DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.021　　文章编号：1000-128X(2023)05-0184-07

# 电力电子器件在柔性直流输电中的应用与发展

杨　柳，饶　宏，袁智勇，周月宾，徐义良，熊　岩
（直流输电技术全国重点实验室（南方电网科学研究院有限责任公司），广东 广州　510663）

**摘　要：**柔性直流输电是以新能源为主体的新型电力系统的核心技术，具有有功无功独立控制、响应快速灵活、扩展性强、无换相失败等优点，广泛应用于新能源送出、异步电网互联、孤岛供电和远距离大容量输电等场景。电力电子器件在柔性直流输电中起着交直流变换的重要作用，目前国内外的柔性直流输电工程普遍采用3.3 kV和4.5 kV等级的功率器件（IGBT），为满足“双碳”目标下大型新能源远距离大容量直流输电送出工程和远海风电场大规模开发利用的需求，功率器件也向着更高电压、更大电流的方向发展。文章对柔性直流输电技术中电力电子器件的发展现状和趋势进行梳理，以国内多个有代表性的柔性直流输电工程为例，系统地阐述了电力电子器件在柔性直流工程中的应用现状，重点介绍了应用于柔性直流的电力电子器件主要技术特点。最后，展望了高压大功率电力电子器件的应用方向与发展趋势。

**关键词：**柔性直流输电；柔性直流换流阀；电力电子器件；高电压；大电流
**中图分类号：**TN325$^{+}$.2　　**文献标识码：**A

# Application and development of power electronic devices in VSC-HVDC transmission system

**YANG Liu, RAO Hong, YUAN Zhiyong, ZHOU Yuebin*, XU Yiliang, XIONG Yan**

( State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou, Guangdong 510663, China)

**Abstract:** Voltage sourced converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) is the core technology of new type of power systems with new energy as its main part. VSC-HVDC has outstanding advantages such as independent control of active and reactive power, fast and flexible response, strong scalability, and no commutation failure. It is widely used in new energy transmission, grid interconnection, island power supply, and long-distance and high-capacity power transmission. Power electronic devices play an important role in AC/DC conversion in VSC-HVDC systems. At present, 3.3 kV and 4.5 kV power devices (IGBTs) are generally used in VSC-HVDC projects at home and abroad. To meet the needs of long-distance and high-capacity DC transmission of large new energy projects, and the needs of large-scale development and utilization of offshore wind farms, power devices are developing towards higher voltage and larger current to help achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals. In this paper, the development status and trend of power electronic devices in VSC-HVDC technology were reviewed, the application status of power electronic devices in VSC-HVDC projects was systematically described with several representative domestic projects as examples, and the main technical characteristics of power electronic devices for VSC-HVDC were emphasized. Finally, the prospective application directions and development trends of high-voltage and high-power devices were explored.

**Keywords:** voltage sourced converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); VSC valve; power electronic devices; high voltage; large current

---

**基金项目：**中国南方电网有限责任公司创新项目(ZBKJXM20232197)
**通信作者：**周月宾（1987—），男，博士，高级工程师，主要从事柔性直流及电力电子技术的研发与应用工作；E-mail: zhouyb@csg.cn
**引用格式：**杨柳, 饶宏, 袁智勇, 等. 电力电子器件在柔性直流输电中的应用与发展[J]. 机车电传动, 2023(5): 184-190.
Citation: YANG Liu, RAO Hong, YUAN Zhiyong, et al. Application and development of power electronic devices in VSC-HVDC transmission system [J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 184-190.

## 0　引言

柔性直流输电（Voltage sourced converter based high voltage direct current，VSC-HVDC）是新一代的直流输电技术，是建设以新能源为主体的新型电力系统的核心输电技术。模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter，MMC）具有控制灵活、输出谐波特性好、可拓展性强等优点，广泛适用于高压直流输电领域，已成为柔性直流输电系统的主流换流器拓扑[1-10]。

世界上第一个基于MMC拓扑的柔性直流输电工程为Trans Bay Cable工程，于2010年在美国旧金山建成投运[4]；我国于2011年建成投运了国内首个基于MMC拓扑的柔性直流输电工程——上海南汇柔性直流输电工程，成功打破了国外技术垄断[11]。此后，基于MMC拓扑的柔性直流输电技术在我国迅速推广应用，经过十余年迅猛发展，其应用场景已涵盖“岛屿新能源并网送出”“交流电网分区柔性互联”“高压大容量远距离架空线输电”“海上风电并网送出”等多种类型[8]。

2013年建成投运的世界首个多端柔性直流输电工程—— ±160 kV南澳多端柔性直流输电工程[12]、2014年投运的±200 kV舟山五端柔性直流输电工程[13]为柔性直流输电技术在岛屿新能源送出场景下的应用，有效解决了岛屿波动性、间歇性新能源并网送出难题，同时可为岛上新能源电站提供黑启动能力。2016年投运的±350 kV鲁西背靠背直流工程[14]、2019年建成的±420 kV渝鄂背靠背直流工程[15]、2022年建成投运的±300 kV广东背靠背直流工程[16]为柔性直流输电技术在交流电网分区柔性互联场景下的应用，实现了两个交流电网的电力交换，提高了已有交流电网的安全稳定水平。2020年竣工投产的世界首个特高压柔性直流输电工程——昆柳龙直流工程[17-18]、世界首个基于柔性直流输电技术的直流电网工程——张北直流电网工程[19]为柔性直流输电技术在高压大容量远距离架空线输电场景下的应用，突破了柔性直流远距离架空线故障清除的国际难题，为大规模可再生能源经远距离架空线跨区消纳提供了新的解决方案。2021年建成投运的我国首个远海风电经直流送出项目—— ±400 kV如东海上风电柔性直流输电示范工程[20]为柔性直流输电技术在海上风电并网送出场景下的应用，有效解决了海上风电场大容量、远距离输电难题，对未来我国海上风电集中连片规模化送出和远海大容量风电开发建设具有重要意义。

柔性直流输电技术的快速发展离不开电力电子器件（IGBT）提供的关键支撑。柔性直流换流阀是柔性直流输电的“心脏”，电力电子器件（IGBT）又是柔性直流换流阀的核心元件，通过电力电子器件（IGBT）的频繁开断，柔性直流换流阀得以实现交直流变换，电力电子器件（IGBT）的性能和可靠性直接决定了整个柔性直流系统能否安全稳定运行。为系统论述电力电子器件（IGBT）在柔性直流输电中发挥的关键作用，本文首先全面梳理柔性直流所应用的电力电子器件封装类型、电气参数；之后依托国内多个有代表性的柔性直流输电工程，对电力电子器件在柔性直流工程中的应用现状展开系统阐述，并着重对柔性直流用电力电子器件的主要技术特点进行介绍；最后，对未来高压大功率电力电子器件的应用方向与发展趋势进行展望。

## 1　电力电子器件在柔性直流的应用现状

### 1.1　功率模块中各元部件组成

柔性直流换流阀的最小单元是功率模块，它是一个涉及机、电、磁、热多物理场耦合的负载系统，主要由一次电路（电气元部件）、二次电路（二次板卡及其芯片）以及机械结构（结构件及其组件）等组成，如图1所示。其中IGBT是整个功率模块的核心，承载着功率变换的功能，其选型设计及可靠性对系统的稳定运行尤为关键。

### 1.2　IGBT在国内柔直工程中的应用情况

柔性直流工程使用的IGBT多为大功率器件，主要分为塑封式和压接式2种封装形式[21-22]，工程中使用的IGBT电流等级、电压等级分别为1 500~3 000 A、3 300~4 500 V不等。塑封式器件的生产工艺简单、成本低，但是器件容量相对较小，在承受电容器直通放电后，可能发生爆炸，不具备长期短路失效能力，影响周边模块的安全运行，目前在配网领域应用较多。压接式器件的封装难度大、成本高，但是散热性能好，器件容量大，由于采取压接方式，承受电容器直通放电后，结构稳定，在远距离输电、电网互联等领域应用较多。

本文对国内已投运的柔直工程IGBT应用情况进行统计，初步得出如下结论：

①从2013年到2022年，国内10个大型柔直工程中应用IGBT功率器件总计近20.1万只。自2013年南澳工程开始，国内柔直工程IGBT的使用数量逐年增加，一方面取决于柔性直流技术在我国的跨越式发展，另一方面也说明了以风电和太阳能发电为代表的可再生能源极大地推动了柔性直流的快速发展及应用。

②国内外柔性直流换流阀IGBT供应商主要包括日立能源（原ABB）、东芝、英飞凌及中国中车，其中日立能源、英飞凌、中国中车的模块式和压接式封装均有产品应用于工程中，而东芝主要以压接式IEGT为主，英飞凌在早期工程中供货模块式IGBT，其压接式

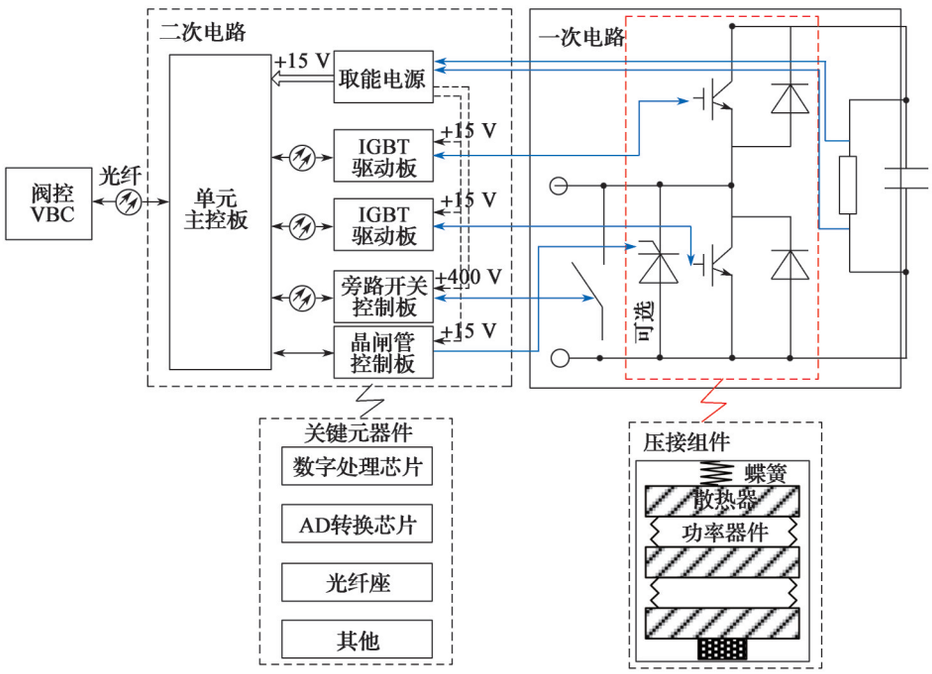



图1 功率模块电气拓扑及各元部件组成

Fig. 1 Electrical topology and composition of various components of power module

IGBT也于2020年上半年推向市场，并在白鹤滩柔直工程中得到应用。

③在2019年及以前，压接式IGBT除东芝有应用外，其余IGBT供货商均为模块式IGBT。随着柔直工程容量进一步扩大，对功率器件的功率密度要求也随之提高，再加上压接式IGBT具有双面散热、失效短路能力、电压电流等级高等一系列优点，从张北工程开始，压接式IGBT已取代模块式IGBT成为柔直工程换流阀的理想和首选器件。

④中国中车一直致力于国产IGBT的开发和研制，其模块式IGBT已大批量成熟应用于机车、风电等领域，在厦门和渝鄂柔直工程中也进行了小批量试用。为适应后续柔直工程的需求，也应时完成了压接型IGBT的开发，并于2018年推出4 500 V/3 000 A产品，2019年推出4 500 V/2 000 A产品，现已逐渐推广应用至乌东德、如东、广东背靠背、白鹤滩等柔直工程中，国产IGBT的性能及可靠性在柔直工程也逐步得到了验证。结合沙戈荒大型新能源基地及海上风电柔直送出的需求，国产IGBT应用规模会进一步扩大，性能也会愈加成熟。

⑤在2019年之前，多数工程为示范性工程，输送容量较小，器件电流等级也相应较小，以1.5 kA以下等级为主。随着柔直换流阀设计和应用技术不断成熟，自2019年之后，柔直工程已推广应用到大容量输电领域，器件电流等级也提高至2 kA以上，2022年广东背靠背和白鹤滩柔直工程所应用的IGBT全部为3 kA电流等级产品。可以预见，随着柔直工程传输容量的进一步增大，IGBT电流等级将会提出3 kA以上需求。

## 2 柔性直流用电力电子器件的主要技术特点

柔性直流使用的电力电子器件主要有以下几个方面的技术特点：

①电力电子器件工作的环境条件好。柔性直流换流阀一般布置在阀厅中，阀厅的温度、湿度、洁净度都是严格控制的，如表1所示，器件的运行环境优于轨道交通等领域的应用。

表1 阀厅工作环境

Table 1 Working environment of valve hall

| 序号 | 名称 | 换流站阀厅 |
|---|---|---|
| 1 | 空气温度，最小值 | 5 ℃ |
| 2 | 空气温度，最大值 | 45 ℃ |
| 3 | 极限空气温度，最大值 | 50 ℃（2 h） |
| 4 | 相对湿度，最大值 | 60%RH |
| 5 | 污秽等级 | 户内（微正压） |

②电力电子器件工作的散热条件好。由于柔性直流换流阀散热量大，一般采用内冷+外冷两层冷却方式散热，内冷采用去离子水，外冷采用水冷或空气冷却方式，根据柔性直流系统容量以及换流站站址水源、温度等环境条件确定。水冷系统需设计严格的进出水温度、报警温度、跳闸温度限值，如表2所示，器件的集电极和发射极侧均有水冷板加持，冷却管路流过水冷板，如图2所示。这保证了器件的工作环境具备良好的散热条件，但是换流阀内部功率模块数多、功率模块内部冷却回路错综复杂，也给模块的机械结构设计带来挑战。

表2　水冷系统温度要求

Table 2　Temperature requirements for water cooling system

| 序号 | 名称 | 换流站阀厅温度/℃ |
|---|---|---|
| 1 | 进阀最高运行温度 | 45 |
| 2 | 进阀温度高报警设定值 | 47 |
| 3 | 进阀温度高跳闸设定值 | 50 |
| 4 | 出阀温度设计值 | 55 |

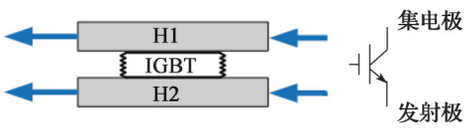



图2　功率器件水冷设计示意

Fig. 2　Schematic design of water cooling for power devices

③电力电子器件工作的开关频率低。柔性直流换流阀中普遍采用调制均压的控制方式，选择电压较高的功率模块与电压较低的功率模块交替导通充放电，从而降低了器件的开关频率，以昆柳龙直流工程为例，受端柔性直流换流阀中半桥模块开关频率低至80 Hz，全桥模块开关频率低至40 Hz；全桥模块采取零电平轮换调制方法，进一步平均电流分布，降低不同器件的结温差至10 K以内。

④功率模块超高可靠性设计，保护器件工作安全。柔性直流换流阀的功率模块数多，如一个特高压柔直站包含5 184个模块，为了避免发生单一模块故障引起系统停运的问题，在昆柳龙工程中首次设计了柔直功率模块的多层级旁路措施，同时设计了软件、硬件旁路功能和逻辑。在旁路执行元件上，还设计了机械式旁路开关、电子式旁路保护晶闸管等不同原理的旁路元件，如图3所示。

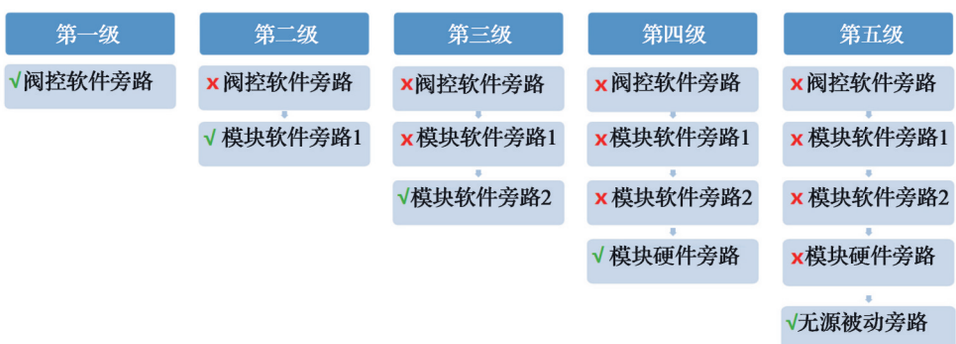



图3　功率模块多级旁路设计

Fig. 3　Multi-level bypass design of power module

⑤电力电子器件浪涌电流能力强、防爆要求高。在电网应用层面，由于控制链路延时等因素的影响，交流系统故障时，柔直阀会出现短时间的浪涌电流和过电压，可能超过器件耐受能力，影响交流故障穿越特性。图4所示波形为鲁西背靠背柔直工程的实际试验结果，由图4可知，交流故障发生后，流过柔直阀的电流出现了瞬时增大，触发了暂停触发的定值。这种工况下，通常要求功率器件具有更大的可重复关断电流能力，有助于提高交流故障穿越能力，降低换流阀出现暂停触发的概率。从柔直阀防爆要求层面考虑，为了达到高可靠性设计的要求，功率模块需要能够承受电容器直通短路故障，电力电子器件、模块的机械结构在承受1 000 kA级的浪涌电流冲击后仍能够长期通流，对器件的防爆设计提出了更高的要求，电容器直通短路故障的波形如图5所示。

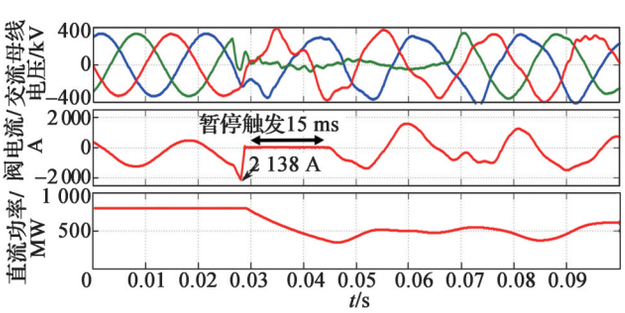



图4　鲁西背靠背工程现场暂停触发波形

Fig. 4　Pause triggering waveform on site of Luxi back-to-back project

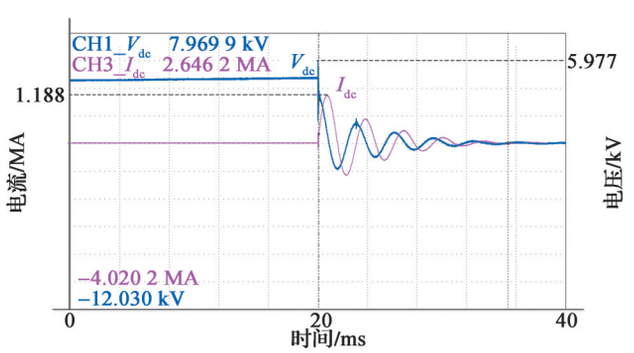



图5　15 mF电容在4 500 V电容电压下直通放电，能量1~2 ms释放完毕

Fig. 5　15 mF capacitor is discharged directly at 4 500 V with energy all released within 1~2 ms

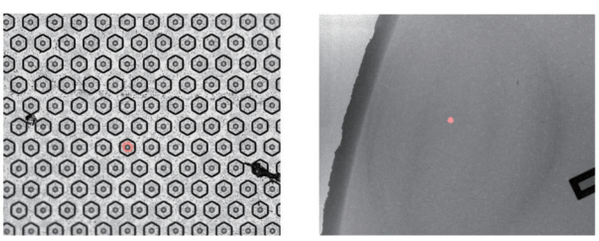
## 3　高压大功率电力电子器件的发展趋势

### 3.1　高海拔应用的需求

在“双碳”目标下，未来我国西部大型沙戈荒基

地的新能源电力将采用柔性直流的方式送出到电力负荷中心，由于我国西部地区海拔普遍偏高，柔直换流站建立在4 000~5 000 m的高海拔区域，电力电子器件将面临比现在平原地区应用更为苛刻的环境条件。一方面，高海拔地区气压低，空气中带电粒子的平均自由行程增大，在外电场作用下，自由电子获得了较大的动能，在与气体分子的碰撞过程中产生较强烈的碰撞电离，导致容易发生间隙放电；另一方面，高海拔地区空气中水分子减少，电子被水分子吸引而成为负离子的比例降低，自由电子的数量增多，间隙电离过程增强，间隙放电电压降低，因此高海拔环境对电力电子器件的爬电距离、电气间隙等提出了更高的绝缘要求。

此外，高海拔自然环境下，宇宙射线大气中子通量加大，比如拉萨地区的中子通量是广州地区的20多倍，宇宙射线对器件安全工作的影响越发突显，如图6所示，尤其当器件处于阻断状态时，$V_{GE}<0$，在外加电压$V_{CE}$的作用下，大气中子与器件内部的强电场产生碰撞电离效应，器件发生单粒子烧毁的概率增加，其影响因素与器件的工作电压、温度都有关系。在工程实施中可通过开展大气中子加速辐照试验的方式，获得电力电子器件在高海拔地区应用的安全边界。



(a) IGBT (b) 晶闸管

图6 功率器件经中子辐照后失效点

Fig. 6 Failure point of power device after neutron irradiation

### 3.2 深远海应用的需求

随着深远海地区风电资源的开发，未来柔性直流将是海上风电能源送出的主要技术形式。电力电子器件在海上的应用需要重点考虑环境中湿度高、盐度大、腐蚀强的因素，加强器件的密封性和防腐蚀设计。同时功率器件也面临更加苛刻的电气工况，为了提高海上平台的可靠性和运维便捷性，通常会采取多组柔直变压组并联的设计，GIS隔离开关操作时会产生特快瞬态过电压VFTO传递给换流阀，其特点是电压幅值高、变化率大、d$u$/d$t$可达到40~100 kV/μs，功率器件需要安全承受此工况的考验。另外功率模块中的旁路保护晶闸管也要耐受40~100 kV/μs的高d$u$/d$t$，容易发生误开通导致击穿，如图7所示。对此需针对性加强防误开通设计，避免潜在的误开通风险。

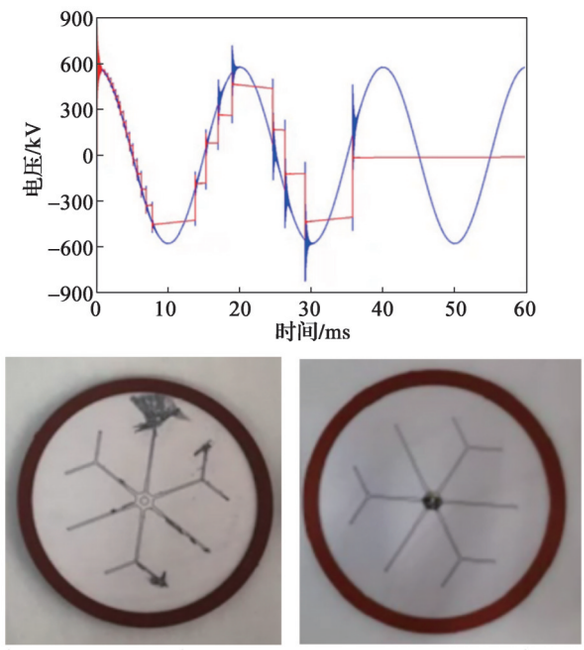



图7 GIS分闸操作产生的VFTO电压尖峰及旁路晶闸管发生误开通后的击穿现象

Fig. 7 VFTO voltage spikes caused by GIS opening operations and breakdown phenomena after incorrect opening of bypassing thyristors

### 3.3 更大容量更低损耗的需求

面对大规模新能源开发外送的需要，柔性直流输电用大功率电力电子器件的市场需求非常广阔，功率器件也向着更高电压、更大电流的方向发展。

①更高电压的需求。柔性直流换流阀包括数千个功率模块，是柔性直流工程中占地面积最大的设备。更高的器件额定电压，有助于降低串联的功率模块数量，使柔直阀更加紧凑，从而达到节省占地的目的。据初步分析，与4 500 V IGBT器件相比，采用6 500 V IGBT器件后，±800 kV/5 000 MW特高压柔直阀的占地面积将减小约31%，阀塔重量可减小约3.3%，损耗减小约10%~20%。

②更大电流的需求。柔性直流系统的输送容量与电力电子器件的电流水平密切相关。更大的器件额定电流，有助于提升单个换流器的输送容量，经济性会更好。目前工程应用中的成熟器件电流为3 000 A，同时5 000 A的IGBT器件已设计定型，未来应用5 000 A器件可进一步支撑特高压±800 kV单个换流站的输送容量达到8 000 MW以上。

③更低导通压降的需求。柔直阀的损耗在全站损耗中占比约60%，其中通态损耗占主要部分。通态损耗与功率器件的导通压降呈正相关，更低的导通压降，有助于减少柔性直流系统损耗，降低运行成本。

④更高工作结温的需求。目前的柔性直流工程中，器件的工作结温基本为125 ℃，柔直阀不具备过负荷能力。如果将器件的工作结温提升到150 ℃，则柔直

阀可设计30%的过负荷能力，同时也保证了稳态运行时更大的结温安全裕度。相应地，因器件结温的提升带来了更大的运行区间裕度，阀冷却系统进出水温度设计也可提升约10 ℃，降低了阀冷却系统的成本。

## 4　结论

电力电子器件是柔性直流输电最为核心的基础元器件，技术含量高，也长期是我国的“卡脖子”难题。本文以国内多个有代表性的柔性直流输电工程为例，全面梳理并分析了电力电子器件在柔性直流输电工程中的应用情况，针对柔性直流用电力电子器件鲜明的技术特点，展望了高压大功率电力电子器件的应用方向与发展趋势。近年来，电力电子器件逐步实现自主化研发，在国产化进程方面也取得了重大突破，未来还需继续推动器件技术性能的不断提升。

**参考文献：**


[1] 赵畹君 . 高压直流输电工程技术[M]. 2 版 . 北京: 中国电力出版社, 2011.
ZHAO Wanjun. HVDC project technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

[2] 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. HVDC transmission technology based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[3] 赵畹君, 曾南超 . 中国直流输电发展历程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
ZHAO Wanjun, ZENG Nanchao. Development history of HVDC in China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.

[4] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等 . 柔性直流输电系统[M]. 2 版 . 北京: 机械工业出版社, 2017.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Voltage source converter based HVDC transmission system[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.

[5] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//IEEE. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna: IEEE, 2003: 3-6.

[6] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(1): 4-17.

[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.

[8] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等 . 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(1): 1-11.

[9] 饶宏, 洪潮, 周保荣, 等 . 乌东德特高压多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(3): 1-5.
RAO Hong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of Wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC[J]. Southern power system technology, 2017, 11(3): 1-5.

[10] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等 . 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. Southern power system technology, 2015, 9(1): 7-13.

[11] 乔卫东, 毛颖科 . 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.
QIAO Weidong, MAO Yingke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project[J]. East China electric power, 2011, 39(7): 1137-1140.

[12] 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.

[13] 刘黎, 蔡旭, 俞恩科, 等 . 舟山多端柔性直流输电示范工程及其评估[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 79-88.
LIU Li, CAI Xu, YU Enke, et al. Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission demonstration project and its evaluation[J]. Southern power system technology, 2019, 13 (3): 79-88.

[14] 杨柳, 朱喆, 侯婷, 等 . 背靠背直流输电技术及其在鲁西异步联网工程中的应用[J]. 南方电网技术, 2018, 12(4): 1-6.
YANG Liu, ZHU Zhe, HOU Ting, et al. Technology of back-to-back DC transmission system and its application in Luxi asynchronous interconnection project[J]. Southern power system technology, 2018, 12(4): 1-6.

[15] 潘尔生, 乐波, 梅念, 等 . ±420kV 中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 175-183.
PAN Ersheng, YUE Bo, MEI Nian, et al. System design of ±420kV Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. Automation of electric power systems, 2021, 45 (5): 175-183.

[16] 罗澍忻, 刘瑞宽, 金楚, 等 . 广东电网背靠背直流高频谐振风险及应对措施[J/OL]. 南方电网技术: 1-9[2023-07-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20230130.1055.003.html.
LUO Shuxin, LIU Ruikuan, JIN Chu, et al. Risk and coun-

termeasures of high-frequency resonance for back-to-back HVDC in Guangdong power grid[J/OL]. Southern power system technology: 1-9[2023-07-18]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/44.1643.TK.20230130.1055.003.html.

[17] RAO H, ZHOU Y, XU S, et al. Research and development of ultra-high-voltage VSC for the multi-terminal hybrid ±800kV HVDC project in China Southern Power Grid[C]// CIGRE. 2018 CIGRE Session. Paris: CIGRE, 2018.

[18] RAO Hong, ZHOU Yuebin, XU Shukai, et al. Key technologies of ultra-high voltage hybrid LCC-VSC MTDC systems [J]. CSEE journal of power and energy systems, 2019, 5(3): 365-373.

[19] 刘泽洪, 郭贤珊. 含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3595-3603.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC grid with renewable source connected[J]. Power system technology, 2020, 44(9): 3595-3603.

[20] 高磊, 吕敬, 蔡旭. 如东海上风电柔直送出系统的中频振荡特性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3495-3509.
GAO Lei, LYU Jing, CAI Xu. Analysis of mid-frequency oscillation characteristics in Rudong MMC-HVDC system for offshore wind farms[J]. Power system technology, 2023, 47 (9): 3495-3509.

[21] 唐新灵, 张朋, 陈中圆, 等. 高压大功率压接型IGBT器件封装技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3622-3637.
TANG Xinling, ZHANG Peng, CHEN Zhongyuan, et al. Review of high voltage high power press pack IGBT package technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3622-3637.

[22] 龙海洋, 李辉, 王晓, 等. 纳米银烧结压接封装IGBT的长期可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5779-5786.
LONG Haiyang, LI Hui, WANG Xiao, et al. Study on the long term reliability of nanosilver sintered press pack IGBT [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5779-5786.

收稿日期：2023-08-14