

# 自换相电流源型高压直流输电关键技术研究综述

张闻闻<sup>1</sup>, 魏晓光<sup>2\*</sup>, 汤广福<sup>2</sup>, 陈龙龙<sup>3</sup>, 王以璇<sup>1</sup>, 齐磊<sup>1</sup>

- (1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;  
2. 北京怀柔实验室, 北京市 怀柔区 101400; 3. 先进输电技术国家重点实验室  
(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 昌平区 102209)

## Overview on Key Technologies of Self-commutated Current Source Converter Composed of Reversing-blocking IGCT Applied in HVDC Transmission System

ZHANG Wenwen<sup>1</sup>, WEI Xiaoguang<sup>2\*</sup>, TANG Guangfu<sup>2</sup>, CHEN Longlong<sup>3</sup>, WANG Yixuan<sup>1</sup>, QI Lei<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Beijing Huairou Laboratory, Huairou District, Beijing 101400, China;  
3. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology (China Electric Power Research Institute),  
Changping District, Beijing 102209, China)

**ABSTRACT:** The self-commutated current source converter (SCC), which is composed of self-turn-off devices, has the characteristics of high power density, controllable power factor, no commutation failure, and flexible connection to the power grid. It has a broad application prospect in the field of high-voltage DC transmission. Aiming at the engineering application, this paper combined with the theoretical analysis and engineering requirements, analyzes and summarizes the key technologies of controllable current source HVDC transmission from five aspects: topology, modulation methods, control strategies, screening of power devices, and consistency of device voltage sharing, figure out the focus of the above five key technology research and their compatibility with engineering. Finally, the focus of SCC optimization, application prospects and problems that still need to be concerned are analyzed and summarized.

**KEY WORDS:** the current source converter; high voltage direct current (HVDC); control strategy; self-turn-off device

**摘要:** 采用全控器件构成的自换相电流源型换流器(self-commutated current source converter, SCC)具备高功率密度、功率因数可控、无换相失败的风险以及能够柔性接入电网等特点,在高压直流输电领域具备广阔的应用前景。该文以工程需求为目标,结合理论分析与工程要求从拓扑结构、调制方法、控制策略、功率器件的筛选以及器件均压一致性等5个方面分析概括了自换相电流源型高压直流输电应解决的关键技术,指出上述5个关键技术研究的重点及与工程的契合性。最后对SCC后续研究的重点、应用的前景以及仍需关注的问题进行了分析与总结。

**关键词:** 电流源型换流器; 高压直流输电; 控制策略; 全控器件

## 0 引言

资源与负荷的逆向分布特性,使得高压输电成为一种有效的电能输送方式。在输电走廊紧张及负荷中心用电急剧增大下的趋势下,远距离、大容量的高压直流输电系统得到了快速的发展。

作为直流输电系统核心装备之一的换流器直接决定了输电系统的运行特性。目前,工程应用中存在2种不同类型的换流器,分别为以晶闸管器件为代表的电网换相换流器<sup>[1-2]</sup>(line commutated converter, LCC)和以IGBT为代表的模块化多电平换流器<sup>[3-4]</sup>(modular multilevel converter, MMC)。电网换相换流器构成的传统高压直流输电系统,以拓扑成熟、工作原理简单、阀低通态损耗,在远距离、大容量输电系统发挥了重要的作用<sup>[5]</sup>。目前运行的准东-宣城传统直流输电系统的直流电压等级达到了 $\pm 1100$  kV,输送容量为24 GW。采用电网换相的换流器在交流侧出现故障时,极易引发换相失败,造成功率大幅缺额,威胁负荷中心的安全稳定<sup>[6]</sup>。由模块化多电平构成的柔性直流输电系统,以稳定的直流电压及灵活的功率解耦特性,在新能源并网及大电网间解列运行起到了关键的作用<sup>[7-8]</sup>。此外,IGBT器件并联的二极管能够实现电流的双向流动,因此模块化多电平换流器以稳定的直流电压,可反向流动的电流等特点在直流环网中具备广阔的应用前景,目前张北四端 $\pm 500$  kV柔性直流输电

工程采用环网结构实现了直流输电系统功率互济及新能源并网, 输送功率为 3 GW。然而, 半桥 MMC 不具备故障的穿越能力<sup>[9]</sup>, 因此通常需要配合直流断路器或采用半桥加全桥模块的 MMC 保证直流故障的切除, 该措施将使得换流站的整体造价增加或阀损耗显著增大。

为了消除 LCC 应用于直流输电系统逆变侧存在换相失败风险及 MMC 功率密度低等弊端。昆柳龙工程采用了将 LCC 应用于整流侧, 两个 MMC 应用于逆变侧<sup>[10]</sup>, 白鹤滩工程则是将一个 LCC 串联三个 MMC 应用于逆变站<sup>[11]</sup>, 两个工程均实现了两种换流器优势结合。但是由于两种换流器所用器件类型不同, 使得直流系统两端功率不匹配, 存在 1 拖  $N$  的现象。除此之外, 电流源型换流器与电压源型换流器构成的混合多端直流输电系统在故障穿越策略、降压运行等方面控制复杂, 且难以实现潮流翻转, 其根本原因在于电压源型换流器与电流源型换流器本质的不同。

综上分析, 寻求远距离大容量高功率密度、能够有效抵御换相失败以及具备柔性接入电网的新型直流输电技术亟待研发。

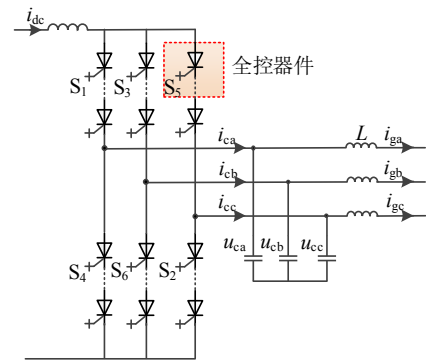
由全控器件构成的自换相电流源型换流器 (self-commutated current source converter, SCC) 具备高功率密度、控制简单、易于实现等优点<sup>[12-14]</sup>。此外 SCC 能够通过调制函数的改变与滤波电容参数的配置能够实现单位功率运行, 降低无功补偿容量<sup>[15-16]</sup>。而且 SCC 的功率解耦能力能够有效实现新能源的并网及对交流电网的支撑<sup>[17-23]</sup>。基于上述优点, SCC 获得了研究学者的关注。中科院李子欣博士和智能电网研究院陈龙龙博士针对 SCC 的拓扑结构、调制方法有相关的文献综述<sup>[13-14]</sup>。然而, 自国内半导体公司研发出逆阻可关断器件后, SCC 的研究进展取得了重大的进展。基于此, 本文以工程应用为导向, 结合理论分析与工程需求针对 SCC 拓扑结构、调制方法、控制策略、功率器件的适用性以及器件均压一致性 5 个关键技术展开, 分析归纳针对上述 5 个关键技术的一般性规律, 期望对后续的研究关注点给予支撑。最后对 SCC 的应用前景及后续需要重点关注的问题进行了总结。

### 1 高压直流输电用自换相电流源型换流器拓扑结构

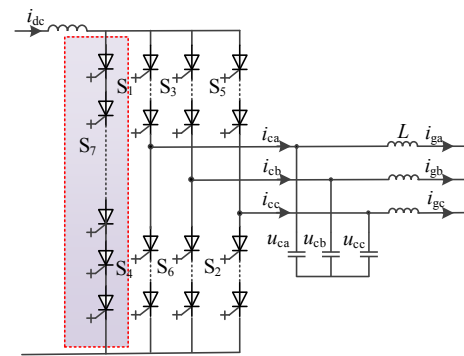
SCC 拓扑是直流输电系统的基础, 因此拓扑

结构简单、具备高功率密度传输是保证 SCC 具备工程化应用的前提。SCC 拓扑结构分为三电平与多电平<sup>[24-29]</sup>。

三电平电流源型换流器的拓扑与传统 LCC 换流器的拓扑一致, 为三相六桥臂, 常见的三电平的换流器的拓扑如图 1 所示。



(a) 常规 SCC 拓扑



(b) H7-SCC 拓扑

图 1 典型的三电平电流源型换流器的拓扑图

Fig. 1 Topology of typical three-level current source converter

图 1(a) 给出常规的三电平 SCC 的拓扑, 三相桥臂通断能够改变换流器交流侧电流脉冲的有效值及相位, 在滤波电容的作用下电流脉冲转换为幅值、相位可调的交流电压, 实现对交流侧有功功率与无功功率的灵活控制。换流器交流侧滤波电容配合滤波电感构成二阶滤波电路, 能够有效滤除换流器产生的高次电流谐波。

电流源型换流器直流侧大电感决定了换流器在运行时不能出现直流电流的断续, 且为了实现对电流的有效控制, 因此有且仅有 2 个桥臂处于导通状态, 对应于电流源型换流器的 3 种运行状态: 1) A 相上桥臂导通, 其他一相下桥臂导通, 此时 A 相输出的电流为  $I_{dc}$ ; 2) A 相下桥臂器件导通, 其他一相的上桥臂器件导通, 此时 A 相输出的电流为  $-I_{dc}$ ; 3) 同一相的上下桥臂器件同时导通, 此时该相输

出的电流为零。图1(b)中的拓扑通过将同相上下桥臂导通状态提取应用于第7桥臂触发导通(H7 self-commutated current source converter, H7-SCC),降低桥臂换流器的开关频率,减少换流器的损耗。

采用脉冲宽度调制的SCC桥臂间换相均为通过桥臂的主动关断实现,在高频PWM调制方式下能够独立的控制有功功率及无功功率,为抵御换相失败及对交流电网的支撑提供基础的理论依据。

模块化多电平电流源型换流器是根据模块化多电平电压源型换流器对偶得到,电压源型半桥子模块对偶得到的电流源型子模块为电感与功率器件并联,模块化多电平电流源型换流器(modular multilevel self-commutated current source converter, MMSCC)采用了电感元件作为电流的储能元件,通过投切、旁路子模块从而实现了对输出电流的控制<sup>[30]</sup>,如图2所示。但是该拓扑存在电流断续的风险及需要精确实现电感电流的排序。为了解决此问题,通过在子模块中添加晶闸管为电感电流提供续流回路避免断续的出现且在子模块中并联电容为各模块进行均压,优化后的多电平拓扑结构能够有效提升电压等级<sup>[31]</sup>。多电平电流源型换流器拓扑结构较为复杂,换流器的功率密度低,控制策略复杂,因此难以在直流领域应用。

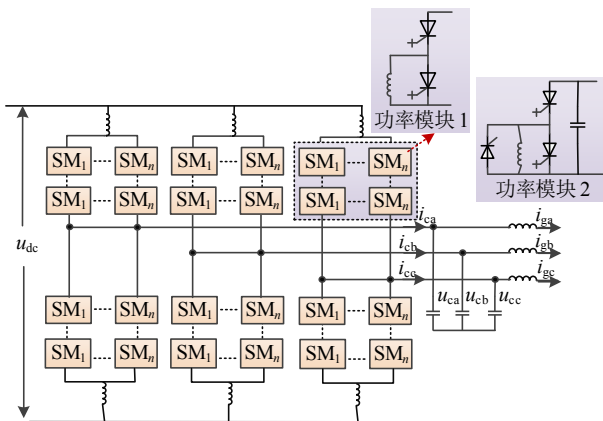


图2 典型的多电平电流源型换流器的拓扑图  
Fig. 2 Topology of typical multi-level current source converter

综上所述,高压直流输电系统用电流源型换流器具备高功率密度,大功率传输是首要选择,其次具备抵御换相失败能力,保证在复杂电网运行工况下的动态安全稳定性是基础保证。最后,能够对交流电网提供必要的有功功率及无功功率支撑,实现电流源型换流器柔性接入电网是电力系统发展需求。SCC能够契合上述新型直流输电装备发展

的需求,因此具备较高的发展前景。不同拓扑下性能对比如表1所示。

表1 不同拓扑下性能对比  
Table 1 Performance comparison among the different topology

参数	SCC	H7-SCC	MMSCC
电平数	三电平	三电平	N电平
功率密度	高	中	低
控制复杂度	低	中	高
抵御换相失败能力/%	100	100	100
功率解耦能力	具备	具备	具备
谐波特性	差	差	优
损耗	中	低	低
体积	小	中	高
技术成熟度	高	高	低

## 2 高压直流输电用自换相电流源型换流器调制方法

调制方法对换流器运行具有重要的支撑作用,同时与换流器拓扑结构的运行原理两者共同决定了SCC的运行应力,进而影响换流器的造价、损耗及器件耐受的 \$du/dt\$<sup>[32-33]</sup>。调制方法中的零电平显著影响SCC的运行应力,因此根据调制方法中是否存在零电平,将调制方法归纳为2类。

### 2.1 零电平作用下换流器运行特性的研究

SCC交直流侧表达式及换流器运行约束<sup>[16]</sup>为:

$$\begin{cases} i_{pj} = s_j i_{dc} \\ u_{dc} = \sum s_j u_j, \quad j = a, b, c \\ \sum s_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} g_a \\ g_b \\ g_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ p_b \\ p_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据式(1)的约束可知,当SCC的开关信号为 \$\pm 1\$ 时,此时换流器的直流电压为换流器交流侧的线电压;当开关信号为 0 时,此时换流器输出电流为零,换流器直流电压也为零,如图3所示。在满足SCC运行约束条件下的调制方法中,可大致分为在线调制方法和离线调制方法。在线调制方法主要包括正弦脉冲宽度调节方法<sup>[34-35]</sup>(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)、空间矢量调制方法<sup>[36]</sup>(space vector modulation, SVM)、以及梯形脉冲调制<sup>[37-38]</sup>(trapezoid pulse width modulation, TPWM)。离线调制方法则以特定谐波消除脉冲宽度调制方法<sup>[39-42]</sup>(selected harmonic elimination pulse width

modulation, SHE-PWM)应用较为广泛。

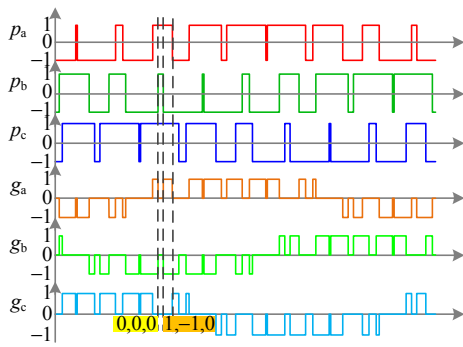


图 3 二三脉冲信号

Fig. 3 Pulse signals of bi-logics and tri-logics

在采用 SPWM 时，由于电流源型换流器的触发信号为 1、-1、0，因此需将 SPWM 与载波比较后获得的两电平信号经二三变换为三电平信号。由于经过二三变换后三电平信号发生偏移，因此文献[34]提出采用调制波预处理的方法进行修正以及为了保证器件动作频率的最小化，需对零电平进行合理分配。文献[35]采用直接载波调制方法，通过将工频周期的等分，从而能够省去二三变化，直接获得所需的桥臂驱动信号。文献[32]分析 SCC 在 SPWM 下的谐波分布频谱，并为交流侧滤波参数的设计提供依据。SVM 与 SPWM 相类似，但需要计算矢量作用时间。文献[36]通过优化计算算法从而缩短计算时间，提高运算效率。SVM 易于实现，且电流的利用率比 SPWM 高。

SHE-PWM 是在电流源型换流器中应用较为广泛的一种离线调制方法。通过联立消除谐波等式的方程的方法不仅能够获得较优的谐波特性也能够保证较低的开关频率<sup>[39-41]</sup>。文献[40]提出一种虚拟相电流的方法从而将实际电流与触发信号相对应，并将零电平信号根据判断条件提前进行存储。文献[37]描述在不同直流电流利用率下，存在零电平出现与消失的临界情况，该特性将导致阀压波动较大。由于 SHE-PWM 属于离线调制，因此大量的文献研究了 SHE-PWM 初始角度的快速计算方法，文献[42]提出 TPWM 初始角度计算应用于 SHE-PWM 的方法，有效提高了计算速度，并进行了实验验证。

在上述调制方法的研究中，只有 SPWM 及 SVM 两种调制方法满足工程应用时的灵活可调性，但均不可避免的出现了零电平直通现象。图 4 给出在 250 kV 的直流电压条件下采用 SPWM 时桥臂电压与阀压的波形图。

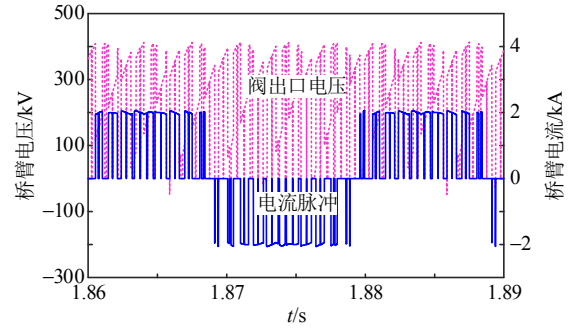


图 4 SPWM 下桥臂电压与阀压波形图

Fig. 4 Waveform of bridge leg voltage and valve voltage adopting SPWM

在换流器调制方法存在零电平的状态下，换流器直流电压波动较大，导致在相同的系统直流电压时，换流器耐受出口电压峰值较大，桥臂  $du/dt$  高，增加器件的串联个数将增大换流器的损耗及造价，此外，较大的换流阀直流电压波动将导致平波电抗器的取值达到“H”级，难以向高压推广。但是该调制方法因具备较好的换流器运行性能在中低压领域的无功补偿、电机拖动及直流融冰具备较高的应用前景。

## 2.2 零电平消除对换流器工程应用提升的研究

为了优化换流器运行时的阀压特性，国内的学者进行了大量的研究，研究表明，从根源上解决调制方法中零电平的出现是降低换流器耐压峰值、减小  $du/dt$ 、降低器件串联个数的根本方法。

梯形调制方法是一种通过将梯形载波与三角载波比较的方法，在  $\pi/3 \sim 2\pi/3$  区间内不产生载波信号，载波频率易于改变。TPWM 在应用于电流源型换流器时，获得的二值逻辑信号能够直接应用于电流源型换流器，不存在零电平的状态。且其最大的电流利用率大于 SPWM 与 SVM，但是调制比的变化范围较小<sup>[37]</sup>。文献[33,43-44]从根本上分析了调制方法中零电平出现的根源，因此提出一种特定载波频率的调制方法(special carrier frequency method, SCFM)，该方法通常运行于过调制下，且载波频率应满足特定的要求，此时器件的动作频率为 150 Hz，与高压直流应用场景较为契合。特定载波频率调制方法应满足的要求见附录 A。文献[45-46]提出基波频率调制方法(fundamental frequency method, FFM)。尽管桥臂开关频率为 50 Hz 时 SCC 的直流电压与无功功率存在耦合，但换流器的直流电压峰值较低，且  $du/dt$  较小，此时换流器的直流电压特性与传统 LCC 相似，具备较强的工程应用

价值。此外, FFM-SCC 及 SCFM-SCC 能够实现触发角在  $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$  之间调节, SCC 发出的无功功率更加灵活可调。

图 5、6 中给出图 1(a)拓扑结构下采用 SCFM 及 FFM 时 SCC 的阀压及桥臂电压波形(直流电压为 250 kV)。SCFM、FFM 均能够彻底消除换流器在运行中的零电平问题, 降低了换流器运行中的阀压峰值。

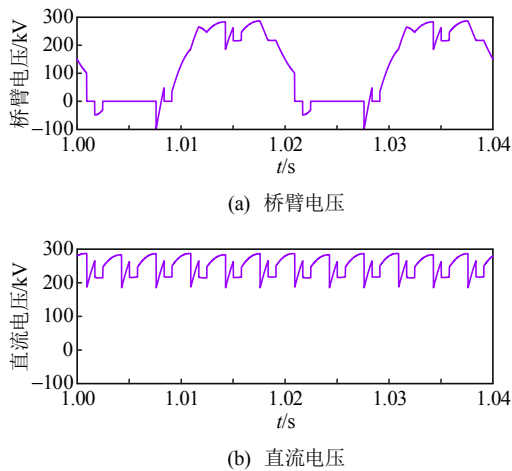


图 5 SCFM 下 SCC 桥臂电压及阀压波形  
Fig. 5 Waveform of bridge leg and valve voltage adopting SCFM

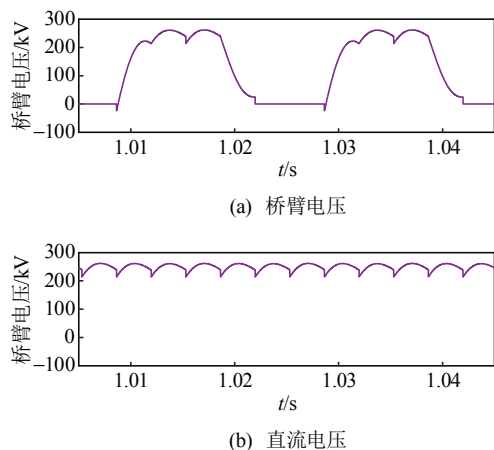


图 6 FFM 下 SCC 桥臂电压及阀压波形  
Fig. 6 Waveform of bridge leg and valve voltage adopting FFM

不同调制方法下换流器运行特性的对比结果如表 2 所示。从换流器阀压峰值及桥臂电压耐受的  $du/dt$  考虑, 调制方法中不应存在零电平, FFM-SCC 与 SCFM-SCC 满足要求。但相应的调制方法中调制比不可调或变化范围较小, 为了满足直流系统与交流电网的柔性连接, 需寻求更灵活的系统控制策略实现有功功率及无功功率运行区间的扩大。

表 2 不同调制方法下性能对比  
Table 2 Performance comparisons among the different modulation methods

项目	SPWM	SVM	SHE-PWM	TPWM	SCFM	FFM
直流电流利用率	0.688	0.707	0.73~0.78	0.74	0.717~0.78	0.78
动态特性	高	高	低	中	中	中
谐波特性	一般	一般	优异	一般	复杂	复杂
桥臂直通现象	存在	存在	取决于调制比	不存在	不存在	不存在
阀压特性	复杂	复杂	复杂	较复杂	简单	简单
阀压峰值/pu	1.636	1.592	—	1.16	1.144	1.048
调制比	大范围	大范围	大范围	小范围	小范围	不可调
可调性	调节	调节	调节	调节	调节	调节
数字化实现	实时	实时	查表	实时或查表	实时	实时
换流器造价	高	高	高	中	低	低
直流输电应用前景	差	差	差	一般	优异	优异

### 3 高压直流输电用自换相电流源型换流器控制策略

控制策略是 SCC 构建直流输电系统可靠运行的重要保障, 同时系统的控制策略也与换流器的拓扑结构、调制方法密不可分。目前关于系统控制策略研究的逻辑分为 2 种: 1) 从系统运行特性最优出发, 对阀设计提出要求; 2) 从当前阀设计能够满足的最高上限出发, 分析优化系统的运行特性, 后者具备更高的应用价值。

#### 3.1 以系统运行特性为目标的控制策略研究

以系统运行特性为研究目标主要针对 SCC 构建的高压直流输电系统功率运行区间宽、控制特性优以及谐波低展开。国外学者主要针对将电流源型换流器应用于海上风电的并网, 将 SCC 应用于海上换流站用于减轻换流站的体积及造价, 在应对海上风电功率波动时为了减小换流器的损耗, 提出了最大调制比的控制策略<sup>[18]</sup>。为了进一步减小海上换流站的体积, 文献[7]充分利用了电流源型换流器的特性, 提出采用级联的方式将 SCC 串联, 增加系统输送的功率。

国内学者研究的重心放在了传统 LCC-HVDC 系统的改造, 从而减弱或彻底消除发生换相失败的风险。浙江大学徐政教授团队是国内最早研究 LCC 与 SCC 构建直流输电系统的控制特性, 在电路拓扑的基础上细致分析了 LCC-SCC 高压直流输电系统的启动过程、潮流翻转模拟、典型的故障响应及重

启动过程，研究成果奠定了传统直流输电系统改造的可行性<sup>[12]</sup>。随后中科院电工所李子欣博士团队进一步针对 LCC-SCC 高压直流输电系统进行了大量的研究，文献[47-48]根据 SCC 的工作原理，推导换流器直流侧电压、交流侧有功功率、无功功率的表达式，并设计了系统运行的控制框图。文献[49]根据换流器的表达式获得了功率的解耦区间，指出 SCC 的功率运行区间存在调制比约束区域和换流器最大通流的约束，并进行了仿真验证。文献[50]提出 SCC 在应用于无源网络的启动控制策略。文献[51]推导在受端交流电网三相不平衡时换流器对功率控制的表达式，并利用仿真的结果验证了理论的正确性。文献[52]分析交流电网故障下换流器的运行特性，表明了电流源型换流器能够有效地实现交直流故障穿越，避免系统的脱网运行。文献[53]分析系统直流侧故障的相关特性，提出交流侧电压过冲、振荡抑制方法及故障结束后的重启动策略。

综上所述，针对 SCC 在高压直流领域的研究较多且研究内容包含了系统稳态、直流故障清除策略、交流故障穿越策略的研究，表明 SCC 在应用于高压直流输电领域具备广阔的前景。但忽略了在系统运行方式下装备的电气应力，因此实际的控制策略有待结合装备的运行特性进行进一步的优化或以装备应力为出发点，进一步改善系统的运行特性。因此该控制策略受限于调制方法带来的问题无法推广至高压直流系统，但中低压领域的控制具备较好的适用性。

### 3.2 以阀压特性为基础的功率运行区间研究

SCC 控制策略研究在面向工程需求时应保证换流器运行应力小、策略灵活易实现，在此基础上优化系统的功率运行区间，最终实现 SCC 柔性接入电网，实现直流系统与交流电网间的互济。汤广福院士团队率先关注了此问题<sup>[32-33,38]</sup>，该研究团队发现：SCC 功率运行区间是以牺牲阀压为代价的。这是因为 SCC 是通过改变滤波电容电压实现对功率的调节，较宽的无功功率区间必然会导致滤波电容电压升高，增大换流阀耐受电压。

在 FFM-SCC 下 SCC 不存在零电平，换流阀运行过程中耐压特性较好。针对此，华北电力大学赵成勇教授团队针对 SCC 在基波频率调制方法下研究换流器的稳态运行特性及典型的故障特性<sup>[45,54-55]</sup>，并分析电流源型换流器在海上风电并网运行的可行性<sup>[23-23]</sup>，为新能源的灵活可靠利用提供了一种全

新的并网方式。文献[45]提出基于两端电气量协调运行控制策略，通过分析功率运行区间的约束条件进而优化系统的控制策略，在保证换流器直流电压特性的基础上扩大功率的解耦区间，增强换流器运行的灵活性。

文献[43]总结现有调制方法在不同调制比下 SCC 的系统运行特性，指出 SCC 在采用 SCFM 与 FFM 时的一般规律：两者均不存在零电平现象，但 SCFM 相比于 FFM 具备两个调节度，保证功率的解耦运行，如图 7 所示。针对不同调制方法及系统控制策略下 SCC 功率运行区间的分析、推导见附录 B 所示。

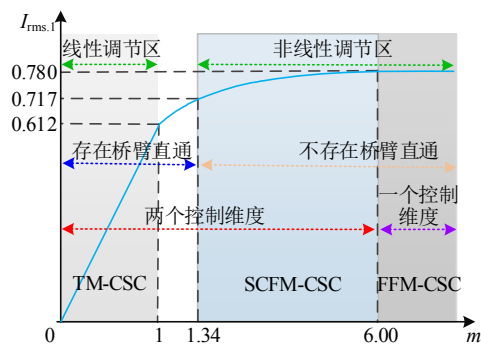


图 7 不同调制方法下 SCC 的运行性能  
Fig. 7 Operation characteristic of different modulation method

在功率运行区间优化的研究中，主要分为 2 个的方面：1) 调制度约束优化；2) 低功率约束优化。文献[45]通过放宽对直流电压、直流电流的约束能够有效扩大换流器的功率运行区间，如图 8 所示，由于直流电流与直流电压上限的约束，使得调制度约束的斜率难以无限增大，因此低功率约束需寻求

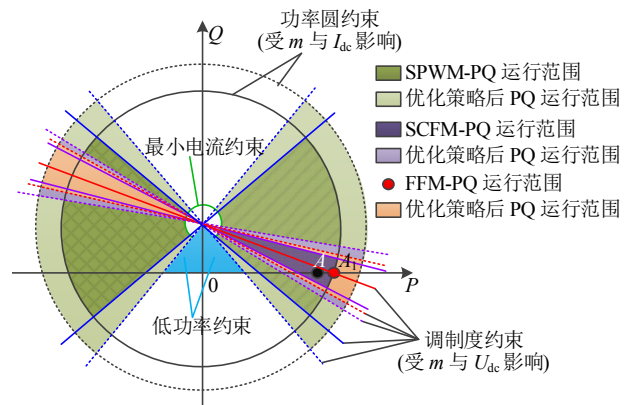


图 8 不同控制策略下 SPWM、SCFM 及 FFM 功率运行区间

Fig. 8 Power operation range of SPWM, SCFM and FFM under the different control strategies

其他的解决办法。

汤广福院士研究团队通过分析在低功率下功率耦合的限制因素，获得了在全工况运行范围内有功功率与无功功率之间的表达式，如式(3)所示<sup>[43-44]</sup>。再结合有功功率与无功功率相对应的控制变量，获得不同阶段的控制特性。

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{3 U_m m_d i_{dc}}{2(1 - \omega^2 LC)} \\ Q_{ac} = \frac{3 \omega C U_m^2 + i_{dc} U_m m_q}{2(1 - \omega^2 LC)} \\ Q_{ac} = \frac{3 \omega C U_m}{2(1 - \omega^2 LC)} - \tan(\varphi_2 - \varphi_1) P_{ac} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{ac}$ 、 $Q_{ac}$ 为网侧有功功率、无功功率； $U_m$ 为变压器阀侧电压的峰值； $\varphi_2$ 、 $\varphi_1$ 为滤波电容相位与网侧电压相位； $L$ 、 $C$ 为换流器交流侧滤波电容及滤波电感； $m_d$ 、 $m_q$ 为调制比在  $d$ - $q$  轴上的投影大小。

根据式(3)，有功功率、无功功率与直流电流、相角差间的关系如图9所示。在保证直流电流不过零、直流电压由零至额定值的条件下，能够实现有功功率与无功功率一一的对应关系。在低有功功率下，直流电流、相角差对有功功率、无功功率的影响互换，因此通过划分  $\varphi_2 - \varphi_1$  与  $45^\circ$  之间的关系，进而调整有功功率与无功功率的控制变量，实现有功与无功的精确控制。该方法由于在低功率下有功功率的控制量由直流电流转变为直流电压，因此最小电流约束圆也能同步消除，此时直流电压运行范围为  $0 \sim 1$  pu 额定值。

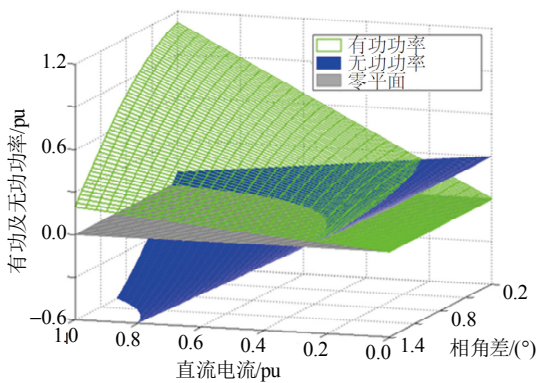


图9 有功功率、无功功率与直流电流、相角差间的关系  
Fig. 9 The curve of active power and reactive power under different DC current and phase difference

在 SCC 功率运行区间的研究中发现：在考虑 SCC 耐受电压应力的前提下依然能够实现了全功率范围内的解耦运行，为工程应用奠定了较好的基础。但受限于功率圆运行及 SCC 运行原理的约束，

在高有功功率下 SCC 所能发出的无功功率小于 MMC，这是电流源型换流器的特性决定的。不同控制策略下 SCC 的运行性能对比如表3所示。

表3 不同控制方法下性能对比  
Table 3 Performance comparison among the different control methods

项目	不采用协调控制策略		
	TM-SCC	SCFM-SCC	FFM-SCC
额定工况无功调节能力	宽	窄	不能
低负载下单位功率运行	不能	不能	不能
阀压特性	差	优	优
项目	采用协调控制策略		
	TM-SCC	SCFM-SCC	FFM-SCC
额定工况无功调节能力	较宽	较窄	窄
低负载下单位功率运行	—	能	能

综上所述，在应用于高压直流输电系统时，对 SCC 拓扑结构、调制方法、控制策略进行了综合选择与比较，提炼出系统对于用于 SCC 中全控器件的要求如表4所示。

表4 系统对器件的参数要求  
Table 4 Parameter requirements of the device under the HVDC system

类别	耐受电压	di/dt	du/dt
参数	双向耐压	1~2 kA/μs	500 V/μs
类别	通态压降	开断电流	关断损耗
参数	低	≥2 pu	低

## 4 自换相电流源型换流器用功率器件适用性

### 4.1 功率器件的筛选

大功率器件作为换流器运行的核心部件，器件选择的契合性将直接决定了换流器的实用价值。在双向耐压的前提下，桥臂器件可在逆阻 IGBT 器件、逆阻 IGCT 器件、IGBT 串联二极管与不对称 IGCT 器件串联二极管中选择。

IGBT 与 IGCT 由于元胞结构的不同，因此对外呈现的外特性也不尽相同<sup>[56-57]</sup>。IGBT 的通态压降相比于 IGCT 较高，主要原因可以归纳为以下两点：1) 在开通过程中， $P+$  与  $N-$  漂移区正向偏置，而  $P_{well}$  与  $N-$  漂移区反向偏置，在 IGBT 中的  $J_2$  结处反向偏置，因此  $J_2$  结处的少子的浓度将降为零，不利于电子从发射极注入漂移区，导致了 IGBT 正向压降较高。2) “拥挤效应”导致的阻抗增大<sup>[58]</sup>。尽管从 IGBT 芯片的外特性来看电流是均与的，但空穴电流在栅极区域下聚集和流动，并存在横向移动过程，导致了  $P_{well}$  区域附近电流密度的增加。同

时  $P_{well}$  附近漂移区域的电导率比集电极附近漂移区域的电导调制更弱，使得该区域通态压降较高。

当 IGCT 承受正向电压且需要导通时，通过门级与阴极间的电流激发 IGCT 内部 NPN 晶体管和 PNP 晶体管的导通，由于晶体管间的电流互为正向增益，因此 IGCT 内部能够迅速充斥着大量来自阳极和阴极空穴和电子，产生大注入效应<sup>[59]</sup>。高浓度的空穴与电子在  $N^-$  区强烈的产生电导调制效应，极大的降低了 IGCT 的通态压降。

非逆阻型的 IGBT 与 IGCT 由于缓冲层的存在，反向耐压时的电场强度如图 10(a)、(b)所示，此时在反向耐压时极易发生器件的雪崩击穿<sup>[60]</sup>，因此逆阻型器件的元胞结构中不存在高掺杂缓冲层，该特性将增大逆阻型器件的通态压降。而 IGCT 器件由于在通态时载流子能够大量注入，因此可以调控载流子的浓度与寿命从而获得较低的通态压降。在相同的器件参数下 IGBT 与 IGCT 器件中等离子区的浓度如图 10(c)所示，可知，IGCT 器件内部的载流子浓度远大于 IGBT，因而能够获得较低的通态压降。

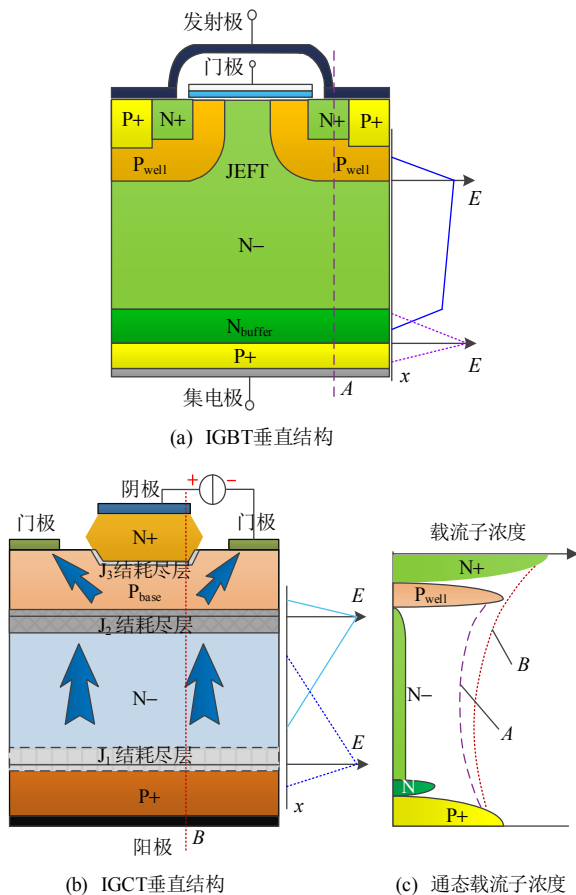


图 10 IGBT 与 IGCT 内部结构、场强及载流子浓度  
Fig. 10 Structure, field strength and carrier concentration of IGBT and IGCT

逆阻 IGCT 器件在关断时需要将阴极电流迅速转移至门级，约  $1 \mu s$ ，此时门级注入的  $di/dt$  决定器件的极限开断电流。而压控性 IGBT 则是通过门级电压控制沟道的关断，具备弱点驱动强电的效果，因此 IGBT 比 IGCT 开断电流大。两者关断时，均为控制  $J_3$  结的关断，随后  $J_2$  结的耗尽层开始拓展，器件内部电场强度逐步建立，当器件两端的电压达到母线电压后， $P^+$  区的存储电荷被快速抽取，阳极电流开始下降。最后  $N^-$  区的过剩载流子浓度通过复合过程逐渐衰减<sup>[61-62]</sup>。通态时 IGCT 相比于 IGBT 有更多的电子与空穴注入到  $N^-$ ，因此 IGCT 相较于 IGBT 的拖尾过程将更长，器件的关断损耗较大。

清华大学曾嵘教授团队对逆阻 IGCT 器件、逆阻 IGBT 器件、非对称 IGCT 串联二极管、非对称 IGBT 串联二极管现阶段的容量进行了调研<sup>[63]</sup>，如图 11 所示，并在阀的应用特性中进行了全面的分析与实验，不同器件选取方式下器件的参数如表 5 所示。

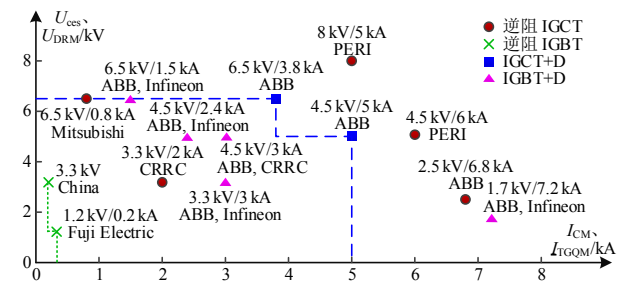


图 11 逆阻型功率半导体器件的额定值  
Fig. 11 Normal ratings of available reverse-blocking-type power semiconductor devices (IGBT:  $U_{CES}$ ,  $I_{CM}$ ; IGCT, diode (D):  $U_{DRM}$ ,  $I_{TQM}$ )

表 5 不同器件组合方式下的参数对比

Table 5 Parameters comparison among different device combination modes

类别	逆阻 IGBT	逆阻 IGCT	IGBT 串 二极管	IGCT 串 二极管
额定电压/kV	1.2	4.5	4.5	4.5
额定电流/kA	0.2	3.0	3.0	3.69
最大关断电流/kA	—	6.0	15	5.6
浪涌电流	低	高	低	高
通态压降	—	1.65V@6kA	5.6V@3kA	3.37V@2.5kA
失效模式	开路	短路	开路	短路

从表 5 中各种器件的运行特性可以看出，在应用于 SCC 中，选用逆阻 IGCT 器件是可供选择的 4 种方式中较为优良的一种，且 IGCT 器件的抗涌流能力较好，器件的均压一致性相比于不对称

IGCT 串联二极管也更易实现。

### 4.2 逆阻 IGCT 器件测试结果分析

西安派瑞功率半导体变流技术股份有限公司针对高压直流用逆阻 IGCT 在满足高电压耐受、大电流关断、高  $du/dt$ 、 $di/dt$  能力和低损耗等特性进行综合分析优化研发了 4 500 V/3 000 A(开断电流 6 000 A)、8 000 V/3 000 A(开断电流 5 500 A)的逆阻 IGCT, 为后续特高压直流用所需求的 6 500 V/5 000 A 及 8 500 V/5 000 A 的逆阻 IGCT 器件奠定基础。

针对生产的逆阻 IGCT 器件的关键特性进行了测试, 主要包括静态漏电流测试、通态压降与极限开断电流等。静态电流通过施加交流电压与直流耐受电压, 漏电流均满足相关的要求。通态压降及开断电流的能力如图 12、13 所示。

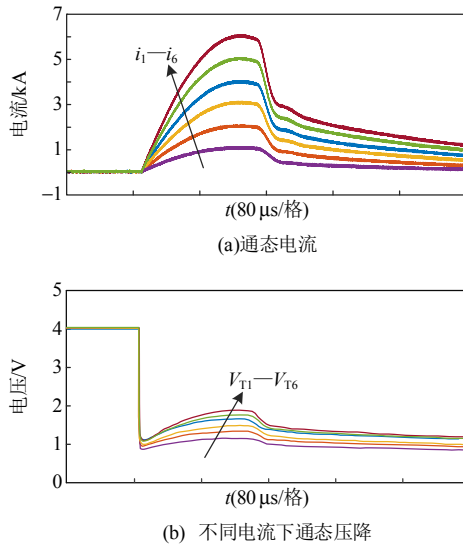


图 12 不同电流下 IGCT 器件的通态压降  
Fig. 12 On state voltage drop of IGCT device under different current

由图 12 可知, 在逆阻 IGCT 器件通流为 6 kA 时器件的导通压降约为 1.65 V, 远小于 IGBT 器件的导通压降。结合图 13 可知, 逆阻 IGCT 器件最大开断电流可达到 6 kA, 为额定电流的 2 pu, 且此时逆阻 IGCT 器件的电压为 3.63 kV, 约为器件额定电压的 80%。逆阻 IGCT 器件的相关参数如表 6 所示。

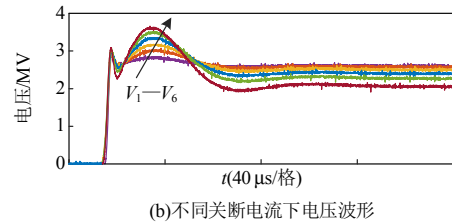
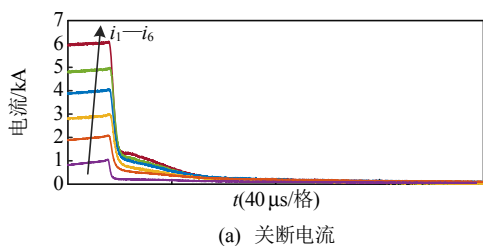


图 13 关断不同电流下 IGCT 器件的电压波形  
Fig. 13 Voltage Waveforms of IGCT at Different Switching off Currents

表 6 不同关断电流下逆阻 IGCT 通态压降及关断电压  
Table 6 On state voltage drop and overvoltage of reverse-blocking IGCT under different current

电流/kA	通态压降/V	关断电压/kV	电流/kA	通态压降/V	关断电压/kV
1	1.17	2.83	4	1.61	3.35
2	1.33	3.02	5	1.76	3.50
3	1.49	3.17	6	1.89	3.63

RB-IGCT 器件除了能够实现主动关断功能外, 还能够实现与晶闸管相似的关断特性, 即在器件耐受负压电流过零时实现过零关断。该开关状态能够有效降低器件的驱动损耗及关断损耗。且过零关断状态下 IGCT 器件间均压一致性的难度将大幅降低。逆阻 IGCT 器件在 3 kA 电流下自然关断过程的反向恢复电流、电压的波形如图 14 所示。

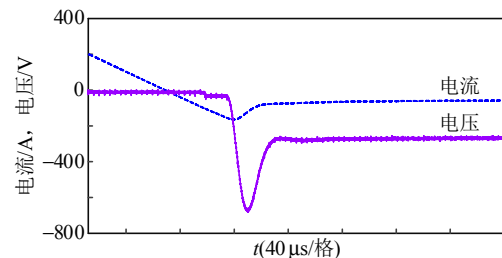


图 14 IGCT 器件自然关断状态下的电压、电流波形  
Fig. 14 Voltage and current waveforms of IGCT in natural off state

## 5 自换相电流源型换流器用逆阻 IGCT 器件均压一致性

电流源型换流器中器件串联均压是 SCC 的核心难题。在分析 SCC 的均压方案前, 需在换流器的拓扑结构及调制方法基础上获得换流器运行时耐受的电气应力。

### 5.1 电流源型换流器运行应力提取

在 SCC 调制方法的介绍中, 分析了 SCC 在高频(450 Hz)、中频(150 Hz)及基频(50 Hz)下的阀压应力, 高频动作下因阀压波动性较大, 因此难以向高压推广。文献[32]分析了 SCC 在中频下换流器的应

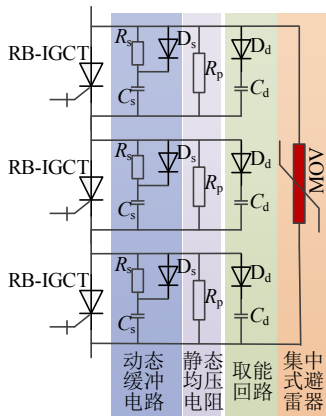
力，总结了换流器在稳态运行时存在主动换相与强迫换相两种运行工况，主动换相过程中开通桥臂的电压相较于关断桥臂的电压低，因此换相过程较易实现。而强迫换相阶段，需要通过桥臂器件关断建立的电压实现桥臂间电流的换相，该过程对器件的均压要求较高。而混合换相换流器 (hybrid commutated converter, HCC) 及可控换相换流器 (controllable line commutated converter, CLCC) 在稳态运行时器件均为电流过零关断，均压一致性的实现难度小。而在抵御换相失败运行时，HCC 与 CLCC 均依靠桥臂内的可关断器件主动关断实现桥臂间电流的转移。HCC 及 CLCC 拓扑结构及工作原理如附录 C 所示。

在 SCC、HCC、CLCC 3 种典型拓扑结构下，器件间的均压特性存在差异，主要表现为两点：1) 器件关断状态存在差异；2) 换相回路参数存在差异。1) 为 SCC 拓扑下，器件每次关断均为主动关断，而 HCC、CLCC 在稳态运行时器件为过零关断，仅在发生换相失败时器件主动关断；2) 为换流阀交流侧滤波电容的增加改变了换流阀换相回路，因此 SCC 换相回路中电感较小。尽管器件每次均为主动关断，但关断的过电压值较小，而 HCC、CLCC 中换相电感较大，因此每次关断器件产生的过电压大。

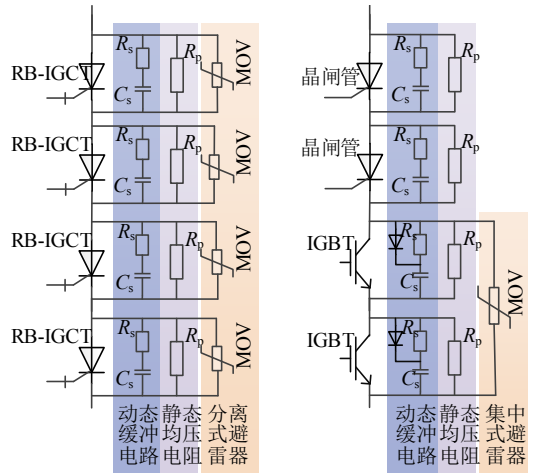
针对 3 种拓扑结构差异，汤广福院士团队与曾嵘教授团队分别提出了 3 种不同的均压方案，如图 15 所示。

### 5.2 以大电容抑制器件过电压的均压方案

汤广福院士团队提出在逆阻 IGCT 器件两端并联两级缓冲电路，一级为电阻、电容及二极管构成，二级为电容和二极管构成。双层缓冲电路能够有效降低器件的  $di/dt$  及  $du/dt$ <sup>[63]</sup> 及主动关断时的过电压，



(a) SCC 均压电路



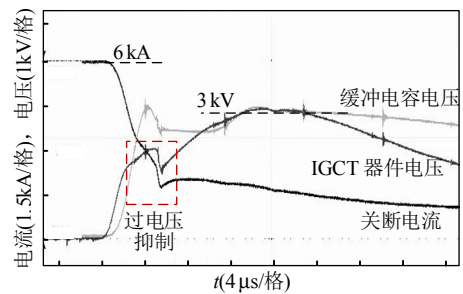
(b) HCC 均压电路

(c) CLCC 均压电路

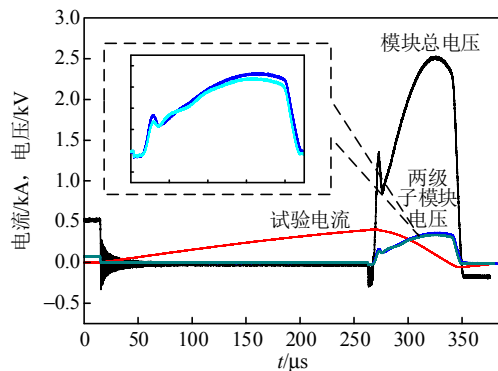
图 15 均压电路拓扑

Fig. 15 Topology of buffer circuit

其中 RCD 中阻尼电容为  $1.2 \mu\text{F}$ ，阻尼电阻为  $32 \Omega$ 。二级缓冲电路电容容值为  $32 \mu\text{F}$ 。此外，二级缓冲电容为逆阻 IGCT 器件提供稳定的驱动电压，保证器件的稳定触发。汤广福院士团队针对 SCC 采用的器件串联方案及效果如图 16(a)、(b) 所示。



(a) 单器件均压电路实验结果



(b) 多器件均压电路实验结果

图 16 均压电路实验结果

Fig. 16 Capacitive double buffer circuit of IGCTs

在换流器运行时，大电容的存在不仅能够有效抑制器件的电压过冲，也能够使换流过程中的能量得以存储，但会引起换流阀体积的增大。

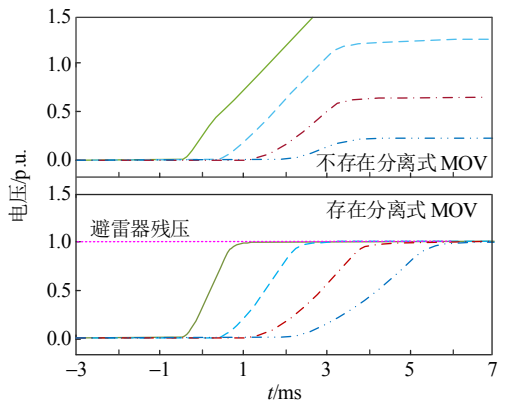
在单器件试验中，IGCT 器件两端电压被电容

电压明显钳位，证实了电容均压的效果。开展的多级逆阻 IGBT 器件串联试验结果显示，所采用的均压电路能够有效将器件间电压的不一致性降低至 7% 以内。

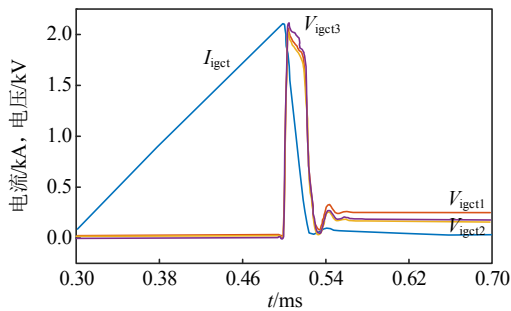
### 5.3 以避雷器抑制器件过电压的均压方案

HCC 与 CLCC 阀换相回路中电感值较大，因此在强迫换相过程中因器件主动关断产生的过电压极高，单纯的依靠电容抑制过电压已无法实现。借助避雷器在高电压下趋近于无限大电容器的特性，曾嵘教授团队和汤广福院士团队结合各自拓扑结构的特点提出了 2 种低损耗、均压一致性高的均压方案。

图 17(b) 为清华大学曾嵘教授团队提出的均压拓扑<sup>[29]</sup>，逆阻 IGBT 并联了阻尼电容、阻尼电阻及分离式避雷器。在主动关断模式下，若不采用均压措施器件的关断电压波形如图 17(b) 所示<sup>[64]</sup>，此时因器件的关断分散性难以实现器件间的均压一致性。在分离式避雷器钳制电压的作用，单器件达到避雷器动作电压后，避雷器能够有效将器件的过电压进行抑制，从而较好的实现了器件间的均压一致性，如图 17 所示<sup>[29,64]</sup>。该方案能够有效保证器件间的均压一致性且损耗低，但存在冗余不足、分离



(a) 避雷器均压工作原理



(b) HCC 均压实验结果

图 17 避雷器式 IGBT 均压回路

Fig. 17 Surge arrester type buffer circuit of IGBTs

式避雷器吸能上限受约束及与桥臂避雷器的配合难等弊端，不利于换流器的长期抵御换相失败运行。

汤广福院士团队结合 CLCC 拓扑结构的特点，提出在 IGBT 两端并联 RCD 缓冲电路配合集中式避雷器均压，缓冲电容容值较大，如图 15(c) 所示<sup>[65]</sup>。该方案通过大电容实现了器件间的均压一致性且集中式的避雷器保证了 IGBT 阀过电压的抑制。尽管此方案中缓冲电容较大，但 IGBT 与晶闸管采用串联设计，IGBT 器件耐压低，因此该均压方案同样具备低损耗、均压一致性高的特点。

根据上述分析可知，针对器件间均压一致性，汤广福院士团队及曾嵘教授团队根据换流器拓扑结构及工作原理设计了相应的均压电路，其中 HCC 与 CLCC 由于关断时过电压较高，因此采用了分离式与集中式避雷器，而 SCC 由于关断过电压较低，故采用了大电容均压，均压拓扑均结合了换流器的运行应力进行设计，保证了均压的可靠性。3 种拓扑中器件关断过电压及与避雷器钳制电压的配合关系如图 18 所示。电容均压与分离式、集中式避雷器均压方式的性能对比如表 7 所示。

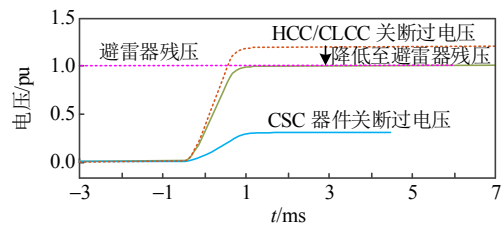


图 18 SCC、HCC、CLCC 过电压与避雷器残压分布特性

Fig. 18 Overvoltage distribution characteristics and residual voltage of arresters of SCC, HCC, CLCC

表 7 不同均压方式下的性能对比

Table 7 Performance comparison between different share circuits

项目	电容均压	分离式避雷器	集中式避雷器
应用场景	低感回路	高感回路	高感回路
均压方式	电容储能	避雷器耗能	避雷器耗能
均压一致性	高	高	高
单次储能/耗能上限	低	高	高
长期运行能力(300 ms)	能	不能	能
冗余灵活性	高	低	高
体积	大	中	小
防爆特性	高	低	高

## 6 下一步的研究重点

1) 对交流电网的支撑研究。

SCC 对交流电网暂稳态下的支撑尚无研究。目

前 SCC 的研究主要针对 SCC 构建的直流输电系统、阀压运行特性进行了大量的研究, 但缺乏对 SCC 与交流电网间的交互机理研究。SCC 能够实现交流侧有功功率及无功功率的解耦运行, 这为交流侧在故障电压跌落时提供必要的无功支撑, 实现交流侧故障结束后的快速恢复。

### 2) 装备-器件的全局优化研究。

换流阀运行应力决定了逆阻 IGCT 器件在极端工况及长期运行工况下的可靠性。在面向  $\pm 800$  kV/5 kA 的直流输电系统时, 器件需长期关断 5 kA 的直流电流, 此时器件长期运行的可靠性应重点关注。在逆阻 IGCT 器件的设计中, 器件的开断电流上限受通态压降、额定电压的影响, 因此需结合 SCC 的运行应力、器件设计的约束条件研发出大电流关断能力、低通态压降、高浪涌能力的逆阻 IGCT 器件。

### 3) 新型均压电路的研究。

亟待研发可长期运行、高可靠性的器件均压电路。全控器件间的均压一致性是高压工程应用中的难题之一, 目前针对流控型可关断器件的均压研究主要采用大电容均压与避雷器均压两种方式。大电容能够实现器件间较好的均压, 且能够长期运行, 但随着开断电流的增大, 缓冲电容容值急速增大, 不利于长期运行的可靠性。而避雷器在残压特性下相当于接近无限大的电容, 器件间的均压一致性极好, 但受限于避雷器荷电率和吸能的约束导致该拓扑故障期间长期运行能力和单次严苛关断的可靠性缺乏进一步的实践。

## 7 总结与展望

本文总结归纳了自换相电流源型换流器在面向工程应用过程中研究者所做的工作, 主要从换流器拓扑结构可行性的选择、换流器调制方法、系统控制策略、功率器件的选型以及器件均压一致性的实现五个方面展开, 相关的结论如下:

1) 拓扑结构的选择决定了换流器运行的功能, 同时也是换流器可实现性的基础。三电平拓扑以结构简单、控制易于实现以及具备较高的功率密度等优点是 SCC 拓扑的不二选择, 此外具备功率解耦运行的换流器拓扑将为直流系统柔性接入电网奠定基础。

2) 调制方法的不同直接决定了换流器耐受的电压峰值及  $du/dt$ 。其中, 不含零电平的调制方法能

够有效减小电压峰值及  $du/dt$ , 将平波电抗器参数从“H”级降低为“mH”级, 具备较高的工程应用价值。

3) 系统的控制策略以期望达到结果的不同分为以系统运行特性以目标和以阀运行应力为基础两大方面, 两者之间相互矛盾。在面向工程应用时应以阀的可行性为基础, 采用两端协调控制策略的 SCFM-SCC 具备较低的阀应力、较宽的功率运行区间从而具备较高的工程应用价值。

4) 功率器件的契合是 SCC 运行的核心。逆阻 IGCT 的低通态压降、 $du/dt$ 、 $di/dt$  及大电流关断能力均满足系统的要求, 是 SCC 的较优选择。

5) 采用器件直串构成的电流源型换流器应重点关注换流器运行时器件的均压一致性。本文根据换流器拓扑结构差异总结归纳了不同换流器拓扑下的均压方案, 3 种方案均在考虑换流器运行特性的基础上实现了器件间均压一致性的要求, 初步满足工程应用的要求。

自换相电流源型高压直流输电面向工程应用的关键技术已取得了较大的进展, 能够为后续的工程应用奠定基础。此外, 面向新能源场站及多馈入地区场景的适用性及大功率器件的研发仍是迫切的。

## 参考文献

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
Zhao Wanjun . HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004(in Chinese).
- [2] BAHRMAN M P, JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.  
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10(in Chinese).
- [4] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [5] HUANG Daochun, SHU Yinbiao, RUAN J. Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555-583.
- [6] GUO Chunyi, YANG Zhizhong, JIANG Bisong, et al.

- An evolved capacitor-commutated converter embedded with antiparallel thyristors based dual-directional full-bridge module[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(2): 928-937.
- [7] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(7): 1760-1771.  
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(7): 1760-1771(in Chinese).
- [8] JOVICIC D. Offshore wind farm with a series multiterminal CSI HVDC[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(4): 747-755.
- [9] LI Pei, MA Jing, ZHOU Xiaodong, et al. A protection scheme for DC-side fault based on a new MMC sub-module topology[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 114: 105406.
- [10] RAO Hong. Architecture of Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC system and its multi-functional control[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, 1(1): 9-18.
- [11] 董芷函, 王国腾, 徐政, 等. 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统运行特性分析方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(6): 118-125.  
DONG Zhihan, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Operation characteristic analysis method of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(6): 118-125(in Chinese).
- [12] 薛英林, 徐政, 潘武略, 等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(9): 98-103.  
XUE Yinglin, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(9): 98-103(in Chinese).
- [13] 李子欣, 徐飞, 赵成勇, 等. 面向高压直流输电的电流源型主动换相换流器研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(3): 1053-1068.  
LI Zixin, XU Fei, ZHAO Chengyong, et al. Research review of current-source type actively commutated converter for high voltage direct current transmission systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(3): 1053-1068(in Chinese).
- [14] 陈龙龙, 徐飞, 魏晓光, 等. 大容量可控关断的直流输电用电流源型换流器研究综述[J]. *中国电力*, 2021, 54(1): 25-36.  
CHEN Longlong, XU Fei, WEI Xiaoguang, et al. A review on large capacity controllable switching current source converter research[J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 25-36(in Chinese).
- [15] XIAO Yuan, WU Bin, RIZZO S C, et al. A novel power factor control scheme for high-power GTO current-source converter[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(6): 1278-1283.
- [16] WANG Xiaoming, OOI B T. Unity PF current-source rectifier based on dynamic trilogic PWM[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1993, 8(3): 288-294.
- [17] POPAT M, WU Bin, ZARGARI N R. A novel decoupled interconnecting method for current-source converter-based offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(10): 4224-4233.
- [18] DAI Jingya, XU Dewei, WU Bin. A novel control scheme for current-source-converter-based PMSG wind energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(4): 963-972.
- [19] LANG Yongqiang, WU Bin, ZARGARI N. A novel reactive power control scheme for CSC based PMSG wind energy system[C]//*Proceedings of 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Edmonton: IEEE, 2008.
- [20] TORRES-OLGUIN R E, GARCES A, MOLINAS M. Integration of offshore wind farm using a hybrid HVDC transmission composed by PWM current-source converter and line-commutated converter[C]//*Proceedings of 2012 Asia-pacific Power and Energy Engineering Conference*. Shanghai: IEEE, 2012.
- [21] GIRALDO E, GARCES A. An adaptive control strategy for a wind energy conversion system based on PWM-CSC and PMSG[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1446-1453.
- [22] 夏嘉航, 王晨欣, 展瑞琦, 等. 基于电流源换流器的混合型海上风电直流输电系统[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 129-138.  
XIA Jiahang, WANG Chenxin, ZHAN Ruiqi, et al. Hybrid DC transmission system for offshore wind power based on current source converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 129-138(in Chinese).
- [23] 夏嘉航, 王晨欣, 展瑞琦, 等. 基于主动换相型电流源换流器的远海风电并网系统[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4811-4822.  
XIA Jiahang, WANG Chenxin, ZHAN Ruiqi, et al. Wind power transmission system based on actively commutated current source converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4811-4822(in Chinese).

- [24] XIA Yuanye, AHMED K H, WILLIAMS B W. A PWM current source-based DC transmission system for multiple wind turbine interfacing[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, 2(4): 784-796.
- [25] NAGUIB M F, LOPES L A C. Harmonics reduction in low switching frequency space vector modulated current source converters[C]//*Proceedings of 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Rhodes: IEEE, 2008: 1434-1440.
- [26] 郭小强. 三相 H7 电流源光伏逆变器共模电流抑制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4665-4672.  
GUO Xiaoqiang. Common mode current suppression for transformerless three-phase H7 current source photovoltaic inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4665-4672(in Chinese).
- [27] 井洋. 基于 PWM 电流源型换流器的柔性直流电网控制和保护方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
JING Yang. Study on control and protection of flexible DC grid based on PWM current source converter[D]. Jinan: Shandong University, 2020(in Chinese).
- [28] XU Chaoqun, YU Zhanqing, ZHAO Biao, et al. A novel hybrid line commutated converter based on IGCT to mitigate commutation failure for high-power HVdc application[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5): 4931-4936.
- [29] XU Chaoqun, YU Zhanqing, CHEN Zhengyu, et al. Comprehensive analysis and experiments of RB-IGCT, IGCT with fast recovery diode and standard recovery diode in hybrid line-commutated converter for commutation failure mitigation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(2): 1126-1139.
- [30] LIANG Jiaqi, NAMI A, DIJKHUIZEN F, et al. Current source modular multilevel converter for HVDC and FACTS[C]//*Proceedings of 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications*. Lille: IEEE, 2013: 1-10.
- [31] BHESANIYA M M, SHUKLA A. Current source modular multilevel converter: Detailed analysis and STATCOM application[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1): 323-333.
- [32] 张闻闻, 陈龙龙, 魏晓光, 等. 基于可控关断的电流源型直流输电系统设计与运行方式[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(7): 2532-2541.  
ZHANG Wenwen, CHEN Longlong, WEI Xiaoguang, et al. Design and operation mode of based on controllable current source converter HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(7): 2532-2541(in Chinese).
- [33] 陈龙龙, 汤广福, 张闻闻, 等. 可控电流源型换流器换流应力分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5094-5104.  
CHEN Longlong, TANG Guangfu, ZHANG Wenwen, et al. Commutation stress analysis of controllable current-source converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 5094-5104 (in Chinese).
- [34] 李玉玲. 电流型 PWM 整流器及其控制策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
LI Yuling. Study on three-phase current-source PWM rectifiers and their control strategies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006(in Chinese).
- [35] 何美玲. 三相电流源变换器载波调制与阻尼控制技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.  
HE Meiling. Research on carrier modulation and damping control technology of three-phase current source converter[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019(in Chinese).
- [36] 肖淼. 基于改进空间矢量的电流型 PWM 整流器的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.  
XIAO Miao. Research on current-source type PWM rectifier base on improved SVPWM[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006(in Chinese).
- [37] WU Bin. High-power converters and AC drives[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [38] ZHANG W, CHEN L, ZHANG B, et al. Dc voltage characteristics of controllable current source converter based on TPWM[C]//*Proceedings of 2021 Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics (HVDC 2021)*. Hybrid Conference, China: IET, 2021.
- [39] KARSHENAS H R, KOJORI H A, DEWAN S B, et al. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters [C]//*Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94*. Orlando: IEEE, 1994.
- [40] 栾轲栋, 李耀华, 李子欣, 等. 适用于高压直流输电的主动换相换流器特定谐波消除脉宽调制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 3970-3980.  
LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on selective harmonic elimination pulse width modulation strategy of actively commutated converter for HVDC applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 3970-3980(in Chinese).
- [41] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(9): 11-15.

- FEI Wanmin, LV Zhengyu, YAO Wenxi. Research on selected harmonic elimination PWM technique applicable to three-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15(in Chinese).
- [42] 官二勇, 宋平岗, 叶满园, 等. 电流源型逆变器 SHE-PWM 开关角度的计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 62-65.  
GUAN Eryong, SONG Pinggang, YE Manyuan, et al. A method of solution to SHE-PWM switching angles for CSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 62-65(in Chinese).
- [43] ZHANG Wenwen, CHEN Longlong, WEI Xiaoguang, et al. Comparisons and improvements of key operating characteristics of current source converter applied in HVDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(5): 1601-1612.
- [44] ZHANG Wenwen, CHEN Longlong, WEI Xiaoguang, et al. Improved control strategy of current-source-converter for HVDC system application[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, DOI: 10.17775/CSEEJPES.2022.00190.
- [45] ZHAO Chengyong, XIA Jiahang, GUO Chunyi, et al. An improved control strategy for current source converter-based HVDC using fundamental frequency modulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107265.
- [46] LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on unit power factor operation control strategy of actively commutation converter with switching frequency of 50Hz[C]//Proceedings of 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). Xi'an: IEEE, 2020: 175-178.
- [47] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Dual phase shift PWM-CSCs based hybrid HVDC transmission system[C]//Proceedings of 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Cairns: IEEE, 2018.
- [48] LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Analysis and design of PWM-CSC for HVDC transmission systems[C]//Proceedings of IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon: IEEE, 2019.
- [49] 夏冰, 李耀华, 李子欣, 等. 基于 PWM-CSC 的混合直流输电系统功率控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(7): 17-24.  
XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on control method of PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(7): 17-24(in Chinese).
- [50] LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Study of black startup strategy of the turn-off device based current source HVDC converter[C]//Proceedings of 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference. Singapore: IEEE, 2019.
- [51] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Control strategy of dual current source inverters for high power application under unbalanced grid[C]//Proceedings of 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju: IEEE, 2018.
- [52] 夏冰, 李耀华, 李子欣, 等. 基于 PWM-CSC 的混合直流输电系统电网故障穿越策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 120-126.  
XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research of grid fault ride-through strategy for PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 120-126(in Chinese).
- [53] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC fault ride through strategy of a PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen: IEEE, 2018.
- [54] 夏嘉航, 赵成勇. 主动换相型电流源换流器直流故障特性及恢复策略[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2850-2859.  
XIA Jiahang, ZHAO Chengyong. DC fault characteristics and recovery strategy of actively commutated current source converter[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2850-2859(in Chinese).
- [55] 袁帅, 付丰豪, 陈力绪, 等. 基于基频调制电流源换流器的直流线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5596-5606.  
YUAN Shuai, FU Fenghao, CHEN Lixu, et al. DC transmission line whole-line quick protection of fundamental frequency modulation-based current sourced converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5596-5606(in Chinese).
- [56] BALIGA B J. Enhancement- and depletion-mode vertical-channel m. o. s. gated thyristors[J]. Electronics Letters, 1979, 15(20): 645-647.
- [57] VEMULAPATI U, RAHIMO M, ARNOLD M, et al. Recent advancements in IGCT technologies for high power electronics applications[C]//Proceedings of 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications. Geneva: IEEE, 2015: 1-10.
- [58] PENDHARKAR S, SHENAI K. Evaluation of turn-on

performance of P-i-N rectifiers and IGBT's under zero voltage switching[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(4): 647-654.

- [59] 陈龙龙, 王峰瀛, 张闻闻. 直流输电大功率逆阻型IGCT器件关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4708-4716.

CHEN Longlong, WANG Fengying, ZHANG Wenwen. Research on key technology of high power reverse-blocking IGCT device for HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4708-4716(in Chinese).

- [60] 刘庆. 逆阻型IGBT机理与新结构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

LIU qing. Study on mechanism and new structures of reverse blocking IGBT[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019(in Chinese).

- [61] 周文鹏, 曾嵘, 赵彪, 等. 大容量全控型压接式IGBT和IGCT器件对比分析: 原理、结构、特性和应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2940-2956.

ZHOU Wenpeng, ZENG Rong, ZHAO Biao, et al. Comparative analysis of large-capacity fully-controlled press-pack IGBT and IGCT: principle, structure, characteristics and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2940-2956(in Chinese).

- [62] 宋阳. IGCT电路模型与驱动电路关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

SONG yang. Research on IGCT circuit model and key techniques of driver circuit[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

- [63] 陈龙龙, 魏晓光, 张闻闻, 等. 基于逆阻IGCT的可控关断电流源型高压直流换流器电气应力和损耗特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1537-1546.

CHEN Longlong, WEI Xiaoguang, ZHANG Wenwen, et al. Analysis of electrical stress and loss characteristics of turning-off current source HVDC converter based on reverse blocking IGCT[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1537-1546(in Chinese).

- [64] XU Chaoqun, ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, et al. A novel DC chopper with MOV-based modular solid-state switch and concentrated dissipation resistor for  $\pm 400$  kV/1100 MW offshore wind VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4483-4488.

- [65] 高冲, 贺之渊, 杨俊, 等. 新型可控电网换相换流器拓扑及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1940-1949.

GAO Chong, HE Zhiyuan, YANG Jun, et al. A novel

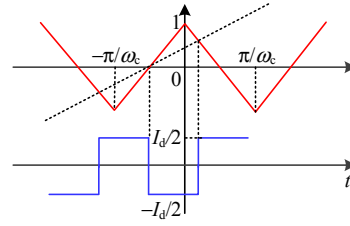
controllable line commutated converter topology and control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1940-1949(in Chinese).

#### 附录A 特定载波SPWM调制技术

以单相电流为例进行分析, 根据电流源换流器运行原理, 对于A相桥臂电流 $i_{pa}$ , 有:

$$i_{pa} = S_a I_{dc} = \frac{1}{2}(p_a - p_b) I_{dc} \quad (A1)$$

式中:  $p_a$ 为A相二值开关逻辑函数;  $p_b$ 为B相二值逻辑的开关函数, 二者作差后 $i_{pa}$ 相位差为 $-2\pi/3$ 。



图A1 载波、调制波和二值开关函数的信号关系

Fig. A1 Relationship between carrier wave, modulated wave and boolean function

基于双重傅里叶分析方法, 可以获得三相电流表达式, 进一步的根据式(A1)获得AB相三值信号的差值表达式, 如式(A2)所示。

$$i_{ab} = \frac{3m_i I_d}{2} \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}) + \frac{8m_i I_d}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty, n \neq 0}^{\infty} \frac{1}{m} J_n(m \frac{\pi}{2} m_i) \sin(m+n) \frac{\pi}{2} \cdot \sin \frac{n\pi}{3} \cdot \cos[m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) + \pi] \quad (A2)$$

由于零开关组合状态, 导致换流阀出口电压直接掉零, 为了消除该问题, 三值开关信号 $i_{pa}$ 和 $i_{pb}$ 只在换相时刻出现交点, 据此, 令:  $i_{ab}=0$ , 观察式(A2)各变量, 有:

$$\begin{cases} \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}) = 0 \\ \cos[m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) + \pi] = 0 \end{cases} \quad (A3)$$

求解式(A3), 有:

$$\begin{cases} \omega t + \alpha = k\pi + \frac{\pi}{6}, & k = 1, 2, 3, \dots \\ \omega_c t + \theta_c = \frac{2h-1-(2k-1)n}{2m} \pi, & h = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (A4)$$

对式(A4), 不妨选取一个周期进行分析, 令 $k=0$ , 代入式(A4), 并将两式中的载波和调制频率进行比较, 则频率倍数比 $N$ 有:

$$N = \frac{\omega_c t + \theta_c}{\omega t + \alpha} = \frac{3(2h-1+n)}{m} \quad (A5)$$

观察式(A2)的谐波系数, 令:  $\sin[(m+n)\pi/2] \neq 0$  和  $\sin(n\pi/3) \neq 0$ , 计算可得到 $m+n \neq 2l$ 、 $n \neq 3l$  ( $l=1, 2, 3, \dots$ )。

据此, 选取 $m$ 、 $n$ 、 $h$ 的取值, 有:

$$N = \begin{cases} \begin{cases} 3(2h-1) = 3, & h=1 \\ 3(2h-1) = 9, & h=2' \end{cases} & n=0 \\ \begin{cases} 3(2h+1) = 9, & h=1 \\ 3(2h+1) = 15, & h=2' \end{cases} & n=2 \\ \begin{cases} 3(2h+3) = 15, & h=1 \\ 3(2h+1) = 21, & h=2' \end{cases} & n=4 \\ \begin{cases} 3(2h+7) = 27, & h=1 \\ 3(2h+7) = 33, & h=2' \end{cases} & n=8 \\ \begin{cases} 3(2h+9) = 33, & h=1 \\ 3(2h+9) = 39, & h=2' \end{cases} & n=10 \\ \vdots & \\ \frac{3(2h)}{2} = \begin{cases} 3, & h=1 \\ 6, & h=2' \end{cases} & n=1 \\ \frac{3(2h+4)}{2} = \begin{cases} 9, & h=1 \\ 12, & h=2' \end{cases} & n=5 \\ \frac{3(2h+6)}{2} = \begin{cases} 12, & h=1 \\ 15, & h=2' \end{cases} & n=7 \\ \frac{3(2h+10)}{2} = \begin{cases} 18, & h=1 \\ 21, & h=2' \end{cases} & n=11 \\ \frac{3(2h+12)}{2} = \begin{cases} 21, & h=1 \\ 24, & h=2' \end{cases} & n=13 \\ \vdots & \end{cases}, m=1, m=2$$

由此，可得到载波频率取值范围为

$$N = [3, 6, 9, 12, 15, 21, 24, 27, 33, 39, \dots] \quad (A6)$$

附录 B SCC 功率运行区间推导

SCC 网侧电流  $i_{pj}$  与直流电流  $i_{dc}$  之间的关系可用调制函数  $\sigma_j$  表示：

$$i_{pj} = \sigma_j i_{dc}, \quad j = a, b, c \quad (B1)$$

换流阀的网侧电流由调制函数  $\sigma_j$  所决定，列些 SCC 交流侧 KCL 与 KVL：

$$\begin{cases} u_{ca1} = L \frac{di_{ga1}}{dt} + Ri_{ga1} + u_{ga1} \\ u_{cb1} = L \frac{di_{gb1}}{dt} + Ri_{gb1} + u_{gb1} \\ u_{cc1} = L \frac{di_{gc1}}{dt} + Ri_{gc1} + u_{gc1} \end{cases} \quad (B2)$$

$$\begin{cases} C \frac{du_{ca1}}{dt} = i_{pa1} - i_{ga1} \\ C \frac{du_{cb1}}{dt} = i_{pb1} - i_{gb1} \\ C \frac{du_{cc1}}{dt} = i_{pc1} - i_{gc1} \end{cases} \quad (B3)$$

采用电网电压锁相，将三相旋转坐标系经 Park 变换为  $d-q$  静止坐标系。

$$\begin{cases} L \frac{di_{gd1}}{dt} = \omega Li_{gq1} + u_{cd1} - Ri_{gd1} - u_{gd1} \\ L \frac{di_{gq1}}{dt} = -\omega Li_{gd1} + u_{cq1} - Ri_{gq1} - u_{gq1} \end{cases} \quad (B4)$$

$$\begin{cases} C \frac{du_{cd1}}{dt} = -i_{gd1} + \omega Cu_{cq1} + i_{pd1} \\ C \frac{du_{cq1}}{dt} = -i_{gq1} - \omega Cu_{cd1} + i_{pq1} \end{cases} \quad (B5)$$

此时，直流电流与直流电压的表达式为：

$$u_{dc} = \frac{3}{2}(m_d u_{cd} + m_q u_{cq}) = \frac{3}{2} \frac{U_m m_d}{1 - \omega^2 LC} \quad (B6)$$

$$Q_{ac} = \frac{3}{2} u_{gd} u_{gq} = \frac{3}{2} \frac{\omega C U_m^2 + i_{dc} U_m m_q}{1 - \omega^2 LC} \quad (B7)$$

式(B6)、(B7)中： $U_m$  为网侧电压的幅值； $m_d$ 、 $m_q$  为调制比  $m$  在  $d$ 、 $q$  轴上的投影。在不同调制度下， $m_d$ 、 $m_q$  可调节的范围可用图 B1 表示。

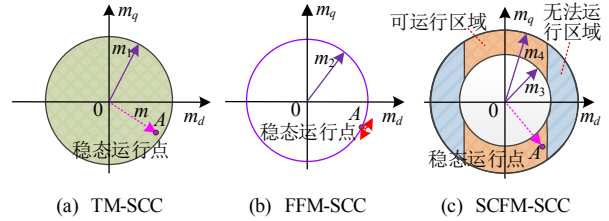


图 B1 不同调制方法下  $m_d$  与  $m_q$

Fig. B1 Operating range of  $m_d$  and  $m_q$  in different modulation methods under the independent control strategy

对于任一种调制方法中均可以写成式(B8)：

$$m_{min}^2 \leq m_d^2 + m_q^2 \leq m_{max}^2 \quad (B8)$$

结合式(B6)、式(B7)及式(B8)可以得到以下约束。

约束 1：

$$\left[ \frac{3U_m}{2(1 - \omega^2 LC)} i_{dc} m_{min} \right]^2 \leq P_{ac}^2 + \left[ Q_{ac} - \frac{3\omega C U_m}{2(1 - \omega^2 LC)} \right]^2 \leq \left[ \frac{3U_m}{2(1 - \omega^2 LC)} i_{dc} m_{max} \right]^2 \quad (B9)$$

约束 2：

$$\left\{ \frac{m_{min}^2}{U_{dc}^2} - \left[ \frac{2(1 - \omega^2 LC)}{3U_m} \right]^2 \right\} P_{ac}^2 \leq \left[ \omega C U_m - \frac{2(1 - \omega^2 LC)}{3U_m} Q_{ac} \right]^2 \leq \left\{ \frac{m_{max}^2}{U_{dc}^2} - \left[ \frac{2(1 - \omega^2 LC)}{3U_m} \right]^2 \right\} P_{ac}^2 \quad (B10)$$

由式(B9)可知，换流阀运行时的约束 1 为圆心在无功率轴上的圆。约束 2 为过约束 1 圆心的直线。约束 2 直线的斜率为

$$k = \tan \varphi = \frac{Q_{ac}}{P_{ac}} = \pm \sqrt{\frac{m^2}{[2(1 - \omega^2 LC) / (3U_m)]^2 U_{dc}^2} - 1} \quad (B11)$$

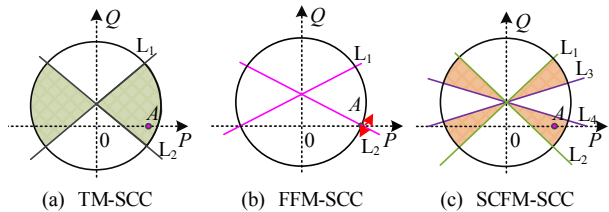


图 B2 不同调制方法下 SCC 功率运行区间

Fig. B2 Operating range of active power and reactive power in different modulation methods under the independent control strategy

根据式(B9)、(B10)、(B11)得到 3 种不同调制方法下的功率运行区间。

在协调控制策略下，将直流电压约束放宽至 0~1 pu，约束 1 与约束 2 范围增大，相应地，SCC 功率运行区间会发生改变，如图所示。

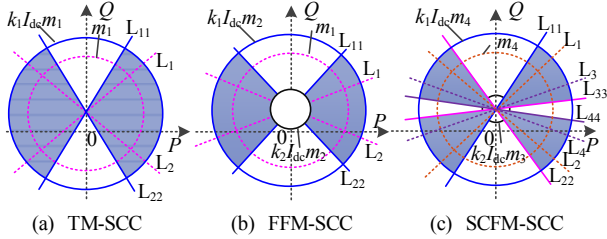


图 B3 控制策略、调制方法对功率运行区间的影响

Fig. B3 Operating range of active power and reactive power in different modulation methods under the coordinated control strategy

附录 C HCC、CLCC 拓扑结构

1) 可控换相换流器(CLCC)。

CLCC 由主支路和辅助支路并联构成，主支路由晶闸管阀串联低压大电流 IGBT 阀构成，辅助支路由高压 IGBT 阀和高压晶闸管阀串联构成，如图 C1 所示。

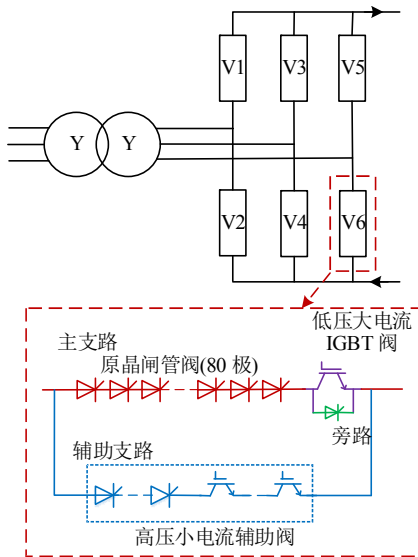


图 C1 CLCC 基本结构形式

Fig. C1 CLCC basic structure

2) 混合换相换流器(HCC)。

HCC 在常规晶闸管阀中加入全控型逆阻 IGCT 器件。IGCT 具有主动关断的能力，因而该技术可大幅提升抵御换相失败的能力。HCC 的拓扑如图 C2 所示，由 6 个桥臂组成，桥臂由逆阻 IGCT 器件构成。

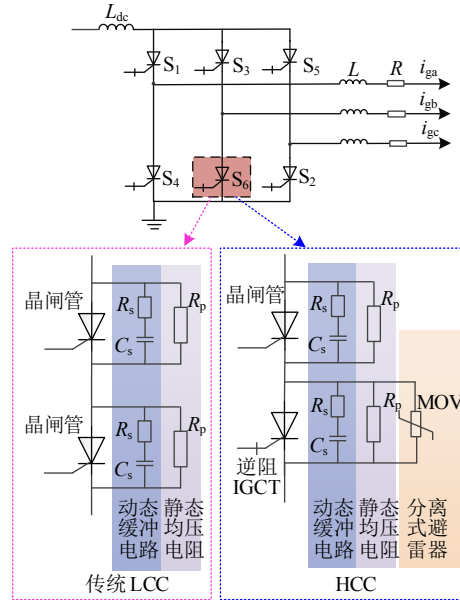


图 C2 LCC 与 HCC 拓扑

Fig. C2 Topology of LCC and HCC



张闻闻

收稿日期：2023-11-09。

作者简介：

张闻闻(1995)，男，博士研究生，研究方向为电流源型换流器高压直流输电系统控制策略与等效试验技术，zhangwenwen@163.com；

\*通信作者：魏晓光(1976)，男，博士，教授级高级工程师，研究方向为直流输电技术与直流电网设备等，weixg366@163.com。

(编辑 刘雪莹)