第48卷 第19期 2024年10月10日
DOI：10.7500/AEPS20240506007
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 48 No. 19 Oct. 10, 2024

可控换相换流器研制及其工程应用

贺之渊[1]，高 冲[1,2]，叶洪波[3]，杨 俊[1]，王成昊[1]，盛财旺[1]
（1. 先进输电技术全国重点实验室（国网智能电网研究院有限公司），北京市 102209；
2. 大功率电力电子北京市重点实验室（国网智能电网研究院有限公司），北京市 102209；
3. 国网上海市电力公司，上海市 200122）

摘要： 可控换相换流器是针对常规直流输电换流阀换相失败问题而提出的一种新型直流换流装备，并于2023年6月在±500 kV/1 200 MW葛洲坝—上海南桥高压直流输电系统改造工程（简称“葛南直流改造工程”）中投入使用。文中首先阐述了可控换相换流器的技术需求与技术原理，对其技术经济性进行了分析。然后，结合葛南直流改造工程的实施，介绍了可控换相换流器研制、试验及应用情况，提出了可控换相换流器电气参数、结构设计方案、型式试验方案，并结合现场录波介绍了工程调试过程中的低压加压、空载加压、人工短路等关键试验项目和试验结果，以及换流器投运后的运行情况，根据历次交流故障事件现场录波具体分析了换流器动作时序的正确性。最后，对可控换相换流器在特高压直流输电工程、省域交流联络线改造等场景下的应用前景进行了分析，为后续可控换相换流器的进一步推广应用提供参考。

关键词： 高压直流输电；换相；换流器；换相失败

0 引言

高压直流输电是中国实施“西电东送”战略的关键技术，目前存在基于电网换相换流器（line commutated converter，LCC）的常规直流输电和基于电压源换流器（voltage source converter ，VSC）的柔性直流输电2条技术路线[1-3]。基于LCC的常规直流输电技术具备容量大、损耗低等经济性优势，在跨区电力输送场景下得到了更广泛应用。中国已建成的30余条跨区直流输送通道中，除昆柳龙特高压直流工程受端换流站采用了VSC以外，其余所有工程均采用LCC技术[4-6]。尽管如此，受限于基本换流原理，LCC存在长期难以克服的换相失败“顽疾”，对送受端电网安全稳定运行形成持久威胁，难以根治[7-11]。

针对换相失败难题，国网智能电网研究院研发团队于2020年基于晶闸管和绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor，IGBT）2种器件在换流器内部混联的思路，提出了可控换相换流器（controllable line commutated converter，CLCC）拓扑结构，对该换流器的拓扑原理、技术经济性及应用可行性进行了讨论[12]，并对比分析了CLCC在受端系统交流故障暂态过程中的功率特性，论证了CLCC的暂态功率支撑能力优于LCC，并提出低压限流环节（voltage dependant current order limiter，VDCOL）优化策略，增强了CLCC暂态功率支撑能力[13]。同时，提出了CLCC耗能控制模式，进一步提升了CLCC在受端交流故障下的功率支撑能力，降低受端故障对送端电网的功率冲击[14]。2021年，完成CLCC原理样机开发，通过功能试验验证。2023年，葛洲坝—上海南桥高压直流输电系统改造工程（简称“葛南直流改造工程”）采用CLCC对原有LCC进行整体替换改造并顺利投运[15]。目前，尚没有文献对CLCC产品研制、试验验证、工程现场调试及投运后运行情况等方面进行相关报道。

本文结合±500 kV/1 200 MW葛南直流改造工程，对CLCC技术研发及工程应用情况进行全面介绍和分析。首先，对CLCC研制进行分析和阐述，包括CLCC电气设计、损耗分析、结构设计，以及型式试验验证。然后，对葛南直流改造工程CLCC现场试验及运行进行说明。最后，对CLCC未来应用场景进行了讨论，并对CLCC在多馈入直流系统中的应用效果进行了分析和评价。

收稿日期：2024-05-06；修回日期：2024-07-22。
上网日期：2024-07-31。
国家电网有限公司科技项目（5108-202218280A-2-220-XG）。

1　可控换相换流技术总体方案

1.1　技术需求

未来中国电力消费增长主要集中在中东部负荷中心，而电力供给增长主要依赖西北大型新能源基地建设，源荷距离普遍超过1 000 km，仍然需要借助特高压直流输电技术实现规模化电力高效传输，而且为达到经济性要求，大部分直流输送通道额定输送容量需达到8 000 MW及以上水平。

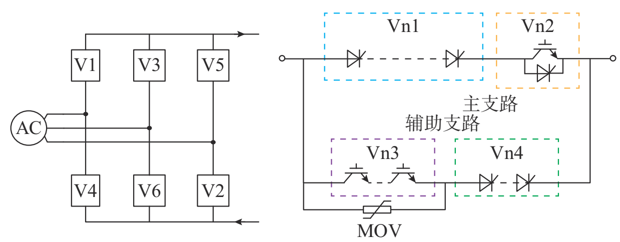
目前，基于LCC的常规直流输电系统最高电压与容量水平已达±1 100 kV/12 000 MW水平，其中，±800 kV/8 000 MW等级已基本成为中国特高压直流输电工程标准化配置，技术路线成熟，核心部件国产化率高，单站满负荷运行损耗不超过0.7%，应是远距离输电的首选技术方案。但由于其换流设备采用的晶闸管元件属于半控型器件，只能控制开通，需要依赖交流电网提供稳定的电压完成电流在桥臂间换相和可靠关断，交流侧发生故障时容易发生换相失败，造成有功功率的大幅跌落和无功功率的剧烈波动，对多馈入直流受端电网和含高比例新能源送端电网的安全稳定运行十分不利。2020年，中国某区域受端电网因交流故障发生多站连锁换相失败，造成电网频率快速下降。因此，在未来中国“西电东送”主要场景中，将难以继续大量沿用该技术路线。

基于VSC的柔性直流输电技术采用全控型IGBT器件，可主动输出交流电压，不依赖交流电网，同时有功功率、无功功率可独立控制，对弱电网暂态电压和功率的支撑能力强，涉网特性契合未来中国新能源基地外送需求。但是，现阶段IGBT器件耐压通流水平最高为4.5 kV/3 000 A，单站最高传输容量仅能达到5 000 MW，若要满足8 000 MW容量，需开发全新5 000 A规格IGBT器件，以及旁路开关等辅助零部件，设备可靠性有待实际验证。同时，在远距离架空线应用场景下，需具备直流线路故障自清除能力，典型的半桥模块构成的柔性直流换流器不具备该能力，需要采用50%以上全桥模块并利用其反向电压输出能力实现故障电流的清除，这样进一步大幅增加了IGBT器件的数量，也显著增加了换流器的造价和运行损耗[16]。为适应特高压直流工程大规模建设需求，中国正在大力推进柔性直流输电技术快速发展迭代，不断提升技术经济性水平。

在现有器件工艺水平下，将晶闸管和IGBT这2种器件有机结合，在换流器内部进行器件或组件混联，形成混合式换流器，使其既具备晶闸管大通流、低损耗的优势，又具备电流主动关断和可控换相的能力，则有望弥补LCC换相失败的缺陷，避免VSC经济性和可靠性不足的问题，为特高压直流输电工程提供一种新的可选方案。正是基于这种考虑，CLCC技术应运而生。

1.2　技术原理

CLCC拓扑如图1所示，基本换流单元仍然采用LCC的6脉动桥结构(其中，V1～V6代表6个换流阀)，但每个桥臂由串联晶闸管构成的单支路改造为双支路并联结构，包括主支路和辅助支路。主支路保留晶闸管作为主通流元件，发挥其低损耗的优势，同时串入少量全控器件IGBT，可实现电流转移并为晶闸管提供负向关断电压。辅助支路由晶闸管子阀和IGBT子阀串联构成，可暂时承接主回路电流，为晶闸管提供足够的关断时间，待主支路晶闸管阀恢复阻断能力后主动关断电流，完成主动换相。



(a) 6脉动桥结构　　(b) 桥臂拓扑结构

图1　CLCC拓扑
Fig. 1　Topology of CLCC

为方便起见，主支路晶闸管子阀和IGBT子阀分别命名为Vn1和Vn2，辅助支路IGBT子阀和晶闸管子阀分别命名为Vn3和Vn4。具体工作过程如下：

1)正常运行时，CLCC运行控制过程如图2(a)所示。t_0时刻桥臂接收到阀控触发信号，主支路中Vn1和Vn2开通，流过直流电流；当主支路导通120°电角度后，t_1时刻桥臂间换相开始；桥臂换相期间，t_2时刻主支路中Vn2关断，同时开通辅助支路中的Vn3和Vn4，电流迅速转移至辅助支路后，Vn1承受Vn2关断后提供的反向电压；t_3时刻辅助支路电流在外部交流电压作用下衰减至零，完成自然换相；t_4时刻辅助支路中Vn3零电流关断，整个桥臂完全关断；t_5时刻桥臂电压正向过零。

2)当受端电网发生交流故障、换流母线电压发生畸变时，CLCC各个子阀开通关断时序与正常运行保持一致，区别在于换相过程电气应力发生变化。如图2(b)所示，在t_2时刻主支路电流向辅助支路转移以后，由于交流侧电压跌落，本桥臂电流向下一个桥臂转移的速率变慢甚至倒流，导致无法完成

自然换相。因此，在t_4时刻辅助支路中Vn3关断时会切断电流，将电流转移至与之并联的金属氧化物避雷器（metal oxide varistor，MOV）上，形成较高的动作电压，动作电压与交流电压叠加增强了换相电压，对换相过程产生加速作用，t_5时刻电流被完全强制转移至下一个桥臂，完成强迫换相。

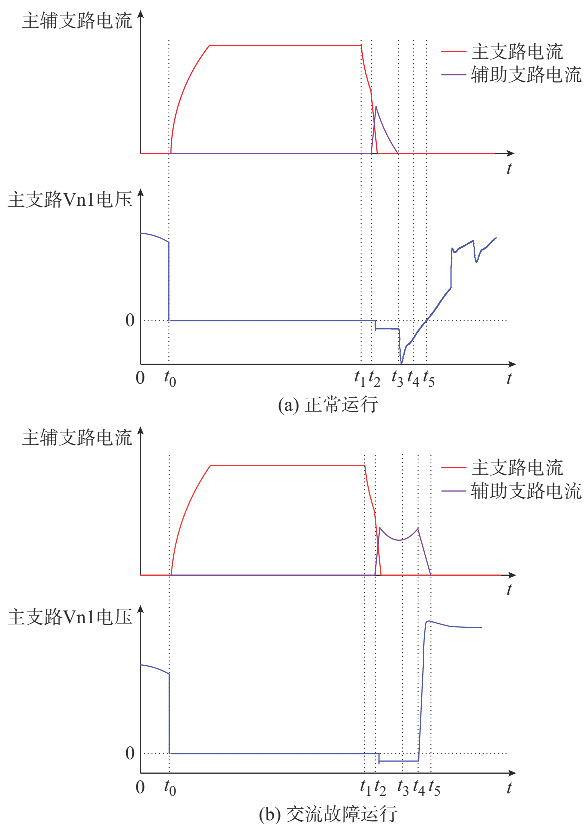


图2　CLCC运行原理

Fig. 2　Operation principle of CLCC

上述过程中，无论是正常运行情况，还是发生交流故障情形，主支路IGBT子阀Vn2关断时刻t_2与辅助支路IGBT子阀Vn3关断时刻t_4的时间间隔保持固定。由于主辅支路电流转移时间极短，约数十微秒，故障条件下该时间间隔几乎就是主支路晶闸管阀Vn2的反向电压持续时间。因此，只要Vn2与Vn3的关断时间间隔大于Vn1恢复阻断能力所需的关断时间t_q（工程中一般介于200～500 μs之间），则可以保障无论什么条件下Vn1恢复阻断过程完全可控，也就保障了CLCC具备完全的换相失败防御能力。

由于CLCC在LCC基础上增加了辅助支路及主支路IGBT阀，为最大程度保证装备可用率，拓扑设计时特意为Vn2并联了旁路晶闸管阀，如果Vn2、Vn3或Vn4任意一个子阀发生故障，则将Vn2、Vn3、Vn4全部闭锁，启用旁路晶闸管阀，与Vn1一同工作，换流器退回LCC运行模式继续输送功率，避免系统停运。

1.3　技术经济性

由1.2节CLCC运行原理可知，其主支路IGBT子阀Vn2的主要功能是将电流从主支路转移至辅助支路，只需较低的关断电压即可实现，故由几个IGBT串联即可，所增加成本和损耗较少。

辅助支路在正常运行时几乎不承担通态电流，只在交流系统故障期间承受短暂的系统电流。因此，其所用器件长期运行损耗很小，长期通流能力要求很低。但是在交流系统故障期间，直流系统电流会出现短时上升，峰值可到2倍额定直流电流，需要Vn3具备相应的关断能力。目前3 000 A以下成熟器件最大关断能力达到5倍额定通流水平，对于5 kA特高压直流工程来说，Vn3选用2 kA IGBT器件即可满足要求。

不同技术路线下±800 kV/8 000 MW特高压直流换流站所需器件规格及数量如表1所示。数据显示，CLCC方案所用器件总数为LCC方案的3.56倍，约为VSC方案器件总数的55%。与LCC方案相比，CLCC方案所增加器件主要为8.5 kV/1 000 A晶闸管和4.5 kV/2 000 A IGBT。与LCC方案采用的8.5 kV/5 000 A晶闸管和VSC方案采用的4.5 kV/5 000 A IGBT相比，CLCC方案的电流水平相对较小，价格相对较低，4.5 kV/2 000 A IGBT、8.5 kV/5 000 A晶闸管、4.5 kV/5 000 A IGBT器件单价分别为8.5 kV/1 000 A晶闸管的4.5倍、5.0倍和12.5倍（此价格参数仅反映笔者团队所掌握的信息）。因此，CLCC成本介于LCC与VSC之间。

表1　特高压直流输电系统LCC、VSC和CLCC单站器件数量对比

Table 1　Amount comparison of single-station devices of LCC, VSC and CLCC for ultra-high voltage DC transmission system

换流器	晶闸管个数		IGBT个数	
	8.5 kV/5 000 A规格	8.5 kV/1 000 A规格	4.5 kV/5 000 A规格	4.5 kV/2 000 A规格
LCC	2 880	—	—	—
VSC	—	—	18 816	—
CLCC	2 880	2 880	192	4 320

注：“—”表示该换流器没有（不使用）这一种器件。

2　±500 kV/1 200 MW的CLCC研制

为实际验证CLCC技术，国家电网有限公司于2021年对该技术方案工程可行性进行了论证，并决定在±500 kV葛洲坝—上海南桥高压直流输电工

程(简称“葛南直流工程”)受端换流站使用该技术。葛南直流工程是中国第1条超高压直流输电工程,始建于1989年,额定容量为1 200 MW,送端连接葛洲坝水电站,受端馈入上海220 kV电网,因运行超过30年,主设备老化严重,影响运行可靠性,需要进行大规模改造。同时,该工程受端换流站位于上海市,是华东多馈入直流输电系统的中心,换相失败防御需求迫切,采用CLCC对原LCC阀进行整体替换后,不仅可以解决本站换相失败问题,也可以缓解临近区域多直流连锁换相失败风险。

针对葛南直流工程改造需求,需在CLCC拓扑原理基础上,开展换流器工程化研制工作,主要包括电气设计、损耗计算、结构设计以及型式试验、现场调试几个关键步骤。主要面临混联组件电热应力综合调控与参数协同、兼容现有阀厅布局的紧凑化阀体设计、可控换相能力等效验证等新的挑战。重点考虑换流器各组部件在系统全部运行工况下的电气应力关系和应力分布、发热元件的损耗大小,并通过器件参数优化设计对电热应力进行综合优化。然后,通过紧凑化结构设计实现各组部件合理布局,既确保阀体电热应力分布均衡,绝缘距离充裕,又能使总体尺寸重量满足现场吊装环境要求。最终,通过设计一整套试验项目,以模拟实际运行中各种工况,对所研制换流器进行全方位考核。

2.1 电气设计

2.1.1 设计输入

CLCC设计从电气设计入手,主要设计依据为系统输入条件,如表2所示。

表2 ±500 kV/1 200 MW的CLCC设计输入
Table 2 Design input of ±500 kV/1 200 MW CLCC

系统技术参数	设计值	系统技术参数	设计值
直流电压	500 kV	整流运行阀短路电流峰值	16.3 kA
直流电流	1 200 A	逆变运行阀短路电流峰值	3.0 kA
额定功率	1 200 MW	跨阀操作冲击耐受水平	620 kV
额定空载直流电压	267 kV	阀端避雷器最大峰值持续运行电压	398 kV
电感压降百分比	7.5%	阀端避雷器峰值持续运行电压	312 kV
1.1倍额定功率2 h过负荷电流	1 327 A	额定关断角	17°
1.25倍额定功率10 s过负荷电流	1 520 A		

2.1.2 子阀参数设计与器件选型

CLCC 4个子阀在拓扑中的功能各不相同,所承受电压、电流应力也呈现较大差异,在同一个桥臂中,各个子阀参数不仅影响自身电气应力,对其他子阀的电气应力也产生相互影响,电气设计重点和难点是对各个子阀参数进行调和,使得各子阀在给定运行条件下应力分布合理,并根据运行应力选择适用器件。

CLCC正常运行时的桥臂电流主要由主支路承担,Vn1和Vn2子阀应具备相应的通流能力。其中,Vn1还应承担绝大部分桥臂电压,减少Vn2承压和器件串联数,避免通态损耗过高。

Vn1电流和电压应力与常规LCC晶闸管阀应力基本一致,电路设计和参数配置也相似,每级晶闸管并联RC阻尼回路实现动态均压,降低换相过冲电压,同时并联静态均压电阻R_{dc}实现直流均压。器件选型和串联数设计主要考虑操作冲击电压、长期通流和故障浪涌电流的承受能力。

Vn2除了通大电流以外,还应具备电流关断能力,能够周期性地将主支路电流转移至辅助支路,尤其是交流故障期间直流电流暂态上升过程中需要关断较大电流。由于需要限制晶闸管开通电流上升率$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$和断态电压上升率$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$,主辅支路均配有饱和电抗器,再加上主辅支路电流转移回路中的杂散电感,Vn2关断电流时会产生快速上升的管端电压。为避免串联IGBT器件关断延迟时间不一致导致先关断的IGBT过压击穿,每个IGBT配置电阻、电容和快恢复二极管构成的RCD阻尼回路,对关断电压进行缓冲,实现软关断,抑制大电流关断时的电压上升率$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$。同时,为避免IGBT关断大电流时电压过高,设有并联避雷器。

辅助支路长期通流小,每周期通流时间约为200 μs,峰值为200 A,故Vn3子阀可选用通流能力较小的IGBT串联,IGBT器件两端并联了RCD缓冲回路和避雷器。交流故障时,Vn3子阀IGBT通过主动关断最高3 kA的故障电流,可在避雷器上建立较高的换相电压,辅助完成桥臂间换相,避雷器同时还起到限制IGBT关断过冲应力的作用。此处RCD缓冲回路的作用与Vn2子阀相同。Vn4子阀选用通流能力较小的晶闸管串联,由于Vn3子阀不能承受反向电压,Vn4子阀承担桥臂全部反压。正常运行时,Vn3与Vn4之间的正向电压分配关系由其阻容参数决定,Vn4阻尼电容较小,桥臂正向电压也主要由Vn4承担。CLCC主辅支路各个子阀的详细电路拓扑结构如附录A图A1所示。

依据葛南直流改造工程系统设计输入以及各子阀暂稳态运行工况应力,确定了CLCC各子阀串联级数及关键元部件参数,如表3所示。

2.1.3 阀损耗分析

损耗是进行换流器优化设计需重点考虑的关键

表3　CLCC电气参数
Table 3　Electrical parameters of CLCC

子阀	串联级数/级	关键部件	技术参数
Vn1	80	晶闸管	8.5 kV/2 000 A
		阻尼电容	1.6 μF
		阻尼电阻	32 Ω
Vn2	11	IGBT	4.5 kV/2 000 A
		阻尼电容	15 μF
		阻尼电阻	3 Ω
		避雷器	27 kV/2.4 kA
Vn3	88	IGBT	4.5 kV/1 500 A
		阻尼电容	15 μF
		阻尼电阻	9 Ω
		避雷器	279 kV/2.4 kA
Vn4	84	晶闸管	8.5 kV/1 100 A
		阻尼电容	1 μF
		阻尼电阻	50 Ω

技术经济性指标,本文根据各子阀综合优化设计得出的换流器电气参数,通过仿真分析了CLCC额定运行和2 h的1.1 p.u.过负荷工况下各子阀损耗,为换流器冷却系统设计提供输入条件,仿真计算结果如表4所示。

表4　CLCC的损耗
Table 4　Losses of CLCC

负荷水平/p.u.	子阀损耗/kW				单阀总损耗/kW	单站阀损耗/kW
	Vn1	Vn2	Vn3	Vn4		
1.0	102.24	32.17	1.6	28.73	164.74	3 954
1.1	109.69	34.17	1.6	29.24	174.70	4 193

南桥换流站原有晶闸管阀单阀串联级数为120级,单级阻容参数为45 Ω、2.4 μF,额定运行工况下单阀总损耗为139 kW[17]。依据现有特高压换流器典型参数,晶闸管阀串联级数均为80级,阻容参数选取为30 Ω、2 μF,额定运行工况下单阀总损耗约为126 kW。

CLCC相较于原有LCC增加了3个子阀,损耗会相应增加,而Vn1子阀串联级数和阻容回路电容参数选取低于原有LCC阀参数,晶闸管和电阻损耗会相对减少。同时,采用大组件压装设计,饱和电抗器数量减少一半,相应损耗有所降低。根据CLCC运行特性增加的损耗主要包括Vn2子阀IGBT通态损耗和Vn4子阀电容跳变引起的阻尼电阻损耗。因此,对比该工程原有LCC阀损耗,可知CLCC阀损耗增加约18.5%,若按照最新LCC技术改造考虑,CLCC阀损耗增加约31.0%,单站换流器损耗约占输送功率的0.33%。

2.2　结构设计

在保证换流器电气特性、绝缘要求的前提下,CLCC整体结构设计主要基于以下原则考虑:机械结构强度可靠,满足换流器长期运行要求,同时保证南桥换流站对于抗震的要求;结构外形尺寸及接口尺寸满足工程需求;施工现场便于安装和维护,采用模块化设计思路,有利于换流器阀塔前期施工和后期运行维护。CLCC阀塔依照功能模块,分别包括了主支路半导体组件、辅助支路半导体组件、通流母排、冷却水管、均压屏蔽结构件、漏水检测装置光缆/光纤及附属支撑件等。采用模块化、分层、分功能区域设计思路实现悬吊式双列阀塔结构集成设计,四重阀塔实物如图3所示。

图3　CLCC阀塔
Fig. 3　Valve tower of CLCC

由于葛南直流工程LCC采用30年前的设计技术,阀塔总体尺寸重量较大,具有较大的改造空间,采用CLCC技术后,阀塔长、宽、高尺寸以及重量均不高于原换流器,所有安装接口均维持不变。按照最新设计技术,CLCC阀塔相较于LCC阀塔在宽度尺寸上较大,具体尺寸和重量如表5所示。

表5　阀塔尺寸和重量对比
Table 5　Comparison of valve tower size and weight

阀塔类型	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	重量/t
原阀塔	6 000	5 800	11 175	36.04
新LCC阀塔	6 000	4 100	11 175	30.00
CLCC阀塔	5 800	5 790	11 175	35.60

2.3　型式试验验证

±500 kV/1 200 MW CLCC型式试验分为绝缘试验和运行试验,其中,绝缘试验是在四重阀塔上进行,阀塔绝缘试验完成后需对阀塔中做完单阀绝缘试验的一个单阀的模块开展运行型式试验。根据合成回路试验平台试验能力和换流器组件结构,运行试验按照1/8单阀为对象开展。

根据CLCC阀运行特性及工作原理,其外特性

和LCC阀保持一致,长期运行时对外输出应力保持不变。因此,CLCC阀大部分型式试验项目还是参照常规阀型式试验标准GB/T 20990.1—2020[18]执行。重点针对IGBT子阀实际暂稳态运行应力,增加了多项专项试验考核,形成了完备的型式试验方案,具体试验项目及参数要求如表6所示。表中:I_d为直流电流;U_{fi}为触发电压;U_{rr}为恢复电压;$\sum\Delta U^2$为电压平方和;U_{fr}为整流触发电压;U_{ri}为逆变关断电压;I_{test}为半波电流;U_{tfvd}为施加的正向电压;U_{tfvr}为反向恢复电压;U_{test}为冲击电压;$U_{1\ min}$、$U_{3\ h}$、$U_{30\ min}$、$U_{15\ s}$分别为1 min、3 h、30 min、15 s试验电压。

表6 CLCC型式试验参数

Table 6 Type test parameters of CLCC

试验类型	试验项目	试验参数
运行试验	最大持续运行负载试验(LCC)	I_d=1 272 A,U_{fi}=25.66 kV(峰值),U_{rr}=25.66 kV(峰值),$\sum\Delta U^2$=1 488 kV^2
	最大持续运行负载试验(CLCC)	I_d=1 272 A,U_{fi}=25.66 kV(峰值),U_{rr}=25.66 kV (峰值),$\sum\Delta U^2$=1 488 kV^2
	最大暂态运行负载试验(2 s)	I_d=378 A,U_{fi}=U_{rr}=55.3 kV(峰值),$\sum\Delta U^2$=10 711 kV^2
	最大暂态运行负载试验(10 s)	I_d=378 A,U_{fi}=U_{rr}=42.6 kV(峰值),$\sum\Delta U^2$=6 338 kV^2
	直流电流断续试验	I_d≥100 A(峰值),U_{fi}=U_{rr}=42.5 kV(峰值)
	最小延迟角试验	I_d=1 272 A,U_{fr}≤2.63 kV(峰值)
	最小关断角试验	I_d=1 272 A,U_{ri}≤6.28 kV(峰值)
	暂态低电压试验	I_d=378 A,U_{fi}≤0.87 kV(峰值)
	单周波故障电流试验	I_{test}=15.7 kA(峰值),U_{tfvd}=43 kV(峰值)
	三周波故障电流试验	I_{test}=16.3 kA,U_{tfvr}=25.3 kV(峰值)
	恢复期正向冲击试验	I_d=1 272 A,U_{test}=70.1 kV(峰值)
绝缘试验	阀支架绝缘试验	直流:$U_{1\ min}$=184 kV,$U_{3\ h}$=150 kV 交流:$U_{1\ min}$=210 kV(有效值),$U_{30\ min}$=143 kV(有效值) 操作冲击:U_{test}=482 kV(峰值)
	多重阀绝缘试验	直流:$U_{1\ min}$=824 kV,$U_{3\ h}$=670 kV;操作冲击:U_{test}=1 300 kV(峰值)
	单阀绝缘试验	直流:$U_{1\ min}$=412 kV,$U_{3\ h}$=206 kV 交流:$U_{15\ s}$=338 kV(有效值),$U_{30\ min}$=276 kV(有效值) 操作冲击:U_{test}=620 kV(峰值)
	单阀非周期触发试验	U_{test}=540 kV(峰值),触发电流为2 500 A(峰值)
	单阀湿态操作冲击试验	U_{test}=620 kV(峰值)
附加试验	可控关断试验	I_d=1 272 A,关断电流为2.4 kA(峰值),U_{ri}≤6.28 kV(峰值)
	CLCC-LCC切换试验	I_d=1 272 A,U_{fi}=25.66 kV(峰值),U_{rr}=25.66 kV (峰值),$\sum\Delta U^2$=1 488 kV^2
	阀塔大电流分断试验	关断电流依次为3 kA(峰值)、2.4 kA(峰值)、1.2 kA(峰值)

依据上述型式要求,CLCC顺利通过了全套试验考核,稳态试验电流达到1 272 A,短路电流为15.7 kA,最大关断电流为3 kA,单阀操作冲击电压为620 kV,非周期触发电流为2 500 A。试验结果表明,CLCC满足葛南直流改造工程运行和绝缘要求,且具备连续关断大电流能力,能够完全避免交流故障引起的换相失败。

3 葛南直流改造工程应用

3.1 CLCC现场试验

葛南直流改造工程投运前依次开展了分系统试验[19]、站系统试验以及端对端系统试验等,以下对与CLCC密切相关的典型试验项目进行介绍。

3.1.1 低压加压试验

低压加压试验属于分系统试验项目,在完成换流变压器本体试验、换流器本体及阀控系统联调试验、换流站控制保护装置试验及极控与阀控联调试验后进行[20-21]。该试验的目的是检查换流变压器一次接线、相序,以及换流器触发同步、触发顺序和各子阀触发时序。

不同于传统特高压换流器,CLCC不仅包含晶闸管、IGBT以及二极管多种电力电子器件,而且存在LCC和CLCC这2种运行模式。参照传统特高压换流器低压加压试验方案,更新优化了CLCC的试验方案,充分考虑不同器件的运行条件对零部件数量进行取舍,并设置了不同的试验控制时序对2种运行模式进行考核。

南桥换流站在LCC和CLCC这2种运行模式下，均顺利通过触发角α分别为30°、60°和75°下的低压加压试验，附录A图A2(a)和(b)为$\alpha=60°$时换流器不同运行模式下各子阀单级电力电子器件的电压波形。试验波形显示，LCC模式下IGBT器件的电压中含有明显的直流偏置电压，CLCC模式下IGBT器件的电压存在明显的导通区间，电压符合预期。

3.1.2　空载加压试验

空载加压试验属于站系统试验，是直流输电系统在投运前检验换流器、换流变压器、平波电抗器等直流设备和直流线路的绝缘水平，以及控制系统是否正常的重要手段[22-23]。

空载加压试验分别在带线路和不带线路这2种条件下开展，同时考虑LCC和CLCC这2种运行模式以及它们之间的带电切换功能验证。附录A图A3为换流器空载加压试验带线路情况下的极控录波，当触发角处于36°左右时，换流器直流侧电压稳定在500 kV左右。图A4(a)和(b)为换流器带线路情况下不同运行模式的阀控录波，图A5(a)和(b)为换流器不带线路情况下不同运行模式的阀控录波。2种模式下各子阀触发脉冲均正确发送，Vn2和Vn3子阀在带线路和不带线路条件下电压波形相似，幅值有所不同，这是因为在换流器触发角相同条件下直流侧是否带线路会影响直流电压大小，从而影响换流器直流电压偏置量。

3.1.3　大功率运行试验

对于CLCC来说，大功率运行试验主要考核满功率条件下，换流器长期导通额定运行电流时能否长时间稳定运行。

南桥换流站CLCC顺利通过LCC及CLCC不同运行模式的大功率运行试验，附录A图A6(a)和(b)为换流器大功率运行工况下不同运行模式的录波。图中波形显示，LCC模式下，Vn2和Vn3保持关断状态，其电压波形为含有直流偏置分量的交流电压，交流部分随着桥臂电压波形变化。CLCC模式下，Vn2关断周期性电流，电压接近于方波；Vn3由于不关断电流，其电压在断态期间随桥臂电压波动。无论是电压幅值，还是波形形态变化，Vn2和Vn3实测电压均符合设计预期，也验证了CLCC参数设计的正确性。

3.1.4　人工短路试验

人工短路试验的主要目的是验证换流器是否具备换相失败防御能力。为了对比分析，本次试验针对LCC和CLCC这2种模式分别开展了人工短路试验，附录A图A7和图A8为2种模式下的试验录波。波形数据分析表明：

1)LCC模式下换流器发生换相失败，直流侧故障电流峰值为2.862 kA，保持输送平均功率19 MW，从故障清除到功率恢复10%用时114 ms，功率恢复70%用时140 ms；

2)CLCC模式下，故障及恢复期间换流器正常换相，直流侧故障电流峰值为1.24 kA，保持输送平均功率85 MW，从故障清除到功率恢复10%用时50 ms，功率恢复70%用时90 ms。

人工短路试验虽然在直流低功率下完成，但是在实际运行条件下直接证明了CLCC的可控换相能力，交流故障下功率维持能力也显著优于LCC。

3.2　运行情况

2023年6月18日，葛南直流工程完成改造后重新投运，标志着世界首个基于CLCC的直流输电系统进入商业运行。正式投运以来，CLCC经历了迎峰度夏期间长期处于满功率运行考验，设备整体运行稳定，至今已成功抵御多次交流故障，南桥换流站保持“零”换相失败，历次交流故障类型及南桥换流站附近换流站换相失败情况如表7所示。

表7　南桥换流站换相失败抵御情况
Table 7　Commutation failure defending cases for Nanqiao converter station of China

序号	交流故障	换相失败情况
1	南桥换流站近区交流扰动	南桥换流站无换相失败
2	上海220 kV相间短路	奉贤、枫泾两站换相失败，南桥换流站无换相失败
3	华东1 000 kV单相故障	奉贤、苏州等多站换相失败，南桥换流站无换相失败
4	南桥换流站近区220 kV故障	枫泾站换相失败，南桥换流站无换相失败

图4所示为表7中第3次系统故障过程南桥换流站的录波，此次故障造成南桥换流站周边多站换相失败，南桥换流站CLCC未发生换相失败。故障前，葛南直流工程运行功率为600 MW，相当于额定功率的1/2。录波波形显示，故障前CLCC各个子阀有序开通关断，IGBT子阀电压较低，维持较低运行损耗，故障期间CLCC各桥臂正常换相，Vn2和Vn3子阀在交流故障期间关断电压提高，分别达到各自避雷器动作电压，增强了主支路晶闸管阀Vn1恢复电压以及桥臂换相电压，运行逻辑和应力特征符合设计。直流电流故障前为600 A，故障期间最低为438 A，故障及恢复期间维持较高功率传输，CLCC大功率下换相失败防御效果也得到直接验证。

图5所示为表7中第4次系统故障过程南桥换流站的录波，此次故障造成临近枫泾站双极发生换相失败，南桥换流站CLCC未发生换相失败。故障

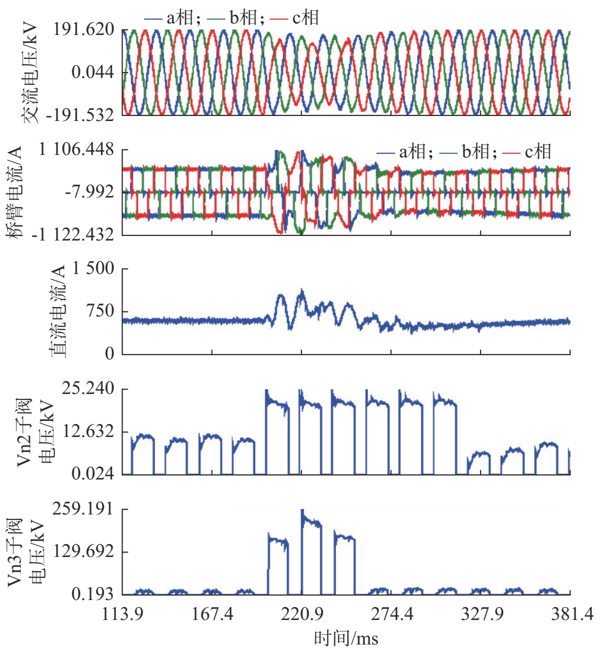


图4　南桥换流站第3次交流故障期间录波
Fig. 4　Recording waveforms of Nanqiao converter station of China during the third AC fault

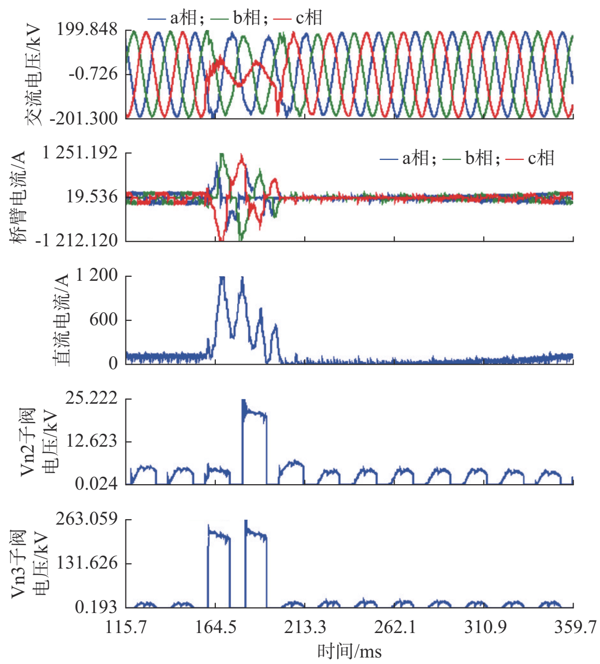


图5　南桥换流站第4次交流故障期间录波
Fig. 5　Recording waveforms of Nanqiao converter station of China during the fourth AC fault

前，葛南直流工程运行功率为120 MW，相当于0.1 p.u.额定功率运行。交流故障前直流稳态运行电流为120 A，故障期间c相电压跌至32%左右，由于故障前直流电流较低，且交流故障较为严重，故直流电流因波动发生短暂过零，但是依然未发生换相失败，故障清除后功率迅速恢复，CLCC在交流电压严重跌落情况下的换相失败防御效果也得到直接验证。

4　CLCC推广应用场景

在“双碳”战略驱动下，中国将加快西部大型新能源基地开发和东部分布式新能源建设[24]。现有输电通道难以满足区域间以及区域内电力输送要求，仍需建设一大批高压直流输电工程。CLCC由于具备容量大、损耗小、成本较低的经济性优势并具备换相失败防御能力的技术优势，将会发挥积极作用。

4.1　跨区域超/特高压直流输电工程

2022年，中国发布《以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地规划布局方案》，有计划、分步骤推动新型电力系统战略目标的实现。到2030年规划建设风光基地总装机容量约455 GW，包括库布齐、乌兰布和、腾格里、巴丹吉林沙漠基地规划装机容量284 GW。“十四五”期间，“沙戈荒”基地规划建设风光总装机容量约200 GW，计划外送占比75%；“十五五”期间，规划建设风光基地总装机容量约255 GW，计划外送占比65%。

上述大型“沙戈荒”新能源基地外送电力主要通过特高压直流工程实现，受端落点主要分布在华东、华中多馈入直流负荷中心。其中，华东、山东以及华中部分受端区域目前直流馈入较为密集，多直流连锁换相失败对电网安全稳定运行已经造成不同程度的威胁[25-26]。CLCC在上述规划工程受端换流站应用，将在有效避免自身发生换相失败的同时，降低对相邻换流站的耦合作用，增加直流对交流故障的抗扰动能力。此外，采用CLCC对该区域在运常规直流换流站进行改造，将进一步提升受端多馈入直流系统的安全稳定运行水平，提升新能源电力的接纳容量，助力新能源电力跨区输送与消纳。

4.2　省域交流联络线直流改造工程

中国新能源开发除西部“沙戈荒”地区大型新能源基地外，在中东部负荷中心部分省域也存在巨量的新能源电力资源，也是未来重点开发对象。以江苏省为例，截至2022年，新能源装机容量在本地装机容量中的占比达31.5%，其中，长江以北地区新能源装机容量占比为80.77%，长江以南地区新能源装机容量占比为19.23%。从电网潮流供需分布来看，江苏电网负荷和电源总体呈逆向分布，其用电需求长期以来集中于长江南岸。目前，苏北富集电力送至苏南消纳，主要依靠省内6条过江输电通道。预计“十四五”时期末，苏北地区新能源装机容量将超

过50 GW，北电南送过江电力输送规模将进一步提升。同时，受地理条件和生态环境制约，新增跨江输电通道数量受限，亟须提升过江通道输送能力。因此，江苏省计划利用现有跨江输电通道建设直流联络线，形成多回省内“嵌入式”直流工程，解决输电缺口问题[27-28]。一是将现有220 kV五峰山交流大跨越工程改造为三回直流工程，将输送能力提升到3倍以上。二是利用1 000 kV苏通气体绝缘金属封闭输电线路（gas-insulated metal-enclosed transmission line，GIL）综合管廊预留的空间建设多回直流工程，进一步增强过江输送能力，如图6所示。

图6　江苏省主要直流落点及过江通道
Fig. 6　DC terminals and river-crossing tunnels in Jiangsu Province of China

考虑到江苏电网已有三常、锦苏、锡泰等多条高压直流输电工程接入，加之今后新建的区外接入特高压直流工程，以及区内“嵌入式”直流工程，直流落点将更加密集，继续沿用常规直流输电技术将会使换相失败问题进一步恶化，系统安全稳定水平降低。在类似江苏电网省内直流建设或改造场景中，CLCC也是有效的技术方案。

5　结语

本文开展了±500 kV/1 200 MW CLCC样机研制及工程应用研究，主要结论如下：

1）换相失败是未来中国受端电网建设必须解决的技术难题，可采用相对成熟的可控换相换流技术，也可采用柔性直流技术，柔性直流无功功率和电压支撑能力更强，但需率先在器件和装备方面取得突破。

2）根据系统输入条件，提出了CLCC电气、结构设计方案，研制了±500 kV/1 200 MW CLCC工程化产品并通过了40余项型式试验考核，有效验证了各子阀暂稳态运行应力及交流故障换相失败抵御能力，证明了CLCC装备的可实现性。

3）葛南直流改造工程CLCC顺利通过各项系统试验，其中，交流侧人工短路试验验证了CLCC换相失败防御能力，正式投运后成功抵御了历次交流系统电压波动、相间短路及单相短路等各类故障，均未发生换相失败，经受了实际运行考验。

4）面向直流多馈入系统，采用CLCC不仅不会发生换相失败，而且故障期间还能够大面积提升各直流的功率维持水平，减小受端电网功率冲击，提升整体运行稳定水平。

后续将结合CLCC设计特点，开展系统控制策略改进与工程应用探索研究，增强CLCC故障期间的无功支撑能力，进一步提升CLCC工程应用价值。同时，面向弱送端和多馈入直流受端系统，VSC-CLCC混合直流系统运行控制技术尚属空白，需要深入开展研究，主要包括交直流故障暂态过程中直流对送端交流过电压抑制、受端无功支撑控制、满足换流器安全运行边界的暂态过压、过流限制等控制措施。通过上述控制措施的实现，使得VSC-CLCC混合直流系统对弱送端电网和多馈入受端电网同时具备强支撑能力，在中国大规模新能源基地直流外送场景中具备应用价值。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx），扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 浙江大学发电教研组直流输电科研组．直流输电[M]．北京：水力电力工业出版社，1985.
DC Transmission Research Group of Zhejiang University Power Generation Teaching and Research Group. High voltage direct current transmission [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1985.

[2] 赵畹君．高压直流输电工程技术[M]．北京：中国电力出版社，2004.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[3] 汤广福．基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]．北京：中国电力出版社，2010.
TANG Guangfu. Voltage source converter based high voltage direct current transmission technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[4] 刘振亚．特高压交直流电网[M]．北京：中国电力出版社，2013.

LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[5] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.

[6] 饶宏,冷祥彪,潘雅娴,等.全球直流输电发展分析及国际化拓展建议[J].南方电网技术,2019,13(10):1-7.
RAO Hong, LENG Xiangbiao, PAN Yaxian, et al. Analysis of the global HVDC power transmission development and the suggestion of the HVDC export[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 1-7.

[7] 薛峰,彭慧敏,王玉,等.多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理研究评述[J/OL].高电压技术[2024-02-27]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231254.
XUE Feng, PENG Huimin, WANG Yu, et al. Review on the mechanism of the interaction between multi-fed HVDC commutation failure and synchronous grid[J/OL]. High Voltage Engineering [2024-02-27]. https://doi. org/10.13336/j. 1003-6520.hve.20231254.

[8] 欧阳金鑫,叶俊君,张真,等.电网故障下多馈入直流输电系统相继换相失败机理与特性[J].电力系统自动化,2021,45(20):93-102.
OUYANG Jinxin, YE Junjun, ZHANG Zhen, et al. Mechanism and characteristics of successive commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system under power grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 93-102.

[9] 汪娟娟,郑睿娜,傅闯,等.基于逆变站动态无功控制的后续换相失败抑制方法[J].电工技术学报,2023,38(17):4672-4682.
WANG Juanjuan, ZHENG Ruina, FU Chuang, et al. A method based on constant reactive power control of inverter to suppress the subsequent commutation failure in HVDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4672-4682.

[10] 李宽,黄强,吕学宾,等.抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):109-119.
LI Kuan, HUANG Qiang, LÜ Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 109-119.

[11] 郑晨一,汤奕.考虑多直流无功交互影响的换相失败预防协调控制方法[J].电力系统自动化,2023,47(4):102-110.
ZHENG Chenyi, TANG Yi. Coordinated control method for commutation failure prevention considering reactive power interaction among multiple HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 102-110.

[12] 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):1940-1950.
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): 1940-1950.

[13] 连攀杰,庞博涵,刘文焯,等.新型可控电网换相换流器故障特性及控制优化研究[J/OL].中国电机工程学报[2024-02-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232010.
LIAN Panjie, PANG Bohan, LIU Wenzhuo, et al. Research on fault characteristics and control optimization of novel controllable line commutated converter[J/OL]. Proceedings of the CSEE [2024-02-27]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013.pcsee.232010.

[14] 张静,高冲,杨俊,等.可控换相换流器耗能模式工作原理及电气建模[J/OL].高电压技术[2024-02-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1239.tm.20240123.1619.008.html.
ZHANG Jing, Gao Chong, YANG Jun, et al. Study on working principle and electrical modeling of energy consumption mode of controllable line commutated converter[J/OL]. High Voltage Engineering[2024-02-27]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/42.1239.tm.20240123.1619.008.html.

[15] 冷超.新型可控换相换流阀安装要点分析[J].电力与能源,2023,44(5):514-518.
LENG Chao. Analysis of installation points of new controllable commutating converter[J]. Power & Energy, 2023, 44(5): 514-518.

[16] 熊岩,饶宏,许树楷,等.特高压多端混合直流输电系统启动与故障穿越研究[J].全球能源互联网,2018,1(4):478-486.
XIONG Yan, RAO Hong, XU Shukai, et al. Research on start and fault ride-through strategy for ultra-high voltage multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 478-486.

[17] 袁清云.HVDC换流阀及其触发与在线监测系统[M].北京:中国电力出版社,1999.
YUAN Qingyun. HVDC converter valve and its trigger and on-line monitoring system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[18] 高压直流输电晶闸管阀　第1部分:电气试验: GB/T 20990.1—2020[S].2020.
Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission—Part1: electrical testing: GB/T 20990.1—2020 [S]. 2020.

[19] 国家电网有限公司.特高压换流站分系统调试规范第2部分换流阀系统调试:Q/GDW 11750.2—2017[S].2018.
State Grid Corporation of China. Sub-system test standard in UHV converter station—Part 2: test for converter valve system: Q/GDW 11750.2—2017[S]. 2018.

[20] 丁一工,康健,金涛.高压直流换流阀的低压加压试验研究[J].湖北电力,2003,27(增刊1):20-22.
DING Yigong, KANG Jian, JIN Tao. Low voltage energization test of the HVDC converter valve [J]. Hubei Electric Power, 2003, 27(S1): 20-22.

[21] 马振祺,王定刚,薛国斌,等.换流阀低压加压试验方法与研究[J].电力学报,2018,33(3):213-220.
MA Zhenqi, WANG Dinggang, XUE Guobin, et al. The low pressure test method and research of converter valve[J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(3): 213-220.

[22] 刘宣宣.云广直流输电工程空载加压试验分析[J].电力建设,2011,32(8):45-48.
LIU Xuanxuan. Analysis of open line test in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 45-48.

[23] 张秋实，傅闯，戴栋，等．高压直流输电开路试验机理分析及解析计算[J].电力系统保护与控制，2019，47(5)：96-105.
ZHANG Qiushi, FU Chuang, DAI Dong, et al. Mechanism analysis and analytical calculation of open line test for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 96-105.
[24] 唐巍，张起铭，张璐，等．新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化，2023，47(6)：2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.
[25] 董新洲，汤涌，卜广全，等．大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报，2019，39(11)：3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
[26] 阮思烨，徐凯，刘丹，等．直流输电系统换相失败统计分析及抵御措施建议[J].电力系统自动化，2019，43(18)：13-17.
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestions on resistance measures for commutation failures of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 13-17.
[27] 王之伟，黄俊辉，程亮，等．"嵌入式"直流技术在省级输电网中的规划及应用[J].电力工程技术，2022，41(6)：65-74.
WANG Zhiwei, HUANG Junhui, CHENG Liang, et al. Planning and application of embedded DC transmission technology in the provincial transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 65-74.
[28] 周前，张潮，张宁宇，等.2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J].电力工程技术，2018，37(1)：51-57.
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ningyu, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC system in planning power grid of Jiangsu in 2018[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 51-57.

贺之渊(1977—)，男，博士，教授级高级工程师，博士生导师，主要研究方向：高压直流输电、柔性直流输电与直流电网。E-mail：13911556769@139.com

高　冲(1982—)，男，博士，教授级高级工程师，主要研究方向：高压直流输电、直流换流装备。E-mail：chong820515@163.com

叶洪波(1974—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向：大电网运行。E-mail：yehb@sh.sgcc.com.cn

杨　俊(1984—)，男，通信作者，博士，高级工程师，主要研究方向：高压直流输电、可控换相换流装备。E-mail：15810547012@163.com

（编辑　蔡静雯）

Development and Engineering Application of Controllable Line Commutated Converter

HE Zhiyuan[1], *GAO Chong*[1,2], *YE Hongbo*[3], *YANG Jun*[1], *WANG Chenghao*[1], *SHENG Caiwang*[1]

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Power Electronics (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The controllable line commutated converter (CLCC) is a new type of DC converter equipment to solve the commutation failure problem of conventional DC transmission converter valves. In June 2023, CLCC was put into operation in the ±500 kV/1 200 MW Gezhouba to Shanghai Nanqiao high voltage DC transmission system renovation project (referred to as "Gezhouba-Nanqiao renovation project") in China. This paper describes the technical requirements and principles of CLCC and analyzes its technical economy. Combined with the implementation of the Gezhouba-Nanqiao renovation project, the development, testing, and application of CLCC are introduced. Then, the electrical parameters, structure design schemes and the type test schemes of CLCC are proposed. The key test items and test results of the low-voltage boosting test, the no-load boosting test, and the artificial short-circuit test during engineering commissioning are introduced in combination with the field recording waveforms. And the operation performance after the project was put into operation is also introduced. According to the field recording waveforms of AC fault events, the correctness of the operation sequence of the converter is analyzed in detail. Finally, the application prospects of CLCC in ultra-high voltage DC transmission projects, provincial AC tie-line renovation, and other scenarios are analyzed, providing a reference for further promotion and application of CLCC.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5108-202218280A-2-220-XG).

Key words: high voltage direct current (HVDC) transmission; line commutation; converter; commutation failure