

基于 Si/WBG 混合的高性能大功率变流器综述

郑宇婷, 肖凡, 谢伟杰, 涂春鸣, 郭祺, 龙柳

(国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南省 长沙市 410082)

An Overview of Large-capacity Converters With High-performance Based on Si/WBG Hybrid Technology

ZHENG Yuting, XIAO Fan, XIE Weijie, TU Chunming, GUO Qi, LONG Liu

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University),
Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Medium & low-voltage large-capacity converters (MLCs) are the core equipment of modern energy systems. However, on the one hand, the MLC using traditional silicon (Si)-based switches is difficult to break through its physical limits. Balancing the large capacity and high-performance output is difficult. On the other hand, new wide bandgap (WBG) switches are expensive, and the current level is difficult to meet the needs of MW-class engineering applications. Applying Si/WBG hybrid technology can complement the performance of different types of power switches. A new paradigm can be provided to crack the bottleneck of balancing MLC performance and cost. This paper reviews two representatives Si/WBG hybrid application technologies, i.e., the hybrid switch and the hybrid system. The basic principles, construction methods, and applications of hybrid switches/ hybrid systems are introduced. A brief comparison between the hybrid switch and the hybrid system is illustrated. The key issues and challenges in the research and engineering applications of Si/WBG hybrid application technologies are summarized.

KEY WORDS: medium & low-voltage large-capacity converter; wide bandgap power switch; Si switch; hybrid switch; hybrid system

摘要: 中低压大功率变流器(medium & low-voltage large-capacity converter, MLC)是现代能源体系的核心装备。然而,一方面,使用传统硅基(silicon, Si)器件的 MLC 难以突破其物理极限,大容量与高性能输出难以兼顾。另一方面,新一代宽禁带(wide bandgap, WBG)器件价格高昂,且电流等级难以满足 MW 级工程应用需求。Si/WBG 混合应用技术可实现不同类型功率器件性能取长补短,为破解 MLC 性能和成本瓶颈提供范例。基于此,详细回顾了两类代表性的 Si/WBG 混合应用技术,即混合器件和混合系统。阐述了混合器件/混合系统的基本原理、构造方法以及在变流器中的

应用。在此基础上,对二者进行了简要比较,并总结了 Si/WBG 混合应用技术研究与应用中的关键问题与挑战。

关键词: 中低压大功率变流器; 宽禁带功率器件; 硅器件; 混合器件; 混合系统

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2125

0 引言

为应对化石能源过度消耗引发的环境和能源危机,推动能源电力低碳转型成为全球普遍共识和一致行动^[1-2]。能源生产清洁化和能源消费电气化是能源转型的两大重要特征。在能源生产领域,可再生能源发电和装机容量逐年攀升,预计到 2030 年全球可再生能源发电占比将达到 46%,到 2050 年将达到 71%^[3]。在能源消费领域,工业、交通与建筑等领域电能替代加速推进,低碳交通、全电机械等绿色用能新模式蓬勃发展。在能源“生产-传输-消费”全过程中,电力电子装备承担电能转换与控制等重要任务,其渗透率正不断提升,如附录图 A1(a)所示。电力电子装备技术水平的提升可推动能源结构优化与产业降碳升级,进而有力支撑以“清洁低碳、安全高效”为特征的现代能源体系的建设。

具有高性能、低成本的中低压大功率变流器(medium & low-voltage large-capacity converter, MLC)是配用电系统中应用最广泛、最具代表性的电力电子装备,如附录图 A1(b)所示。然而,功率等级的提升对系统耐流能力提出了更高要求。为此,出现了两种较为成熟的方案:1)降低器件开关频率、2)增加并联变流单元,如附录图 A2 所示。

降低开关频率能够有效减小变流器损耗,提升系统耐流能力^[4-6]。在 MLC 中,单个功率器件需承载较大电流,受功率损耗、耐流能力、散热条件的限制,功率模块开关频率通常被限制在 kHz 级,在

基金项目: 国家自然科学基金项目(重点项目)(52130704)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key program) (52130704).

极端工况下运行开关频率甚至为 500Hz。极低开关频率下变流器输出谐波含量高、电能质量低，单机大功率变流系统波形质量问题严峻，威胁系统控制性能。虽然采用复杂的调制技术可以优化波形，但对于设备整体波形质量的提升幅度有限，需进一步加大滤波参数，这显然不利于设备紧凑化设计。

多个中小功率变流单元并联运行的模式突破 MLC 开关频率限制，提供了消弭上述问题的契机^[7-9]。开关频率的提升有助于减小滤波损耗和滤波尺寸，增加系统控制带宽，降低输出电流谐波含量，如附录图 A3 所示。根据并联形式的不同，可分为同步并联变流系统与交错并联变流系统。同步并联系统通常采用宽禁带(wide bandgap, WBG)器件提高开关频率，优化波形质量。但与硅(silicon, Si)基器件相比，WBG 变流器高昂成本^[10]与低耐流能力难以满足 MW 级工程的应用需求^[11]。交错并联系统利用中等功率 Si 器件有效缓解了成本与增容之间的矛盾，但为了获得较高的等效开关频率，需要并联较多的桥臂，带来环流交互、稳定性、共模电压与中点平衡等问题，这将导致系统拓扑和控制的复杂度急剧提升。因此，无论哪种并联方式，随着变流器功率等级的不断提升，并联单元数量和成本均会骤增，拓扑结构和控制方法的复杂化会降低系统整体可靠性，阻碍 MLC 实用化进程。

附录图 A4 上半部分总结了上述现有大功率变流器技术路线的优缺点。由此可见，单一类型功率模块应用技术固有局限与变流系统性能需求之间的矛盾日益严峻，亟需探索兼顾高性能与低复杂度的新型大功率变流系统设计理论与应用方法。

器件的混合应用为突破 MLC 性能与成本之间的矛盾提供一条行之有效的途径。例如，Si 基绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)由 Si 基双极性结型晶体管(bipolar junction transistor, BJT)和 Si 基场效应晶体管(field-effect transistor, FET)混合而成，如附录图 A5 所示。Si 基 IGBT 的出现证明了功率半导体混合应用的重要研究价值。借鉴这一思路，将典型 Si 器件和新型 WBG 器件混合应用，可构成混合器件、混合拓扑或混合系统，兼顾二者优点，进而实现 MLC 性能和成本的折衷，如附录图 A4 下半部分所示。

将变流器中某些 Si 器件直接替换为 WBG 器件是最先使用的 Si/WBG 混合应用方式。在有源中性点钳位式变流器(active neutral point clamped, ANPC)、模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)等拓扑中，需要使用大量开关器

件。出于成本考虑，在这些拓扑中很难实现全 WBG 器件。但如果仅在部分有高频开关需求的支路上使用 WBG 器件，则可以在控制成本的同时提高效率 and 功率密度^[12-14]。与全 WBG 型变流器相比，基于混合支路的变流器能够以更低的配置成本实现几乎相同转换效率^[15]。

与混合支路方法不同，混合器件(混合系统)方法使用小电流 WBG 器件(由 WBG 器件构成的小容量系统)辅助大电流 Si 器件(由 Si 器件构成大容量系统)，实现两种功率器件的优势互补。在混合器件中，WBG 器件用于辅助 Si 器件实现软开关。在混合系统中，WBG 系统用于补偿谐波。

混合支路、混合器件、混合系统应用方法均已在一些常用变流器拓扑中开展了研究和应用，如表 1 所示。这 3 种混合应用均能提升变流器的整体性能，然而，混合支路方法并未提升系统耐流水平。在大功率变流器中，仍不可避免使用昂贵的大电流 WBG 器件。而混合器件/混合系统方法仅使用小电流 WBG 器件就能实现大功率高质高效变流，有望突破 MLC 实用化进程中的瓶颈问题。

表 1 Si/WBG 混合的 3 种形式
Table 1 Three forms of hybrid Si/WBG

器件	混合支路	混合器件	混合系统
Buck 变流器		[16-19]	
Boost 变流器		[12-13,20]	
双向 DC-DC 变流器			[21-23]
图腾柱无桥 PFC			[24-26]
Boost PFC			[27-28]
单相半桥变流器		[14,29-31]	[32]
单相全桥变流器		[33-37]	[38]
三相全桥/四线变流器	[39]	[40-42]	[43-46]
T 型变流器	[47-48]	[49-50]	
ANPC	[10,15,51-55]	[56]	[57-59]
MMC	[60-63]		
DAB	[64-66]	[67-68]	
其他		[69-71]	

注：PFC: Power Factor Correction, 功率因数校正器；Cascaded H-bridge, 级联 H 桥多电平变流器；DAB: Dual Active Bridge, 双有源桥变流器。

本文系统性回顾了混合器件和混合系统技术的研究进展，以期引起学术界和工业界研究人员的关注。本文其余部分安排如下：第 1 节回顾了混合器件的原理、构造和驱动方法。第 2 节介绍了混合系统的不同拓扑与基本控制策略。第 3 节分析比较了混合器件与混合系统方法的差异及优缺点。在此基础上，深入分析了 WBG/Si 混合应用技术的发展趋势和主要挑战。最后，对 WBG/Si 混合应用技术进行总结。

1 混合器件的构造及应用

功率半导体混合器件的发展历程如图1所示,功率器件的混合应用可结合不同器件的优点,为器件性能提升提供了一条新途径。为了减少开关损耗、提升效率,出现了由Si IGBT与Si基金属氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)并联构成的新型开关单元^[72]。随后,为降低Si IGBT反向恢复和导通损耗,文献[73]将碳化硅(silicon carbide, SiC)肖特基二极管作为IGBT反并联二极管。随着新材料器件的发展,WBG器件由于其导通电阻^[74]和反向恢复功耗较低,将其与Si IGBT组合构成混合器件(hybrid switch, HyS)成为研究热点,本文主要关注这种HyS。

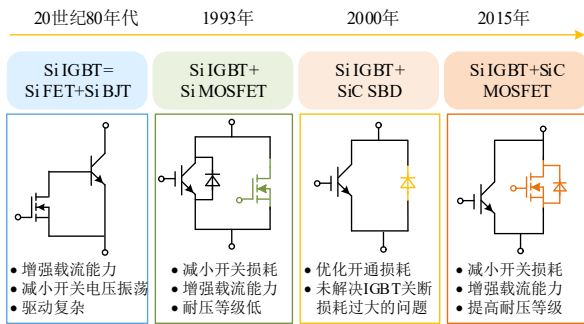


图1 功率混合器件发展历程

Fig. 1 Evolution of power hybrid switches

1.1 混合器件的基本原理与构造方式

1) 基本原理。

出于成本和性能的折衷考虑,HyS通常由大电流Si IGBT即主开关器件(main switch, MS)和小电流WBG器件即辅开关器件(slave switch, SS)组成。其中,WBG器件负责开关切换,而Si IGBT负责静态电流导通。这种组合可在不同电流等级下高开关频率工作的同时实现低损耗运行。通常,在轻载条件下,HyS中的WBG器件承载更多电流;而在重载条件下,HyS中Si IGBT承载电流更多电流。

2) 构造方式。

WBG器件与Si器件的连接方式与电流配比是HyS构造的关键环节。

在混合器件连接方式方面,现有研究大多使用分立的Si器件和WBG器件构成混合器件^[14]。这一方式具有操作简单、开发周期短等优势。然而,分立的Si器件和WBG器件之间寄生互连电感不匹配^[13],且热阻差异较大,严重制约了混合器件的性能:①寄生互连电感不匹配将导致器件错误开关,增加混合器件的开关能量损耗;②较大的寄生互连电感

会降低HyS的动态换流速度,增加WBG器件的导通损耗、降低HyS开关速度,并影响器件可靠性;③热阻不同会导致功率损耗分布不平衡,甚至会导致结温超过最大值。为了解决寄生电感引起的性能问题,通过汇流母排将WBG分立器件和Si IGBT模块连接在一起构成模块化混合桥是一种有效方案^[65]。但为了保证HyS的性能,这种方案要求汇流母排的寄生参数低。然而,目前最佳解决方案仍是将HyS封装成模块^[31,75-76]。

除连接方式以外,选择恰当的Si/WBG电流额定值比是构造混合器件的另一重要方面。将WBG器件与Si器件并联的主要目的是让WBG器件承担开关暂态,进而降低开关损耗。因此,在开关动作期间,WBG器件通常需要承担全部负载电流,这使其将受到周期性脉冲电流的压力,并产生高热通量。当使用额定电流较小的WBG时,WBG芯片面积减小,热阻增加、热容量减少。这将导致开关瞬态期间WBG最大瞬态结温峰值超过其允许值,造成器件损坏。因此,需要确定SiC/Si电流比边界点,以实现混合器件成本、损耗和可靠性之间的最佳权衡。以WBG器件最高结温作为约束,基于功率损耗分析模型^[19]或查表确定得到WBG/Si电流比范围是一种可行方案^[13,53]。该方法保证了混合器件的可靠性,可用于确定任何电压/电流等级下WBG/Si电流比。

1.2 混合器件的驱动

1.2.1 基本开关时序

开关时序对于HyS有重要影响,根据不同场景的应用需求现有研究提出6种时序,如图2所示^[16]。

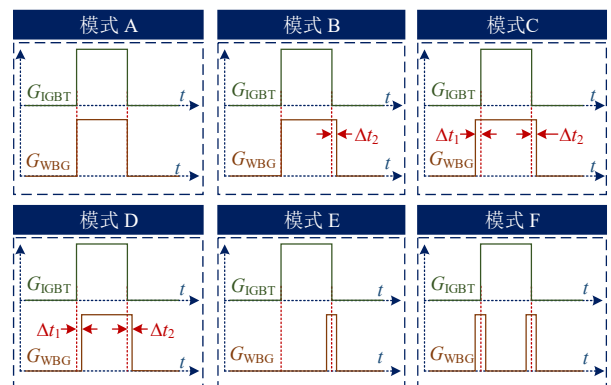


图2 HyS不同开关时序^[16]

Fig. 2 Different switching sequence for HyS^[16]

在时序A中,Si/WBG器件在同一时刻开通和关断。这一模式简单有效地降低了器件损耗^[77-78]。然而,由于Si器件拖尾电流的存在,HyS的性能优势不显著。

在时序B中,为降低Si器件拖尾电流导致的

高关断损耗, WBG 器件关断时刻相对于 Si 器件延迟了 $\Delta t_2^{[14]}$ 。因此, 在延迟时间内, Si 器件实现零电压开关(zero voltage switching, ZVS), HyS 关断损耗近似等于 WBG 器件的关断损耗。

在时序 B 的基础上, 时序 C 进一步将 Si 器件的导通时刻推迟了 Δt_1 , 实现 Si 器件零电压开通, 进一步降低了 HyS 的开通损耗。尽管时序 C 具有良好的开关性能, 但 Si 器件和 WBG 器件中寄生电感的不平衡限制了其应用。

为解决寄生电感不平衡导致的换流问题, 出现了时序 D^[79]。在时序 D 的开通过程中, 电流由 Si 器件流到 WBG 器件。对于足够大的 Si 器件而言, 额外的导通损耗不会影响其可靠性。当寄生电感不平衡超过 10nH 时, 应使用时序 D^[13]。

在时序 E 和 F 中, WBG 器件只在 Si 器件开关瞬间投入使用, 以减少 HyS 的开关损耗。这两种时序需要复杂的控制策略, 且 WBG 器件利用率低, 未充分发挥 HyS 的优势。因此, 在 6 种开关时序中, C 和 D 是较为常用的时序。

1.2.2 门极驱动策略优化

为了充分发挥 HyS 开关性能, 需要设计全面的驱动策略以减少损耗, 保证可靠性, 并提高系统过载能力。开关时序与时间延迟对于器件驱动具有重要意义, 因此主要从驱动时序优化与延迟时间优化开展驱动策略优化研究。

1) 驱动时序优化。

混合开关的运行需要综合考虑 Si 器件和 SiC 器件的开关特性。例如, WBG 的开关速度比 Si IGBT 快得多。如果不采取任何开关策略, Si IGBT 在开关中总会经历较大的关断损耗。更重要的是, 当变流器在重载/过载工况下运行时, WBG 在导通瞬间将承担所有负载电流, 带来可靠性问题。

为了解决上述问题, 基于负载电流大小设计不同的开关时序是一种有效手段^[80-82]。这种开关策略针对 3 种不同负载电流水平, 采用不同的开关模式: ①在低负载电流时, WBG 器件传输全部负载电流, Si IGBT 不动作; ②在中等负载电流下, 采用驱动模式 C, 所有开关开通和关闭动作均由 WBG 器件处理, 以实现 Si IGBT 零电压开关; ③当负载电流超过 WBG 器件的安全工作区时, Si IGBT 早开通、晚关断, 以保证器件的可靠性。在该策略中, 电流边界值根据器件额定值和热分析确定。上述策略可降低器件损耗, 保证并联器件的安全运行, 并提高 HyS 的过流能力。

2) 延迟时间优化。

由于 WBG 器件与 Si IGBT 异步工作, 开关性能受内部器件门极信号延迟时间的影响。部分文献基于仿真、双脉冲测试或开关损耗模型, 研究了门极延迟时间与 HyS 效率的关系, 得到了固定工况下开关损耗最小的最佳固定延迟时间^[12,31,42]。

上述方法主要针对 DC/DC 变流器展开研究, 其电流和器件结温都几乎是恒定的。然而, 在交流条件下, HyS 的结温和工作电流随时间变化, 其导通和开关环境变化较大。因此, 固定延迟时间难以保证 HyS 在任何电流水平下都保持较低的功率损耗。为解决上述问题, 时变延迟时间控制策略随之提出^[17,33,83]。文献[17]基于电热功率损耗模型与器件结温差动态调整门极关断延迟时间; 文献[83]基于功率损耗模型与总功率损耗最小的约束条件, 得出了最优门极关断延迟时间与工作电流之间的函数关系。为提升开关策略的适用性, 文献[33]采用粒子群优化算法, 基于变流器直流侧与输出侧参数, 确定了最佳门极关断延迟时间值, 适用于不同的变流器拓扑, 但执行负担较重。

2 混合系统的构建及控制

前述章节已经回顾了 WBG/Si 混合器件与混合支路, 然而目前混合器件商用化程度较低, 而混合支路则尚未克服 WBG 器件额定电流等级低的限制^[38]。为此, 部分文献借鉴部分功率转换技术^[84-85]和有源滤波技术^[86-87], 提出了混频变流系统(hybrid frequency converter system, HbFCS)的概念^[27-28, 43]。

2.1 基本原理与拓扑构建

2.1.1 基本原理

混频变流系统的基本思想是将变流器功率传输分为两条并行路径: 使用低成本 Si 器件的主功率处理路径以及使用高频 WBG 器件的低功率有源滤波路径^[27], 如图 3 所示。具体而言, 主单元(main unit, MU)工作在低开关频率, 处理所传输的基本负荷功率; 从单元(slave unit, SU)容量较小但功率器件开关频率较高, 用于抑制 MU 中的谐波。在混合系统中, MU 低开关频率运行提升效率, 而 SU 综合 WBG 器件优异的开关性能, 整个系统的损耗大大降低, 减小了散热器体积与滤波器尺寸。

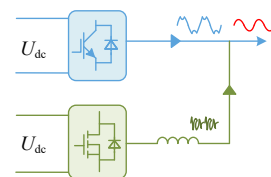


图 3 混合系统的概念

Fig. 3 Concept of hybrid system

图4将传统的全WBG(或全Si)变流器和HbFCS进行对比。传统的全WBG或全Si系统只包含一个具有单一开关频率的功率处理路径,而HbFCS将功率转换任务划分为使用Si的低频(low frequency, LF)基本功率处理路径和使用WBG器件的高频(high frequency, HF)部分功率有源滤波路径。通过功率配置,总变流器的效率和电能质量与全WBG变流器几乎相同的,但组件成本显著降低。

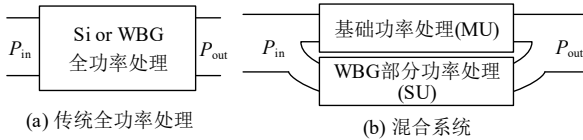


图4 混合系统与传统系统对比

Fig. 4 Comparison of hybrid system and conventional system

Si路径和WBG路径可以同时或单独运行,因此混合系统通常可以实现3种运行模式^[24],即:

1) 混合模式。MU和SU以协调方式运行, MU处理低频主功率, SU处理高频部分功率,以实现电能质量和成本的折衷。

2) WBG模式。SU可以在所选器件的安全工作范围内单独工作,在一些轻载条件下可以采用该模式,以提高效率。

3) Si模式。MU单独工作, SU不运行。低频运行会导致输出电流/电压质量差,仅用于SU发生故障时变流器的功率传输,提供容错能力。

WBG模式以及Si模式作为传统的全功率变流技术已被广泛讨论,因此不再赘述,后文主要讨论混合模式。图5显示了HbFCS功率流路径。MU输出中包括大部分负载功率和部分谐波。SU输出中包含较多的无功功率,主要用于补偿MU的谐波。SU还可以处理少量的负载功率来调整基波电压/基波电流。为了更直观地展示混合系统的特性,表2总结了MU和SU的特性。

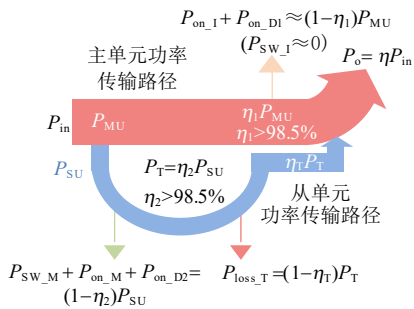


图5 功率流路径^[38]

Fig. 5 Path of the power flow^[38]

2.1.2 拓扑构建

基于MU与SU的构成形式,混合系统可划分为两种:1)由相同结构的变流单元并联构成混合

表2 MU和SU的特点
Table 2 Characteristics of MU and SU

特点	主单元(MU)	从单元(SU)
功率组成	大部分负载功率+部分谐波	少部分负载功率+谐波 (谐波含量与MU相同)
电压/电流	大部分基波 部分低次谐波	少量基波 低次谐波含量与MU相同
效率	开关频率低使得效率高	WBG器件的使用使得效率高
开关频率	1~20kHz	100kHz~1MHz
主要任务	主功率传输和功率粗调	谐波补偿、精确调节功率

系统;2)不同结构的变流单元构成混合系统。其中,由相同结构组成的混合系统又可以分为输出并联型混合系统和输出串联型混合系统。

1) 相同结构的变流单元并联构成混合系统。

传统基于单一器件半桥(half bridge, HB)电路是变流器中最基本的拓扑模块,如图6(a)所示。文献[21]提出了一种WBG/Si混合半桥(hybrid half bridge, HHB)模块,几乎可以在任何变流器设计中实现混合系统概念,其拓扑与电流波形分别如图6(b)、图6(c)所示。HHB与传统的相位交错拓扑^[7]有相似之处,但其工作原理和设计却大不相同:交错拓扑通常使用具有相同开关频率和功率水平的变流单元,而HHB则使用不同功率器件、开关频率和功率水平的变流单元。

图6(c)为HHB工作电流波形。MU采用两个大电流Si器件(S_{L1} 、 S_{L2})和一个主电感 L_1 ,传输基础功率。由于MU低开关频率运行,主电感 L_1 滤波能力有限,电感电流中的纹波含量增大,如图6(c)中的蓝色线所示。SU采用两个较小电流的WBG器件(S_{H1} 、 S_{H2})和一个小电感 L_2 。SU在高频下工作,以消除MU电流纹波并处理部分功率,如图6(c)中的绿色线所示。 L_2 中的电流纹波包含两部分:第1部分是LF纹波,其极性与MU中纹波相反进行补偿;第2部分是HF纹波,它直接决定总电流的纹波含量。总电流如图6(c)所示的灰线所示,HbFCS可显著提高电能质量并减小滤波器尺寸,同时大幅降低设备成本。

基于HHB的思想,混合Si/WBG在双向DC/DC变流器^[21-23]、混合图腾柱无桥PFC(totem pole bridgeless power factor correction, TPBPFC)^[24-26]、Boost PFC^[27-28]等变流器中进行使用,拓扑结构如图7所示。

在三相变流器方面,文献[43,88]提出了图8所示的混合系统拓扑。同样地,大容量MU工作在低开关频率下,产生所需的平均电流;而SU容量小,运行在高开关频率下,补偿MU中的电流谐波。由

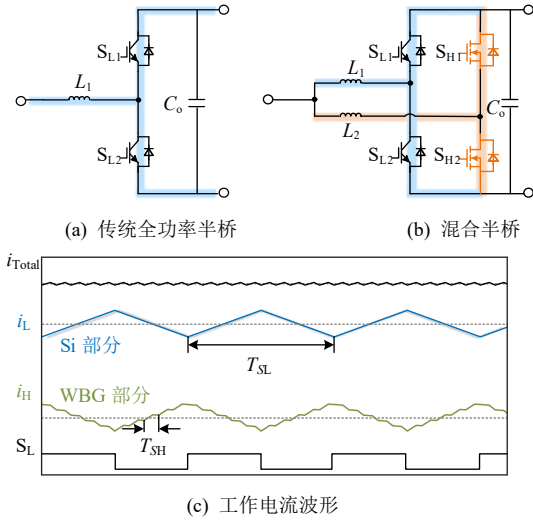
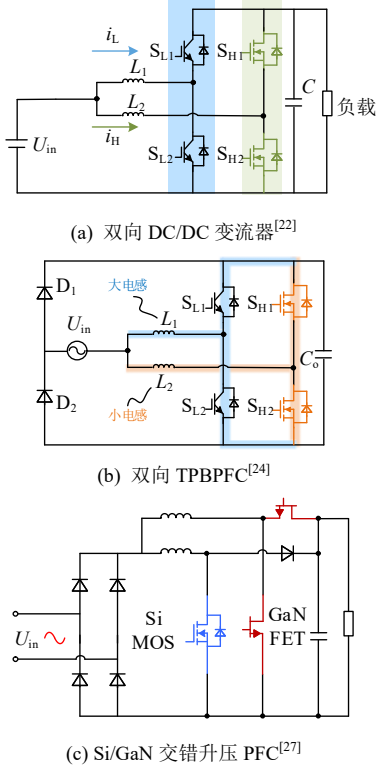
图 6 混合系统拓扑与电流波形^[21]Fig. 6 Hybrid system topology and current waveforms^[21]

图 7 混合 Si/WBG 变流器

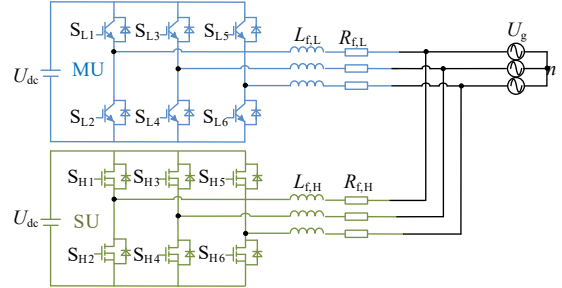
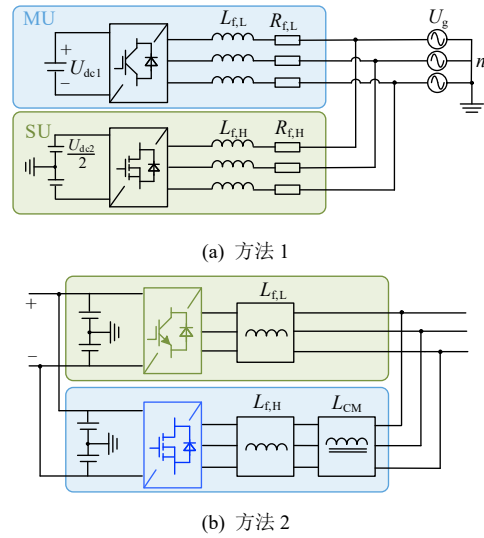
Fig. 7 Converters of hybrid Si/WBG

于两个变流器的开关动作由一个公共控制单元生成，SU 无需像有源滤波器那样估算参考信号和谐波。这种结构已应用到开式绕组内嵌式永磁同步电机的供电系统中^[89]。

然而，图 8 所示拓扑的缺点在于，由于 MU 和 SU 的直流侧不耦合，因此这种拓扑需要提供两个直流源，这增加了变流器体积和成本。为此，出现了两种解决方案：

①SU 仅处理无功功率以补偿主变流器电流的失真，其直流母线电压通过电流控制从电网获得，无需直流电源供电，如图 9(a)所示^[90]。

②两个变流单元共用一个公共直流母线，在这种结构中，SU 不仅可以处理无功功率，还具备处理部分有功功率的能力，但需要共模扼流圈或特殊控制算法来限制循环电流的大小，如图 9(b)所示^[44-46]。

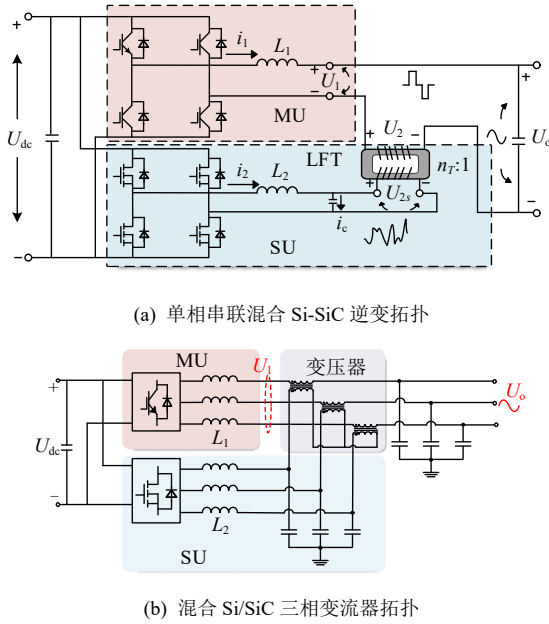
图 8 并联形式的混合系统^[43,88]Fig. 8 Hybrid system in parallel form^[43,88]图 9 混合系统直流侧解决方案^[44-46, 90]Fig. 9 Solutions for DC-side power supply in hybrid system^[44-46, 90]

2) 相同结构的变流单元串联构成混合系统。

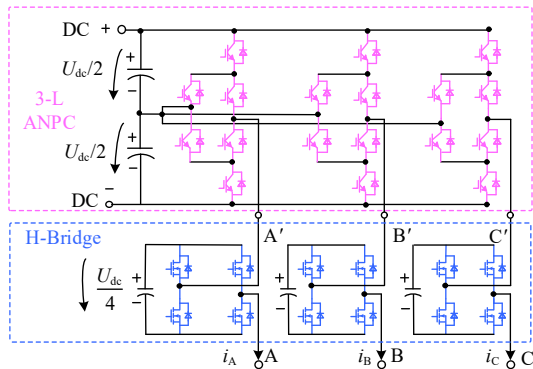
除并联结构以外，将变流单元输出侧串联也是构成 HbFCS 的主要方法。文献[38]提出了一种单相变流器结构，其中 MU 和 SU 通过工频变压器串联连接，如图 10(a)所示。与前述优化输出电流的 HbFCS 不同，该拓扑的目标是优化输出电压。MU 处理主输出功率并粗略调节电压，SU 处理部分功率并进行精确的电压调节，而变压器可降低 SU 功率等级。最终，将 MU 和 SU 电压叠加获得高品质正弦电压。随后，文献[91]将上述结构拓展至三相系统，如图 10(b)所示。

3) 不同结构的变流单元构成混合系统。

由不同结构变流单元构成的混合系统由混合多电平变流器(hybrid multilevel converters, HMC)发展而来。为了降低成本、提升变流器效率，文献[58-59]

图 10 串联形式的混合 Si/SiC DC-AC 拓扑^[38,91]Fig. 10 Hybrid Si/SiC DC-AC topologies in series form^[38,91]

提出了一种中压七电平 HMC，由三相 Si 基 ANPC 单元和级联的 SiC MOSFET H 桥单元组成，如图 11 所示。

图 11 混合 7-L 变流器的拓扑结构^[58-59]Fig. 11 Topology of the hybrid 7-L converter^[58-59]

相比于由相同结构的变流单元构成的 HbFCS，不同结构的变流单元构成的 HbFCS 需要配合复杂的调制策略使用。因此，后者在硬件拓扑和控制结构比前者复杂很多，限制其通用性和可推广性。

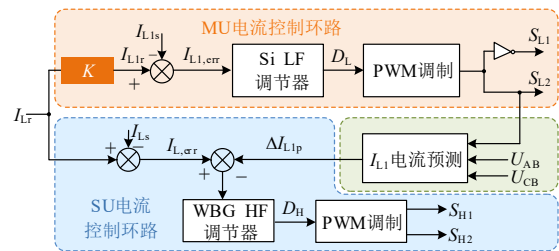
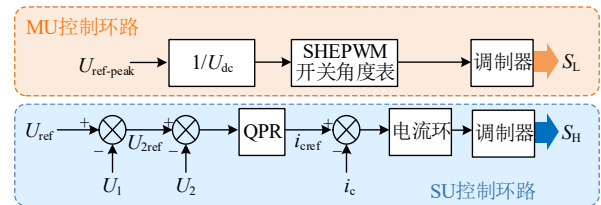
2.2 控制机制与参数设计

2.2.1 控制机制

混合系统中 MU 和 SU 之间协同运行，MU 处理大部分负载功率，而 SU 进行谐波补偿。其中，补偿对象可分为谐波电压与谐波电流。在 HbFCS 中，主从变流单元虽然开关频率不同，但其基本控制结构与传统变流器类似，包括电压电流环、调制环、功率电路等环节。通过附加补偿环节就可在原有控制结构的基础上实现谐波补偿，最大限度地提高系统兼容性。

在电流补偿控制方面，文献[21]给出一种针对图 6(b)的 HHB 混合系统的控制策略，其控制框图如图 12 所示。控制结构由 3 部分组成，分别是 MU 基本电流环、SU 补偿环和预测部分。其中 I_{Lr} 为总电流参考值，通常由外环控制获得或直接给定。调整参数 K 可以改变 MU 处理的电流，实现主从单元之间电流分配。需要注意的是，由于 MU 在每个 HF 周期内会产生变化误差，因此 $I_{Lr,cr}$ 不能直接用于生成 SU 占空比。需要利用 Si 相开关函数进行电流预测，得到 MU 电流变化值 ΔI_{L1p} ，才能精确补偿 Si 相电流。在该策略的基础上，类似的控制思路在 DC/DC 变流器^[22-23]、TPBPFC^[24-26]、Boost PFC^[27-28]之中得到应用，控制策略分别如附录图 A6(a)–(c)所示。

在电压补偿控制方面，文献[38]针对图 10(a)的单相拓扑提出了双频谐波消除调制策略，系统的控制结构如图 13 所示。其中，MU 采用开环控制，利用特定次谐波消除调制策略(selective harmonic elimination pulse width modulation, SHEPWM)去除中频谐波；SU 使用闭环控制，采用多重准比例谐振控制(quasi-proportional resonance, QPR)电压外环和电容电流内环控制，用于补偿低频谐波。随后，文献[91]将其应用于三相拓扑，并在 7.5 kW 样机上进行测试与验证。

图 12 HHB 的谐波电流补偿控制策略^[21]Fig. 12 Current compensation control strategy of HHB^[21]图 13 混合系统的谐波电压补偿控制策略^[38]Fig. 13 Voltage compensation control strategy of hybrid system^[38]

混合系统的研究尚处于初步探索阶段，现有控制策略以基本电压电流环为主，暂未考虑 PQ 控制、下垂控制、跟构网协同等复杂的控制策略。因此，在现有策略的基础上，逐步增加控制外环，开展不

同控制策略下混频系统的特性分析,是混合系统走向实用化进程的关键步骤。

2.2.2 开关频率和功率分配比优化

混合系统有 3 个关键参数:功率分配比 K 、主单元开关频率 f_L 、从单元开关频率 f_H 。其中,由于总电流纹波和电能质量仅由从单元的开关频率决定^[21,23,43],为了保证总电流电能质量以及有效的开关频率, SU 开关频率 f_H 通常是固定的。因此,主要对主从单元之间的功率分配比、主单元开关频率 f_L 进行优化设计:

1) 功率分配比 K 。决定了各变流单元处理的平均电流值。由于两个功率处理单元特性差异较大,功率分配比 K 会严重影响混合系统的总损耗。功率分配比 K 的选择需要综合考虑两个功率处理单元的损耗分布,使总损耗最小。

2) MU 开关频率 f_L 。Si 相开关频率较低,开关损耗较低,但电流纹波较大。由于 SU 必须用来抵消 MU 纹波,较大的 MU 电流纹波会同时影响 MU 和 SU 传导的均方根电流,从而进一步影响导通损耗。

综上所述,功率分配比 K 和主单元开关频率 f_L 均会影响混合系统的总损耗,同时这两个参数的取值也会相互影响。因此,正确选择开关频率和功率分配比对于 HbFCS 的效率提高和安全运行至关重要^[22]。现有多数研究仅选择了固定开关频率和功率分配比,以实验证明混合系统的电气性能优势,或者仅从离线功率损耗模型中讨论了固定的最佳参数,较少对开关频率和功率分配比开展进行动态优化设计。文献[43]中将 SiC/Si 电流分配比为固定 1:2,频率固定为 10/2kHz;文献[24-25]将混合 TPBPFC 系统开关频率固定为 20/160kHz,功率分配比虽动态变化但仅用于确保 SiC 相的安全运行,而不是针对总损耗最小化进行优化。文献[22]以 HHB 总功率损耗为优化目标,得到了不同运行工况下的最佳频率和功率分配比。虽然在一定程度上优化了开关频率和功率共享比,但优化目标单一,未开展多目标优化策略研究。

3 混合器件和混合系统的对比

由前两节的分析可知,混合器件和混合系统均能提高系统可靠性、运行效率、功率密度、电能质量和响应速度,进而实现 MLC 性能和成本的折衷,表 3 总结了两者的实现方式。

在混合方式和构造难度方面,混合器件由大电流 Si 器件和小电流 WBG 器件混合而成。简单使用

表 3 混合器件和混合系统的对比
Table 3 Comparison of hybrid switches and hybrid systems

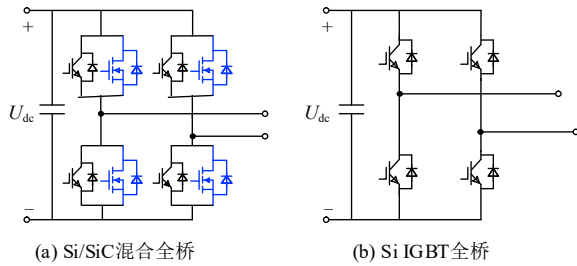
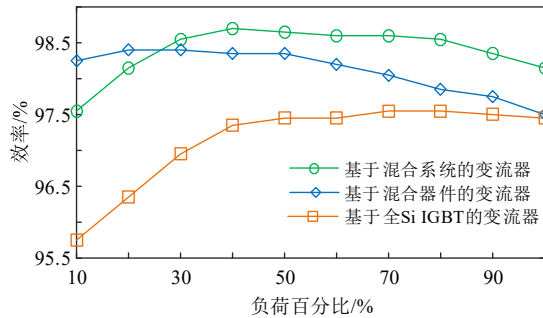
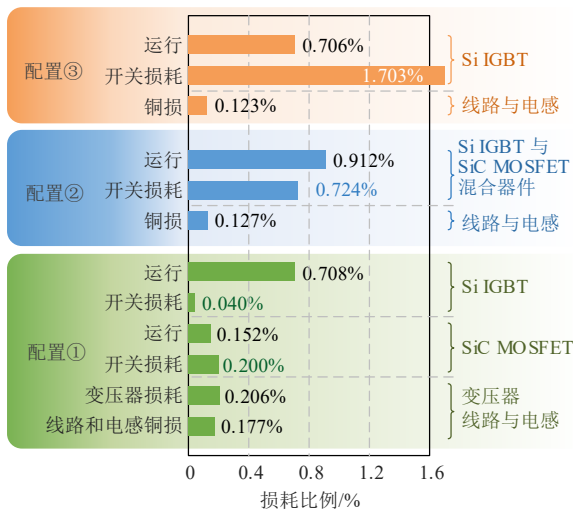
对比项目	混合器件	混合系统
应用效果	提高系统可靠性、运行效率、功率密度、电能质量和响应速度,实现性能和成本的折衷	
混合方式	大电流 Si 器件(MS)+ 小电流 WBG 器件(SS)	大容量 Si 单元(MU)+ 小容量 WBG 单元(SU)
构造难度	难	易
理论基础	软开关理论	部分功率处理理论 有源滤波理论
基本原理	SS 承担开关动作, 使得 MS 实现软开关	MU 处理基本功率, SU 处理小功率并补偿谐波
控制自由度	低	高
开关频率	WBG 器件和 Si 器件开关频率相同	WBG 器件和 Si 器件 开关频率不同

分立的 MS 和 SS 构成混合器件可能面临寄生参数过大等问题。因此,将 MS 和 SS 封装在一起构成 HyS 成为新趋势。这涉及复杂的布局和封装技术,制作工艺复杂、开发周期长。混合系统由大功率 Si 单元和小功率 WBG 单元混合而成。MU 和 SU 均可采用既有商用变流单元,其构造难度低。

在理论基础和基本原理方面,混合器件基于软开关理论,即:SS 承担开关动作,MS 实现软开关。混合系统是部分功率处理理论和有源滤波理论的结合。其中,MU 以低开关频率粗略处理大部分输入功率,SU 以高开关频率处理小部分输入功率并补偿 MU 产生的谐波。

在控制自由度方面,混合器件可以灵活调节 MS 和 SS 的电流配比。然而,在大多数情况下,MS 和 SS 的开关频率须保持一致。混合系统不仅可以调节 MU 和 SU 的电流配比,还可分别调节 MU 和 SU 的开关频率。此外,在特殊情况下,MU 和 SU 还可分别独立运行,承担不同的控制任务。因此,混合系统具有更高的控制自由度。

在效率与开关损耗方面,文献[38]对比了 3 种单相全桥变流器:HbFCS 变流器(如图 10(a)所示,以下简称配置①)、HyS 变流器(如图 14(a)所示,以下简称配置②)以及全 Si IGBT 的变流器(如图 14(b)所示,以下简称配置③)。3 种配置的变流器效率曲线如图 15 所示,对比分析可知配置①和②的效率均远高于配置③,且当负载百分比大于 30%时,配置①的效率更高。图 16 为 3 种变流器在开关频率为 20kHz、负载百分比为 50%时的损耗分布。由图可见,配置①的总开关损耗为 0.24%,远小于配置②(0.724%)和配置③(1.703%)。分析结果表明 HbFCS 变流器在大功率应用中优势明显。

图 14 Si/SiC 混合器件变流器和全 Si IGBT 变流器^[38]Fig. 14 Si/SiC HyS converter and the full Si IGBT converter^[38]图 15 开关频率为 20 kHz 时的变流器效率曲线^[38]Fig. 15 Efficiency curve of the converters when switching frequency is 20 kHz^[38]图 16 三种变流器的损耗分布^[38]Fig. 16 Loss distribution of the three converters^[38]

4 展望与挑战

Si/WBG 混合应用技术是破解 MLC 性能和成本之间矛盾的开创性技术,在推广应用环节仍存在许多挑战,值得进一步关注和突破。下面将从 Si/WBG 混合器件/混合系统的构造方法、特性分析、运行优化 3 个方面重点讨论当前研究的挑战和 Si/WBG 混合应用技术的未来趋势。

1) Si/WBG 混合器件/混合系统的构造方法。

对于混合器件,需要研发单芯片即插即用门极驱动器,并进一步研究低寄生参数、低电磁发射的混合器件封装技术。一方面,为了提升混合器件的

通用性,将其研制为通用的三端器件非常重要。同时,混合器件门极驱动还须满足低成本、低复杂度、可变门极控制实现能力等要求,以实现功率损耗降低、结温平衡、可靠性提升等多个目标之间的权衡。另一方面,基于混合器件的技术仍未成熟,仍有一些方面需要通过器件封装来解决,如内部器件之间的寄生互连电感不匹配;Si/WBG 混合器件具有更高的 EMI 值。此外,基于集成电源模块的混合封装技术的发展,也是推动混合器件工程实用化的重要方面,但这一方面尚未受到广泛关注。

对于混合系统,需要研究面向降低成本、提升性能的混合系统多目标体系化构造方法。兼顾多性能指标的异频大功率变流系统拓扑构建过程复杂,运行效率、功率密度与成本等指标的 HbFCS 混合应用机制尚不清晰,整体缺失泛化性拓扑衍化方法。面向混频大功率变流系统的电流纹波特性、电容电流有效值通用型分析模型缺失,难以指导电感电容等关键储能元件的设计,尚无针对不同场景不同需求的 HbFCS 构造体系。

2) Si/WBG 混合器件/混合系统的特性分析。

对于混合器件,需要研究异质器件功率分配与驱动时序对混合器件整体稳态、暂态特性的影响机制及刻画方法。一方面,主、辅器件功率匹配的非线性关联耦合致使混合器件稳态特性复杂。另一方面,不同时间尺度的开关过程以及驱动时序对混合器件暂态特性影响显著。因此,明晰混合器件特性是充分发挥 HyS 优势的关键。

对于混合系统,需要进行精确建模与开展多时间尺度动态特性分析。系统中存在快/慢两种时间尺度,控制环路之间耦合作用明显,且 MU-SU-电网-负载间存在多条动态交互路径,交互机理复杂。现有针对单频系统的建模方法难以直接分析混合系统动态特性。

3) Si/WBG 混合器件/混合系统的运行优化。

在运行效率优化方面,如何实现混合型 MLC 全工作域效率最优是尚待解决的难题。混频系统运行过程中面临轻/重载、电网故障、负载不平衡等多类非额定工况。MLC 可依据实际工况下的损耗分布特征自主改变功率特性进而减小开关损耗。然而,不同工作点下,混合 MLC 内部 MS/SS(MU/SU)间的分流规律呈现非线性特征。同时,系统运行损耗的影响因素多且耦合性强。因此,研究 MLC 损耗分布规律,解析运行性能指标对效率的影响规律,是 MLC 高效运行的基础。

在多工况优化运行方面,复杂工况下混合型

MLC 的运行调控策略也是未来的潜在研究方向。混合型 MLC 包含 MS/SS(MU/SU)两条功率路径,使其具有一定的冗余调控能力和过载能力。因此,MLC 在内部故障发生时可容错运行,或者在电网故障发生时实现故障穿越。然而,混合型 MLC 拓扑支路构成复杂、不同支路的耐受力差异大,增加了系统故障时可靠运行的难度。综合考虑功率器件耐压/过流等级、拓扑结构限制与控制环路动态特性约束,明确不同工况下系统调控目标与调控区间,是 MLC 优化运行的先决条件。

5 结论

以 HyS 和 HbFCS 为代表的 Si/WBG 混合应用技术有望突破 MLC 性能和成本瓶颈,是未来 MLC 的发展方向。本文概述了 HyS 和 HbFCS 的基本原理、构造方法、控制策略以及实际应用,主要结论如下:

1) Si/WBG 器件的混合应用结合了 Si 器件的大电流特性和 WBG 器件的优异开关特性,变流器有望实现高效、高可靠、高功率密度、高电能质量、快速响应、低成本等指标的兼顾和折衷。Si/WBG 混合应用技术提供了一套新的电力电子装备设计研发理念和方法,为低电流水平的 WBG 器件在 MW 级变流器中展现优异特性提供可行方案,具有广阔的应用前景。

2) 混合器件和混合系统是 Si/WBG 混合应用的两种代表性方案。在混合器件中, WBG 器件用于辅助 Si 器件实现软开关。在混合系统中, WBG 系统用于补偿 Si 系统产生的谐波。研究分析表明,基于混合器件的变流器和基于混合系统的变流器均能实现性能和成本的折衷。

3) 混合器件和混合系统的目标是以可接受的成本增加实现最大限度的性能提升。然而,混合器件和混合系统目前均处于理论研究和实验室样机研制阶段。为了推动该技术的工程实用化进程,必须重点关注和解决构造方法、特性分析和运行优化等方面的关键问题。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

[1] 张程铭, 柳璐, 程浩忠, 等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-264.
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-264(in Chinese).

[2] 周于清, 姚伟, 宗启航, 等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1091-1102.
ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1091-1102(in Chinese).

[3] IEA. World energy outlook 2022[R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2022.

[4] 王宇翔. 大容量低载波比变流器的电流环双边频域建模及优化控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

[5] SHEN Jie, SCHRÖDER S, STAGGE H, et al. Impact of modulation schemes on the power capability of high-power converters with low pulse ratios[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5696-5705.

[6] ZHANG Wenjing, SONG Zihao, YAO Wenxi, et al. Single active vector pulse width modulation with improved harmonic and dynamic performance for low-carrier ratio applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 5649-5661.

[7] ABUSARA M A, SHARKH S M. Design and control of a grid-connected interleaved inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 748-764.

[8] ZHOU Wenzhi, DIAB M, YUAN Xibo, et al. Inverter with paralleled modules to extend current capacity and combat motor overvoltage in SiC-based adjustable speed drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 4474-4484.

[9] CHEN Jianliang, SHA Deshang, ZHANG Jiankun, et al. A variable switching frequency space vector modulation technique for zero-voltage switching in two parallel interleaved three-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6388-6398.

[10] Min-Geun Song, Seok-Min Kim, Kyo-Beum Lee. Elimination of abnormal output voltage in a hybrid active NPC inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5348-5361.

[11] MILLÁN J, GODIGNON P, PERPIÑÀ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.

[12] WANG Jun, LI Zongjian, JIANG Xi, et al. Gate control optimization of Si/SiC hybrid switch for junction temperature balance and power loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1744-1754.

[13] DESHPANDE A, LUO Fang. Practical design considerations for a Si IGBT + SiC mosfet hybrid switch: parasitic interconnect influences, cost, and current ratio optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 724-737.

[14] SONG Xiaoqing, HUANG A Q, LEE M C, et al. High voltage Si/SiC hybrid switch: an ideal next step for SiC[C]/2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong: IEEE, 2015: 289-292.

[15] GUAN Qingxin, LI Chushan, ZHANG Yu, et al. An extremely high efficient three-level active neutral-point-clamped converter comprising SiC and Si Hybrid Power Stages[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8341-8352.

[16] FU Yongsheng, MA Zhengrong, REN Haipeng. A low cost compact SiC/Si hybrid switch gate driver circuit for commonly used triggering patterns[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5212-5223.

[17] LI Zongjian, WANG Jun, DENG Linfeng, et al. Active gate delay time control of Si/SiC hybrid switch for junction temperature balance over a wide power range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5354-5365.

- [18] FU Yongsheng, REN Haipeng. A novel single-gate driver circuit for SiC+Si hybrid switch with variable triggering pattern[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11953-11966.
- [19] LI Zongjian, WANG Jun, JI Bing, et al. Power loss model and device sizing optimization of Si/SiC hybrid switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8512-8523.
- [20] DESHPANDE A, NARAYANASAMY B, LUO Fang. Analysis of conducted EMI in Si IGBT+SiC MOSFET hybrid switch based converters[C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). Suntec City: IEEE, 2018: 127.
- [21] ZHANG Chao, WANG Jun, QU Kun, et al. WBG and Si hybrid half-bridge power processing toward optimal efficiency, power quality, and cost tradeoff[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6844-6856.
- [22] ZHANG Chao, YUAN Xufeng, WANG Jun, et al. Optimization of power sharing and switching frequency in Si/WBG hybrid half-bridge converters using power loss models[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2837-2849.
- [23] QU Kun, ZHANG Chao, CHEN Weibin, et al. A hybrid Si/SiC interleaved bidirectional DC-DC converter to optimal power quality, efficiency, and cost tradeoff[C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver: IEEE, 2021: 2001-2004.
- [24] ZHANG Chao, QU Kun, HU Bo, et al. A high-frequency dynamically coordinated hybrid Si/SiC interleaved CCM Totem-pole bridgeless PFC converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 2088-2100.
- [25] CHEN Weibin, ZHANG Chao, QU Kun, et al. A new hybrid Si/SiC CCM totem pole bridgeless PFC design towards optimal performance and cost tradeoff[C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver: IEEE, 2021: 2203-2207.
- [26] ZHANG Chao, XIE Xin, QU Kun, et al. A hybrid Si/SiC CCM interleaved totem-pole bridgeless PFC converter with coupled-inductor and hybrid-frequency interleaving operation[C]//2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). Shanghai, China: IEEE, 2021: 1-5.
- [27] ZHANG Chao, WANG Jun, TANG Sai, et al. A new PFC design with interleaved MHz-frequency GaN auxiliary active filter phase and low-frequency base power Si phase[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 557-566.
- [28] ZHANG Chao, YIN Xin, TANG Sai, et al. WBG partial power processing: a new PFC design with interleaved MHz-frequency GaN and low-frequency Si phases[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore: IEEE, 2019: 2702-2706.
- [29] SONG Xiaoqing, ZHANG Liqi, HUANG A Q. Three-terminal Si/SiC hybrid switch[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8867-8871.
- [30] CHEN Nan, CHIMENTO F, NAWAZ M, et al. Dynamic characterization of parallel-connected high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 539-546.
- [31] LI Lei, NING Puqi, Wen Xuhui, et al. A 1200 V/200 A half-bridge power module based on Si IGBT/SiC MOSFET hybrid switch[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2018, 3(4): 292-300.
- [32] ZHANG Chao, YUAN Xufeng, WANG Jun, et al. Adaptive power sharing and switching frequency control for power loss optimization in WBG/Si hybrid half-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 4440-4450.
- [33] PENG Zishun, WANG Jun, LIU Zeng, et al. Adaptive gate delay-time control of Si/SiC hybrid switch for efficiency improvement in inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3437-3449.
- [34] PENG Zishun, WANG Jun, LIU Zeng, et al. Fault-tolerant inverter operation based on Si/SiC hybrid switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 8(1): 545-556.
- [35] LI Zongjian, WANG Jun, HE Zhizhi, et al. Performance comparison of two hybrid Si/SiC device concepts[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 42-53.
- [36] OU Ling, PENG Zishun, LIU Zeng, et al. An EMI suppression strategy for Si/SiC hybrid switch based single-phase inverter[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit: IEEE, 2020, 3548-3551.
- [37] ZHU Liyan, BAI Hua, BROWN A, et al. Transient analysis when applying GaN+Si hybrid switching modules to a zero-voltage-switching EV onboard charger[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 146-157.
- [38] LIU Chuang, ZHUANG Kehao, PEI Zhongchen, et al. Hybrid SiC-Si DC-AC topology: SHEPWM Si-IGBT master unit handling high power integrated with partial-power SiC-MOSFET slave unit improving performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3085-3098.
- [39] CHOI J, LIM G C, HA J I. Si-IGBT/SiC-MOSFET hybrid inverter control method for reduced loss and switching ripple[C]//2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans: IEEE, 2020: 1183-1188.
- [40] FU Yongsheng, REN Haipeng. Super-twisting sliding mode control for neutral point voltage of three-phase four-wire inverter based on SiC/Si hybrid switch[J]. ISA Transactions, 2024, 144: 352-363.
- [41] TAN Changyu, STECCA M, SOEIRO T B, et al. Performance evaluation of an electric vehicle traction drive using Si/SiC hybrid switches[C]//2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Gliwice: IEEE, 2021: 278-283.
- [42] LI Lei, NING Puqi, WEN Xuhui, et al. A 30kW three-phase voltage source inverter based on the Si IGBT/SiC MOSFET hybrid switch[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim: IEEE, 2019: 1397-1401.
- [43] KUNDU A, NA R, AMIR A, et al. WBG fractional power processing: a new Si-SiC hybrid voltage source inverter design[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit: IEEE, 2020: 6226-6231.
- [44] BASURTO M, JUDGE P, MERLIN M, et al. Investigation of output filter topologies for a parallel hybrid converter based on Si-IGBTs and partially-rated SiC-MOSFETs[C]//2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Aalborg: IEEE, 2020: 1-7.
- [45] WU T F, HUANG Y H, LIU Y T. 3 Φ 4W grid-connected hybrid-frequency parallel inverter system with ripple compensation to achieve fast response and low current distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10890-10901.
- [46] WU T F, HUANG Y H, TEMIR S, et al. 3 Φ 4W hybrid frequency parallel uninterruptable power supply for reducing voltage distortion and improving dynamic response[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 906-918.
- [47] PENG Hongwu, YUAN Zhao, WOLDEGIORGIS D L, et al. Practical design and evaluation of a high-efficiency 30-kVA grid-connected PV inverter with hybrid switch structure[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit: IEEE, 2020: 3670-3676.
- [48] HE Jiangbiao, KATEBI R, WEISE N, et al. A fault-tolerant T-type

- multilevel inverter topology with increased overload capability and soft-switching characteristics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2826-2839.
- [49] WANG Ye, CHEN Min, YAN Cheng, et al. Efficiency improvement of grid inverters with hybrid devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7558-7572.
- [50] PENG Hongwu, YUAN Zhao, ZHAO Xingchen, et al. Improved space vector modulation for neutral-point balancing control in hybrid-switch-based T-Type neutral-point-clamped inverters with loss and common-mode voltage reduction[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(4): 328-338.
- [51] GUO Zhehui, LI Hui, DONG Xiaofeng. A self-voltage balanced hybrid three-level mv inverter using 3.3-kV SiC MOSFET module with false-trigger-proof design[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6854-6864.
- [52] BELKHODE S, SHUKLA A, DOOLLA S. Enhanced hybrid active-neutral-point-clamped converter with optimized loss distribution-based modulation scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3600-3612.
- [53] WOLDEGIORGIS D, WU Yuheng, WEI Yuqi, et al. A high efficiency and low cost ANPC inverter using hybrid Si/SiC switches[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 154-167.
- [54] HE Jiangbiao, ZHANG Di, PAN Di. PWM strategy for MW-scale "SiC+Si" ANPC converter in aircraft propulsion applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3077-3086.
- [55] PAN Di, ZHANG Di, HE Jiangbiao, et al. Control of MW-scale high-frequency "SiC+Si" multilevel ANPC inverter in pump-back test for aircraft hybrid-electric propulsion applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 1002-1012.
- [56] LIU Haichen, ZHAO Tiefu. Optimal gate driving strategy for Si/SiC hybrid switch-based 3L-ANPC inverter with improved output capacity [C]//2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Phoenix: IEEE, 2021: 741-746.
- [57] XU Xiaohui, LIU Nianzhou, WANG Kui, et al. Modulation and control of an ANPC/H-bridge hybrid inverter for ship electric propulsion drives[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin: IEEE, 2019: 1-5.
- [58] DIAO Fei, LI Yufei, DU Xinyuan, et al. An active hybrid modulation strategy for a Si/SiC hybrid multilevel converter[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2021, 2: 401-413.
- [59] DIAO Fei, DU Xinyuan, MA Zhuxuan, et al. A megawatt-scale Si/SiC hybrid multilevel inverter for electric aircraft propulsion applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 4095-4107.
- [60] YIN Tianxiang, LIN Lei, SHI Xiaojie, et al. A Si/SiC hybrid full-bridge submodule for modular multilevel converter with its control scheme[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 712-721.
- [61] YIN Tianxiang, LIN Lei, XU Chen, et al. A hybrid modular multilevel converter comprising SiC MOSFET and Si IGBT with its specialized modulation and voltage balancing scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11272-11282.
- [62] XU Chen, HE Jialu, LIN Lei. Research on capacitor-switching semi-full-bridge submodule of modular multilevel converter using Si-IGBT and SiC-MOSFET[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4814-4825.
- [63] YIN Tianxiang, XU Chen, LIN Lei, et al. A SiC MOSFET and Si IGBT hybrid modular multilevel converter with specialized modulation scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 12623-12628.
- [64] DONG Jiaxin, Pou J, SUN Changjiang, et al. Hybrid Si+SiC neutral-point-clamped dual-active-bridge converter for high-voltage battery energy storage systems[C]//2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia). Singapore: IEEE, 2021: 632-637.
- [65] ORTIZ G, GAMMETER C, KOLAR J W, et al. Mixed MOSFET-IGBT bridge for high-efficient medium-frequency dual-active-bridge converter in solid state transformers[C]//2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Salt Lake City: IEEE, 2013: 1-8.
- [66] CAPÓ-LLITERAS M, HEREDERO-PERIS D, DIAZ-GONZALEZ F, et al. Analytical dead-band compensation for ZCS modulation applied to hybrid Si-SiC dual active bridge[J]. IEEE Access, 2020, 8: 181577-181589.
- [67] LI Zongjian, HE Zhizhi, YU Jiajun, et al. Performance improvement of dual active bridge DC-DC converter using cost-effectiveness Si/SiC hybrid switch[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore: IEEE, 2019: 1988-1991.
- [68] WEI Lianrong, LI Zixin, XU Fei, et al. Loss optimization of series resonant dual active bridge DC-DC converter using hybrid switch [C]//45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon: IEEE, 2019: 4108-4112.
- [69] MING Lei, DING Wenlong, GAO Ziyang, et al. A SiC-Si hybrid module for direct matrix converter with mitigated current spikes[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 3805-3817.
- [70] LAI J S, YU Wensong, SUN Pengwei, et al. A hybrid-switch-based soft-switching inverter for ultrahigh-efficiency traction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1966-1973.
- [71] SUN Pengwei, LAI J S, LIU Chuang, et al. A 55-kW three-phase inverter based on hybrid-switch soft-switching modules for high-temperature hybrid electric vehicle drive application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 962-969.
- [72] JIANG Yimin, HUA Guichao, Eric Yang, Fred C. Lee. Soft-switching of IGBTs with the help of MOSFETs in bridge-type converters[C]//Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference-PESC'93. Seattle: IEEE, 1993: 151-157.
- [73] JOHNSON C M, RAHIMO M, WRIGHT N G, et al. Characterisation of 4H-SiC Schottky diodes for IGBT applications[C]//Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Rome: IEEE, 2000: 2941-2947.
- [74] LIANG Y C, ORUGANTI R, OH T B. Design considerations of power MOSFET for high frequency synchronous rectification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(3): 388-395.
- [75] WOLDEGIORGIS D, HOSSAIN M M, SAADATIZADEH Z, et al. Hybrid Si/SiC switches: a review of control objectives, gate driving approaches and packaging solutions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 1737-1753.
- [76] LI Daohui, LI Xiang, CHANG Guiqin, et al. Characterization of a 3.3-kV Si-SiC hybrid power module in half-bridge topology for traction inverter application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13429-13440.
- [77] ZHANG Lei, YUAN Xibo, WU Xiaojie, et al. Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1181-1196.

- [78] FUENTES C D, KOURO S, BERNET S. Comparison of 1700-V SiC-MOSFET and Si-IGBT modules under identical test setup conditions [J]. IEEE Transactions On Industry Applications, 2019, 55(6): 7765-7775.
- [79] WANG Jun, JIANG Xi, LI Zongjian, et al. Short-circuit ruggedness and failure mechanisms of Si/SiC hybrid switch[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2771-2780.
- [80] PENG Zishun, WANG Jun, LIU Zeng, et al. A variable-frequency current-dependent switching strategy to improve tradeoff between efficiency and SiC MOSFET overcurrent stress in Si/SiC-hybrid-switch-based inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4877-4886.
- [81] LIU Zeng, PENG Zishun, PENG Xiaogui, et al. Current-dependent variable switching strategy for Si/SiC hybrid switch-based single-phase inverter[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore: IEEE, 2019: 1922-1925.
- [82] HE Jiangbiao, KATEBI R, WEISE N. A current-dependent switching strategy for Si/SiC hybrid switch-based power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8344-8352.
- [83] LI Zongjian, ZHANG Chao, YU Jiajun, et al. Dynamic gate delay time control of Si/SiC hybrid switch for loss minimization in voltage source inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4160-4170.
- [84] JEONG H, LEE H, LIU Yuchen, et al. Review of differential power processing converter techniques for photovoltaic applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 351-360.
- [85] KASPER M, BORTIS D, KOLAR J W. Classification and comparative evaluation of PV panel-integrated DC-DC Converter concepts[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2511-2526.
- [86] BUTICCHI G, BARATER D, CONCARI C, et al. Single-phase series active power filter with transformer-coupled matrix converter[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(6): 1279-1289.
- [87] MONTERO M I M, CADAVAL E R, GONZALEZ F B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 229-236.
- [88] WU T F, SAKAVOV T, HUNG C C, et al. 3P3W grid-connected hybrid-frequency parallel inverter system with wireless synchronization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 14930-14941.
- [89] MATSUMORI H, KOSAKA T, MATSUI N, et al. Alternative PWM switching strategy implementation for a dual inverter fed open winding motor drive system for an electric vehicle application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(5): 5957-5970.
- [90] ISEN E, BAKAN A F. Highly efficient three-phase grid-connected parallel inverter system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 1079-1089.
- [91] YU Qin Hai, LIU Chuang, LI Ruifeng, et al. Input-parallel output-series Si-SiC hybrid inverter with fractional harmonic elimination[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1375888.



郑宇婷

在线出版日期: 2025-01-22。

收稿日期: 2024-12-05。

作者简介:

郑宇婷(1999), 女, 博士研究生, 研究方向为新能源电力电子发电装备建模与控制, E-mail: yt0107yt@hnu.edu.cn;

肖凡(1988), 男, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: woliao123@126.com;

谢伟杰(1995), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源电力电子发电装备建模与控制, E-mail: vijayxie@126.com。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

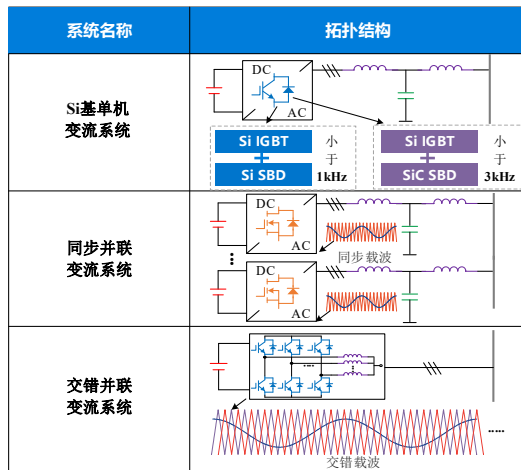
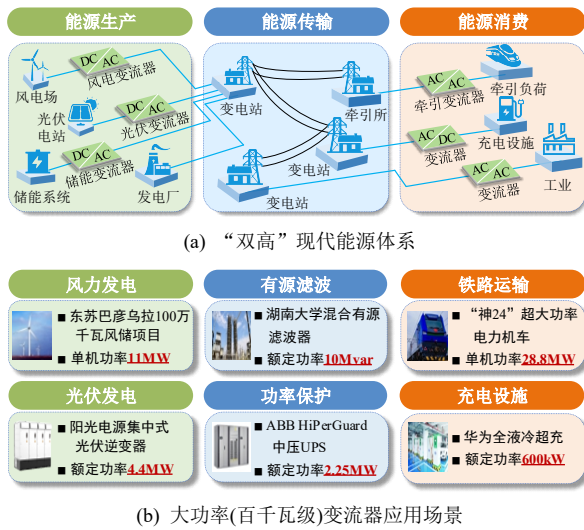
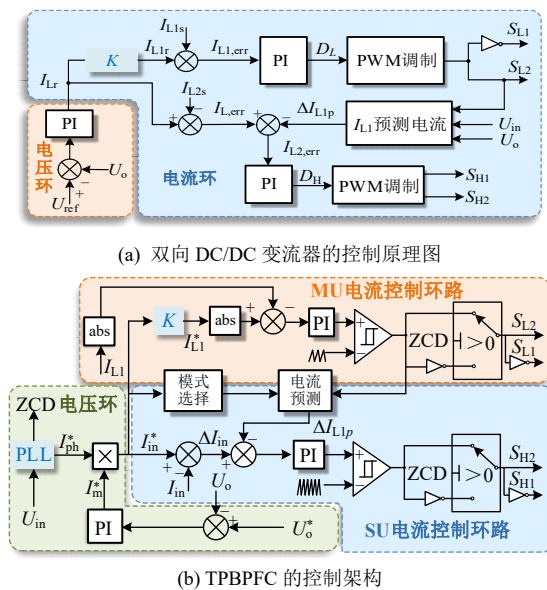
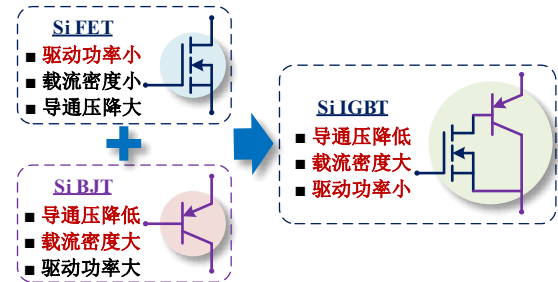
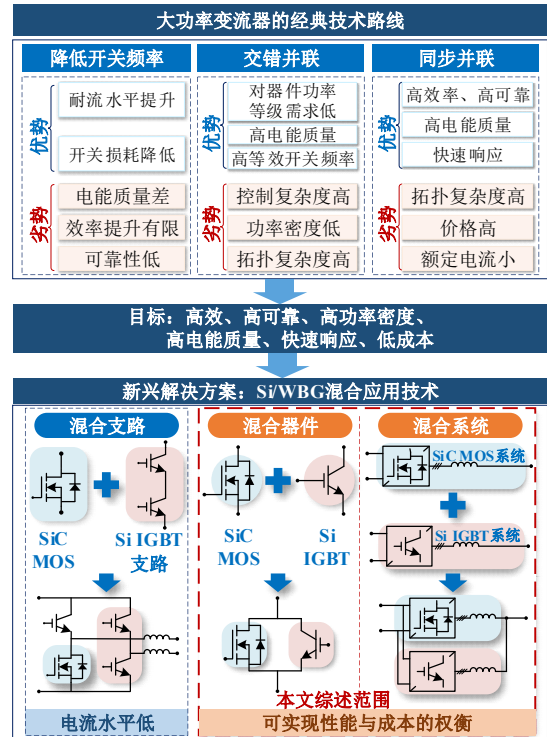
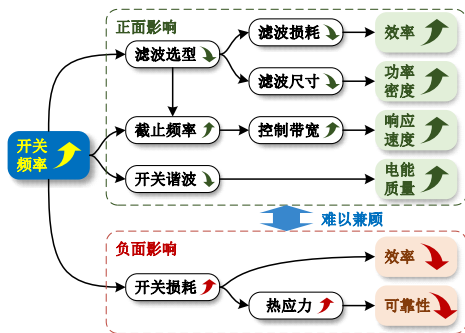


图 A2 传统典型 MLC 拓扑结构
Fig. A2 Conventional typical topologies of MLC



(c) Boost PFC 系统控制框图

图 A6 混合变流器控制原理

Fig. A6 Control schematic diagrams of hybrid converters

