

综述 · 评论

风电变流器功率组件技术及发展趋势

陈燕平, 蒋云富, 忻兰苑

(1. 新型功率半导体器件国家重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 功率组件是风电变流器的核心构成部件, 其性能及可靠性直接影响变流器的整体性能及可靠性。文章对风电变流器中 IGBT 功率组件的电路拓扑结构、关键器件选型、驱动技术、散热技术等关键技术及其未来的发展趋势进行研究及阐述, 为风电变流器中功率组件的设计、选型与技术研究提供参考依据。

关键词: 风电变流器; 功率组件; IGBT; 驱动技术; 散热技术; 自诊断

中图分类号: TM614; TN6

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)06-0001-09

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.06.001

Development of Power Assembly Technology for Wind Power Converters

CHEN Yanping, JIANG Yunfu, XIN Lanyuan

(1.State Key Laboratory of Advanced Power Semiconductor Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2.Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Power assembly is the key component of wind power converter, whose performance and reliability affect the performance and reliability of converter. For IGBT power assembly in wind power converter, it introduced its key technologies such as circuit topology & composition structure, key device selection, gate-driver technology, heat dissipation technology and its development trend, which could provide references for the design, selection and technical research of power assembly in wind power converter.

Keywords: wind power converter; power assembly; IGBT; driven technology; heatdissipation technology; self-diagnose

0 引言

风力发电作为应用最广泛和发展最快的新能源发电技术, 已在全球大规模开发应用。2016 年底全球风电累计装机容量达 4.87 亿 kW, 过去五年全球累计装机容量复合增速达 15.38%。2016 年, 美国、欧盟地区、中国的风能发电量在总发电量中占比分别达到 5.5%, 10.4% 和 4%; 中国新增发电装机容量 1210 万 kW, 其中风电新增装机容量 234 万 kW, 占比 19.3%, 成为继火电、水电之后的第三大电力供应来源^[1]。预计 2020 年全国风电装机累计达到 2.1 亿 kW 以上^[2], 年均复合增速可达 10% 左右。随着特高压直流输电技术的发展, 能源

中心与负荷中心将有效连接, 解决限风弃电问题, 促进风电行业健康快速发展。

风电变流器是风力发电系统中的关键部件, 其功能是将风机在自然风的作用下发出电压频率、幅值不稳定的电能转换为频率和幅值稳定、符合电网要求的电能后并入电网。风电变流器不仅提高了机组效率, 而且对于机组并网、电网安全稳定运行起到了关键作用。

功率组件是风电变流器实现电力变换的核心部件, 其将变流器中的功率器件、电容器、驱动电路、散热器、低感母排甚至检测及控制电路等集成在一起, 形成一个功能相对独立的功率部件, 成本约占整个变流器的 40%, 其质量问题及故障率则占整个变流器的 60% 以上。本文主要对风电变流器中 IGBT 功率组件的电路拓扑结构、关键器件选型、驱动技术、散热技术等关键技术进行研究, 并对其发展趋势进行阐述。

收稿日期: 2017-09-20

作者简介: 陈燕平 (1975-), 女, 教授级高级工程师, 主要从事变流技术研究。

1 风电变流器主电路拓扑结构

风电变流器主要有全功率式和双馈式两种类型^[3], 分别对应直驱式风电机组和双馈式风电机组。直驱式风电机组将风轮与低速同步发电机直接连接, 降低了机械故障率和定期维护成本; 同时由于同步电机能够更加平稳地发电, 提高了风电转换效率和运行可靠性, 更适于大功率应用场合, 但较双馈式风电机组, 其体积大、价格高。双馈式风电机组采用多级齿轮箱驱动异步发电机, 电机转速高、转矩小、重量轻、体积小, 但齿轮箱的运行维护成本较高且存在机械损耗。两种机型各有优劣, 并存于市场。目前双馈式风电机组相对市场份额较高, 但直驱式机组的份额比例在缓慢上升, 在 3 MW 以上的大功率风电机组中, 直驱式机组的占比甚至超过了双馈式机组。

图 1、图 2 分别示出双馈式风力发电系统和直驱式风力发电系统典型的拓扑结构, 其中变流器部分可由单个或多个功率组件构成。因双馈式风力发电系统发电机的电功率一部分直接经定子馈送到电网, 另外一部分由转子经变流器馈送到电网, 变流器额定功率一般只需为双馈异步发电机额定功率的 $1/3 \sim 1/2$, 即对应同等功率等级的风机, 其功率组件的总需求也同比减少。

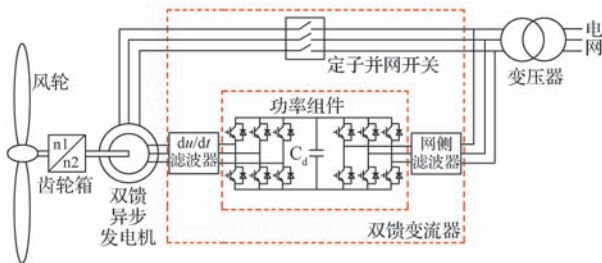


图 1 双馈式风力发电系统典型的拓扑结构

Fig. 1 Circuit topology of doubly-fed wind-power generation system

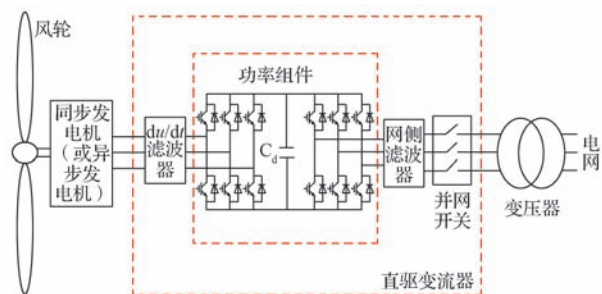


图 2 直驱式风力发电系统典型的拓扑结构

Fig. 2 Circuit topology of direct-driven wind generation system

风电变流器按照电压等级可分为低压变流器与中高压变流器。从风机整机系统成本考虑, 单机 5 MW 以内系统采用低压 690 V 等级有系统成本优势, 所以陆上风电一般采用低压变流器; 中高压技术方案一般应用于大功率海上风电机组。随着陆上风电发展日趋

饱和, 海上风电日益成为研究热点。预计到 2020 年, 3.6 MW~6 MW 机组是海上风电的主流机型, 小批量 7 MW~10 MW 风电机组将进入海上风电场; 2021-2030 年, 10 MW~15 MW 将成为海上风电主流机型, 小批量 16 MW~20 MW 风电机组将进入海上风电场。大功率风电机组主要采用直驱技术, 根据其电路拓扑结构, 海上风电技术方案可分为低压技术方案、中压技术方案及高压级联技术方案。

低压技术方案以西门子公司、金风公司为代表, 其电路拓扑如图 3 所示, 变流器额定输出 690 V 三相交流电实现并网。风机系统通过增加永磁同步发电机的定子输出绕组来增大总功率, 变流器系统采用多个低压全功率变流器并联而成。与传统陆上风电变流器不同的是, 为减小电缆损耗, 将 690 V 升压至 35 kV 的并网变压器装置在风机塔筒的机舱内, 单机最大功率可达 8 MW。

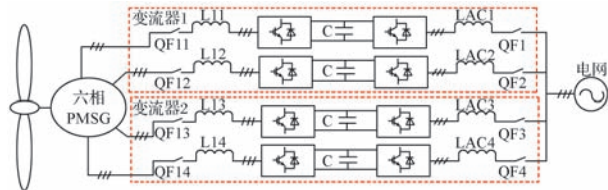


图 3 低压直驱风力发电系统拓扑结构

Fig. 3 Circuit topology of low-voltage direct-driven wind generation system

中压技术方案以 ABB、禾望等公司为代表, 其电路拓扑如图 4 所示, 系统拓扑采用三电平 NPC 电路结构, 直流母线电压不低于 5 kV, 交流侧额定输出电压为 3.3 kV, 功率器件一般选择额定电压 4.5 kV~6.5 kV 的 IGBT 或 IGCT^[4]。在中压变流器应用中, 器件的开关频率受限, 一般小于 1 kHz^[5]。开关频率较低, 会造成输出电流波形谐波含量过大和控制带宽降低等问题, 严重时可能导致变流器无法正常工作, 因而需要更大参数的网侧滤波器, 但这会使系统成本上升、体积增大。

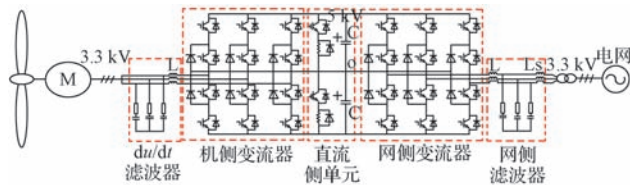


图 4 中压三电平风力发电系统拓扑结构

Fig. 4 Circuit topology of medium-voltage three-level wind generation converter

高压技术方案为采用串联高压直流输电电压源变流器 (voltage source converter, high voltage direct current transmission, VSC-HVDC) 拓扑结构 (图 5)。将所有永磁发电机经整流器后串联, 将直流母线电压抬高后再进行直流传输, 这种方式如果设计合理, 则无需再加入 DC-DC 模块进行升压处理, 减少了设备投入量, 可直接满足直流输电系统所需要的电压等级要求^[6-7]。通过

组件级联多电平技术，可有效降低网侧谐波，减小网侧滤波电抗器容量，使系统更为简洁。目前此电路拓扑结构正处于研究阶段，还未被商业应用。

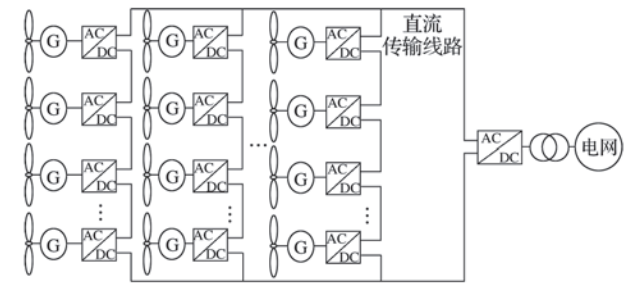


图 5 VSC-HVDC 拓扑结构
Fig. 5 Circuit topology of VSC-HVDC

2 功率组件拓扑结构

风电变流器基本功能包含整流、逆变与过压抑制。过压抑制一般由斩波电路(chopper)或撬棒电路(crowbar)来实现，因此风电功率组件按功能可分为整流(AC/DC)、逆变(DC/AC)、斩波(DC/DC)、Crowbar或由以上功能组合的组件。

功率组件是风电变流器中的核心部件，其结构设计根据风电变流器的总体布局、性能优化与维护需求而定。功率组件结构方式主要有两种确定方法：一种是定制开发，根据变流器系统布置最优来确定功率组件的结构，即变流器与组件结合设计，如Converteam公司、ABB公司；另一种是标准功率组件单元，即功率组件厂商设计通用的功率组件，客户选用其构建变流器，如英飞凌公司、赛米控公司的通用功率组件。根据功率组件电路拓扑，可分为半桥功率组件、全桥功率组件、三电平功率组件、MMC功率组件及包含整流与逆变的复杂功率组件。

半桥功率组件集成单个桥臂(图6)，以Converteam公司风冷组件为代表，其包含电流检测等功能，重量轻、易维护，但因变流器所需功率组件数量过多，致成本较高。

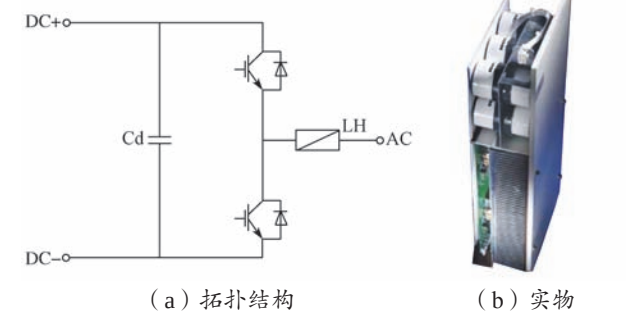


图 6 半桥功率组件
Fig. 6 Half-bridge power assembly

全桥功率组件集成三相桥臂(图7)，以英飞凌公司Stack系列产品为代表，其包含电流检测、电压检测、

温度检测等功能，功能完善，但重量较重，维护不便。

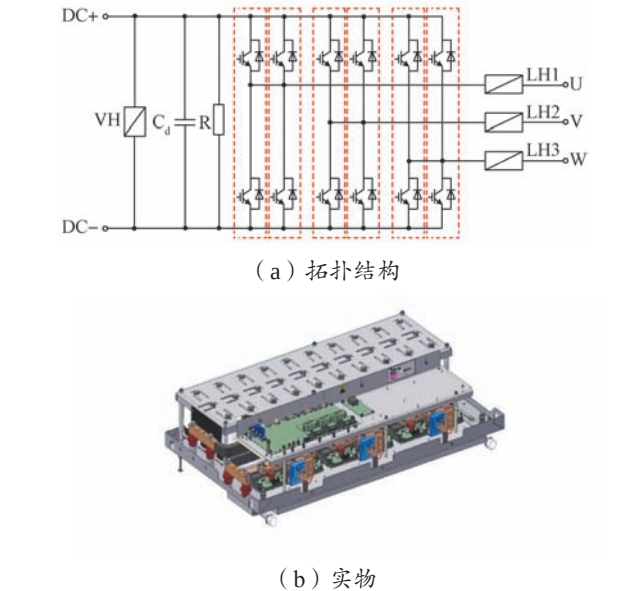


图 7 全桥功率组件
Fig. 7 Full-bridge power assembly

三电平功率组件主要应用于3300V中压风电机组中，目前均处于示范应用阶段，还未大批量应用，预计未来几年内将在5MW以上风电机组实现规模应用，主电路拓扑如图8所示^[8-9]。

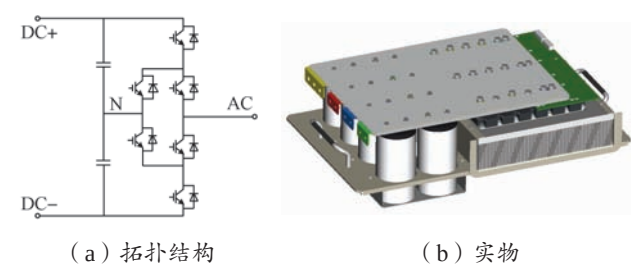


图 8 三电平功率组件
Fig. 8 Three-level power assembly

MMC功率组件主要应用于柔性高压直流输电领域。随着技术的发展，柔性直流输电与风电场设计相结合，MMC功率组件成为研究热点，其电路拓扑及组件结构如图9所示，功率器件可采用模块式IGBT或压接式IGBT^[10-11]。

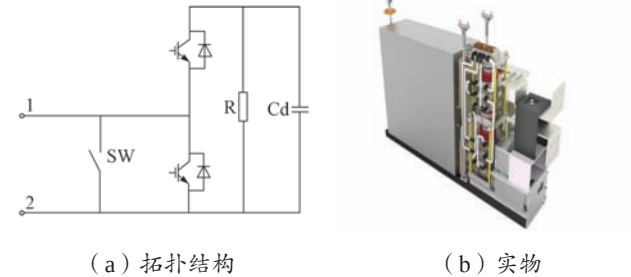
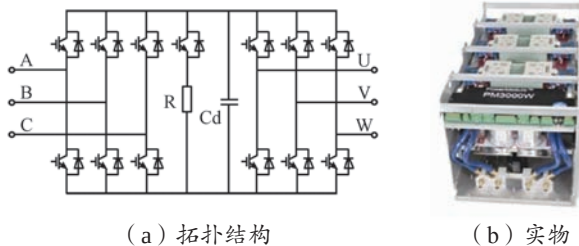


图 9 MMC 功率组件
Fig. 9 MMC power assembly

复杂功率组件，以超导公司PM3000变流器IGBT功率组件为代表，其电路拓扑及组件结构如图10所示，

主要应用于 1.5 MW 与 2 MW 双馈式风电变流器。单个组件集成整流、逆变与斩波功能,具有功能完备的特点,但维护较困难。



(a) 拓扑结构

(b) 实物

图 10 复杂功率组件

Fig. 10 Complex power assembly

功率组件拓扑及结构设计需综合考虑变流器拓扑功能、安装结构、总体成本、可维护性等,在特定变流器中有一合适选择或集成的范围。按照系统拓扑,三电平 NPC 中压风电变流器采用三电平功率组件;VSC-HVDC 高压风电变流系统采用 MMC 功率组件级联;对于功率较小的 1.5 MW 和 2 MW 双馈风冷风电变流器采用半桥功率组件,虽然组件个数相对较多,但因风道结构设计简单、组件维护方便而受欢迎,如 Convertteam 双馈风冷变流器;超导 PM3000 水冷双馈变流器由一个复杂功率组件构成,但因体积与重量过大而造成维护不便,在客户端的接受度较低;对于 2.5 MW 及以上的中、大功率水冷风电变流器,功率组件需在集成度与维护方面进行折中,既可采用全桥功率组件,也可采用多个并联的 IGBT 半桥功率组件。

3 功率组件中关键器件选型

风电功率组件中的关键器件包括功率器件、支撑电容器、电流传感器、电压传感器、温度传感器、低感母排及散热器等,其中功率器件与支撑电容器选型直接关系到功率组件的性能指标和可靠性。功率组件包含多种电路拓扑结构,但其基本电路拓扑为全桥功率组件,目前绝大部分风电变流器使用的功率器件为 IGBT。本文主要对基于全桥电路拓扑 IGBT 功率组件的 IGBT 及支撑电容器的选型进行介绍。

3.1 IGBT

IGBT 选型主要根据计算的电压等级与电流大小来确定。因风电变流器对可靠性与成本要求很高,在满足电压、电流前提下,应尽量选取市场用量大、质量好、成本低的器件。

IGBT 电压选型计算的参考公式^[12]为

$$U_M = (K_1 U_d + U_{sp}) K_2 \quad (1)$$

式中: U_M ——器件最高工作电压, V; K_1 ——过电压系数; U_d ——额定直流电压最大值, V; U_{sp} ——关断时的尖峰电压, V; K_2 ——安全系数。

低压风电系统直流电压额定值通常为 1 050 V, 保护值通常设为 1 250 V, 实际最高直流电压可能超过 1 300 V, 因此, 为使 IGBT 能可靠正常工作, 即最高工作电压不超过 1 700 V。功率组件设计往往需采取过电压抑制措施, 如保证主电路杂散电感尽可能低; 采用带有过电压抑制或软关断的驱动电路; 必要时还需外加过电压吸收电路, 如在 IGBT 附近直流端增加吸收电容等。在采取相应过电压抑制措施后, 为评估 IGBT 电压选型是否满足要求, 可采用在最高工作电压下, 进行 IGBT 最大工作电流关断测试及短路测试来验证器件的实际最高过电压峰值是否超过标称值来评判。

IGBT 的电流定额参考计算公式^[12]为

$$I_{cm} = \sqrt{2} \times I_0 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \quad (2)$$

式中: α_1 ——电流尖峰及纹波系数, 通常取 1.15; α_2 ——温度降额系数, 一般取 1.2; α_3 ——过载系数, 通常取 1.4; I_{cm} ——IGBT 器件集电极最大电流; I_0 ——额定工作电流有效值。

如果器件存在并联情况, 式(2)中还要增加并联降额系数, I_{cm} 最终计算结果不能超过 IGBT 器件的集电极重复峰值电流 I_{CRM} 。此外, IGBT 的电流定额还要考虑热设计结果, 确保器件的结温在可靠范围内。可通过实际工况计算器件的损耗, 再根据系统的热阻计算器件的最高结温, 也可采用器件厂家提供的热计算仿真软件得到器件的最高结温, 最终通过试验进行验证。设计选型时需均衡考虑, 器件定额太小, 则利用不充分, 造成浪费; 定额太大, 必然使器件工作结温太高, 降低可靠性。一般而言, 为保证器件在各种异常条件下的可靠性, 其最高工作结温离器件允许的最高工作结温应有一定裕量。

3.2 支撑电容器

支撑电容器的作用是稳定中间直流电压, 提供瞬时能量交换, 与电源及负载交换无功。支撑电容器可选择铝电解电容器或金属化薄膜电容器。早期, 因铝电解电容器的价格优势及单位体积容量大的优点, 在中小功率变频器领域占居主导; 但铝电解电容器因其额定电压通常不超过 500 V, 风电应用中需要串联使用来满足中间电压要求, 且还具有寿命短、电流小、容量偏差大、损耗大及频率特性差等缺陷。随着技术的发展与进步, 铝电解电容器相比金属化薄膜电容器, 已无明显成本优势, 在新开发的风电变流系统中已基本不再使用, 但部分老产品仍在沿用。对于支撑电容使用金属化薄膜电容器的系统, 若支撑电容器通过低感母排与 IGBT 并联, 在保证系统电感足够低的前提下, 还可省去桥臂两端的过电

压吸收电路，使系统电路更加简洁^[13-14]。

支撑电容器参数的确定方法有多种，如电路分析算法、仿真法、估算法、能量计算法^[13]。目前三相变流器一般沿用传统的6脉波整流的电路分析算法来选取支撑电容器参数，其参考计算公式^[14]为

$$C=\frac{P}{U_{\text{ripple}}\times(U_{\text{dc}}-U_{\text{ripple}}/2)\times f}$$

(3)

式中： C ——电容容量，F； U_{dc} ——直流母线电压最大值，V； U_{ripple} ——直流母线纹波电压，V； P ——输出功率，W； f ——纹波脉动频率，Hz。

因纹波电压 U_{ripple} 相对直流电压很小，且三相6脉波整流器的纹波脉动频率是整流器输入电源频率的6倍，实际应用中，式（3）一般可简化为

$$C=\frac{P}{6f_z\times U_{\text{ripple}}\times U_{\text{dc}}}$$

(4)

式中： f_z ——三相整流器输入电压频率，Hz。

支撑电容纹波电流计算公式^[14]为

$$I_{\text{dc}}=\frac{P\times\pi}{(U_{\text{dc}}-U_{\text{ripple}}/2)\times\sqrt{2}}$$

(5)

4 功率组件核心技术

4.1 IGBT 驱动技术

IGBT 驱动器同时承担驱动 IGBT 器件和保护 IGBT 器件的任务^[15]。IGBT 驱动技术主要包括驱动电路设计及驱动参数匹配，其标准是 IGBT 正常工作下不超器件安全工作区，同时使 IGBT 器件开关损耗尽可能低，能快速检测 IGBT 故障并执行保护动作。IGBT 驱动器保护功能最重要的是 IGBT 短路保护，根据需要还可配备 IGBT 过流保护、门极过电压保护和集-射极过电压保护等功能。

驱动电路为 IGBT 导通与关断提供合适的驱动电压、驱动电流与驱动功率，需综合考虑 IGBT 饱和压降、通态损耗、短路电流与寿命等因素。导通电压是 IGBT 导通时为驱动电路提供的驱动电压，通常选用 +15 V 较为理想。由于 IGBT 栅极与集电极之间存在密勒效应，在半桥电路中，当上管导通时，下管上产生的 dv/dt 经过密勒电容为门极充电。为避免造成下管误导通，IGBT 关断电压选用负电压。

驱动电源最大峰值电流^[16]为

$$I_{\text{GPK}}=\frac{V_{\text{G(on)}}+|V_{\text{G(off)}}|}{R_{\text{Gext}}+R_{\text{Gint}}}$$

(6)

式中： $V_{\text{G(on)}}$ ——驱动正偏置电压，V； $V_{\text{G(off)}}$ ——驱动负偏置电压，V； R_{Gext} ——门极外接电阻， Ω ； R_{Gint} ——

IGBT 门极内阻， Ω 。

驱动电源的平均功率^[16]为

$$P_{\text{AV}}=(V_{\text{G(on)}}+|V_{\text{G(off)}}|)\times Q_{\text{G}}\times f_{\text{s}}$$

(7)

式中： Q_{G} ——门极电荷； f_{s} ——开关频率，Hz。

目前根据电路类型的不同，驱动电路可分为可编程驱动与模拟驱动。可编程驱动因需要使用可编程逻辑芯片，成本较高，在风电变流器中使用较少。对于一些大公司如 Power Integrations(PI)公司，也有采用专用集成电路来替代模拟驱动电路，这样使电路更加简洁，体积更小。

并联使用时，在驱动电路及主电路结构设计中还需考虑器件的均流问题^[17]。驱动电路对并联均流影响较大的有驱动参数、驱动信号时序以及射极环流这几个因素。因此在并联应用中，采用同一块驱动板和独立驱动电阻的方式，能较大程度上避免驱动参数的差异及驱动信号的不同步。若驱动信号走线长短不同，由于线路中存在寄生参数，器件栅极的信号同步性会受影响，可对驱动信号路径进行长度匹配，或者在线路上串入差模扼流圈^[18]。

电路结构对并联均流的影响主要来自主回路上寄生参数的差异，包括线路长度和线路互感，通常采用对称的结构设计来减小其差异，在某些设计中，甚至可以通过人为制造路径差^[17]，抵消互感带来的影响。

4.2 散热技术

散热是变流器中一项关键技术，影响系统的功率密度、性能、可靠性及成本等。风电作为新能源的代表，各科研院所与企业均对散热原理进行深入研究。

风电变流器通常采用风冷或水冷散热方式，风冷散热方式维护方便，在功率较小、系统不复杂时使用有优势；水冷散热方式散热效率高，在大功率风电系统中应用优势明显。目前 2 MW 及以下的风电变流器较多采用风冷方式，2 MW 以上的风电变流器多采用水冷方式，尤其是 3 MW 及以上的大型风机。

等效热阻模型可以量化分析 IGBT 结温和散热情况，功率组件等效热阻电路如图 11 所示。

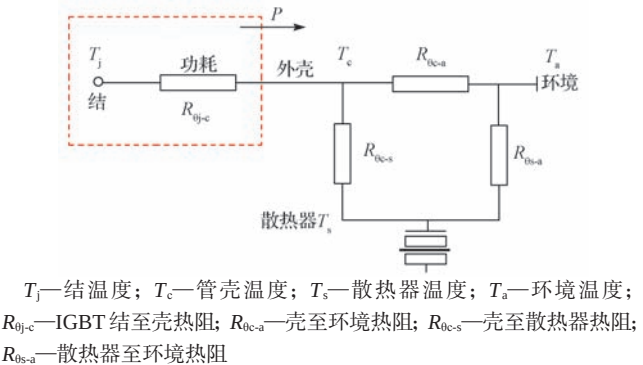


图 11 功率组件热阻等效电路

Fig. 11 Equivalent circuit of power assembly heat loop

根据热等效回路, 器件结至环境的总热阻^[19]为

$$R_{\theta j-a} = R_{\theta j-c} + \frac{R_{\theta c-a}(R_{\theta c-s} + R_{\theta s-a})}{R_{\theta c-a} + R_{\theta c-s} + R_{\theta s-a}} \quad (8)$$

由于热阻 $R_{\theta c-a}$ 比 $R_{\theta c-s}$ 和 $R_{\theta s-a}$ 大得多, 故可忽略其影响, 这样全部热量都经散热器扩散出去, 则式(8)可以简化为

$$R_{\theta j-a} = R_{\theta j-c} + R_{\theta c-s} + R_{\theta s-a} \quad (9)$$

$R_{\theta j-a}$ 与IGBT损耗的乘积等于IGBT结至环境的温升, 因此 $R_{\theta j-a}$ 越小, IGBT结温越低, 系统散热性能越好。减小 $R_{\theta j-a}$ 可通过减少其传递路径或减小其路径上热阻的方式实现, 如风冷散热器可将普通的翅片散热器改成带波浪形翅片散热器或在散热器上嵌入热管, 水冷散热器可采用微通道散热器等。目前新型散热方式成为研究热点, 如Pin-fin散热、直接基板散热、直接衬板散热等。

Pin-fin散热, 即在IGBT基板上集成了散热柱, 如图12所示。与传统的散热方式相比, 因基板直接可将热量导到冷却液中, 省去了散热器表面及导热硅脂, 大大减小了总热阻。

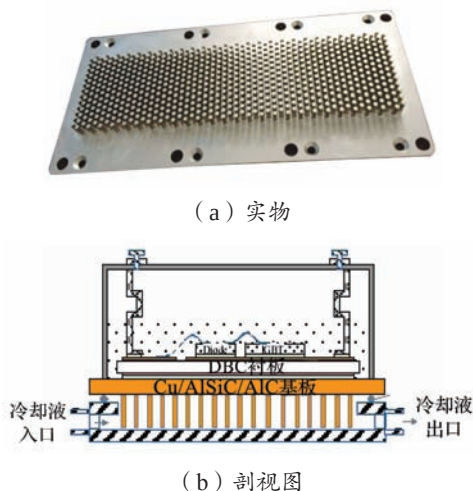
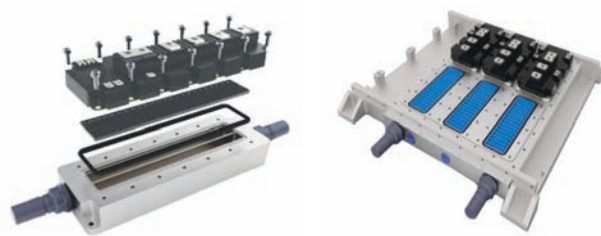


图12 Pin-fin 散热技术
Fig. 12 Pin-fin radiating technology

直接基板散热技术, 如Danfoss公司, 设计了直接将IGBT基板压接在水槽上的ShowerPower技术^[20]

(图13), 其思路是基板表面垂直冷却, 缩短流道长度, 在冷却液还未被加热时就使其流出。基于这种思路, Danfoss公司设计了一种带有流量分配的冷却装置, 散热器内部划分成若干小室, 每个小室均有一个垂直于模块基板的进液口和出液口, 流过一个室室的冷却液不流经其他小室, 使得冷却液以相同的温度流入所有小室, 从而使器件的内部温度分布更加均匀, 散热效果比Pin-fin技术略好, 且成本更低。目前Danfoss公司已在自制的风电功率组件中批量应用。



(a) 分解图 (b) 组件实物图

图13 ShowerPower 直接液体冷却
Fig. 13 ShowerPower radiating technology

直接衬板散热技术, 以赛米控公司产品为例, 采用SKiiP压接技术(图14(a))^[21], 直接将IGBT衬板压接在散热器上, 省去了IGBT基板, 比图14(b)所示标准基板散热方式减小了30%的热阻, 使散热效率得到大幅提升; 同时因无铜基板的热膨胀问题, 可延长功率模块的使用寿命。赛米控公司的功率组件已在风力发电中大批量应用。

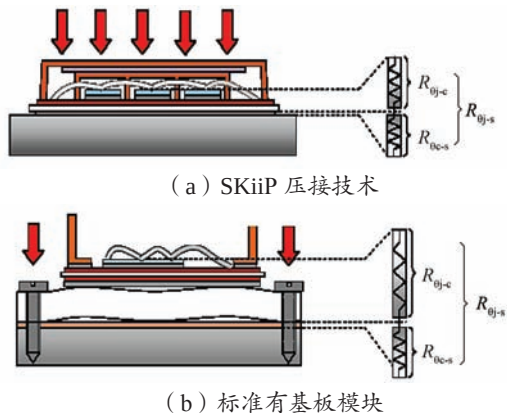


图14 直接衬板压接技术与标准有基板技术
Fig. 14 Direct-substrate pressing technology & substrate pressing technology

4.3 低感母排设计

低感母排又称叠层母排, 是一种正负极导电层上下叠层, 中间采用绝缘材料隔离, 正负电极外表面覆以绝缘层, 通过热压粘接一体化成形的复合母排结构。相比普通铜排连接, 低感母排具有电感及阻抗低、安全性及可靠性高、结构紧凑、防差错以及更好的电流承载能力与散热效果等优势^[22-23]。功率组件采用低感母排可抑制IGBT器件关断过电压及降低尖峰电压, 提高IGBT使用寿命。

杂散电感是低感母排性能的重要指标, 设计时需考虑母排结构、绝缘层厚度、母排宽度、安装孔位置等, 尽量减小电流环路面积, 降低杂散电感^[23]。

低感母排杂散电感参数计算公式^[22]为

$$L = \frac{31.9 \times l \times a}{w} \quad (10)$$

式中: l ——低感母排长度, mm; a ——低感母排中间

绝缘厚度，mm； w ——低感母排宽度，mm。

低感母排电感值可通过仿真得出，图 15 示出一款风电变流器功率组件低感母排的结构图与电流密度仿真云图。

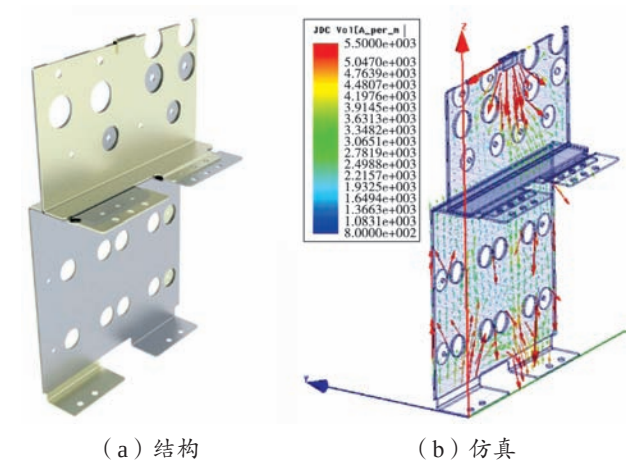


图 15 低感母排结构图与电流密度仿真云图
Fig. 15 Structure diagram and simulation of the laminated busbar

低感母排电容参数可由式（11）计算得出^[22]：

$$C_1 = \frac{0.2225 \times l \times w \times \varepsilon_r}{a} \tag{11}$$

式中： ε_r ——中间绝缘层相对介电常数。

低感母排阻抗参数可由式（12）计算得出^[22]：

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_1}} \tag{12}$$

4.4 其他技术

根据变流器构建的方便性等要求，功率组件可选配集成其他部件或功能，常见的有集成检测与保护功能，如赛米控公司、英飞凌公司的通用型功率组件；有的甚至集成了完整的变流器控制功能，整个组件相当于一台变流器，如 ABB、超导公司风电变流器中的功率组件。

检测与保护功能主要包括电流检测、温度检测、电压检测及其保护功能。集成检测与保护功能的功率组件，通过集成芯片还可包含脉冲控制（如死区、最小脉宽控制等）以及控制电源的过、欠压保护功能。

根据变流器的需求，有的功率组件还包括控制自取电功能，如 Switch 公司风电变流器中使用的 Vacon 公司功率组件，控制电路从直流母线自取电，变流器不需要提供功率组件的控制供电电源。为实现功率组件的自诊断，某些功率组件还带有故障记录及存储功能。

5 风电功率组件发展现状及趋势

5.1 现状

目前 IGBT 功率组件主要以内部配套的方式为主，即厂家生产的 IGBT 功率组件配套自身的变流器外销，

如 ABB、西门子、GE、禾望等公司。随着风电行业持续发展，IGBT 功率组件技术取得了长足的进步，众多公司加入这一行业中，逐渐发展成 IGBT 功率组件专业化企业，并形成各具特色的产品形态。

从器件为基础延伸功率组件产品，其代表是英飞凌公司。在风电 IGBT 功率组件中，IGBT 器件的成本占比超过 50%，是最为核心的部件。作为器件制造厂家，对器件的特性了解更为深刻，可充分发挥组件的性能。

以关键核心技术为基础，形成独具特色的功率组件产品。赛米控公司发挥在封装技术方面的优势，形成集成式 IGBT 功率组件，在功率密度方面独占鳌头；丹佛斯公司通过结合其先进的冷却技术，形成高效散热 IGBT 功率组件，在散热效率方面独具优势；青铜剑公司发挥其在驱动方面的优势，拓展延伸 IGBT 功率组件技术，进军组件市场。

以智能制造为基础，形成具备成本优势的 IGBT 功率组件产品，其代表是台达公司。IGBT 功率组件目前仍为劳动密集型产业，在工厂组装与试验中，需占用较多人力资源与场地资源。在风电成本日趋苛刻的今天，成本控制尤为重要，通过结合智能制造，实现 IGBT 功率组件规模生产，可有效控制产品成本。

系统技术和器件技术结合，发展组件业务，以中车株洲电力机车研究所有限公司为代表，其生产的 IGBT 功率组件内配轨道交通变流器，具备雄厚的变流技术与制造能力。2008 年，收购丹尼克斯公司后，又逐步构建 IGBT 器件的设计与制造能力。通过结合变流技术与 IGBT 器件核心能力，逐步形成独具特色的 IGBT 功率组件产品，并获得市场认可。

5.2 发展趋势

通过结合市场需求与自身优势，专业化 IGBT 功率组件企业逐步形成规模。随着风电往大功率、智能化、高性价比等方向发展，对 IGBT 功率组件提出了新的要求。

5.2.1 中高压、大功率

陆上风电大功率风机在占地方面具有明显优势，随着技术的成熟，风机容量越大经济性将越高，因此，陆上风电主流机组容量从 1.5 MW 提升到了 2 MW 和 2.5 MW，正朝着 3 MW 及以上的容量发展。海上风电更是容量越大优势越明显，通常容量都在 5 MW 以上，目前 10 MW 等级特大型海上垂直轴风电机组正处于验证与试验阶段。

随着风机容量的不断提升，中高压、大功率风电变流器将是未来的发展趋势，意味着功率组件的电压、电流等级将不断提升，需要采用一些新的电路拓扑或功率

器件,如三电平主电路拓扑、IGCT 功率器件等已在海上风电实现应用。适合更大功率、更高电压等级的级联 IGBT 功率组件正在研究中,如半链式 MMC 组件和全链式 MMC 组件。

5.2.2 大数据、智能化

随着大数据时代的到来,智能化是很多行业发展的趋势,尤其对于风力发电领域。IGBT 功率组件作为风电系统的核心执行部件,是整个风电机组故障率最高的部件,且极易发生爆炸,给生命与财产安全带来威胁。

基于大数据与智能化的发展,通过实时监测 IGBT 运行的结温、导通压降、电流等数据,分析 IGBT 功率组件运行的安全性,实现对功率组件自诊断,并通过分析特征参数的衰减,实现 IGBT 功率组件寿命预测,并对失效进行预警。目前基于寿命预测与故障预警的大数据、智能化研究成为热点。通过 IGBT 功率组件大数据与智能化实现,将大大节省风机的运营及维护成本,尤其是海上风电,运维成本高是制约其大力发展的瓶颈之一。

5.2.3 积木式、集成化

随着 20 MW 及以上风电机组研究的开展,功率组件将更多采用串联与并联方式实现其功率等级的提升;基于级联式高压功率组件的快速发展,功率组件将朝着易于电气、机械与水路连接的方向发展。主电路允许其以模块的形式进行串、并联集成,而其驱动与控制集成则需确保感抗低、参数一致性好,以便实现良好的均流效果。因此,未来易拆装式电力电子积木式功率组件必然是融主电路集成、驱动控制集成为一体的高度标准化、模块化、大功率化装置,组件相互并联或通过总线简单组合将成为设计电力电子设备的一种非常简单、高效、灵活的方法^[24-26]。

随着技术的不断进步,功率组件集成化技术不断成熟,集成化可带来功率密度及性能的提升、成本的降低及体积的减小,是功率组件发展的必然趋势,如赛米控公司的 Skiip 功率组件。同时,随着集成能力与水平的不断进步,目前已经出现 IGBT 芯片内集成电流与温度的检测技术,将来甚至可以将驱动电路集成到 IGBT 芯片内。

5.2.4 其他发展方向

除了上述各种新技术外,与功率变流相关的新技术与新材料也在不断涌现,如压接式 IGBT、碳化硅(SiC)器件等。压接式 IGBT 将来可能取代大型海上风电上使用的 IGCT,实现变流器应用技术的简化及开关频率的提升;SiC 器件具有高频、耐高温和高压等特点,能有效降低电力转换时的损耗,有助于设备节能及节省设备

占地空间,已成为电力电子装置研究的重要选择^[27],将是功率组件未来发展趋势之一。

功率组件的智能化、集成化发展,不仅涉及智能控制、存储及集成封装等技术,还需有很多配套的设计、制造及实验平台,已经不是普通的变流器厂家所能拥有和掌握的,所以功率组件的设计与制造将不断朝着专业化方向发展,未来将由一些专业公司承担。同时伴随工业 4.0 与中国制造 2025 的发展目标,智能制造也是功率组件未来发展的趋势,智能制造的实现也将促进功率组件的专业化发展。专业化、智能制造将促进功率组件业务的设计资源与制造资源的集中,带来规模效益的同时,将实现产品质量与可靠性提升、生产成本降低。

6 结语

风电作为一种清洁、可再生能源,在全球新能源发电中占据了重要部分。随着风电技术发展与越来越多专业化公司加入功率组件的研发与制造,将带动组件技术的深入研究,并将逐步形成产业集群,功率组件也将成为实现智能化与工业 4.0 的最佳载体。

参考文献:

- [1] 肖宏伟. 2016 年电力形势分析与 2017 年展望[J]. 中国物价, 2017(1): 31-34.
- [2] 魏宇晨. 浅析《巴黎协议》对中国新能源发展的推动[J]. 科技经济导刊, 2016(35): 79-80.
- [3] 冯江华. 风电变流器的技术现状与发展[J]. 大功率变流技术, 2013(3): 5-11.
FENG J H. Technology Status and Development of Wind Power Converters[J]. High Power Converter Technology, 2013(3): 5-11.
- [4] RATHORE A K, HOLTZ J, BOLLER T. Synchronous Optimal Pulsewidth Modulation for Low-Switching-Frequency-Control of Medium-voltage Multilevel Inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2378-2381.
- [5] 任康乐. 中压三电平全功率风电变流器[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2016.
- [6] CHUANGPISHIT S, TABESH A, MORADI-SHARBABK Z, et al. Topology Design for Collector Systems of Offshore Wind Farms With Pure DC Power Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 320-328.
- [7] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 串并联拓扑结构风电场协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015(12): 155-162.
HUANG S, WANG H, LIAO W, et al. The Coordinated Control Strategy Based on VSC-HVDC Series-parallel Topology in Wind Farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015(12): 155-162.
- [8] 高宁, 王勇, 蔡旭. 三电平中压风电变流器的研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 39-46.
GAO N, WANG Y, CAI X. Research on Three-level Medium Voltage Wind Power Converter[J]. Power Electronics, 2011, 45(11): 39-46.
- [9] ABU-RUB H, HOLTZ J, RODRIGUEZ J, et al. Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and

Requirements in Industrial Applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (8): 2581–2596.

[10] ZHAO K, LI G Y, WANG B Z, et al. Grid-connected topology of PMSG wind power system based on VSC-HVDC [C] //International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Weihai: IEEE, 2011: 297–302.

[11] POLLER T, BASLER T, HERNES M, et al. Mechanical analysis of press-pack IGBTs [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52 (9–10): 2397–2402.

[12] 王兆安, 张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[13] 陈燕平, 忻力, 李中浩. 牵引变流器中支撑电容器研究 [J]. 铁道机车车辆, 2011(2): 76–81.

CHEN Y P, XIN L, LI Z H. Study of the DC-Link Capacitor for Traction Converter [J]. Railway Locomotive & Car, 2011(2): 76–81.

[14] 唐海燕, 唐洲. 功率变换器中直流支撑电容器的选择和应用 [J]. 大功率变流技术, 2011(6): 27–30.

TANG H Y, TANG Z. Selection and Application of DC Support Capacitor in Power Converter [J]. High Power Converter Technology, 2011(6): 27–30.

[15] GRBOVIC P J. An IGBT Gate Driver for Feed-Forward Control of Turn-on Losses and Reverse Recovery Current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 643–652.

[16] 唐开毅, 尹新, 沈征, 等. IGBT 驱动设计原理及技术比较 [J]. 电源技术, 2016(3): 693–696.

TANG K Y, YIN X, SHEN Z, et al. Design Principles and Technical Comparisons of IGBT Gate Driver [J]. Chinese Journal of Power Technology, 2016(3): 693–696.

[17] 忻兰苑, 孙康康, 龚喆, 等. 功率组件 IGBT 并联均流设计 [J]. 大功率变流技术, 2017(1): 18–23.

XIN L Y, SUN K K, GONG Z, et al. Current Balancing Design of Paralleled-IGBT in Power Assembly[J]. High Power Converter Technology, 2017(1): 18–23.

[18] FINK K, DUSTERT C, VOLKE A. An Approach to Balancing the Switching Behavior of Paralleled IGBT-Modules using a Differential-Mode Choke in a Gate-Control Loop [C] //PCIM Asia 2015, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai: Proceedings of VDE, 2015.

[19] 陈建业, 吴文伟. 大功率变流器冷却技术及其进展 [J]. 大功率变流技术, 2010 (1): 15–30.

CHEN J Y, WU W W. Cooling Technology for High Power Converter and Its Development [J]. High Power Converter Technology, 2010(1): 15–30.

[20] 孙微, 刘钧, 马翀慧, 等. IGBT 功率模块新型直接冷却技术研究 [J]. 电气传动, 2014 (1): 82–84.

SUN W, LIU J, MA C H, et al. New Direct Cooling Technology Research of IGBT Power Module [J]. Electric Drive, 2014(1): 82–84.

[21] PLUSCHKE N. 基于 SKiiP 技术的双馈异步发电机与同步发电机的比较 [J]. 电力电子, 2007 (3): 36–37.

[22] 陈明翊, 马伯乐, 陈玉其, 等. 低感母排技术在 IGBT 变流器中的应用 [J]. 大功率变流器技术, 2012 (6): 14–17.

CHEN M Y, MA B L, CHEN Y Q, et al. Application of Low Stray Inductance Bus-bar Technology in IGBT Converter [J]. High Power Converter Technology, 2012(6): 14–17.

[23] CAPONET M C, PROFUMO F, DE DONCKER R W, et al. Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronic circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (2): 225–231.

[24] 蒋云富, 黄南, 袁勇, 等. 集成式 IGBT 功率组件的现状与发展趋势 [J]. 大功率变流技术, 2015 (3): 1–5.

JIANG Y F, HUANG N, YUAN Y, et al. Status and Development Trends of Integrated IGBT Power Assembly [J]. High Power Converter Technology, 2015(3): 1–5.

[25] 厥春兰, 傅晓锦, 杨恩星, 等. 基于智能 PEBB 的风电变流器模組设计 [J]. 太阳能学报, 2016(3): 617–621.

QUE C L, FU X J, YANG E X, et al. The Design of Wind Power Converter Based on Intelligent PEBB [J]. Acta Energaie Soloaris Sinica, 2016(3): 617–621.

[26] MACKEN K J P, MACNAIR D, NGUYEN M N, et al. IGBT PEBB technology for future high energy physics machine operation applications [C] //Applied Power Electronics Conference and Exposition. USA: IEEE, 2012: 1319–1337.

[27] 李诚瞻, 常桂钦, 彭勇殿, 等. 一种低感封装的 1 200 V 碳化硅功率模块 [J]. 大功率变流技术, 2016(5): 71–74.

LI C Z, CHANG G Q, PENG Y D, et al. 1 200 V Hybrid SiC Power Module with Low Stray Inductance [J]. High Power Converter Technology, 2016(5): 71–74.

第一届中国轨道交通装备技术田心论坛在湖南株洲召开

当今时代，颠覆性黑科技层出不穷，中国轨道交通装备的发展既享受着“一带一路”政策红利，也面临着更为激烈的全球轨道交通市场的竞争。2017 年 11 月 18 日，首届中国轨道交通装备技术田心论坛（以下简称“田心论坛”）在湖南株洲召开。此次论坛由中车株洲电力机车研究所有限公司主办，清华大学、北京交通大学、西南交通大学、中南大学等高校及相关企业参会，包括原铁道部部长、中国工程院院士傅志寰在内的 30 余位轨道交通装备领域的院士、教授、专家与会，围绕轨道交通领域国内外科技发展的情况，共同研讨中国轨道交通装备技术及其前沿发展，以推动轨道交通装备产业的持续健康发展。会上，专家们还就全球科技发展、全球铁路科技发展、交通领域科技发展总体态势与轨道交通装备技术发展路径、电力电子与电气传动技术新进展及其应用、未来轨道交通技术发展等进行了精彩专题报告。