



团 体 标 准

T/CASAS 063—2026

SiC MOSFET 功率模块有功对拖测试方法

Active power testing method for silicon carbide metal oxide
semiconductor filed effect transistors (SiC MOSFET) power module for
EV main-inverter and PV & Wind power conversion system

2026 - 06 - 30 发布

2026 - 06 - 30 实施

目 次

前言..... II

引言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 原理..... 2

5 测试条件..... 3

6 仪器设备..... 3

7 样品..... 3

8 测试步骤..... 3

 8.1 测试系统控制框图..... 3

 8.2 测试流程图..... 4

 8.3 测试项目设置..... 5

9 测试数据处理..... 6

 9.1 测试数据记录..... 6

 9.2 测试数据分析..... 6

10 失效判据..... 6

11 测试报告..... 6

参考文献..... 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归CASA所有，未经CASA许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经CASA允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件主要起草单位：忱芯科技(上海)有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、广电计量检测集团股份有限公司、安徽长飞先进半导体股份有限公司、深圳平湖实验室、国网上海市电力公司电力科学研究院、西安交通大学、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：毛赛君、高俊、陈媛、李汝冠、陆月明、肖磊、徐新兵、陈哲、周行星、杨奉涛、王来利、高伟。

引 言

近年来，随着新能源发电、电动汽车以及智能电网等新兴应用快速发展，对电力电子装置的效率和应用环境提出了更为严苛的要求。以SiC MOSFET为代表的第三代宽禁带半导体器件突破了传统Si器件的材料性能限制，具有高开关速度、低导通损耗、耐高温等性能优点，满足了新能源发电、电动汽车等新一代电力电子应用对功率器件的需求，市场应用前景广阔。

由于SiC MOSFET在其材料特性、低开关损耗、更高的功率密度、更高的系统效率、可靠性及全生命周期成本的综合优势，新能源主驱逆变器与光伏储能风电变流器已经开始批量采用SiC MOSFET功率模块逐步取代传统IGBT功率模块。功率模块作为新能源主驱逆变器和光伏储能风电变流器最核心的功率部件，其电热特性以及可靠性直接影响逆变器系统的可靠性和性能。新能源主驱逆变器主要采用两电平SiC MOSFET功率模块，光伏储能风电变流器主要采用三电平SiC MOSFET功率模块。传统的电驱动测试台架虽然可以模拟实际电机工况，但是设备巨大，测试复杂；传统的双脉冲+短路+静态测试虽然能够完全表征器件的参数，但是无法模拟实际工况。

随着中国功率半导体产业国产化的提高，在功率半导体测试领域，SiC MOSFET功率模块的有功对拖测试可以进行以实际应用工况为导向的老化特性测试以及可靠性测试，验证SiC MOSFET功率模块在不同应用工况下的可靠性。SiC MOSFET功率模块的有功对拖测试可以实现功率因数从-1~+1的满电压满电流满功率全工况测试，模拟新能源主驱逆变器与光伏储能风电变流器的实际应用，提升SiC MOSFET功率模块可靠性。此测试方法是中国产业化的全新测试项目，鉴于此，我们提出也要制定中国产业自己的标准。

SiC MOSFET 功率模块有功对拖测试方法

1 范围

本文件描述了新能源主驱逆变器采用的两电平SiC MOSFET功率模块、光伏储能风电变流器采用的三电平SiC MOSFET功率模块有功对拖测试方法，包括：试验装置、试验程序以及失效判据。

本文件适用于Si IGBT模块的有功对拖输出测试。

本文件适用于SiC MOSFET模块的有功对拖输出测试。

本文件适用于Si IGBT、SiC MOSFET混合模块的有功对拖输出测试。

本文件适用于ANPC、INPC、TNPC等拓扑电流的有功对拖输出测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 4023.8 半导体分立器件 第8部分：场效应晶体管
- GB/T 18488.1 电动汽车用驱动电机系统 第1部分：技术条件
- GB/T 18488.2 电动汽车用驱动电机系统 第2部分：测试方法
- T/CASAS 006 碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管通用技术规范

3 术语和定义

GB/T 4023.8、T/CASAS 006界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

散热器温度 sink temperature

T_s

在器件散热器规定点测得的温度。

3.2

热敏电阻温度 thermistor temperature

$T_{\text{thermistor}}$

在半导体器件管壳规定点测得的温度。

3.3

母线电压 bus voltage

V_{dc}

母线电容两端提供给功率模块的电压。

3.4

空间矢量脉宽调制 space vector pulse width modulation; SVPWM

基于空间矢量的脉宽调制方法，多用于电机控制。

3.5

数字脉宽调制 digital pulse width modulation; DPWM

基于空间矢量的脉宽调制方法，用于电机控制、变换器控制等领域。

3.6

载波频率 carrier frequency

f_{sw}

将信号负载到一个固定频率的波上，这个过程称为加载，这样的一个固定频率。

3.7

输出频率 output frequency

F_{out}

基于空间矢量的脉宽调制方法，多用于电机控制。

3.8

负载电流 loading current

I_L

模块正常工作时，每相交流输出端子上的电流有效值。

3.9

峰值电流 peak current

I_{peak}

规定工况下，模块内部芯片能正常工作的最大电流。

3.10

水流量 cooling liquid flux

$\Delta V/\Delta t$

单位时间内流过冷却水道的水量。

3.11

中点箝位型三电平 neutral point clamped;NPC

该拓扑通过二极管对中性点进行箝位，实现输出端电压在 $+V_{dc}/2$ 、0、 $-V_{dc}/2$ 三个电平之间切换，上下桥臂器件承担全部电压应力。

3.12

改进型中点箝位三电平 improved neutral point clamped;INPC

INPC主要通过开关器件布局优化，来改善NPC的中点电压平衡能力

3.13

主动中点箝位三电平 active neutral point clamped;ANPC

ANPC将NPC中的箝位二极管替换为主动功率器件（如IGBT/MOSFET）。允许通过切换策略主动调节中点电压平衡，兼顾低损耗和电压均分。

3.14

T型中点箝位三电平 t-type neutral point clamped;TNPC

在传统NPC的下桥臂部分引入T型结构，去除NPC中下桥臂的箝位二极管，靠两个直串功率器件直接输出中点电平。

4 原理

两电平功率模块有功对拖测试系统和三电平功率模块有功对拖测试系统的电路原理图，见图1和图2。有功对拖测试系统的陪测单元为ANPC的拓扑结构，控制器采用空间矢量调制技术输出18路驱动，在陪测单元三相桥臂上建立相位互差 120° 的三相交流电压。有功对拖测试系统的被测单元为INPC、TNPC或ANPC的拓扑结构，可根据实际的测试需求选择其中任一种拓扑结构进行系统测试。控制器采用空间矢量调制技术，在被测单元三相桥臂上建立相位互差 120° 的三相交流电流。若被测单元为INPC或TNPC，则控制器输出12路PWM驱动，若被测单元为ANPC，则控制器输出18路PWM驱动。被测单元和陪测单元直流母线和电容中点通过线路互联，且直流母线接入到直流源的输出，三相桥臂的输出分别按相序接入电抗器两端。由于功率会在陪测和被测单元之间循环流动，因此能够降低对于直流电源的功率要求。两电平三相全桥拓扑电路测试方法类似，区别在于驱动信号的路数会更少。

通过对新能源主驱逆变器与光伏储能风电变流器应用的SiC MOSFET功率模块实施有功对拖测试，可以评估SiC MOSFET功率模块在 $-1\sim+1$ 功率因数下满电压满电流满功率运行条件下的连续功率运行性能，并确定SiC MOSFET功率模块的应用可靠性和稳定性。

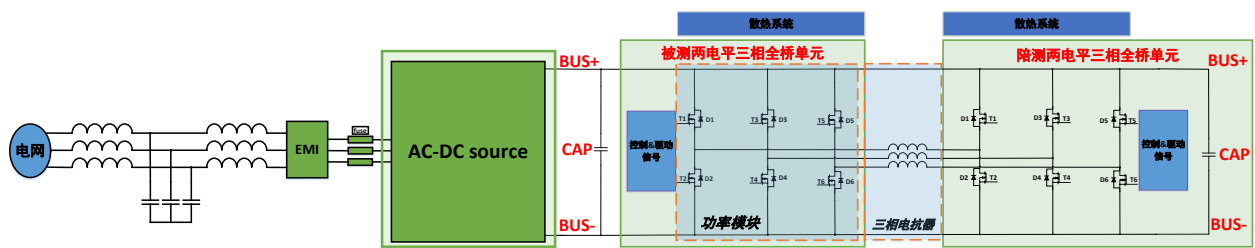


图1 两电平功率模块有功对拖测试系统电路原理图

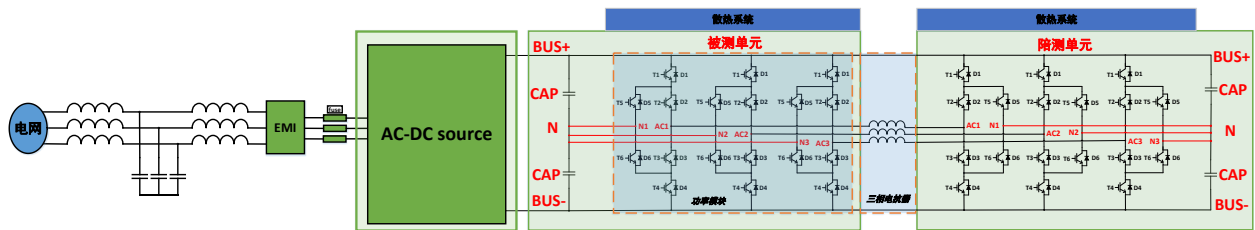


图2 三电平功率模块有功对拖测试系统电路原理图

5 测试条件

- 测试环境条件为：
- a) 环境温度:25 °C±5 °C；
 - b) 相对湿度:40 %RH~60 %RH；
 - c) 大气压:86 kPa~106 kPa。

6 仪器设备

- 所使用的仪器设备应能够支持功率模块的正常工作模拟。仪器设备的关键组成如下：
- a) 直流电源。直流电源输出可调节。直流电源输出电压、功率、电流需满足半导体器件测试范围；
 - b) 母线电容。母线电容的电压等级和容值应当满足测试要求；
 - c) 散热系统。包括水冷装置或其他冷却方式，制冷方式的选择取决于测试样品和测试要求；
 - d) 控制、驱动信号。用于功率器件的驱动信号、相电流、线电压采样等控制信号；
 - e) 三相电抗器。提供感性负载替代电机；
 - f) 测试夹具。确保试验样品在试验过程中不会发生位置偏移，具备良好的电气连接，应尽可能反映产品的实际状态。

7 样品

测试样品应为外观完好，电参数测量符合器件产品手册或者与客户协定的规范要求的SiC MOSFET功率模块，可以是全桥模块，可以是半桥模块的组合，也可以是分立器件的组合，也可以是Si IGBT和SiC MOSFET混合模块。

8 测试步骤

8.1 测试系统控制框图

图3是三相逆变器有功对拖测试系统控制框图，采用DSP+FPGA的控制方案，陪测逆变器和控制逆变器的控制均在一块控制板上完成，因此容易确定陪测与被测逆变器之间的相位，以陪测逆变器的相位为基准，根据上位机发送的功率因数指令，确定被测逆变器的相位。

陪测逆变器采用输出电压闭环，控制器通过ADC采样陪测逆变器的三相输出线电压，经过clark变换和park变化后得到两相旋转坐标系下的反馈电压，再与上位机发送的电压参考指令经过PI环路调节后再经park反变换和clark反变换得到三相调制波，经SVPWM控制生成18路驱动波形。被测逆变器采用输出电流闭环。控制器通过ADC采样被测逆变器的三相输出相电流，经过clark变换和park变化后得到两相旋转坐标系下的反馈电流，再与上位机发送的电流参考指令经过PI环路调节后再经park反变换和clark反变换得到三相调制波，且根据上位机发送的指令确认被测单元是INPC、TNPC或ANPC，用以决定生成12/18路驱动波形。两电平三相全桥控制拓扑类似，区别在于驱动信号的路数会更少。

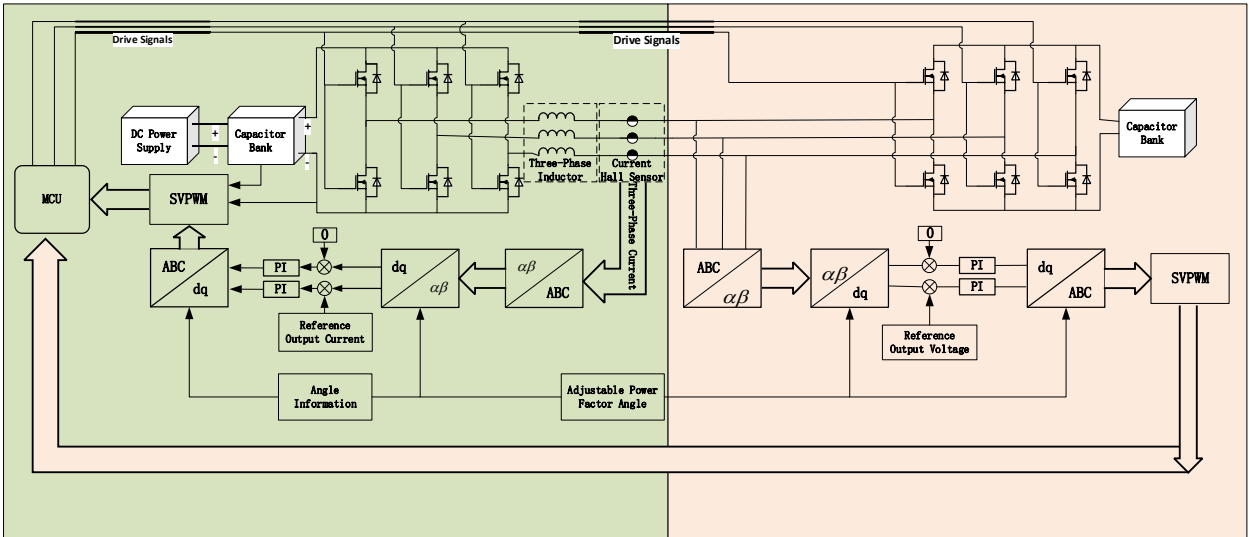


图3 三相逆变器有功对拖测试系统控制框图

8.2 测试流程图

图4 a)是系统主状态机流程图，系统上电后，先进入上电自检测状态，确认所有电信号是否正常或者存在故障位，若无异常则跳转至待机状态。待机状态下，接收到来自于上位机的系统启动指令，则进入陪测逆变器软启状态，陪测逆变器软启动完成后则进入被测逆变器软启动状态，被测逆变器软启动完成后则进入正常运行状态，以上状态下，若接收到来自于上位机的系统停机指令，则跳转至待机状态，若存在故障信号则跳转至保护状态，保护状态下需通过上位机清除软件锁存才能跳转至上电检测状态，否则将持续停留在保护状态下。

图4 b)是DSP定时器中断服务程序流程图，DSP进入DSP中断后，先读取FPGA侧的电压电流ADC采样数据，根据上位机发送的功率因数指令确定陪测逆变器和被测逆变器的相位，接着进行电容中点电压环路控制和零序电流环路控制，然后依次进行陪测逆变器电压环控制和被测逆变器电流环控制，最后将计算完成的陪测和被测逆变器的三相调制波发送至FPGA。

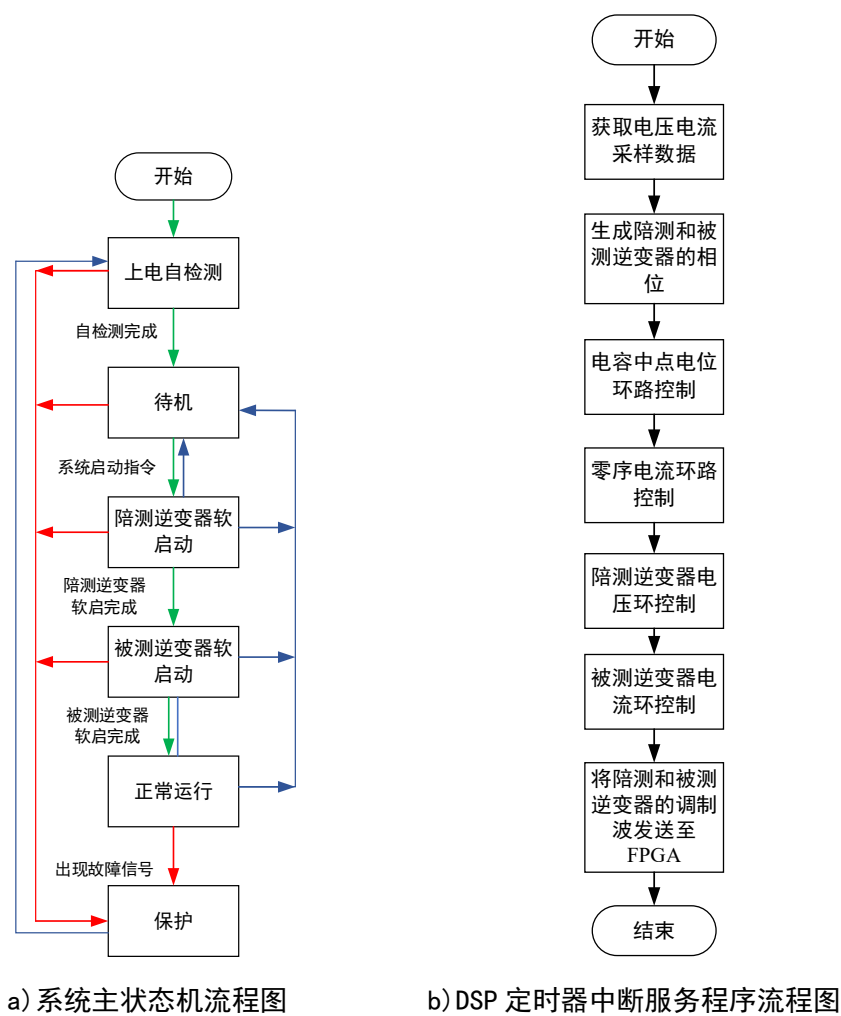


图4 测试流程图

8.3 测试项目设置

最基本的功率模块出厂测试项目应当包含常规的-1~+1功率因数下满电压满电流满功率运行和堵转测试，分别模拟功率模块在新能源主驱逆变器中的电动工况、发电工况和堵转工况。同时可以模拟功率模块在光伏储能风电变流器的实际应用。

表1 功率模块有功对拖测试项目

序号	试验项目	工况设置项目	说明
1	变流器电动测试	直流母线电压、母线电流、母线功率，测试水温、水流量，输出电流频率、载波频率、堵转角度、堵转电流、模块过温点、驱动电压、功率因数、输出电流有效值、线电压有效值	功率因数0~1可调节，模拟变流器工作在逆变模式，测试对应的功率模块地Si IGBT或者SiC MOSFET可靠性
2	变流器馈电测试		功率因数-1~0可调节，模拟变流器工作在整流模式，测试对应的功率模块地二极管可靠性
3	逆变器堵转测试		用软件控制实现不同桥臂开通测试
4	结温测试		通过热电偶或者红外测温方式实现
5	过载测试		在测试时根据实际应用设置过载电流和过载时长，过载电流和过载时长任意可调，在过载测试过程中不能报其他故障，以确定模块是否满足实际应用过载需求

9 测试数据处理

9.1 测试数据记录

测试过程中应记录测试条件和电特性参数，其中测试条件包含：

- a) 直流母线电源 V_{dc} ，单位为伏特（V）；
- b) 线电压有效值 V_a 、 V_b 、 V_c ，单位为伏特（V）；
- c) 每相输出电流有效值 I_a 、 I_b 、 I_c ，单位为安培（A）；
- d) 输出频率 F_{out} ，单位为赫兹（Hz）；
- e) 模块内部热敏器件温度（如有），单位为摄氏度（℃）；
- f) 冷却水进水口温度 T_{in} 和出水口温度 T_{out} ，单位为摄氏度（℃）；
- g) 水流量 F ，单位为立方米每秒（m³/s）。

电特性参数包含：

- a) 漏-源通态电阻 $r_{DS(on)}$ ，单位为毫欧（mΩ）；
- b) 漏-源反向电压 V_{SD} ，单位为伏特（V）；
- c) 结壳热阻 $R_{th_{jc}}$ ，单位为开尔文每瓦（K/W）；
- d) 栅-源阈值电压 $V_{GS(th)}$ ，单位为伏特（V）；
- e) 漏极泄漏电流 I_{DSS} ，单位为纳安（nA）；
- f) 栅极泄漏电流 I_{GSS} ，单位为纳安（nA）；

9.2 测试数据分析

试验样品完成测试和测量后，应对电特性参数进行计算分析：

- a) 测试后的电特性参数与测试前的电特性参数进行变化率计算，计算公式如下：

$$\text{变化率} = \frac{\text{测试后的电特性参数} - \text{测试前的电特性参数}}{\text{测试前的电特性参数}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

10 失效判据

失效判据应包括但不限于表2所示的参数，测试方法依据GB/T 4023.8，测试条件按照产品规范测试常温下的参数变化。建议在测试结束后使用声学扫描显微镜检查器件的所有界面退化情况。

表2 功率循环测试的失效判据

参数	符号	失效判据 (相对于初始值的变化率)
漏-源通态电阻	$r_{DS(on)}$	5 %
漏-源反向电压	V_{SD}	5 %
结壳热阻	$R_{th_{jc}}$	20 %
栅-源阈值电压	$V_{GS(th)}$	5 %
漏极泄漏电流	I_{DSS}	>5倍；若测试前<10 nA，则测试后>50 nA
栅极泄漏电流	I_{GSS}	>5倍；若测试前<10 nA，则测试后>50 nA

11 测试报告

测试结束应提供测试报告，其中至少包括：

- a) 测试对象；
- b) 样品数量；
- c) 测试条件；

- d) 测试项目；
- e) 测试异常现象（若有）及处理；
- f) 本文件的标准编号；
- g) 测试结果。

参 考 文 献

- [1] AEC-Q101 Stress test qualification for discrete semiconductors
 - [2] AQG 324 Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles
 - [3] IEC 60747-2—2016 Semiconductor devices - Part 2: Discrete devices - Rectifier diodes
 - [4] IEC 60747-8—2021 Semiconductor devices - Discrete devices - Part 8: Field-effect transistors
 - [5] IEC 60747-9 Semiconductor devices - Part 9: Discrete devices - Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)
-