

三安碳化硅器件在组串式光伏逆变器中的应用优势

SiC SBD 与 SiC MOSFET 协同优势分析

AN2025-D01 产品简介

作者：三安半导体 应用工程师 陈赣、姚晨、乐林红

Boost 电路在光伏发电、功率因数校正、UPS 电源等场合下具有广泛的应用。针对光伏发电领域，组串式逆变器对功率密度与效率需求的持续攀升，三安半导体推出的新型第三代半导体功率器件 1200V/40mΩ SiC MOSFET (AMS120040M2)，最大导通电流达 48A，具有高阻断电压、低导通电阻、高开关速度、低电容、低热阻的特性，同时该器件具有极低的开关损耗以及出色的雪崩可靠性；推动光伏系统产品往高效率、高功率密度、高可靠性、高电能质量方向发展。

本文根据产品实测数据，详细对比分析了三安 SiC 器件相较于友商 SiC 器件以及 Si 器件在功率等级最大为 10kW 的 1000V 光伏系统中的性能表现。如表 1 所示，主动开关器件为 Sanan 1200V/40mΩ SiC MOSFET (AMS120040M2) 与友商 A 1200V/40mΩ SiC MOSFET 以及友商 B 1200V/75A Si IGBT，封装型式均为 TO247-4L；二极管器件为 Sanan Gen5 1200V/20A SiC SBD (SDS120J020H5) 与友商 B 1200V/30A Si FRD，封装均为 TO247-2L。

表 1 本文对比分析所采用的规格与试验组合

Test group	Active switching device (TO247-4L)	Boost diode (TO247-2L)	Switching frequency
1	Sanan SiC MOSFET AMS120040M2	Sanan SiC SBD SDS120J020H5	20 kHz 40 kHz 60 kHz
2	Comp.A SiC MOSFET 1200V/40mΩ	Sanan SiC SBD SDS120J020H5	40 kHz
3	Comp.B Si IGBT 1200V/75A	Sanan SiC SBD SDS120J020H5	20 kHz
4	Comp.B Si IGBT 1200V/75A	Comp.B Si FRD 1200V/30A	20 kHz



图 1 为测试所用 Boost 电路拓扑。

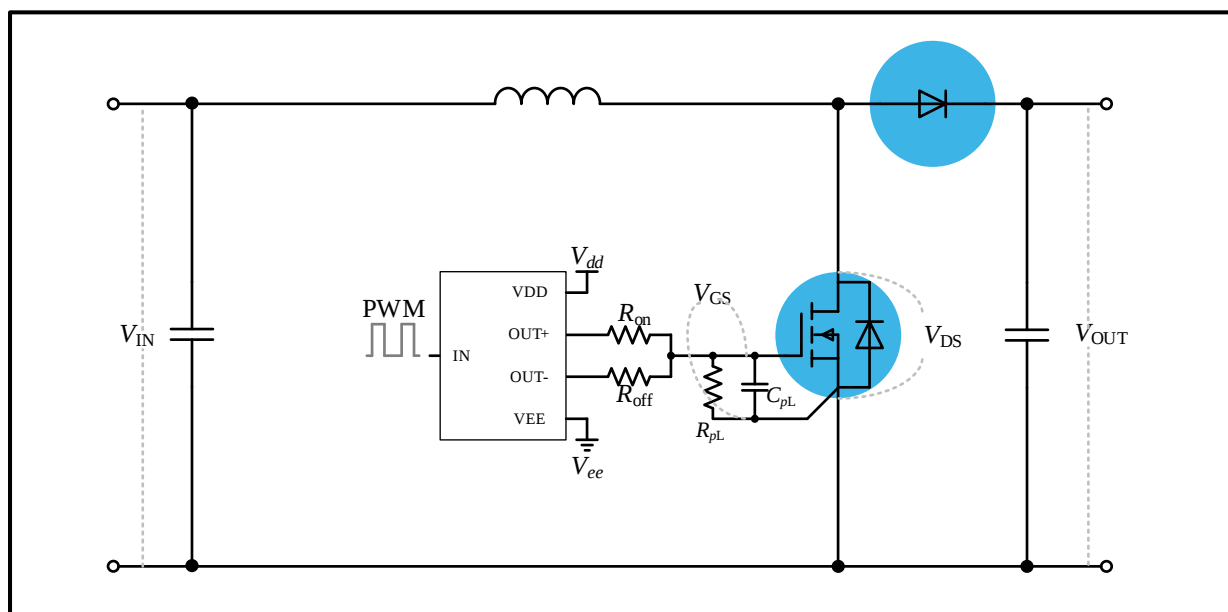


图 1 Boost 电路拓扑

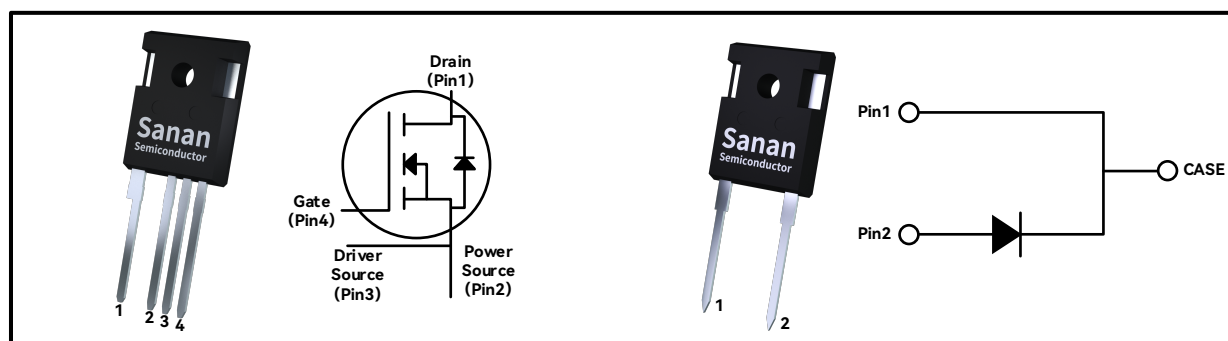


图 2 1200V/40mΩ SiC MOSFET (AMS120040M2) 与 1200V/20A SiC SBD (SDS120J020H5)

一、Sanan 功率器件在 Boost 电路中的性能表现

本节测试为实验组一，开关器件选择 Sanan AMS120040M2，二极管器件选择 Sanan SDS120J020H5；直流电压输入 $V_{IN}=350V$ ，输出电压 $V_{OUT}=650V$ ，电感 L 为 Boost 专用的铁硅铝磁芯电感，感值为 $390\mu H$ ，栅极电压 $V_{GS}=+18V/-5V$ ，栅极电阻 $R_{on}=R_{off}=2.4\Omega$ ，环境温度 $T_a=22^\circ C$ ，输出功率 $P_{OUT}=4kW$ 、 $6kW$ 、 $8kW$ 和 $10kW$ ，SiC MOSFET 工作频率 $f=20kHz$ 、 $40kHz$ 和 $60kHz$ ；改变输出功率与工作频率，评估三安碳化硅功率器件在不同工况下的性能表现。

图 3 为工作频率 $40kHz$ ，满载输出 $10kW$ 的实际工作波形。图中 CH1(棕色)为 SiC MOSFET 的 V_{GS} 电压，CH2(浅蓝色)为 SiC MOSFET 的 V_{DS} 电压，CH3(红色)为 SiC MOSFET 的 I_{DS} 电流，CH4(绿色)为输入电压 V_{IN} ，CH5(橙色)为输出电压 V_{OUT} ，CH6(深蓝色)为电感电流 I_L 。波形上显示，开通时间 $32ns$ ，关断时间 $35ns$ ，器件具有较为优秀的开关表现。



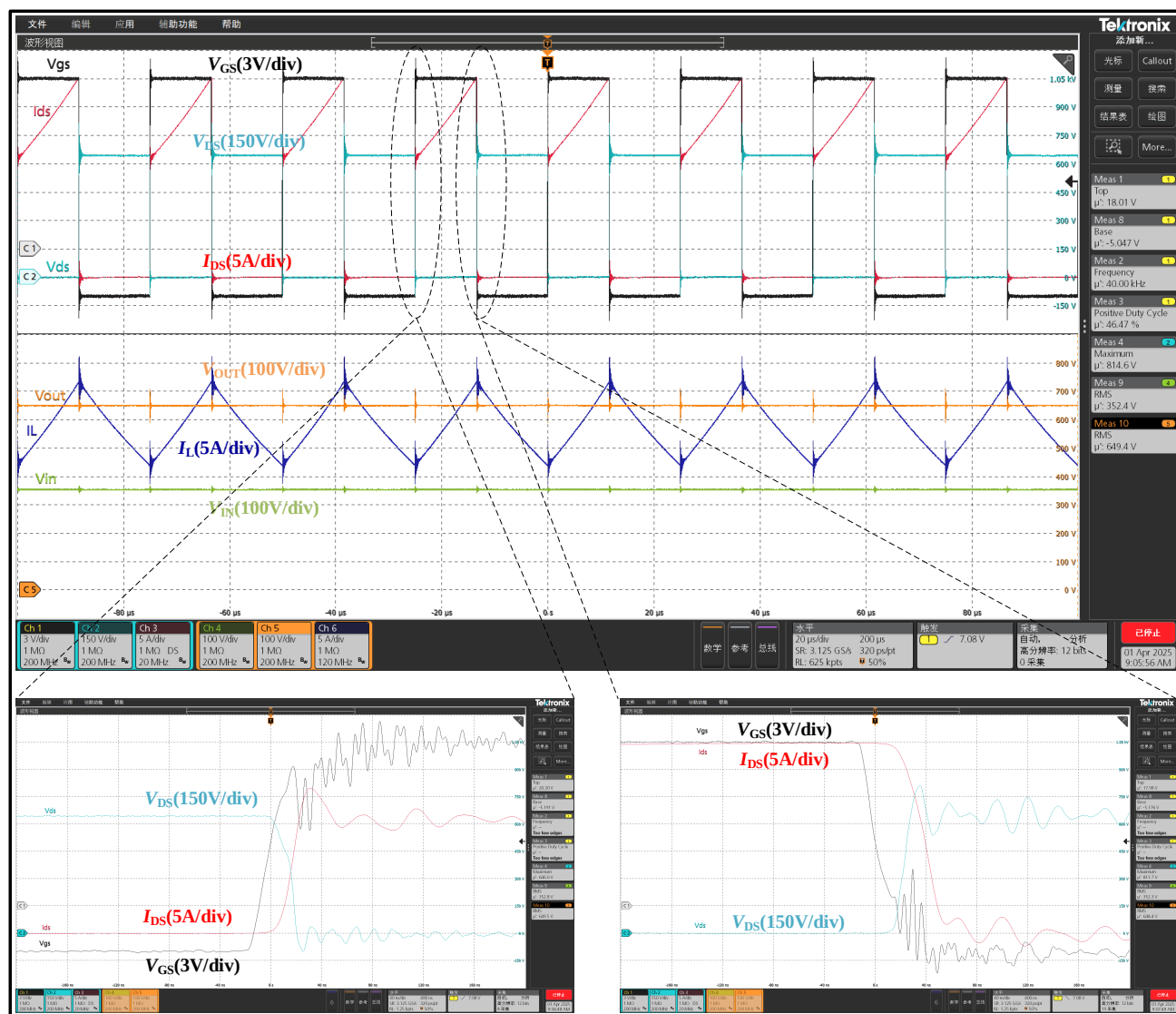


图3 工作频率 40kHz, 满载输出 10kW 的工作波形

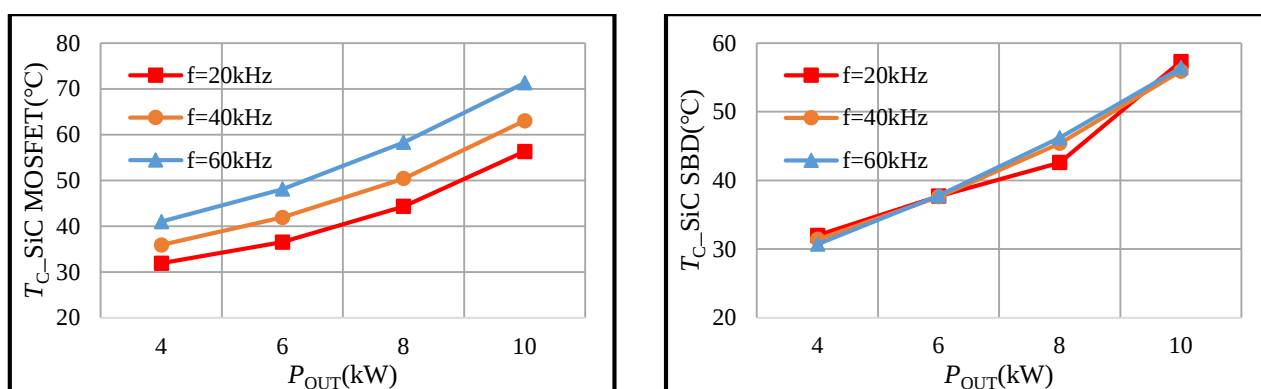


图4 不同频率下, 不同输出功率对应的 SiC MOSFET (左) 与 SiC SBD (右) 温升曲线

上图4所示为20kHz、40kHz与60kHz工作频率下, SiC MOSFET与SiC SBD不同功率下的温升曲线, 其中本文所述的 T_C 为器件塑封面表面最高温度。随着输出功率的增大, SiC MOSFET与SiC SBD的温度也在逐步上升; 如下图5所示, 在工作频率60kHz, 满载输出10kW



稳定运行下, SiC MOSFET 表面最大温度为 71.3°C , SiC SBD 表面最大温度为 56.4°C , 温升表现十分优秀。

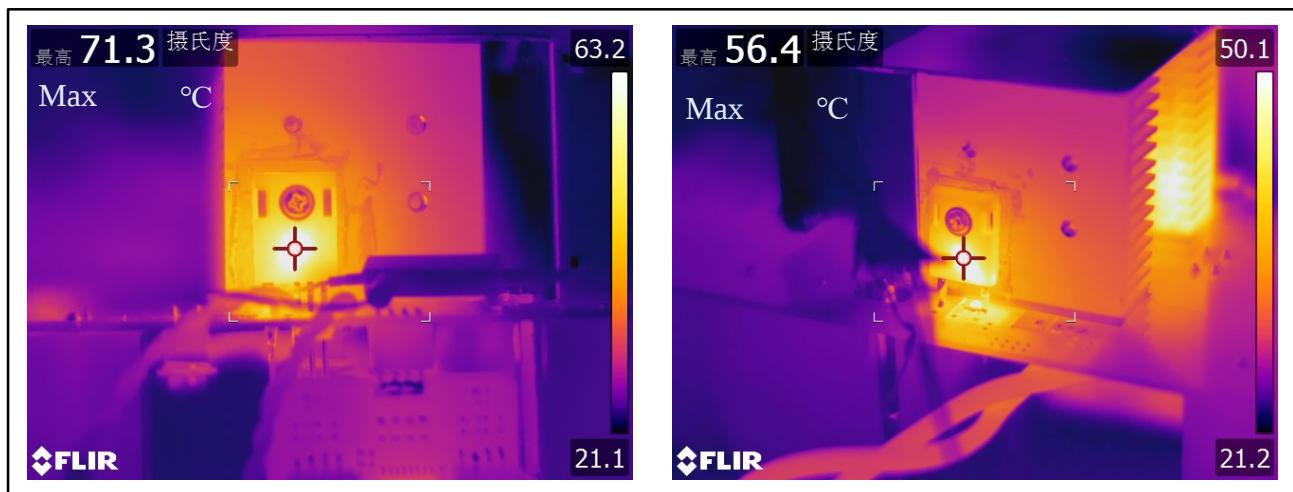


图 5 工作频率 60kHz, 满载输出 10kW 时的 SiC 功率器件温度 (左 SiC MOSFET; 右: SiC SBD)

下图 6 为不同频率下, 不同输出功率对应的效率曲线, 整机效率均在 98.6% 以上; 开关频率从 20kHz 到 60kHz, 随着开关频率的增大, 整机效率随之升高; 效率与输出功率的曲线呈现先增大后减小的趋势, 在 6kW 时效率达到最大值。

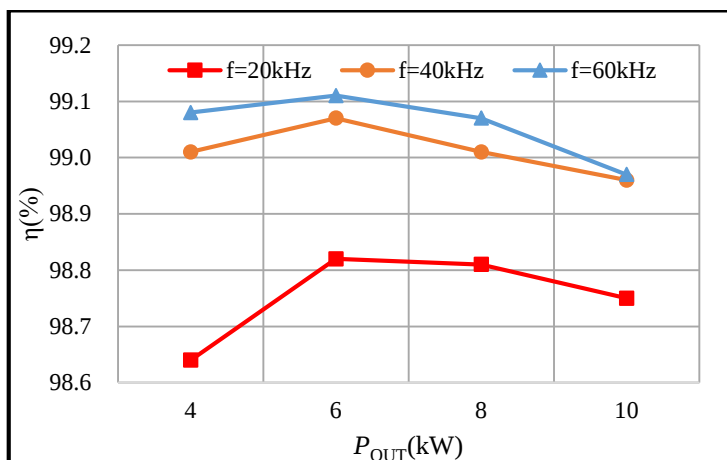


图 6 不同频率下, 不同输出功率对应的效率曲线

二、Comp.A 1200V/40mΩ SiC MOSFET 在 Boost 电路中的性能表现

本节测试为实验组二, 主动开关器件选择 Comp.A 1200V/40mΩ SiC MOSFET, 二极管器件选择 Sanan SDS120J020H5; 实验条件与实验组一设置一致, SiC MOSFET 工作频率 $f=40\text{kHz}$, 输出功率 $P_{OUT}=4\text{kW}$ 、 6kW 、 8kW 和 10kW ; 通过测试器件温升与整机效率, 对比 Sanan SiC MOSFET 与 Comp.A SiC MOSFET 在 Boost 电路中的性能表现。

下图 7 为 Comp.A SiC MOSFET 与 AMS120040M2 在 $f=40\text{kHz}$ 工况下对应的不同输出功率的温度曲线 (左) 与整机效率曲线 (右); 从整机效率来看, Comp.A SiC MOSFET 和



AMS120040M2 有着相似的表现, 即效率与输出功率的曲线呈现先增大后减小的趋势, 在 6kW 时效率达到最大值, 同时两组的效率差距比较小, 差值在 0.05% 以内; 虽然整机效率基本一致, 但是温度曲线来看, AMS120040M2 对比 Comp.A SiC MOSFET 有着明显的优势, 在满载 10kW 下, AMS120040M2 器件表面温度比 Comp.A SiC MOSFET 低 8.6°C, 这是因为 AMS120040M2 的 $R_{th(j-c)}$ 为 0.52°C/W, 明显低于 Comp.A SiC MOSFET 的 $R_{th(j-c)}$ 为 0.65°C/W, 这意味着 AMS120040M2 可以在环温更严苛的工况下运行。

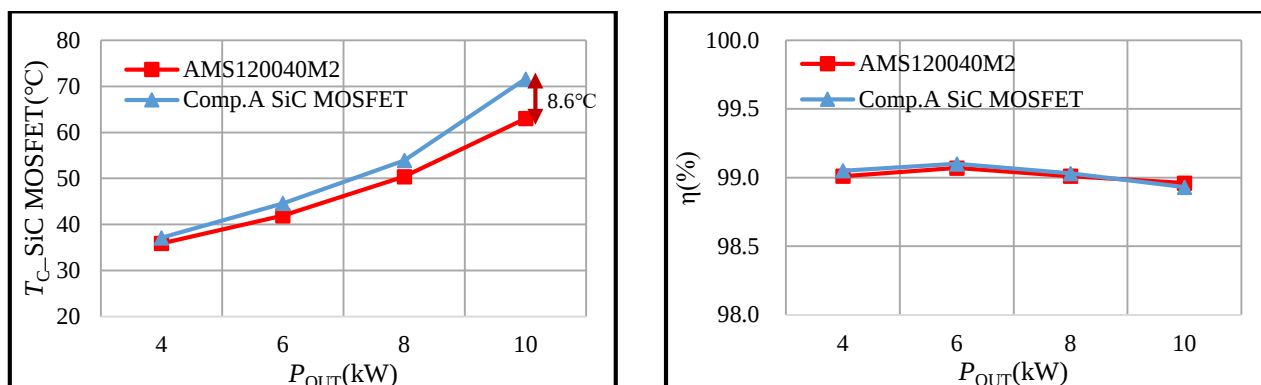


图 7 Sanan 与 Comp.A SiC MOSFET 40kHz 工况下不同输出功率对应的温度曲线 (左) 与效率曲线 (右)

三、SiC 相对于 Si 器件在 Boost 电路中的性能优势对比

本节测试为实验组三与四, 目的为对比 Si 器件与 SiC 器件在 Boost 电路中的性能表现。其中实验组三为 SiC/Si 混合使用, 开关器件选择 Comp.B 1200V/75A Si IGBT, 二极管器件选择 Sanan SDS120J020H5; 实验组四为全 Si 器件, 开关器件依旧选择 Comp.B Si IGBT, 二极管器件改为 Comp.B 1200V/30A Si FRD; 实验条件与实验组一保持一致, 由于 Si IGBT 器件在关断时存在明显的电流拖尾效应, 实测开通时长约为 76ns, 关断时长更是达到了 240ns 以上, 损耗相较于 SiC MOSFET 较高, 由于温度的限制, Si IGBT 在本测试装置中仅能承受的开关频率为 $f=20\text{kHz}$, 故与实验组一中 20kHz 工况下的数据进行对比。

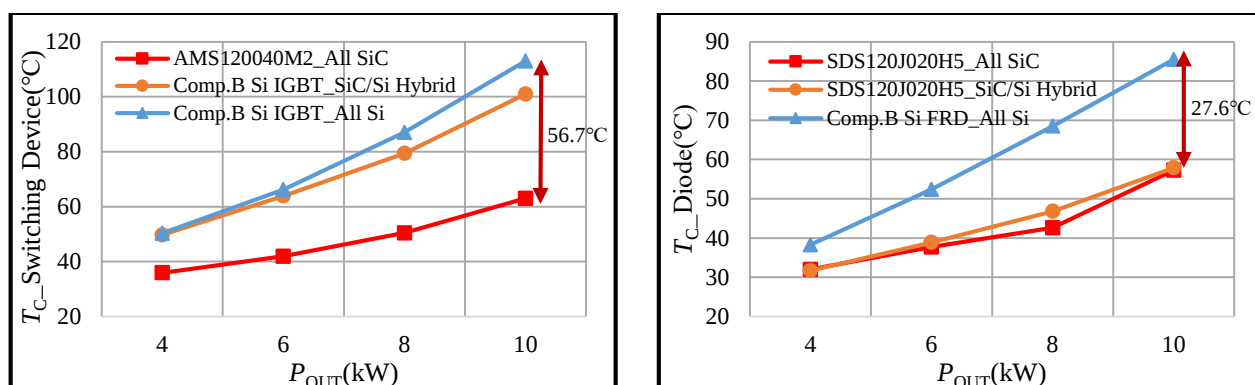


图 8 全 SiC、SiC/Si 混合、全 Si 20kHz 工况下不同输出功率对应的温度曲线

上图 8 为全 SiC、SiC/Si 混合、全 Si 在 20kHz 工况下开关器件 (左) 和二极管器件 (右) 不同输出功率对应的温度曲线; 其中全 SiC 为实验组一 $f=20\text{kHz}$ 测试数据, 开关器件为



AMS120040M2, 二极管为 SDS120J020H5; SiC/Si 混合为实验组三; 全 Si 为实验组四。图中可以看出, 全功率等级下, 温度方面, SiC 器件对比 Si 器件有着明显的优势, SiC/Si 混合工况下, Comp.B Si IGBT 在 $P_{OUT}=10\text{kW}$ 稳定运行时, 器件表面温度高达 101°C , 全 Si 工况下, Comp.B Si IGBT 在 10kW 稳定运行时的表面温度更是高达 113°C , 远超全 SiC 工况下 AMS120040M2 的 56.3°C ; 同时二极管器件 SiC SBD 对比 Si FRD 也有着明显的优势, 10kW 满载工况下, Comp.B Si FRD 温度高达 85.5°C , 远超同样条件下的 SDS120J020H5 57.9°C 。

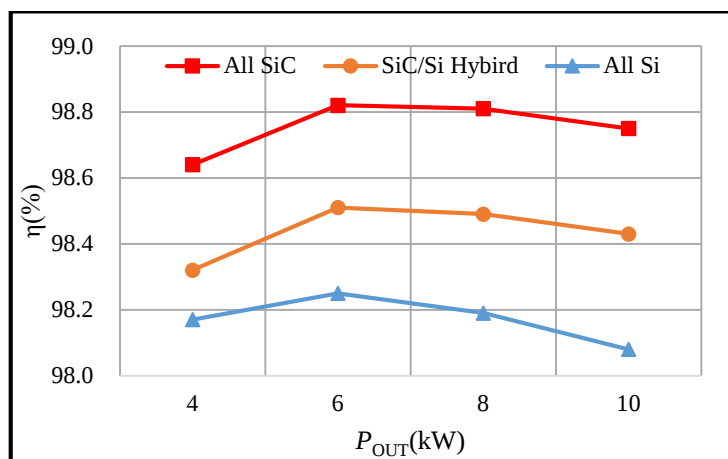


图 9 全 SiC、SiC/Si 混合、全 Si 20kHz 工况下不同输出功率对应的效率曲线

上图 9 为全 SiC、SiC/Si 混合、全 Si 20kHz 工况下不同输出功率对应的效率曲线, 从整机效率来看, 10kW 满载工况下, 全 SiC 工况比 SiC/Si 混和工况效率高 0.32% , 这两个工况下, 二极管器件均为 SDS120J020H5, 且温度基本一致, 说明该条件下, $1200\text{V}/75\text{A}$ Si IGBT 的损耗比 AMS120040M2 损耗高 32W 左右。同理, 满载时 SiC/Si 混合工况比全 Si 工况效率高 0.25% , 这两个工况下, 开关器件均为 $1200\text{V}/75\text{A}$ Si IGBT, 前者 IGBT 温度低约 10°C , 说明该条件下, $1200\text{V}/30\text{A}$ Si FRD 的损耗比 SDS120J020H5 损耗高约 20W 左右。

四、总结

本文测试了 Sanan $1200\text{V}/40\text{m}\Omega$ SiC MOSFET 与 $1200\text{V}/20\text{A}$ SiC SBD 在 Boost 中不同工况下的性能表现, 器件均表现良好; 同时对比了 Comp.A $1200\text{V}/40\text{m}\Omega$ SiC MOSFET 在该电路下的性能, 效率方面两者相差较小, 温升方面 Sanan SiC MOSFET 比 Comp.A 具有一定的优势; 此外还对比了传统 Si 器件在 Boost 应用中的性能表现, 实验结果表明 SiC 器件对比 Si 器件在温升和效率方面都有着很大的优势。

三安半导体在 SiC 功率器件的技术革新上深耕研发, 不断迭代优化器件性能, 致力于提供满足客户各类需求的优质产品。三安半导体 AMS120040M2 与 SDS120J020H5 的优异性能将助力 SiC 器件在光伏发电领域的大规模应用。

