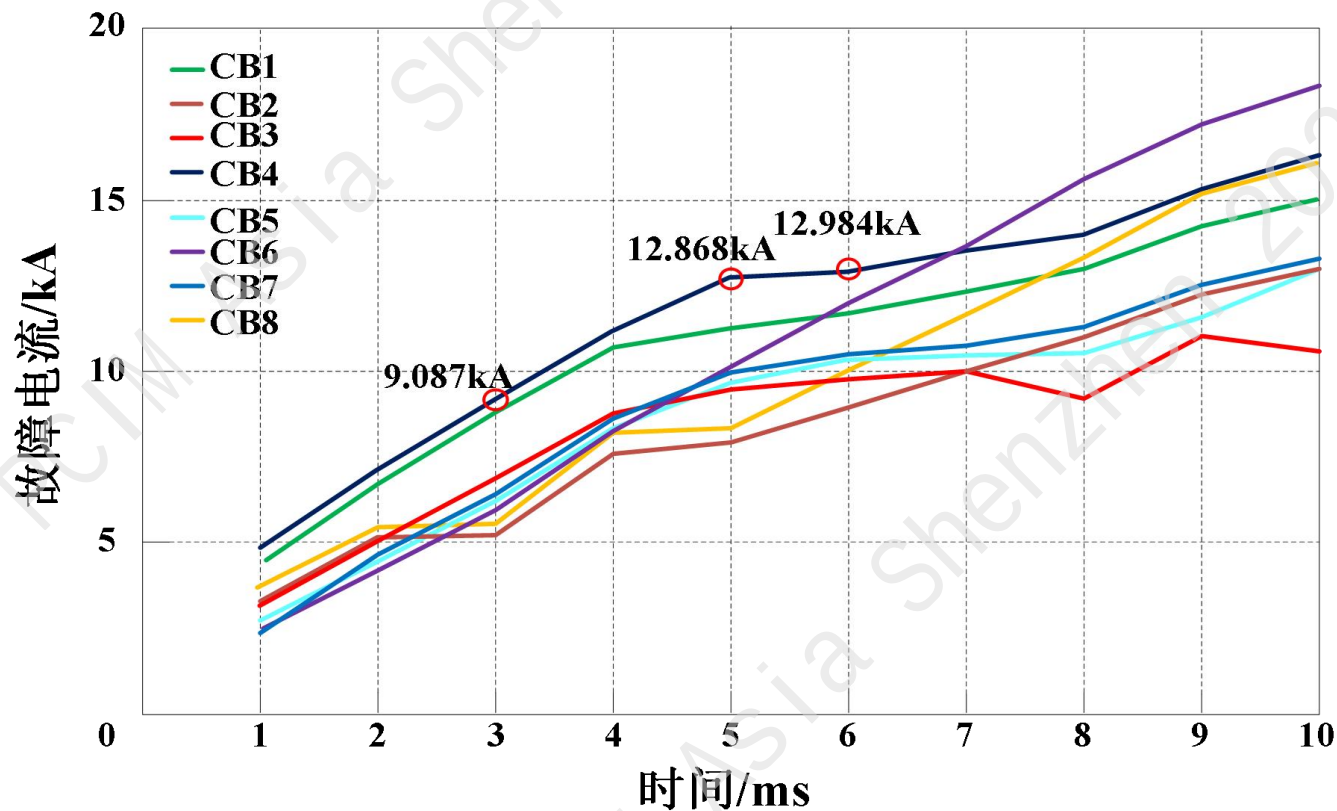
直流电流无过零点，电弧无法耗
散熄灭

1.1 发展背景



难题二

➤ 直流故障电流几毫秒可发展到数十千安，需要断路器毫秒级开断



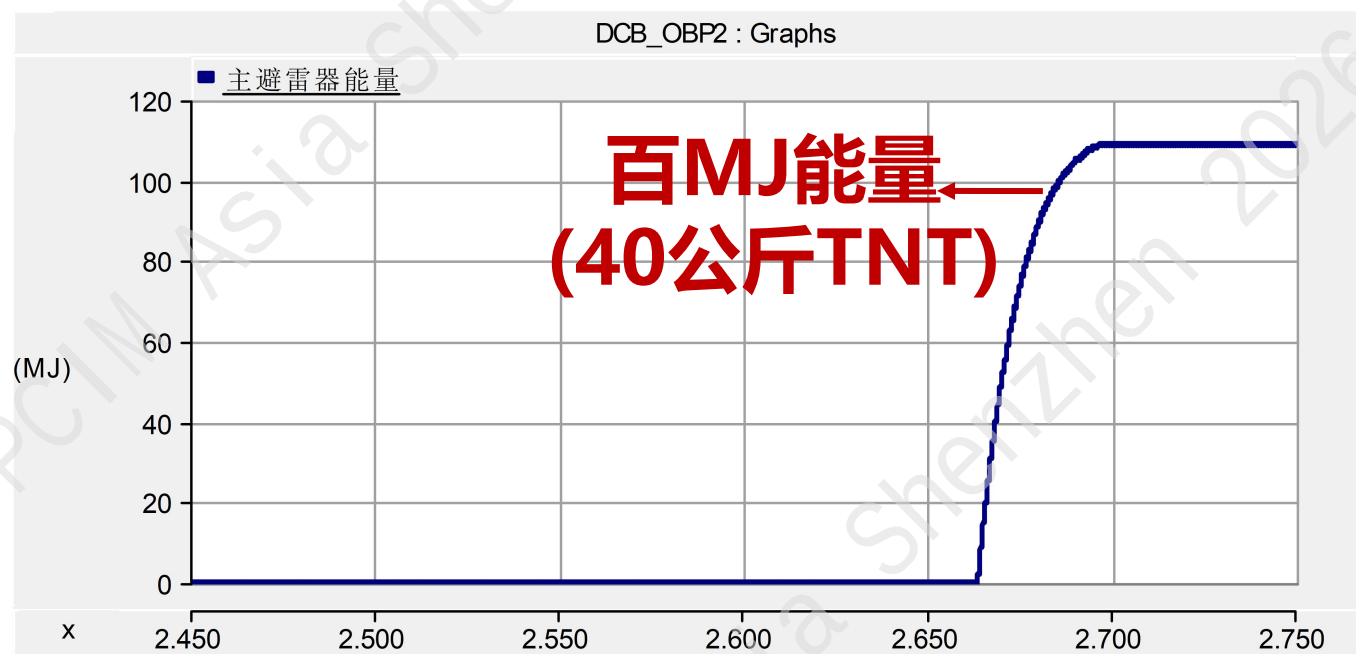
直流线路故障电流

1.1 发展背景



难题三

➤ 开断过程中**大量**电磁能量吸收与暂态冲击防护



500kV直流断路器主避雷器吸能

大容量、高速度、低成本的直流开断技术
是电工装备领域的迫切需求与瓶颈难题

1.2 直流断路器系列产品



535kV直流断路器



10kV混合式直流断路器

10kV机械式直流断路器



750V固态式直流断路器



750V自然换流型直流断路器

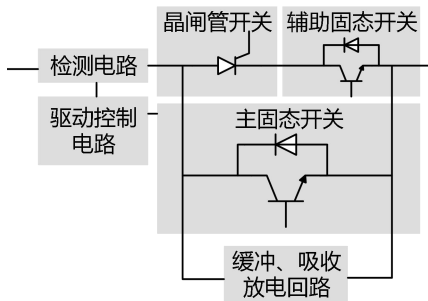


±375V固态式直流断路器

1.3 直流断路器拓扑介绍



固态式直流断路器



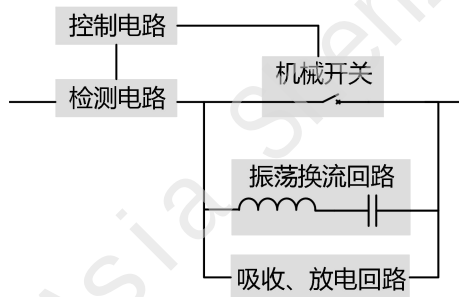
- ❑ 半导体器件强制分断，分断时间短
- ❑ 由半导体组件导通电流，通态损耗高

1987年

美国德克萨斯州大学
U texas

200V/15A

机械式直流断路器



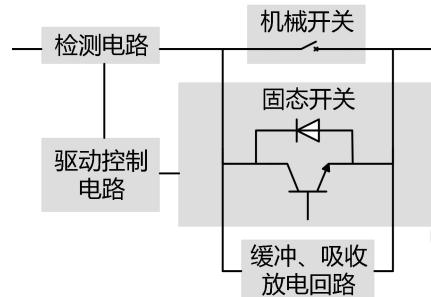
- ❑ 通过LC回路自激振荡产生电流零点
- ❑ 有弧分断，分断时间长，通态损耗低

1985年

西屋公司
Westinghouse

100kV/2kA

混合式直流断路器



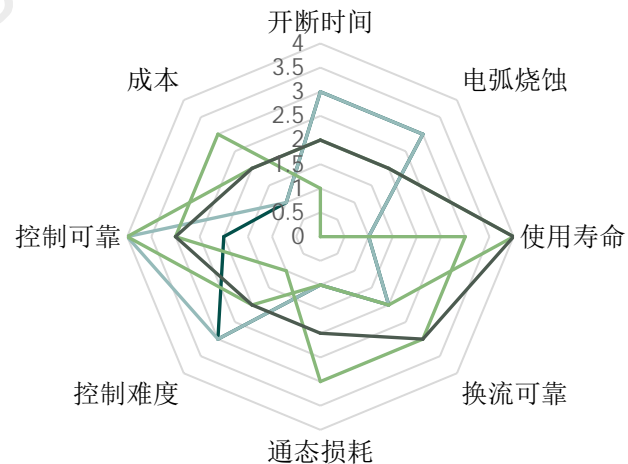
- ❑ 由机械开关和半导体组件混合构成
- ❑ 兼具低通态损耗和高分断的技术特点

1992年

荷兰埃因霍芬理工大学
Eindhoven U. Tech,

提出该技术方案

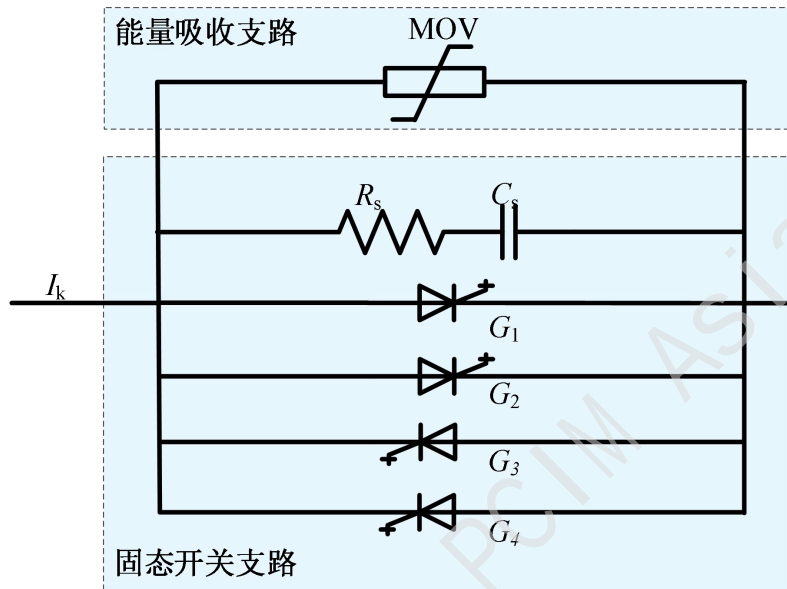
— 栅片灭弧型 — 人工过零型 — 固态式
— 自然换流型 — 强制换流型



1.3 直流断路器拓扑介绍



□ 固态式断路器拓扑



乌兰察布“源网荷储一体化”工程

- 额定电压：750 V；
- 额定电流：2000A；
- 额定分断能力：10 kA；
- 分断时间：< 1ms。

技术定位：

- 1、极致开断速度
- 2、超高可靠性
- 3、长寿命
- 4、高环境适应性

➤ 开断速度极快；

➤ 无电弧、无机械运动部件，寿命高；

➤ 无机械动作延时，重复操作性能极佳；

➤ 开断性能稳定，不依赖电流大小；

➤ 通态损耗大，发热严重；

➤ 成本高；

➤ 高压大容量化难度大；

➤ 故障耐受能力弱。



02

功率器件工程选型原则

2.1 固态式断路器功率器件选型核心原则



□ 通用选型原则

01 电压裕度

- 核心要求：额定电压 ≥ 1.6 倍 系统最高电压；
- 可靠性：长期工作电压对应永久直流电压；
- 原因：关断过电压会叠加在母线电压上。

02 电流选型

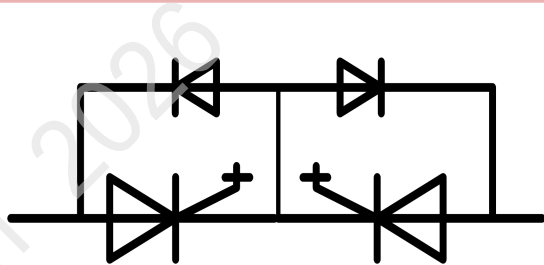
- 额定通流： ≥ 1.5 倍 系统额定电流（按需散热）；
- 关键指标：非重复可关断电流 $\geq$ 系统最大短路电流。

03 关断安全区

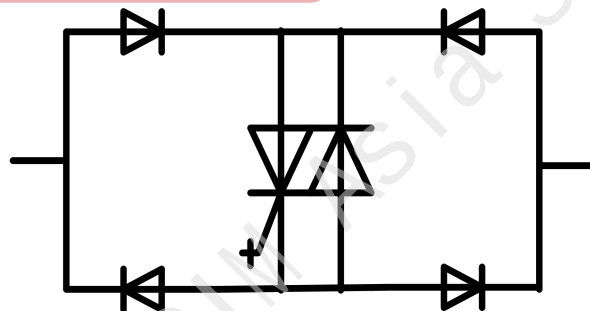
- 严禁在短路故障时让器件进入雪崩击穿区，确保器件安全。

04 双向直流拓扑

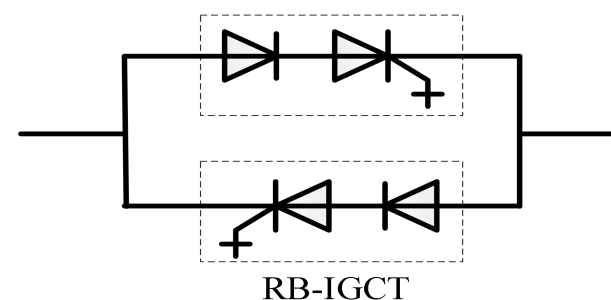
- 适用场景：需要双向导通和阻断的直流系统；
- 拓扑结构：采用适合的双向拓扑结构。



反串联拓扑



二极管桥拓扑



基于逆阻器件的反并联拓扑

2.2 四种常用功率器件额定通流与故障开断能力对比



IGBT / IGCT / IGBT / SiC MOSFET 关键性能综合分析

额定通流能力 (稳态长期工作)

排序: IEGT > IGCT > IGBT > SiC MOSFET

IGCT (最强): 晶闸管结构, 同等芯片面积下通流能力是所有功率器件中最高。

IEGT (很强): 注入增强型IGBT, 大电流下的通态压降显著优于普通高压 IGBT

IGBT (中等): 综合性能均衡, 中压领域应用最广泛的通用型器件。

SiC MOSFET (较弱): 单极器件, 单位芯片面积的电流密度高, 但单器件通流能力低。

故障电流开断能力 (直流短路硬关断)

排序: IGCT $\approx$ SiC MOSFET > IGBT > IEGT

IGCT (最强): 安全工作区极宽, 浪涌耐受极强, 适用大容量冲击性故障场景。

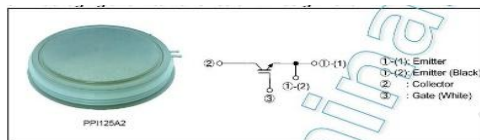
IEGT (很强): 直流断路器场景下可以可靠关断 4~6 倍额定电流的故障电流, 适配高压直流故障开断需求。

IGBT (中等): 当前应用最广的全控器件, 故障开断特性成熟, 保护体系完善, 分为压接型与模块型两类。

SiC MOSFET (很强): 单极高频率、低损耗特性引领效率升级, 通过主动高速限流, 提高开断能力。



安全工作区极宽
浪涌耐受极强



高电流关断能力突出
驱动门槛低



故障开断特性成熟
保护体系完善



高频优势显著
主动高速限流

2.3四种常用功率器件损耗对比分析



通态损耗（额定电流）

排序（损耗从低到高）：

$IGCT < IEGT < IGBT < SiC$

- IGCT：通态压降最低，高压大电流工况下通态损耗最低。
- SiC：轻载下损耗极低，高温、重载下损耗上升快。

开关损耗（高频性能）

排序（损耗从低到高）：

$SiC < IGBT < IEGT < IGCT$

- SiC：纳秒级开关速度，损耗极低，开关频率可达20kHz。
- IGBT：均衡成熟的工业基准，开关频率可达5~20kHz。

短路工况损耗（限流能力）

排序（损耗从低到高）：

$SiC < IGCT < IGBT < IEGT$

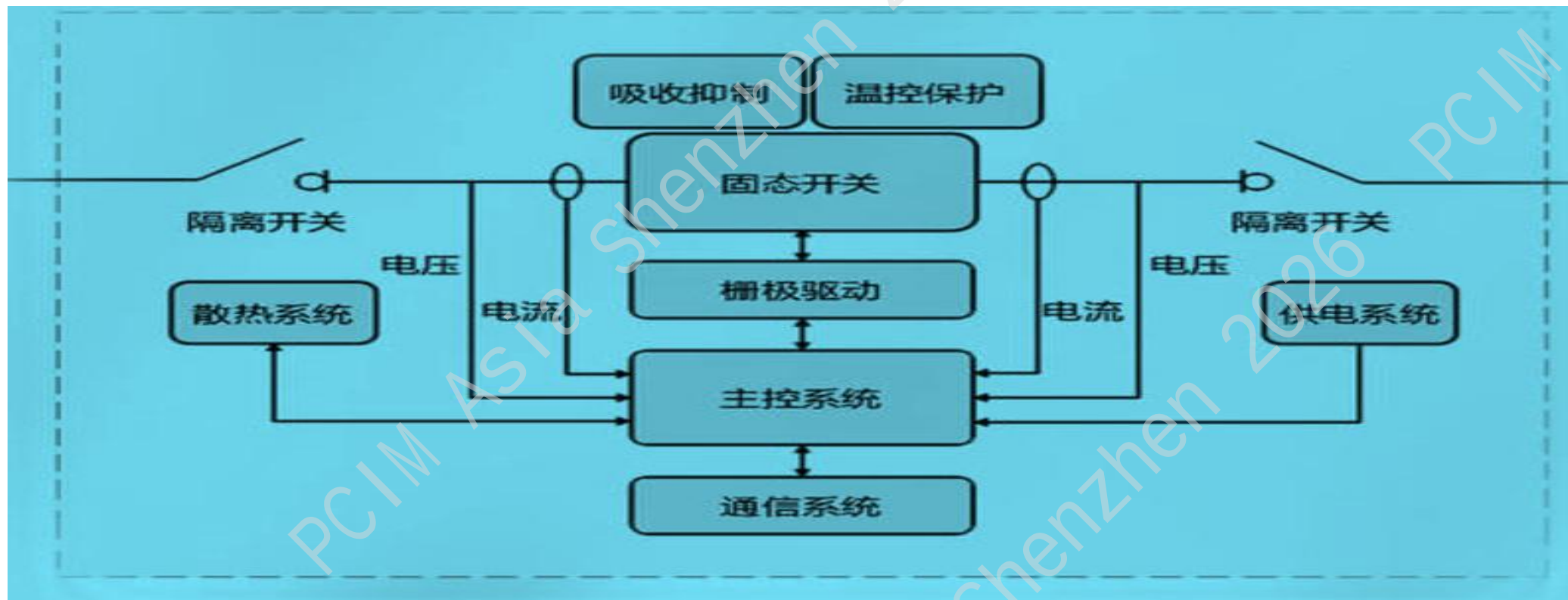
- SiC：短路损耗呈现“峰值高、时间短、能量集中”的特点。
- IEGT：高浓度载流子导致关断尾电流更大，短路关断暂态损耗较高

器件类型	核心损耗特点	推荐适用场景
IGCT	通态损耗最低，短路损耗可控，可靠性高	高压直流断路器、大容量冲击性故障场景
IEGT/压接IGBT	通态损耗较低，但开关及短路损耗最高	兼顾故障可靠性与驱动便利性中高压场景
IGBT模块	各项损耗指标最均衡，性价比适中	常规工业变频、中低压通用场景
SiC MOSFET	开关损耗最低，适合高速限流，但通态损耗大	高频高效、故障概率低且保护速度快场景

03

样机研制及试验测试

3.1 样机研制-系统设计



典型固态式直流断路器系统图

状态监测→保护触发→吸收抑制→能量耗散→隔离故障→状态反馈

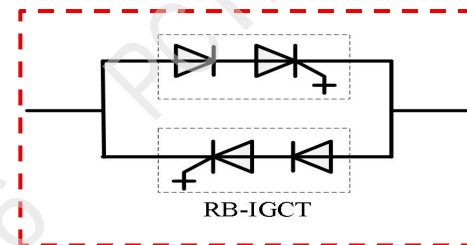
各环节需要精准匹配，形成闭环保护

3.1关键技术-设计重点



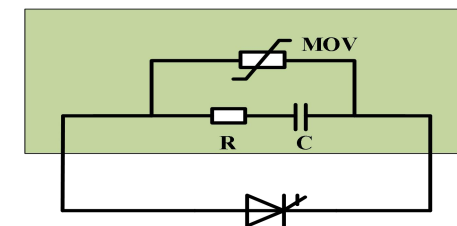
重点1：结构设计

➤ 低杂散电感、并联均流极佳



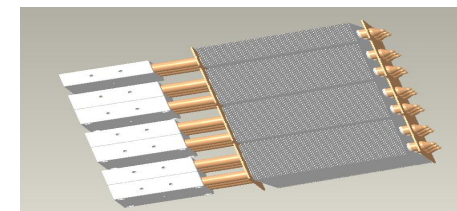
重点2：开关缓冲设计

➤ 高可靠、高裕度



重点3：高效散热设计

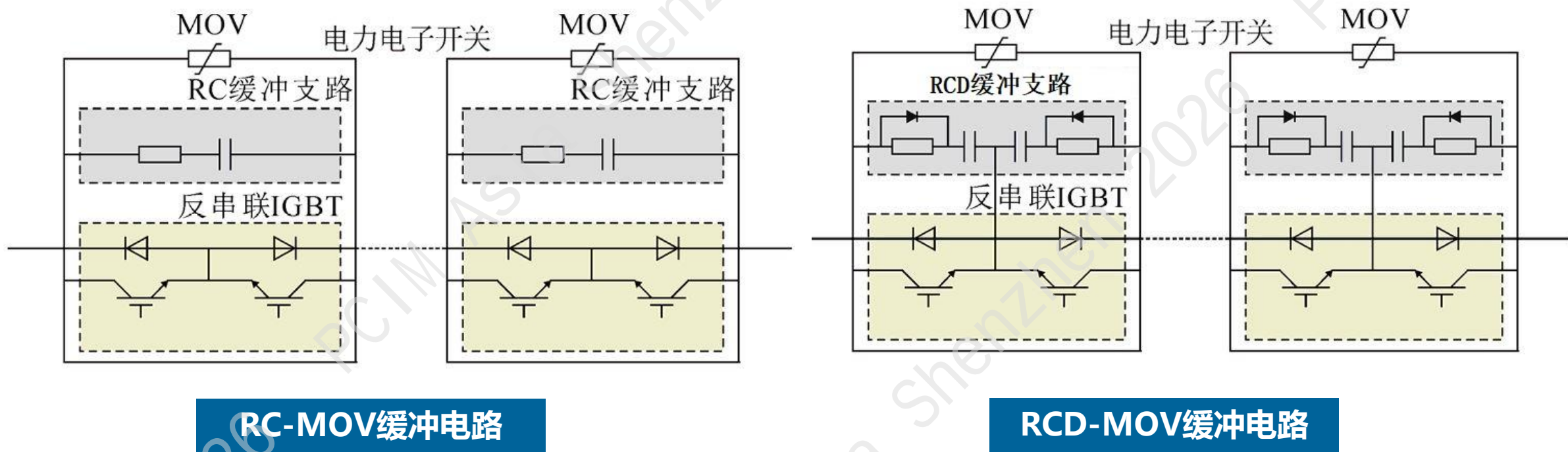
➤ 高效、低成本、紧凑化



3.1 关键技术-开关缓冲设计



直流断路器中电力电子开关的常规缓冲吸收电路



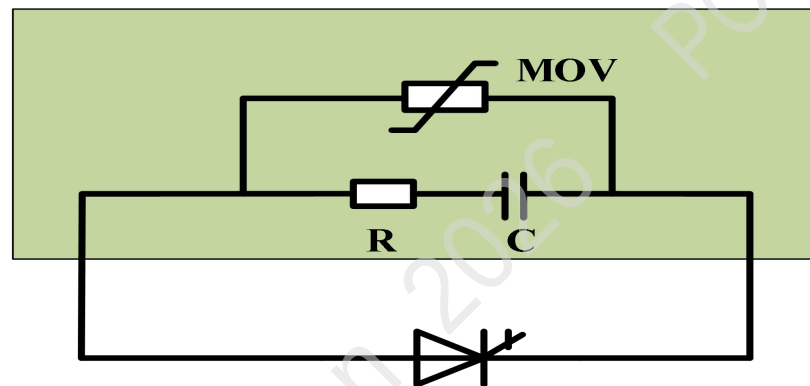
阻容精细缓冲 + MOV 峰值钳位

3.1 关键技术-开关缓冲技术

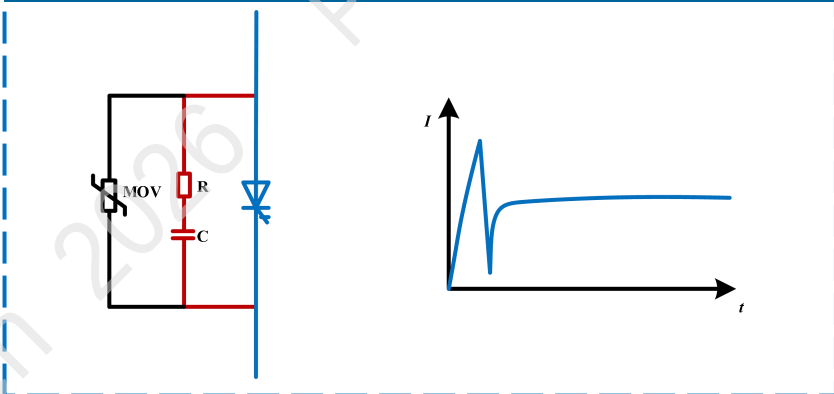


□ 固态式断路器一般采用RC+MOV方式进行缓冲及动态均压

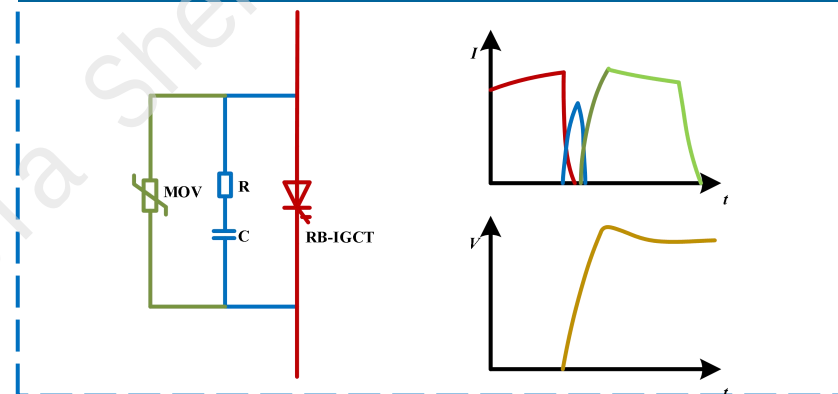
- MOV抑制开断过电压，保证器件安全
- RC可有效控制MOV电流上升速度
- 有效降低开通关断过程中的电应力
- 易于实现双向通流



IGCT开通过程



IGCT关断过程



3.1 关键技术-开关缓冲技术



□ RC-MOV参数的选取需综合考虑系统参数、器件参数、RC-MOV参数互相耦合

➤ **R考虑电阻值和能量耐受**

➤ **C考虑电容值和最大耐受电压**

➤ **MOV考虑额定电压、残压和电流**

a) 陡波冲击电流幅值（电力电子器件最大关断电流） I_{main} ;

b) 陡波冲击电流波前时间 t_{res} ;

c) 电力电子器件长期稳态耐压 U_{sd} ;

d) 幅值 I_{main} 的陡波冲击电流时避雷器残压 U_{res} 。

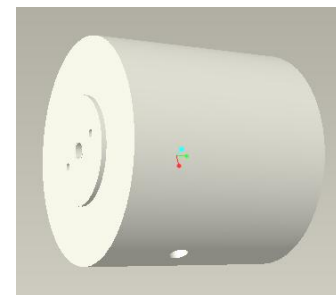
$$\frac{U_{sd}}{I_{main}} = R$$



$$C \geq K \frac{t_{res} \cdot I_{main}}{U_{ref}}$$



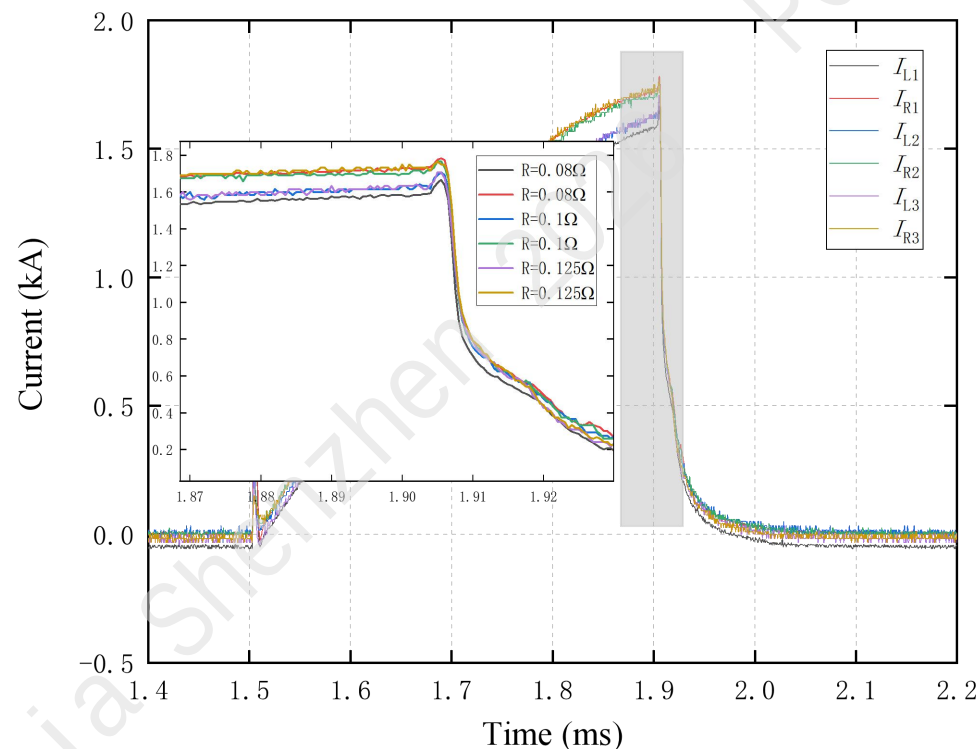
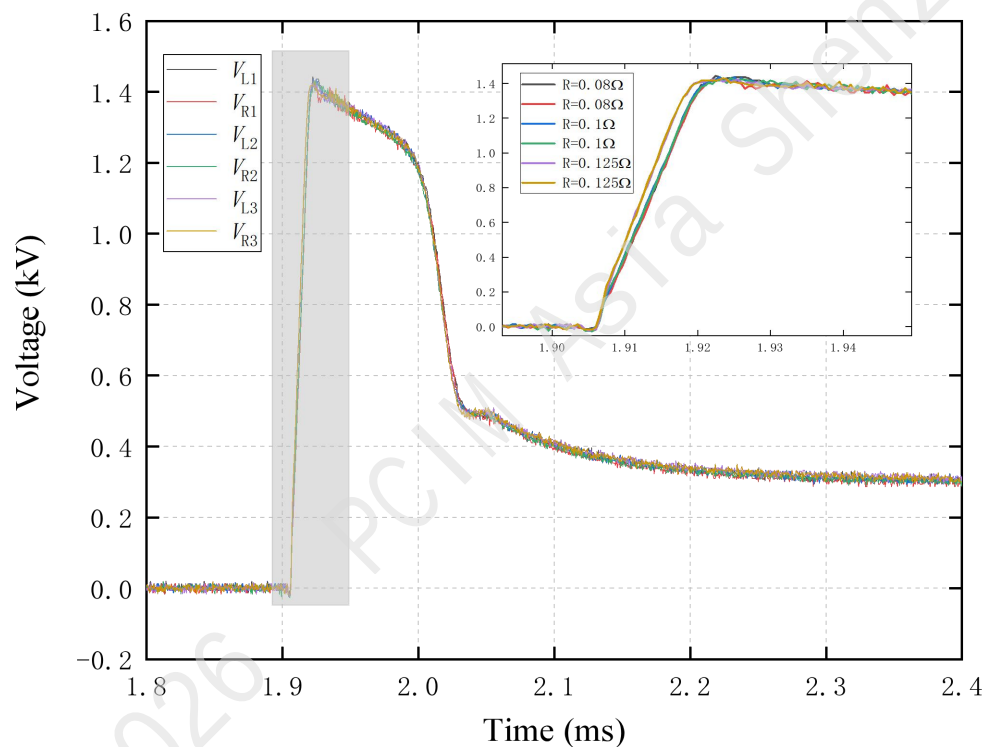
$$U_{ref} = 1.1 \sim 1.2 U_{sd}$$
$$U_{res} = 1.6 \sim 2.0 U_{sd}$$



3.1 关键技术-开关缓冲技术



缓冲电阻R对开断过程的影响

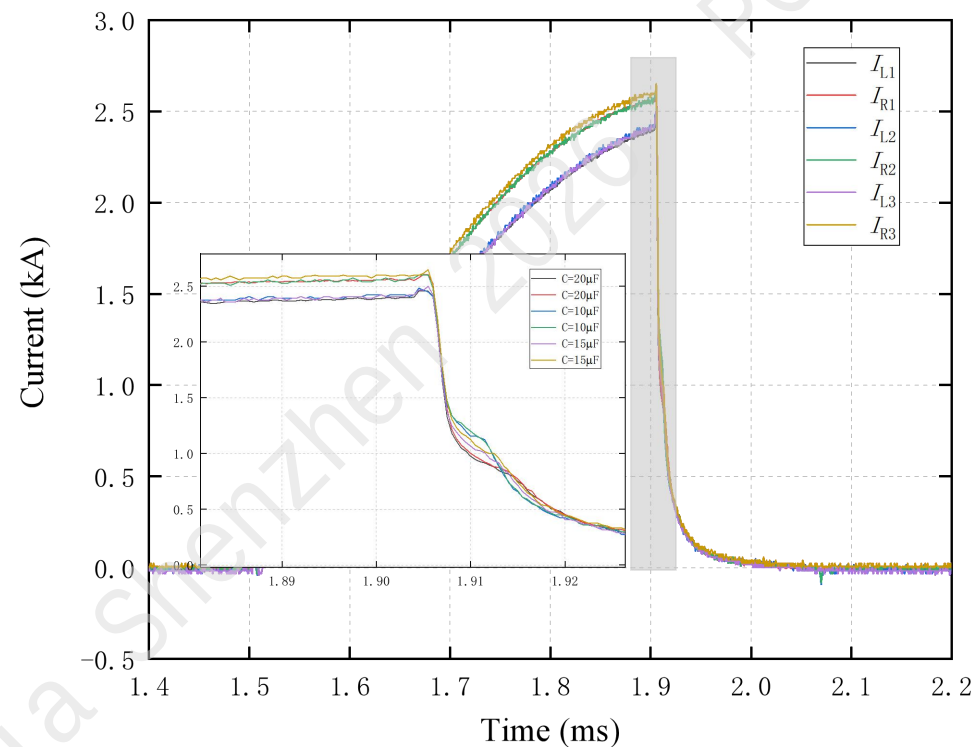
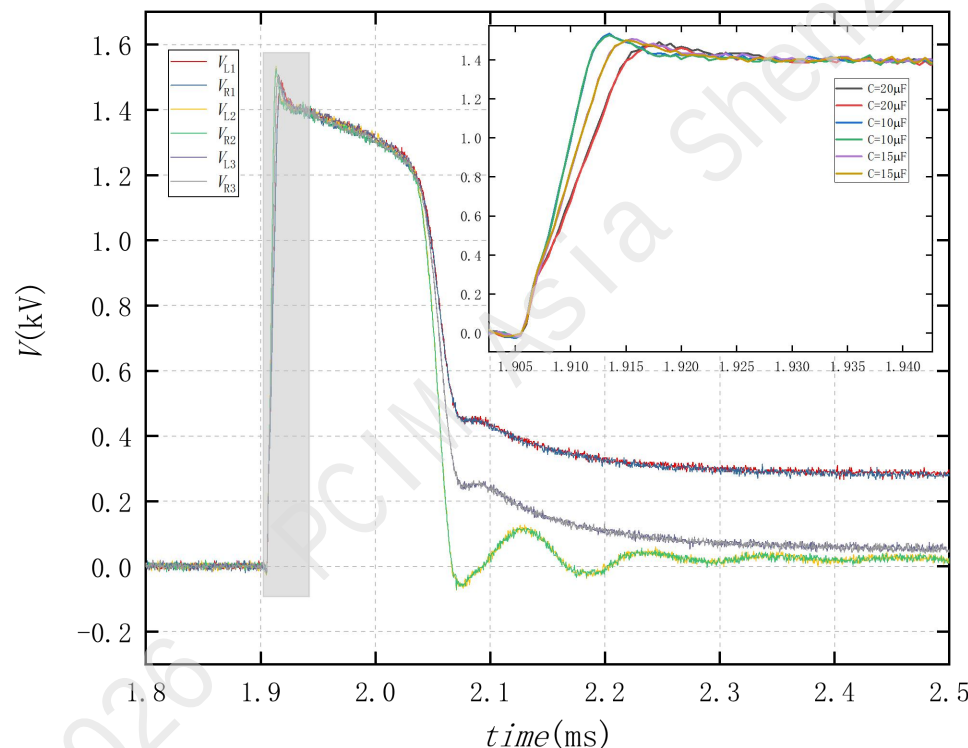


电阻越大，开断过电压上升得越快；对开断电流无明显影响

3.1 关键技术-开关缓冲技术



□ 缓冲电容C对开断过程的影响



电容越小，开断过电压上升得越快；电流下降率产生临界点，临界点之前，电容越大，电流下降率越大，之后，电容越大，下降率越小

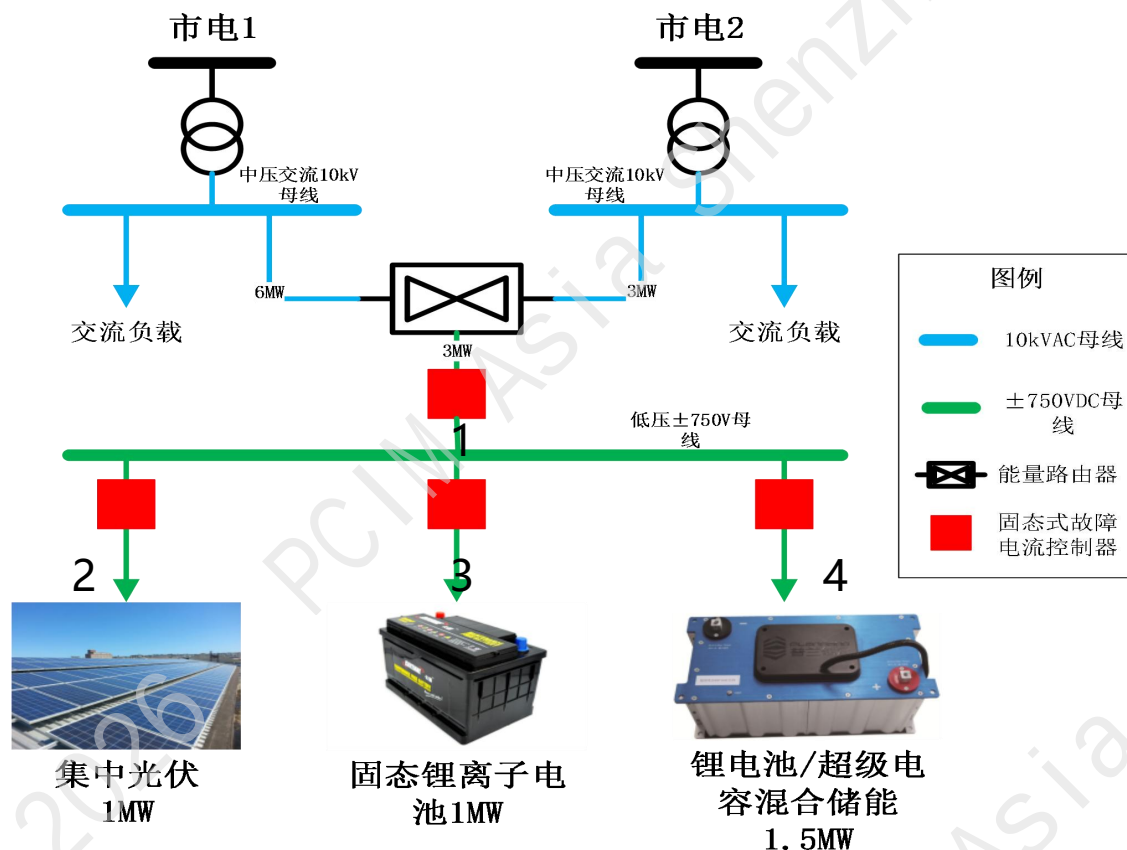
04

工程实践

4.1 工程实践



基于逆阻IGCT的750V/10kA固态式直流断路器



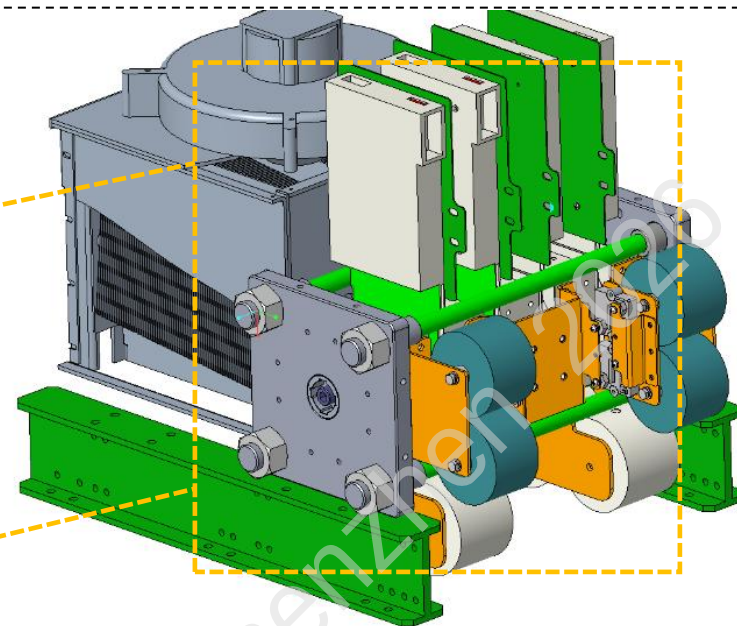
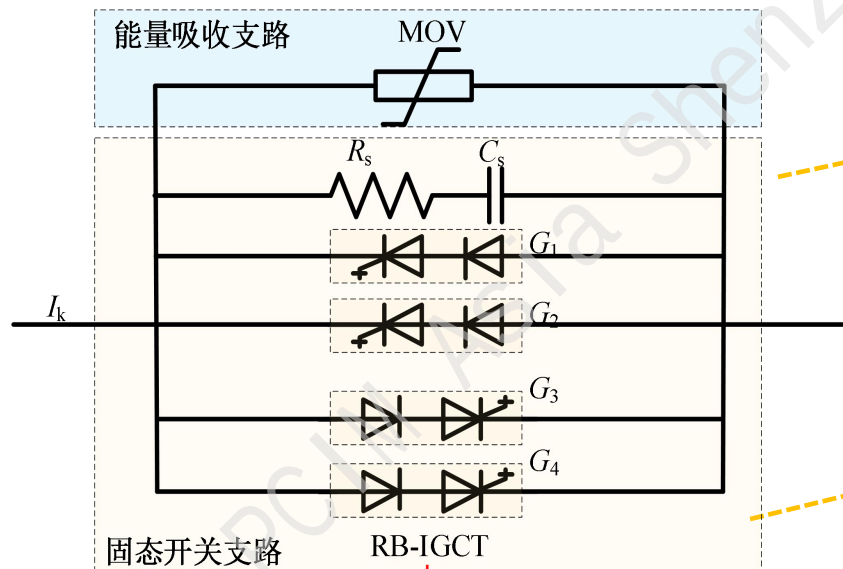
开关编号	1&4	2&3
额定电压	750VDC	
额定电流	2000A	1000A
短路开断	10kA	
开断时间	≤300us	
拓扑型式	固态式直流断路器	
通流方向	双向	
功率器件	逆阻型IGCT	

应用于三峡乌兰察布产业园储能系统出口快速保护

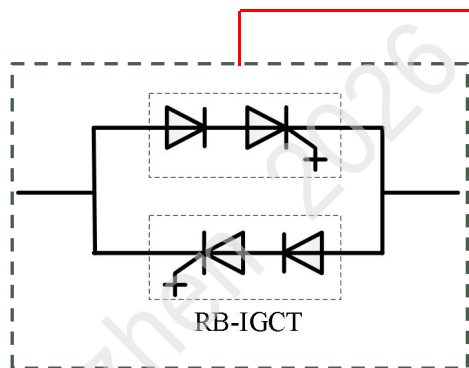
4.1 工程实践



基于逆阻IGCT的750V/10kA固态式直流断路器



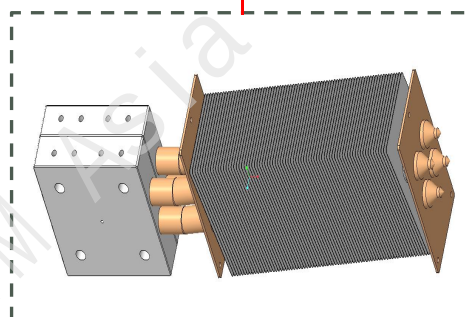
控制保护系统



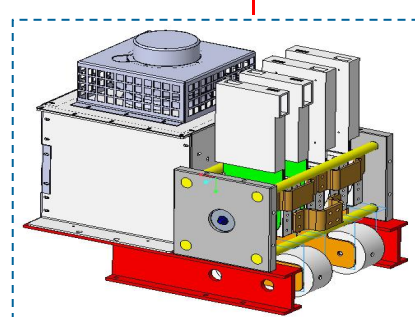
反并联双向结构



逆阻型功率器件



热管相变散热系统

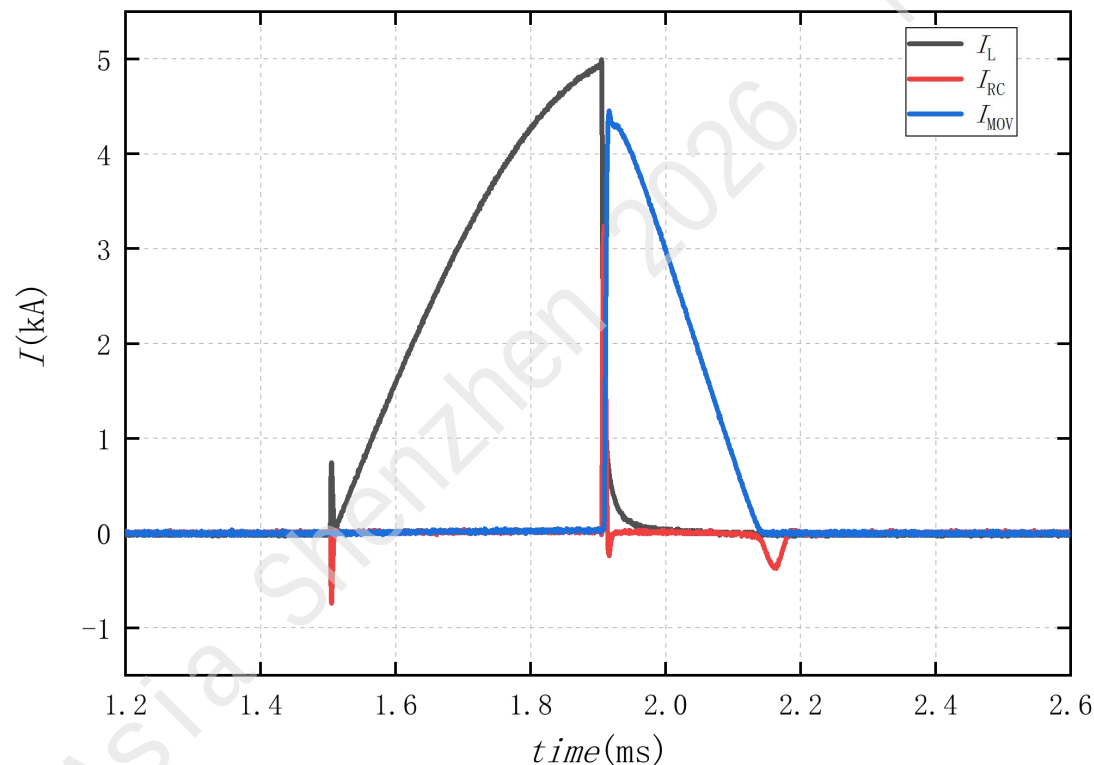
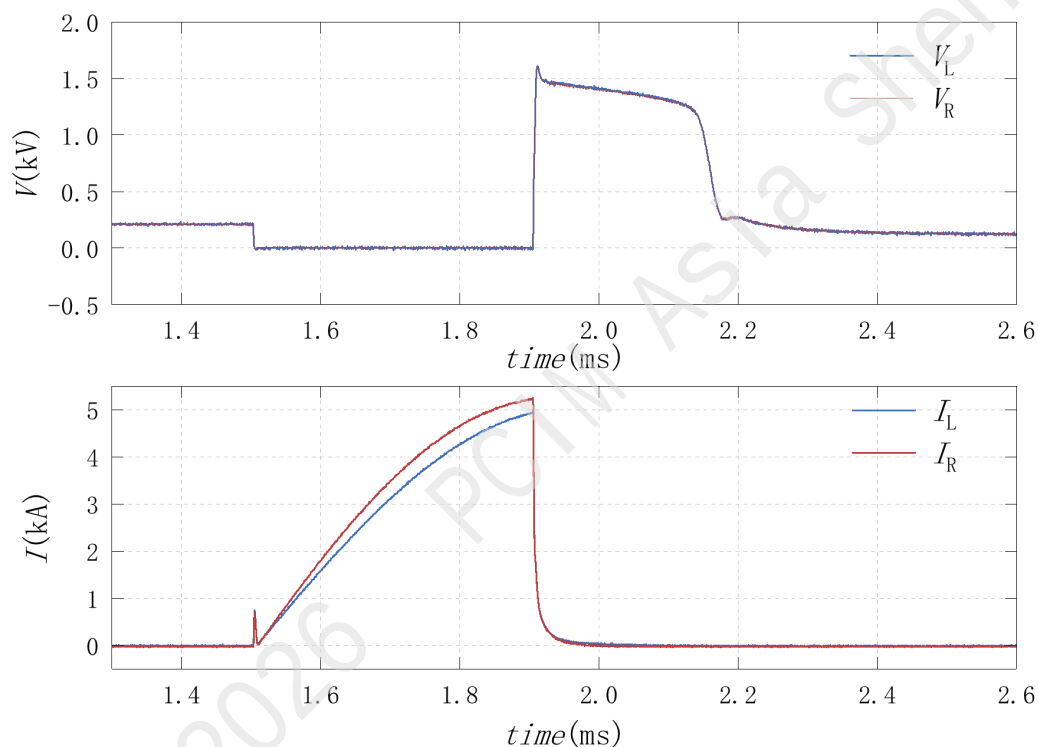


一体模块化设计

4.1 工程实践



基于逆阻IGCT的750V/10kA固态式直流断路器

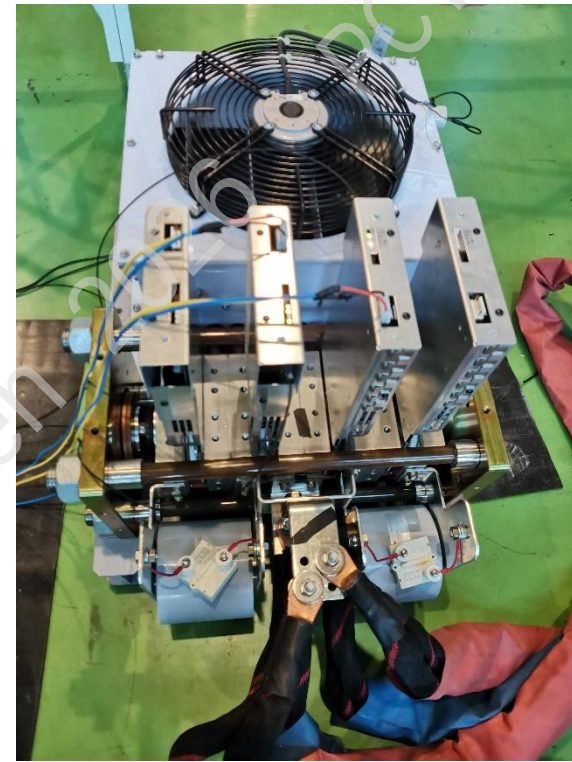
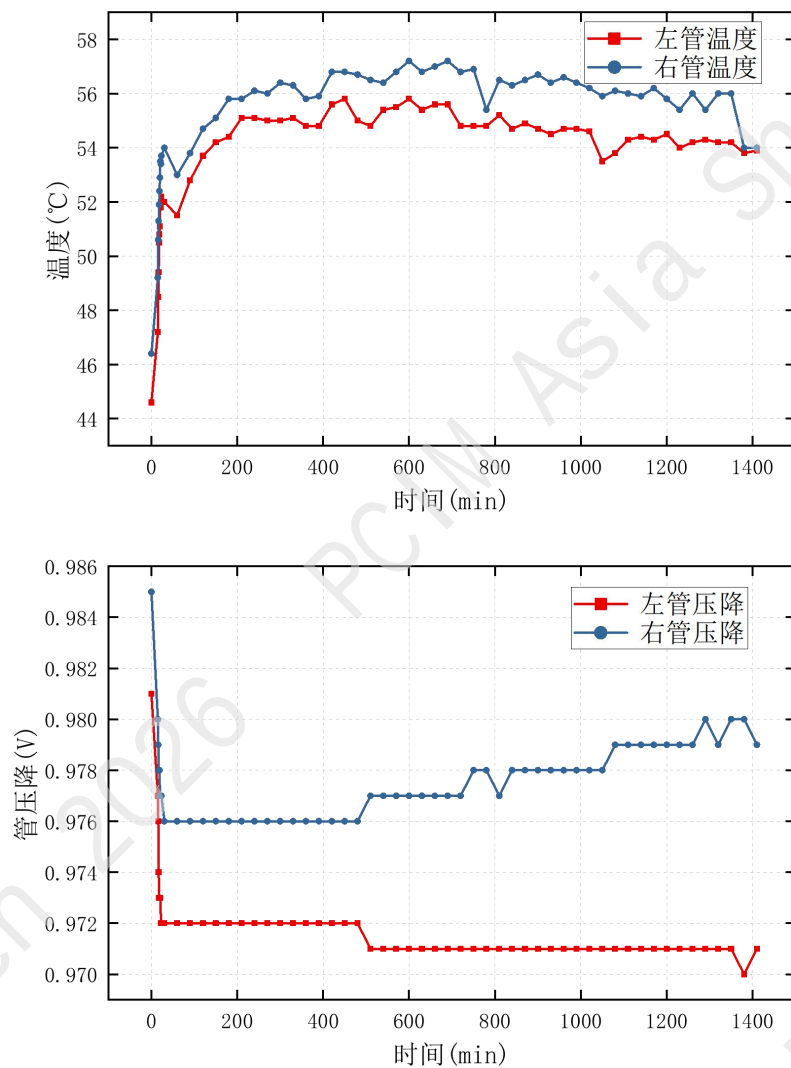


➤ 成功开断**10kA**电流，过电压为**1.5kV**；响应时间**<10us**；全开断时间**300μs**

4.1 工程实践



基于逆阻IGCT的750V/10kA固态式直流断路器

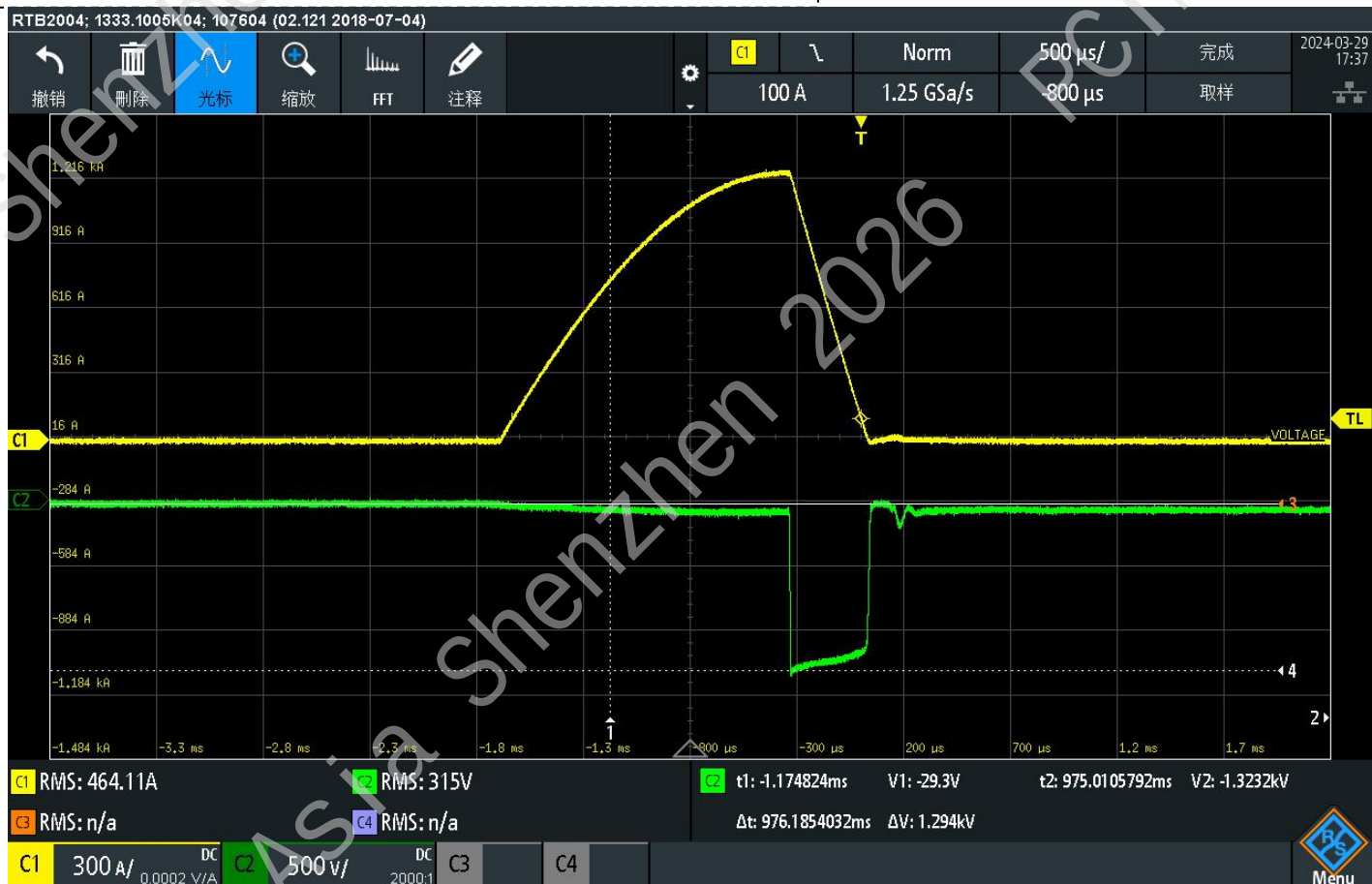
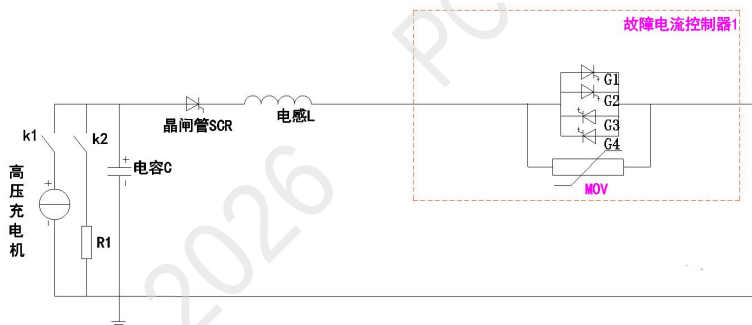


- 长期通流2kA，环境温度26.5℃
- 器件管壳处的温升为30℃，长期导通压降约为0.98V

4.1 工程实践



基于逆阻IGCT的750V/10kA固态式直流断路器



➤ 在乌兰察布产业园现场进行故障电流开断试验，测试结果表明保护时间 $< 1\text{ms}$ 。



山东泰开直流技术有限公司
Shandong Taikai DC Technology Co., Ltd.

感谢聆听

山东泰开直流技术有限公司