



life.augmented

基于STM32G4的数字控制 3kW无桥图腾柱PFC解决方案

Erin Wang 王艳芳

工业电源与能源技术创新中心

意法半导体 亚太区

Power & Energy
Competence
Center



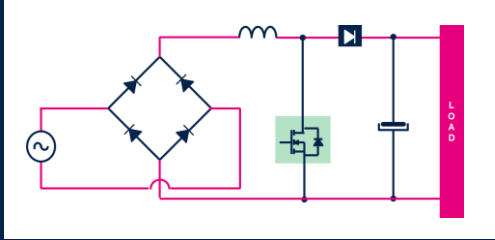
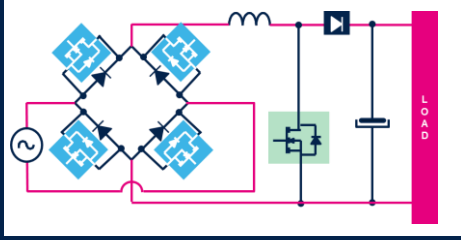
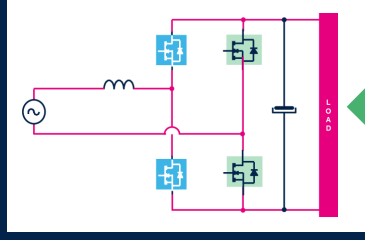
- 1 为什么首选图腾柱PFC?
- 2 3kW无桥图腾柱PFC数字电源解决方案
- 3 评估板性能测试结果
- 4 ST适用于图腾柱PFC的产品介绍
- 5 总结

为什么首选图腾柱PFC?



PFC拓扑比较

图腾柱配置是PFC拓扑中常用的配置方式
用以实现高效率和高功率密度的目的

配置			
拓扑	传统有桥升压	有源桥	CCM图腾柱
晶体管	Si MOS	Si MOS	SiC / GaN FET
峰值效率	97.3%	97.8% - 98.5%	98.0% - 99.0%
优点	<ul style="list-style-type: none"> • 简单的控制机制 • 众所周知的技术 • 低BOM成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 更高的效率 • 简单的概念 • 减少布局工作 	<ul style="list-style-type: none"> • 效率最高 • 功率密度高 • 元件数量少
缺点	<ul style="list-style-type: none"> • 效率低 	<ul style="list-style-type: none"> • 更高的零件数 	<ul style="list-style-type: none"> • PCB布局比较关键 • 驱动电路和控制算法复杂

目标应用

服务器/数据中心



效率要求

	10%负载	20%负载	50%负载	100%负载
		90%	94%	91%
	90%	94%	96%	91%

电信



电信电源峰值效率



5G Gen

96-98%的效率



4G Gen

94-96%的效率

3kW无桥图腾柱PFC数字电源解决方案



3kW CCM图腾柱PFC解决方案

主要特性

- 输入AC电压范围：90Vac ~264Vac
- 开关频率：70kHz
- 工作模式：CCM
- 峰值效率：98.5% @ 230VAC
- 功率因数：100%负载下 > 0.99
- iTHD < 5%， >50%负载时
- 数字（STM32G4）电源控制
- 尺寸：100mm*145mm*41mm
- 功率密度：82W/inch³

样机

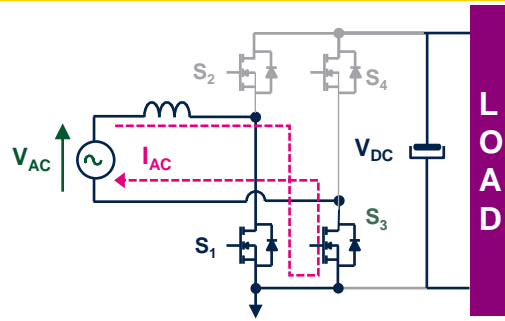


图腾柱PFC的工作模式

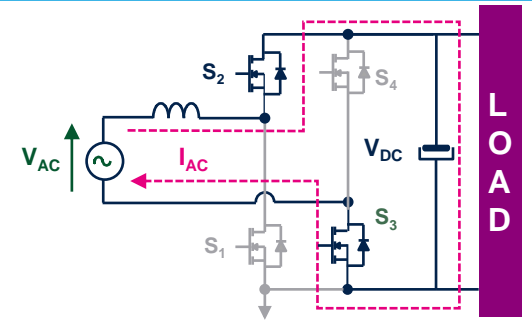
$$V_{AC} > 0$$

S1开通，PFC电感储能；
S3常开通；
S2本体二极管仅在死区时间导通，
可以实现软开通；在toff期间开通，
减少本体二极管的压降；

S1闭合，电感电流上升



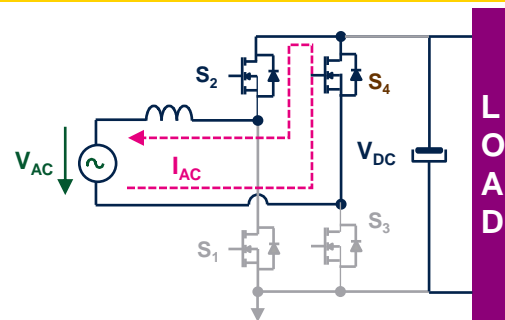
S1断开，电感电流下降



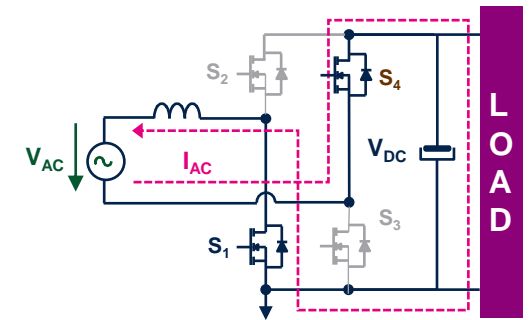
$$V_{AC} < 0$$

S2开通，PFC电感储能；
S4常开通；
S1 本体二极管仅在死区时间导通，
可以实现软开通；在toff期间开通，
减少本体二极管的压降

S2闭合，电感电流上升

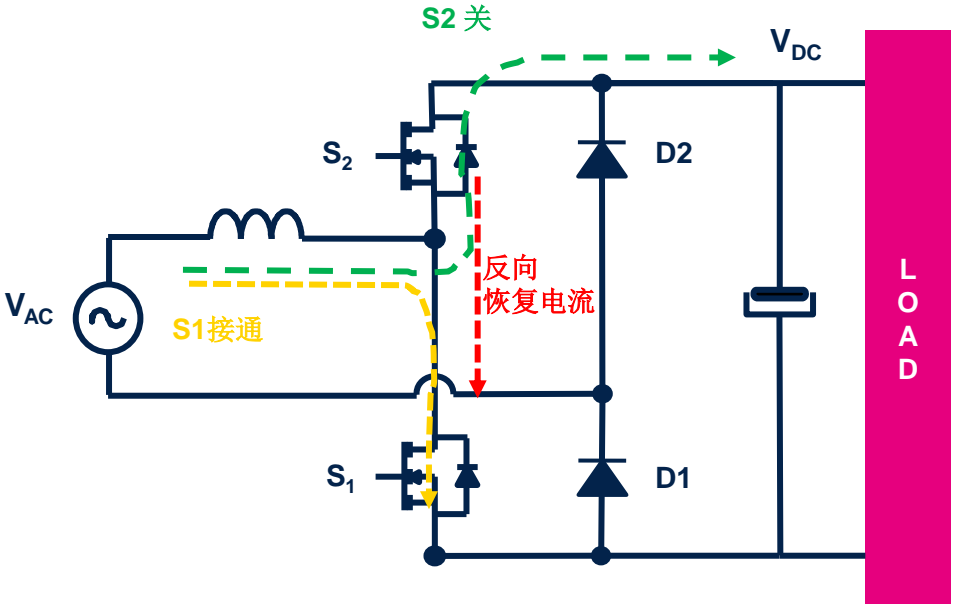


S2断开，电感电流下降

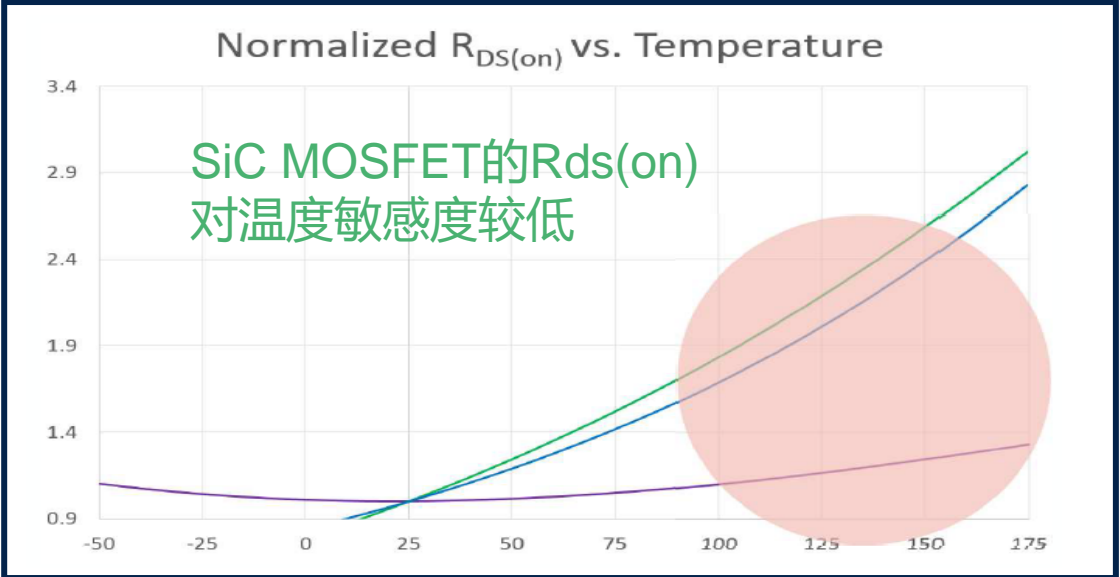
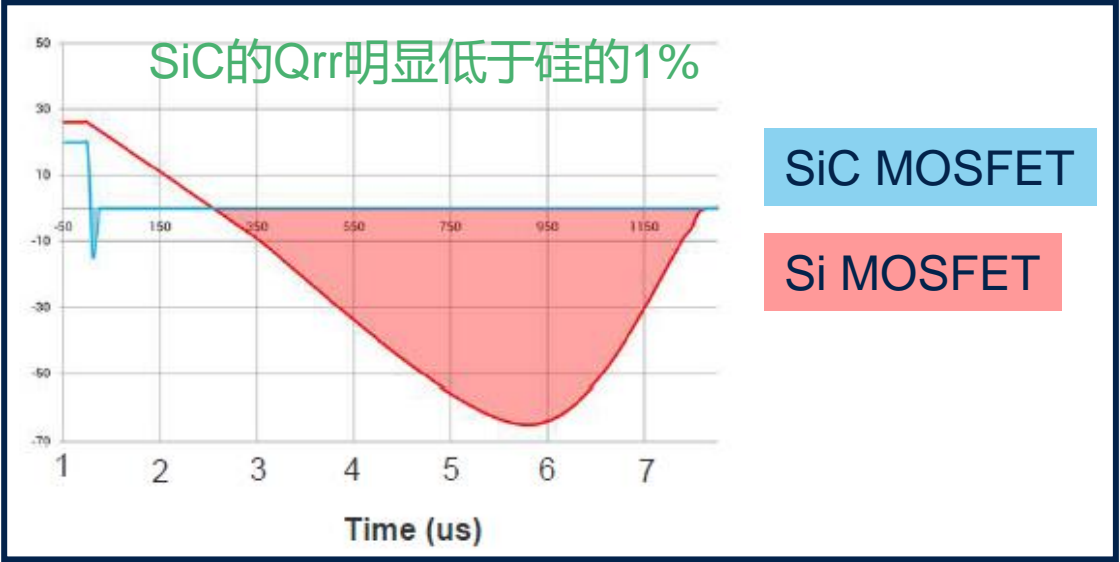


SiC MOSFET和驱动器IC

650V 第二代 SiC MOSFET



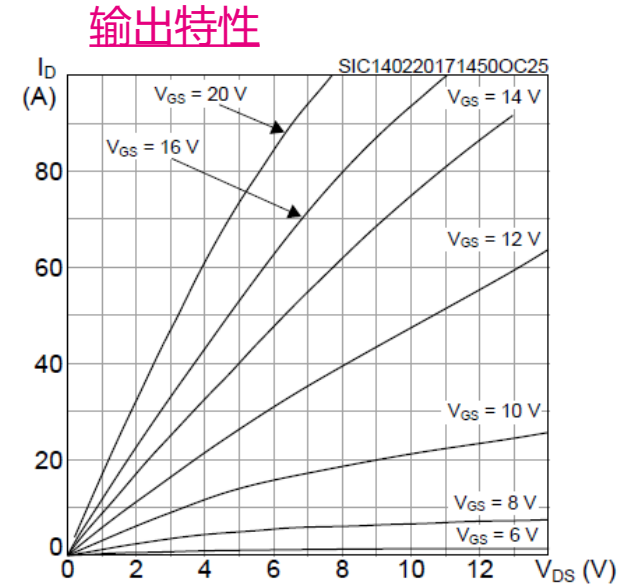
- 良好的反向恢复特性。
- 出色的品质因数导致开关损耗低
- 由于电阻随温度的变化较小，高温下的功耗低



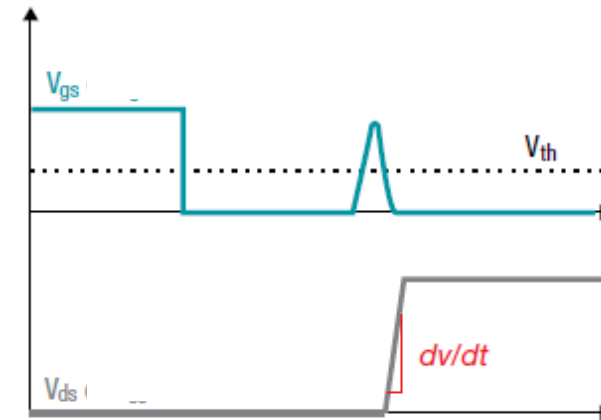
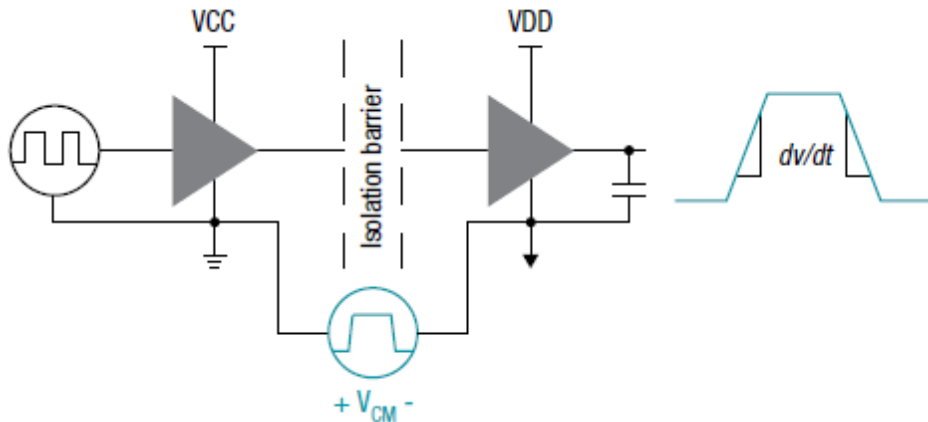
驱动SiC MOSFET的关键

SiC MOSFET的输出特性，使其需要更高的驱动电压来保持较低的传导损耗

- 共模瞬态抗扰度 (CMTI) 是选择SiC MOSFET高速开关栅极驱动器的重要参数。
- 高转换率 dv/dt 可能在栅极电压下产生米勒导通峰值，需要减少或者减低尖峰电压，避免误开通。



高速开关引起的共模噪声

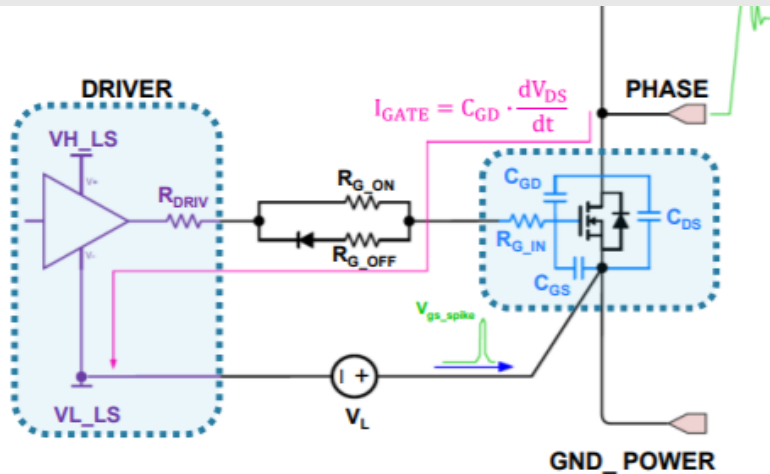


米勒效应对栅极电压的影响

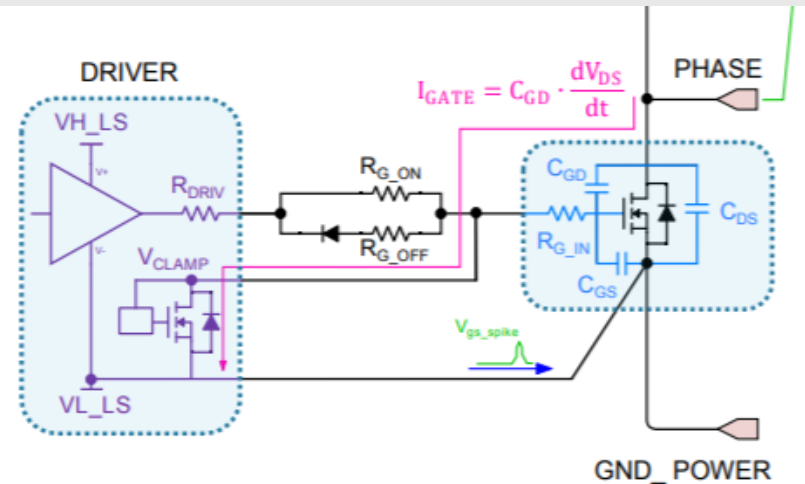
Miller尖峰影响的抑制

SiC MOSFET工作在高速开关状态时会产生高的dv/dt瞬态

- 高转换率dv/dt可能会在驱动关闭的瞬间在门极电压产生Miller尖峰
- 带有有源Miller钳位功能的驱动芯片可以减少或降低尖峰电压；
- 驱动负压也可有效降低驱动电压尖峰，防止miller尖峰引起的误开通；

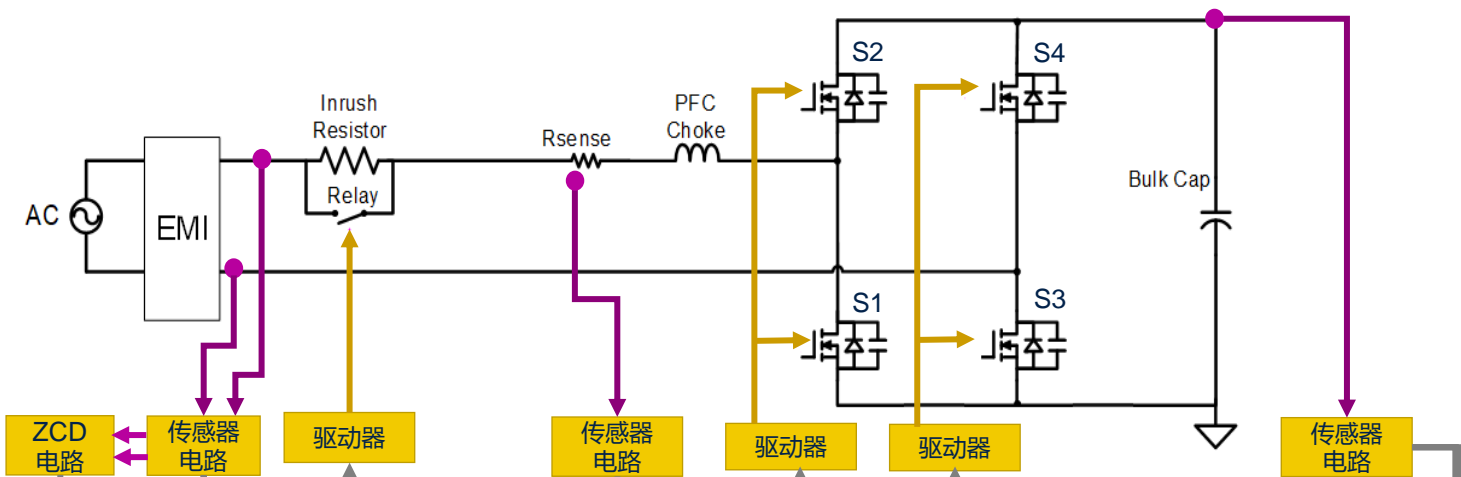


负栅极驱动



有源Miller钳位

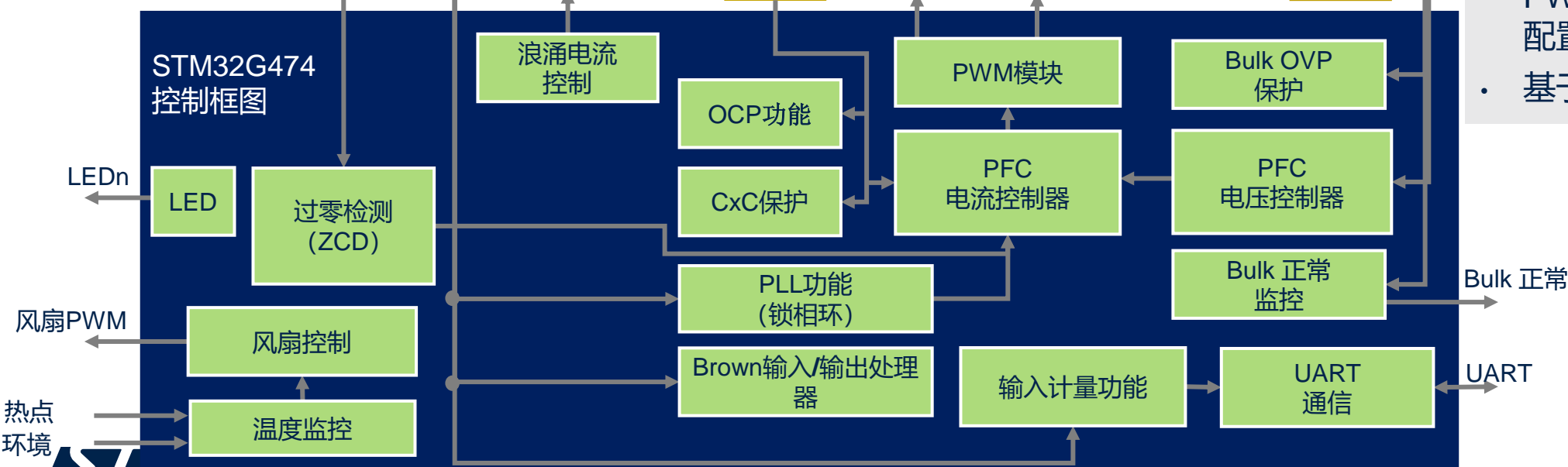
固件功能块



关键数字特性

- 通过多个ADC (最多5个) 同时进行电压/电流采样
- 通过比较器进行关键保护 (最多7个)
- 通过HRTIM支持高分辨率PWM (184ps), 可实现PWM控制方案的高灵活性配置
- 基于UART的在线系数调节

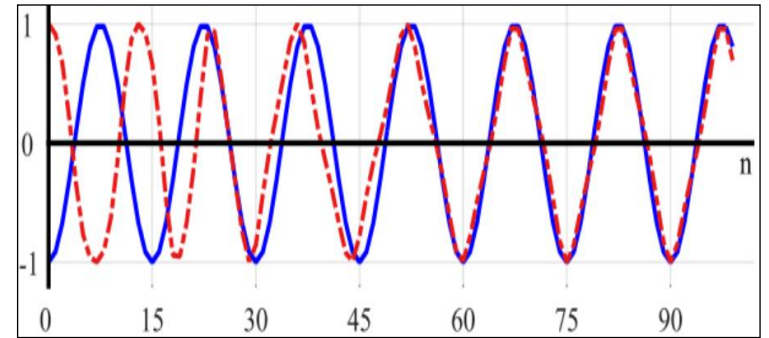
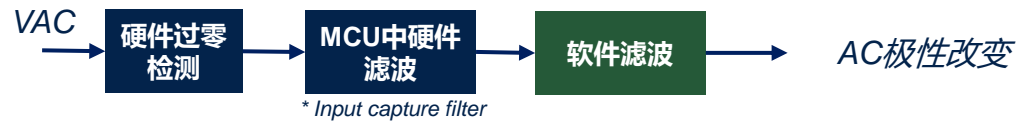
STM32G474 控制框图



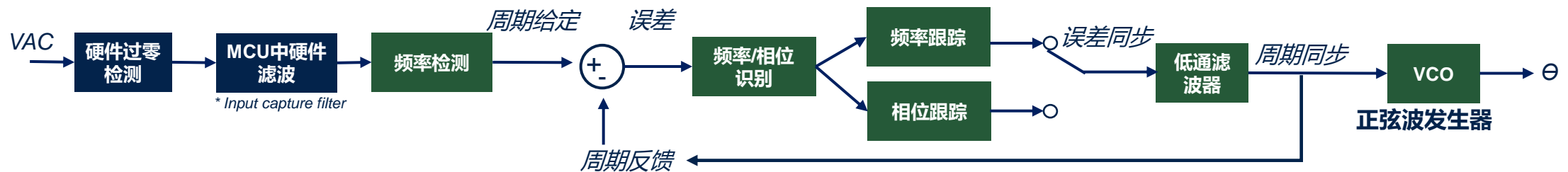
硬件AC过零检测

硬件过零检测电路+ 硬件/软件滤波

- 电路简单，但易受干扰
- 由于硬件每半周更新一次，因此响应速度有限



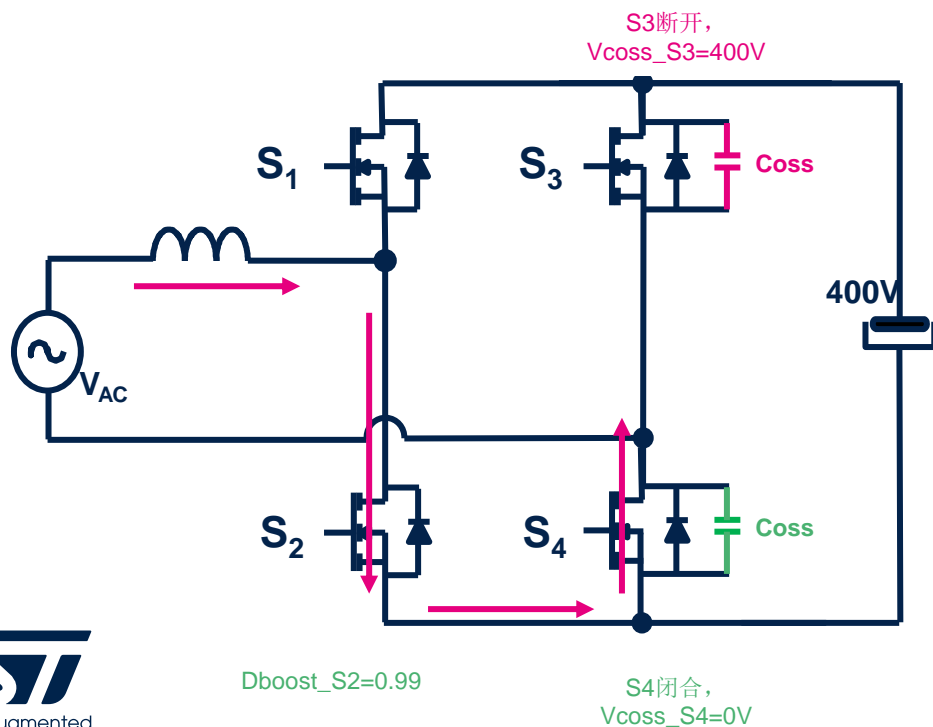
软件锁相环(频率/相位跟踪)



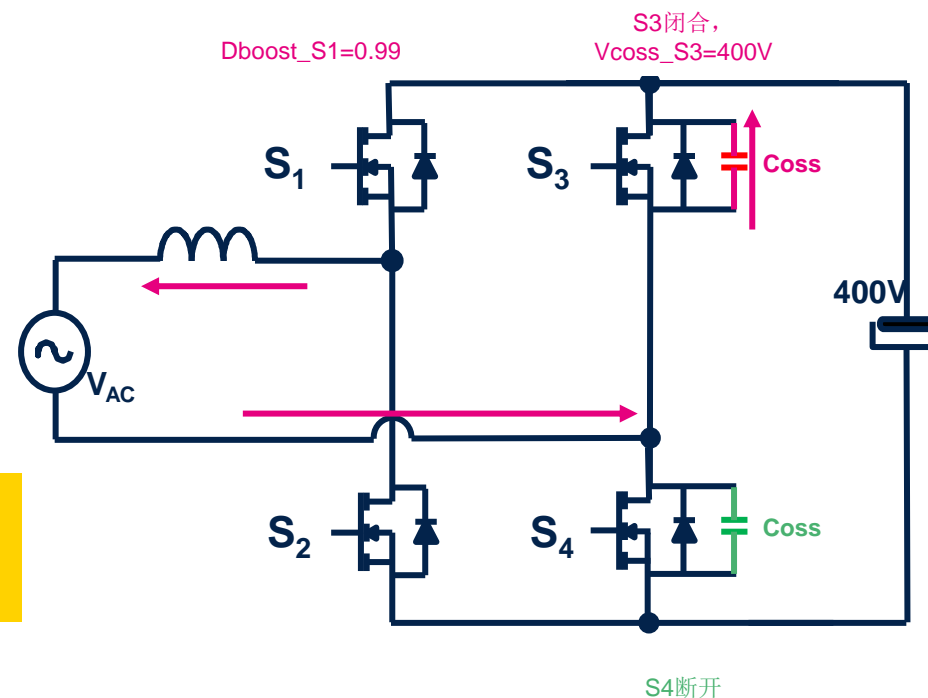
设计挑战

交流过零时的尖峰电流

- 在过零时，当交流输入从正到负。
 - 过零之前， $V_{coss_S3}=400V$ ， $D_{boost}=0.99$ 至 S2， $(1-D_{boost})=0.01$ 至 S1
 - 过零之后， $V_{coss_S4}=400V$ ， $D_{boost}=0.99$ 至 S1， $(1-D_{boost})=0.01$ 至 S2
- 在过零时，如果 D_{boost} 突然改变， V_{coss_S3} 将引起尖峰电流。



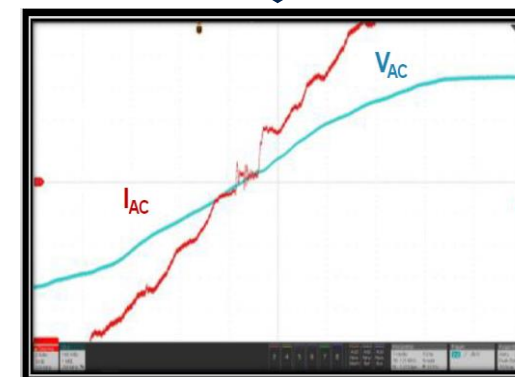
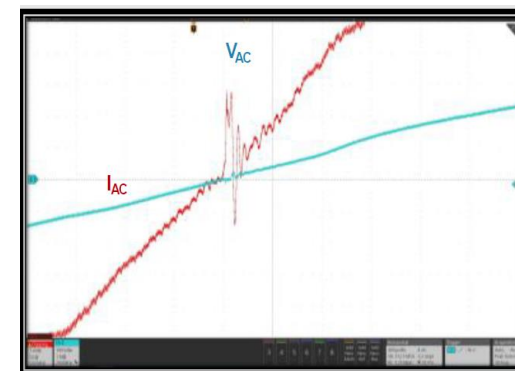
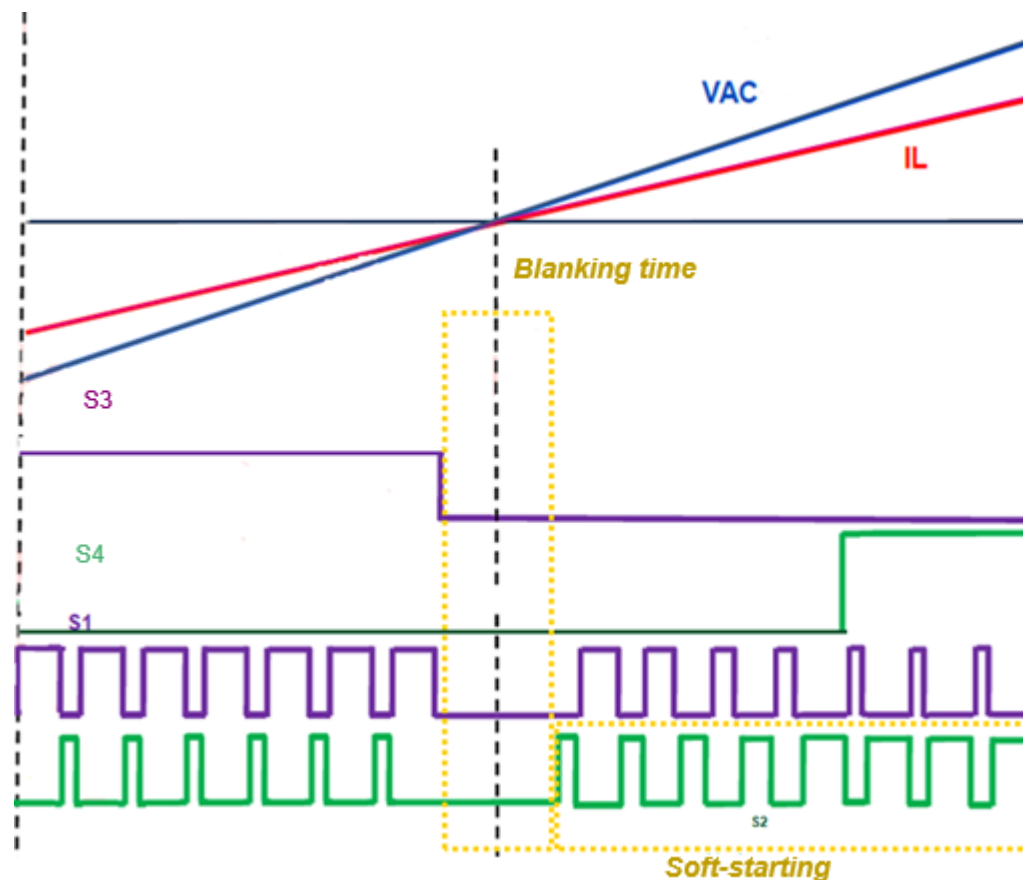
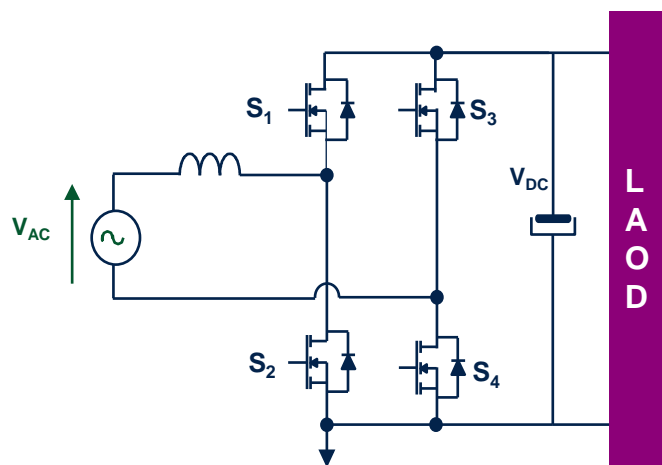
Vac过零过零
从正到负



尖峰电流消除解决方案

MOSFET在消隐期间都是关断的，以确保有安全的电源开关控制，并避免输出直流电容发生短路现象。

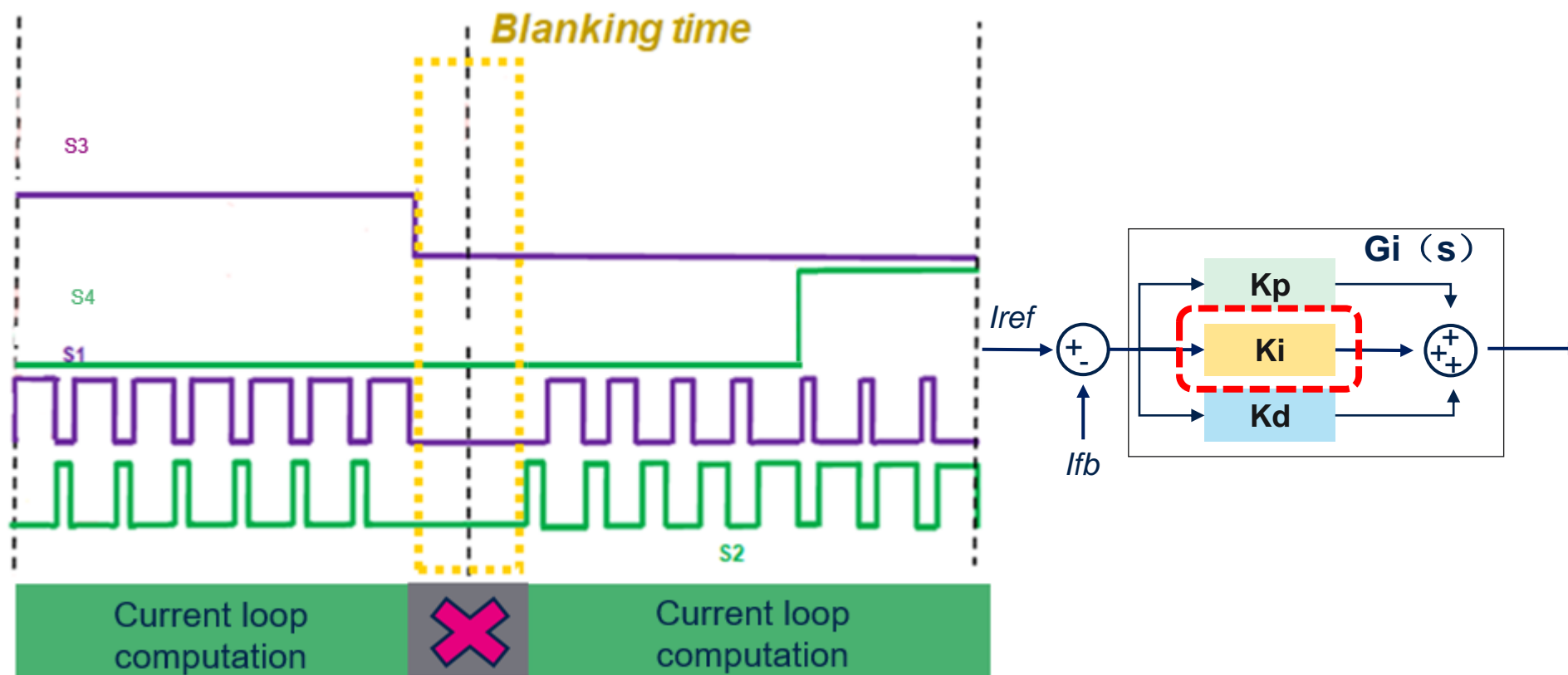
消隐 + 软启动占空比控制方案



S1或S2有源开关由软占空比进行控制。

尖峰电流消除解决方案

为了避免电流环的积分器产生较大的PWM脉冲，从而造成较大的尖峰电流，控制环路在消隐期间应暂停。



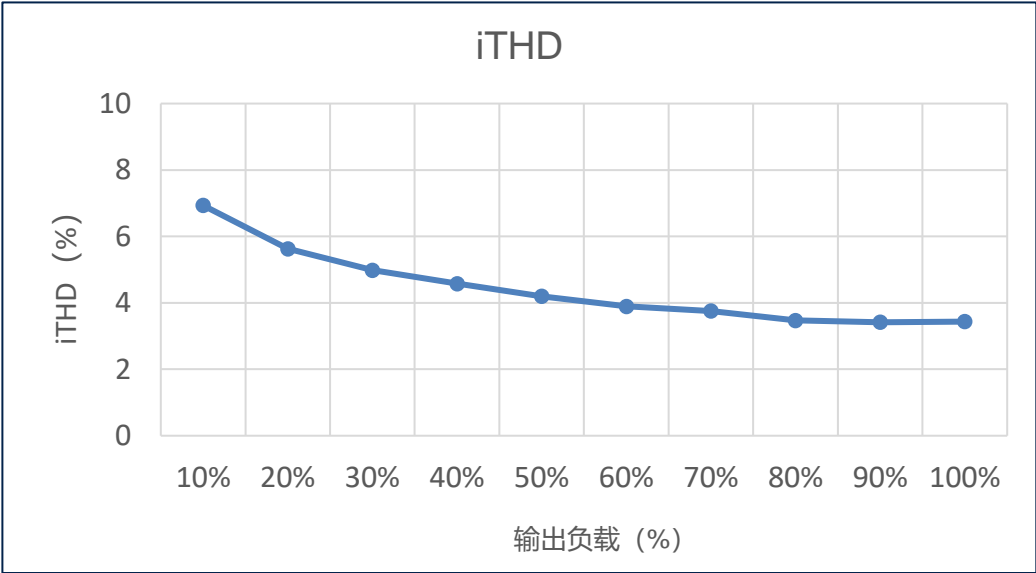
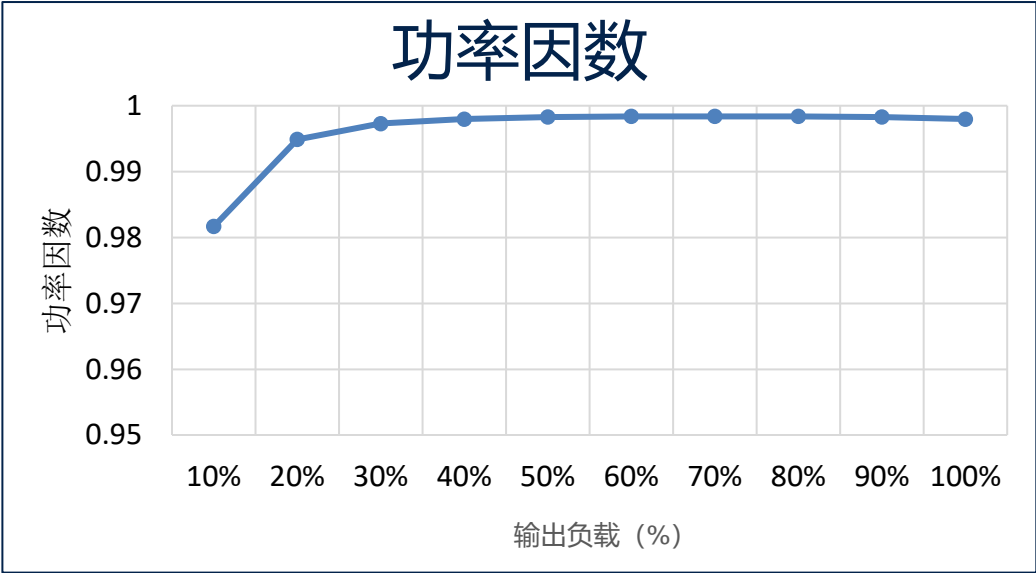
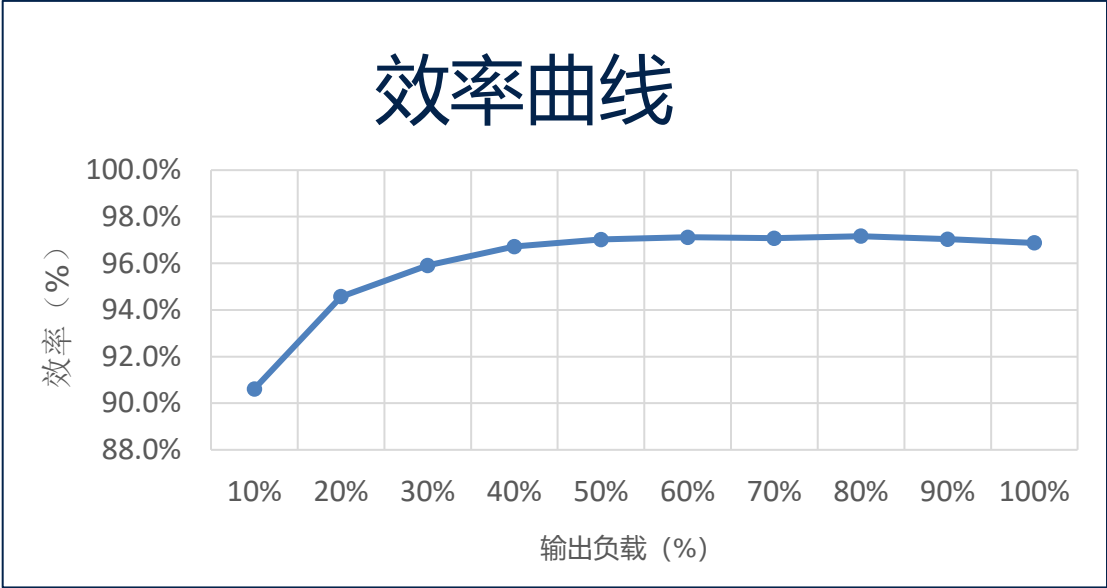
评估板性能测试结果



1. 效率 / iTHD / PF
2. 输入电流测量波形
3. 负载瞬态响应
4. 交流线电压瞬态响应
5. 交流线路频率瞬态响应
6. 浪涌电流
7. 平顶交流电压失真

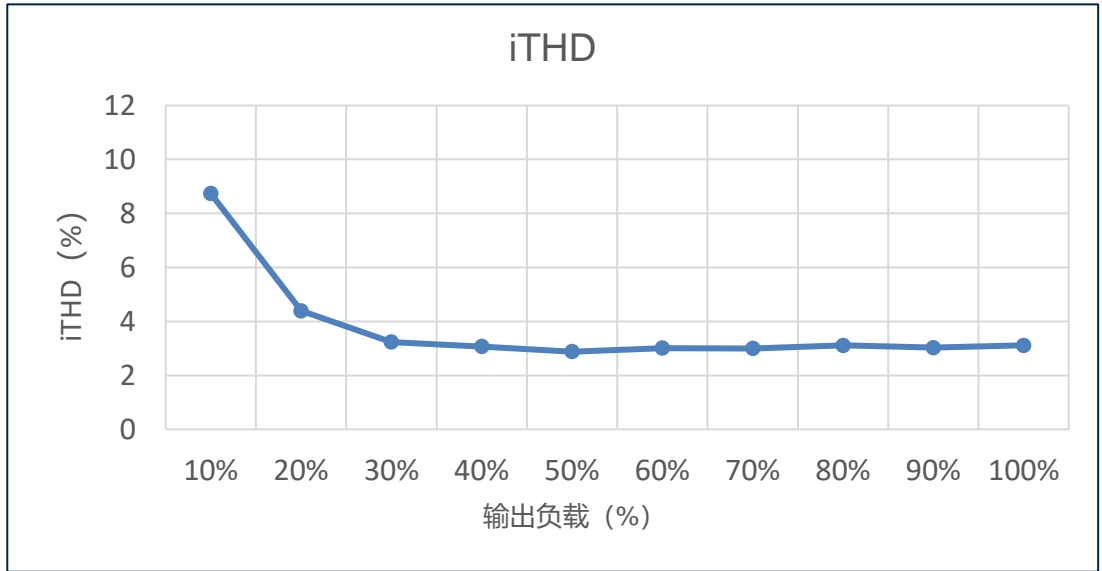
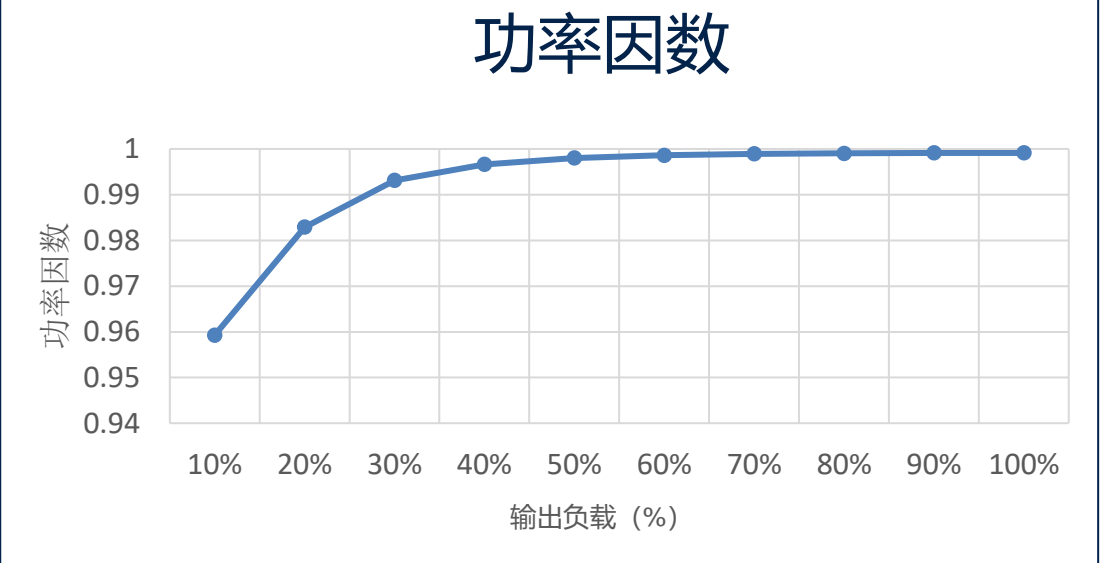
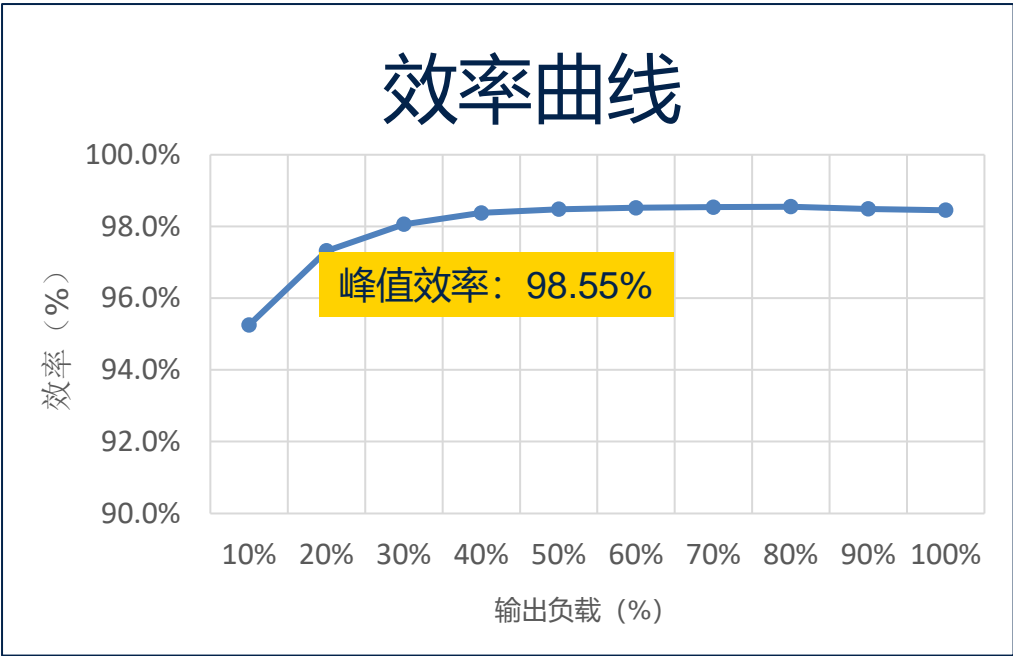
效率 / PF / iTHD

115Vac/50Hz



效率 / PF / iTHD

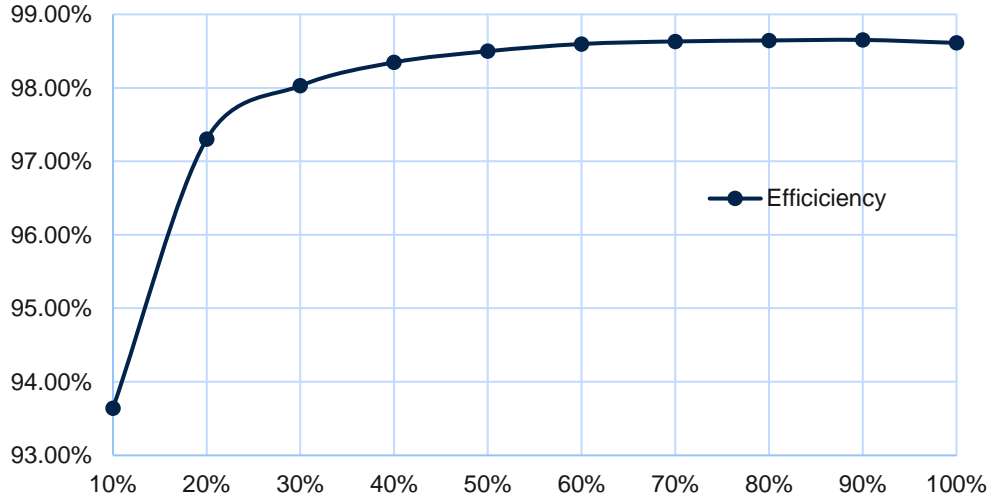
230Vac/50Hz



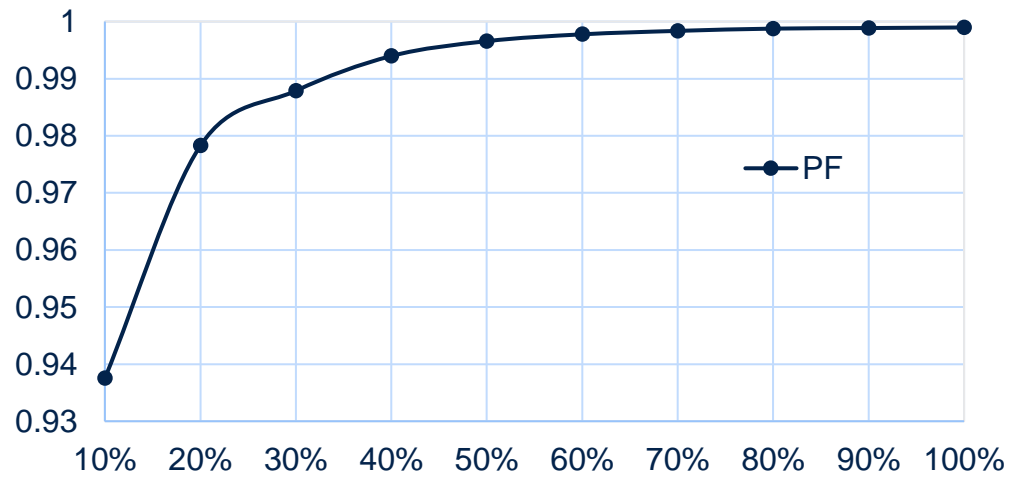
效率 / PF / iTHD

264Vac/50Hz

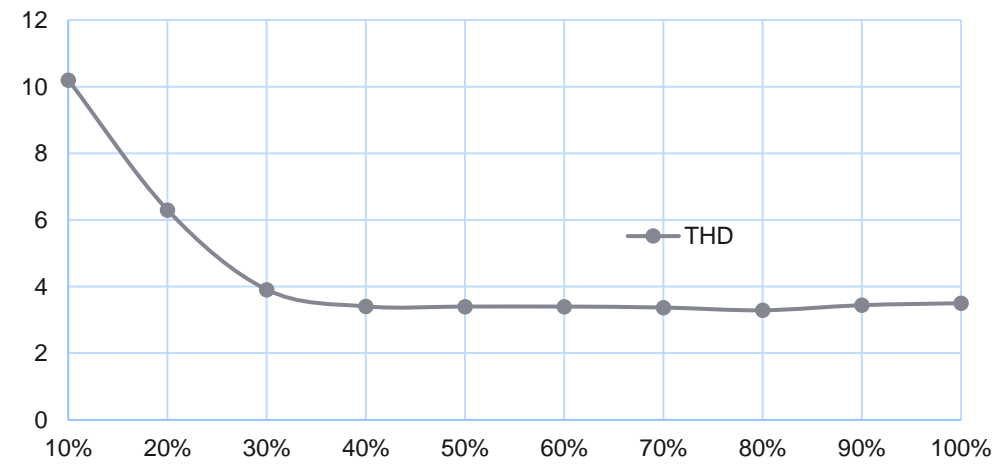
效率



PF

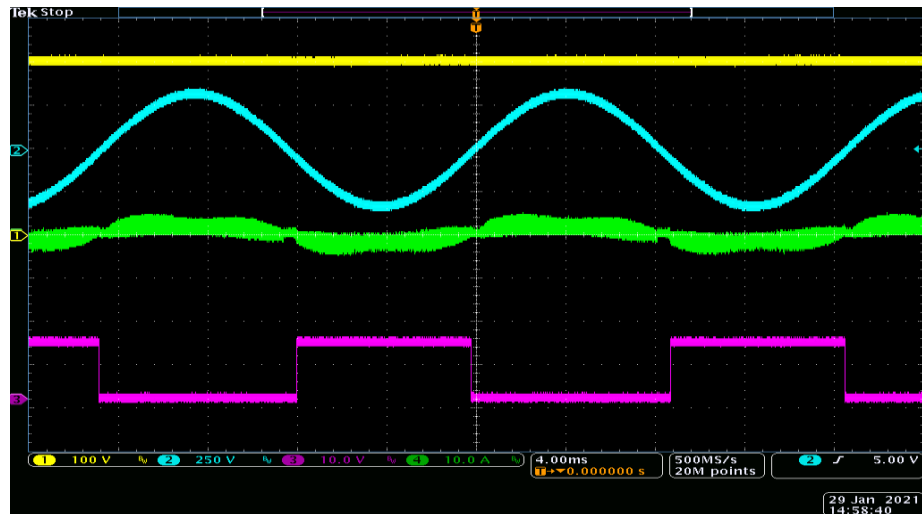


THD

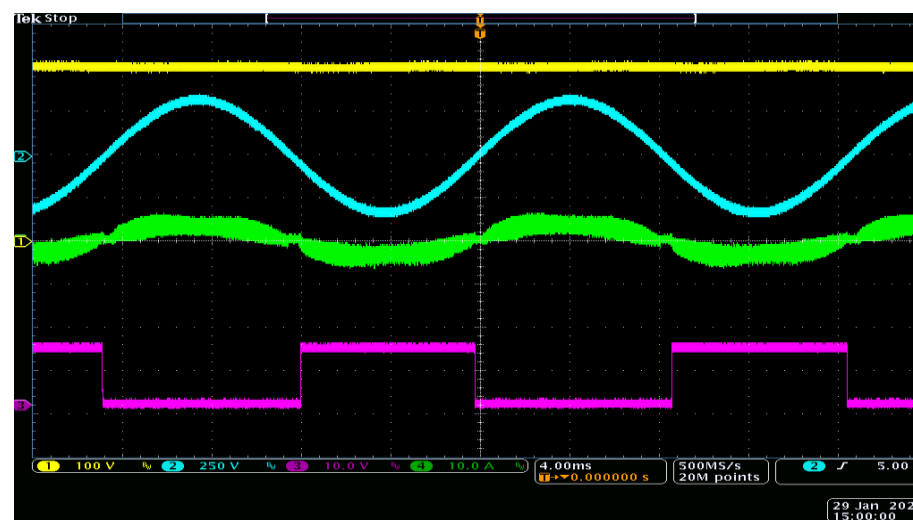


输入电流测量

300W负载



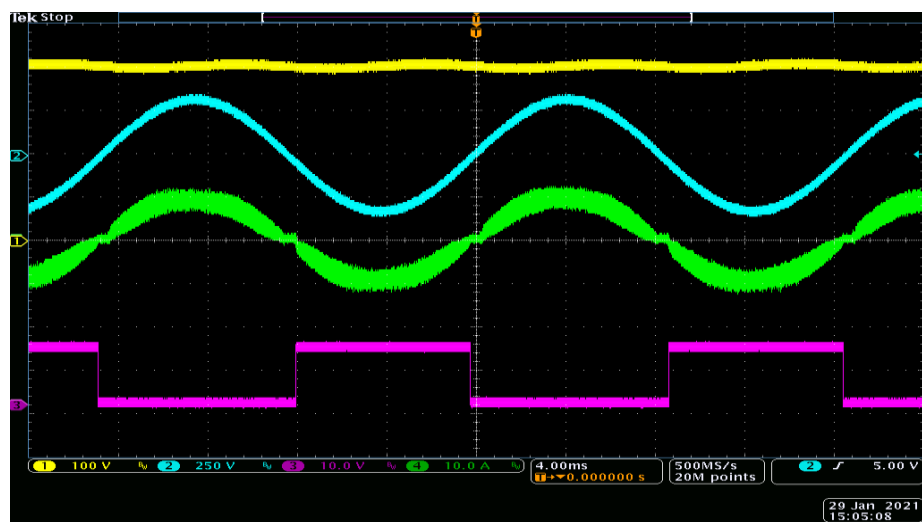
600W负载



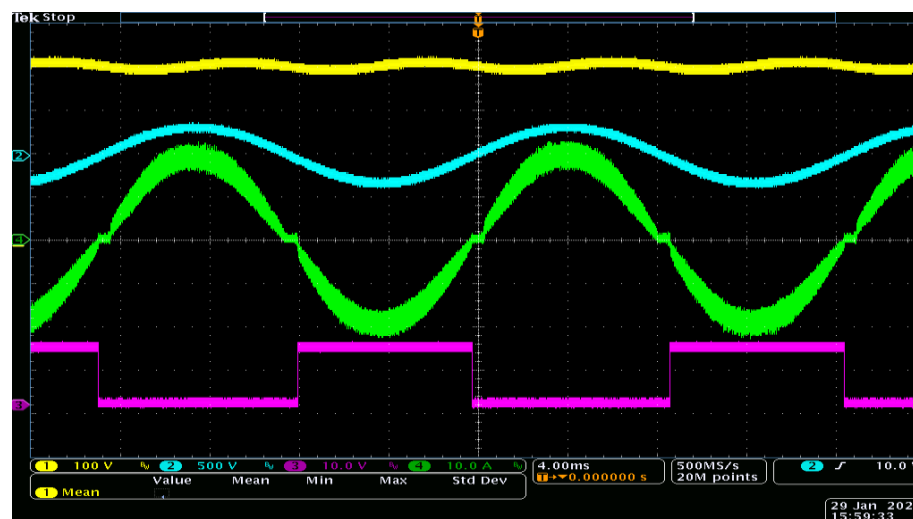
@ 230Vac, 60Hz

CH1: 总线电压
CH2: 输入电压
CH3: 线路MOS的PWM
CH4: 输入电流

1500W负载

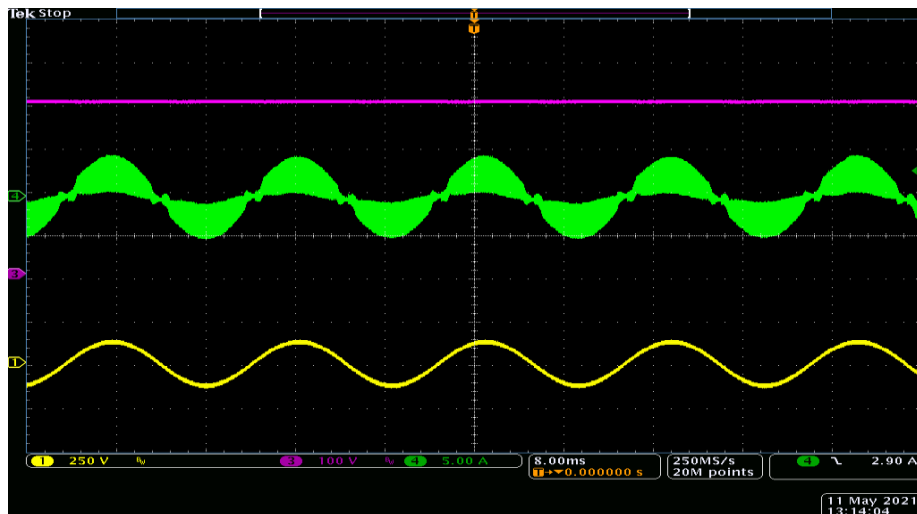


3000W负载

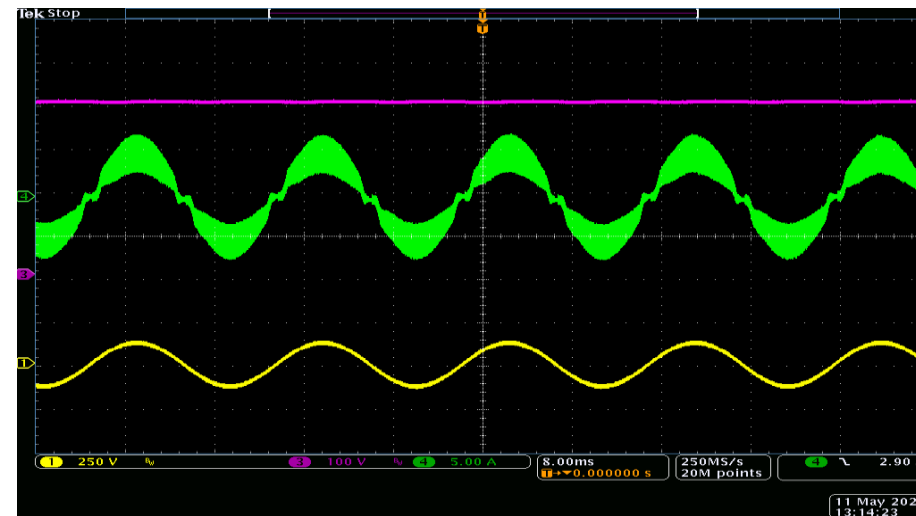


输入电流测量

90VAC, 10%负载



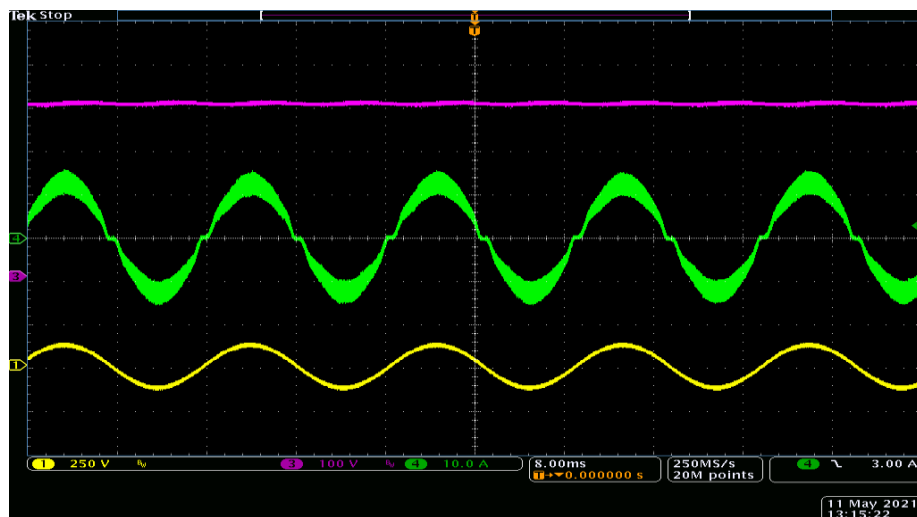
90VAC, 20%负载



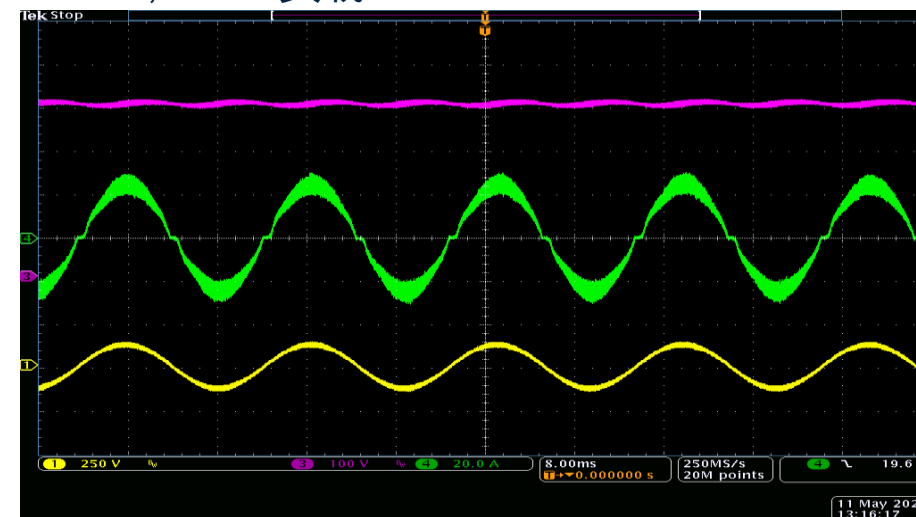
@ 90Vac, 60Hz

CH1: 输入电压
CH2: 大容量电容电压
CH3: 输入电流

90VAC, 50%负载

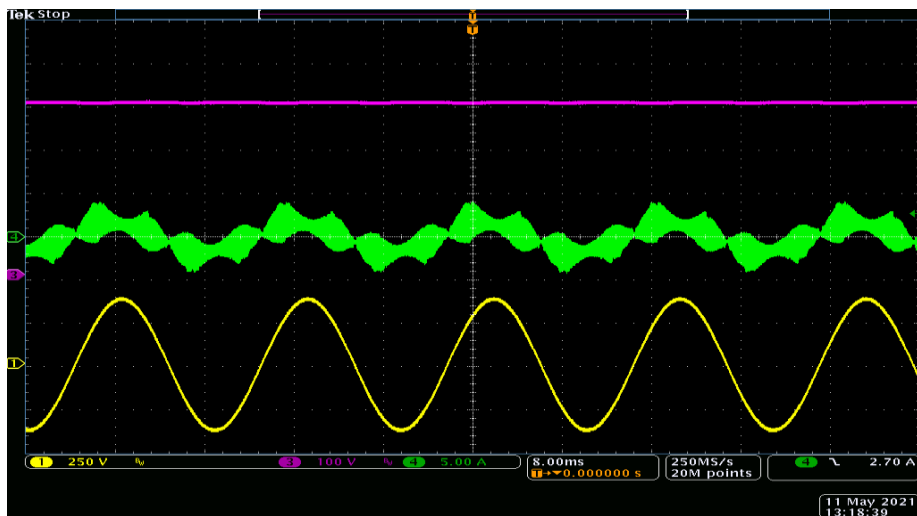


90VAC, 100%负载

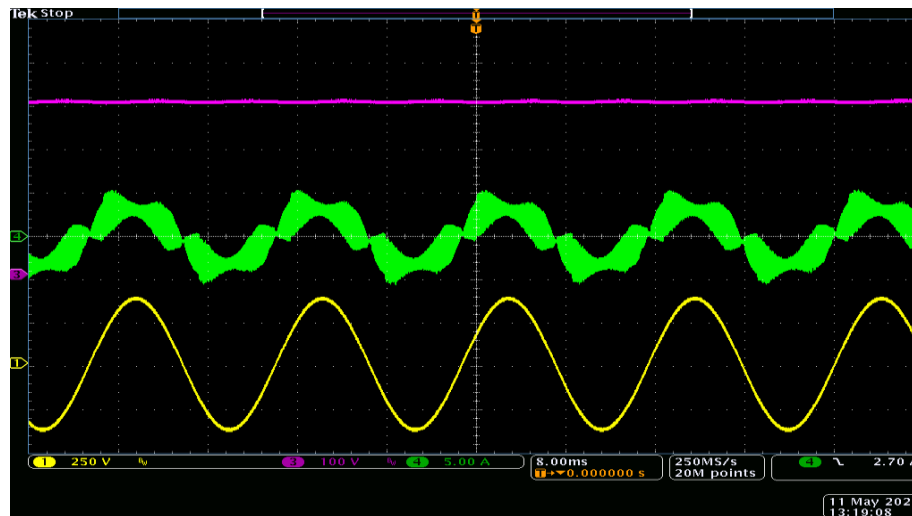


输入电流测量

264VAC, 10%负载



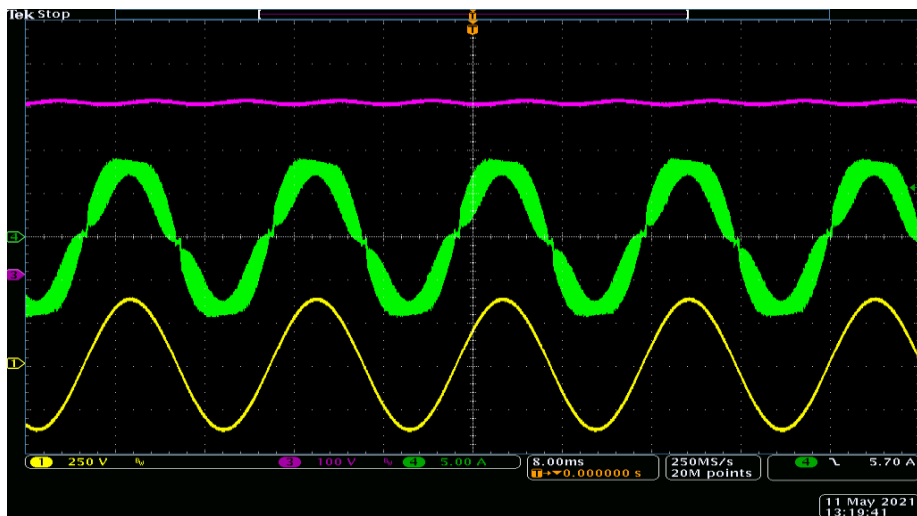
264VAC, 20%负载



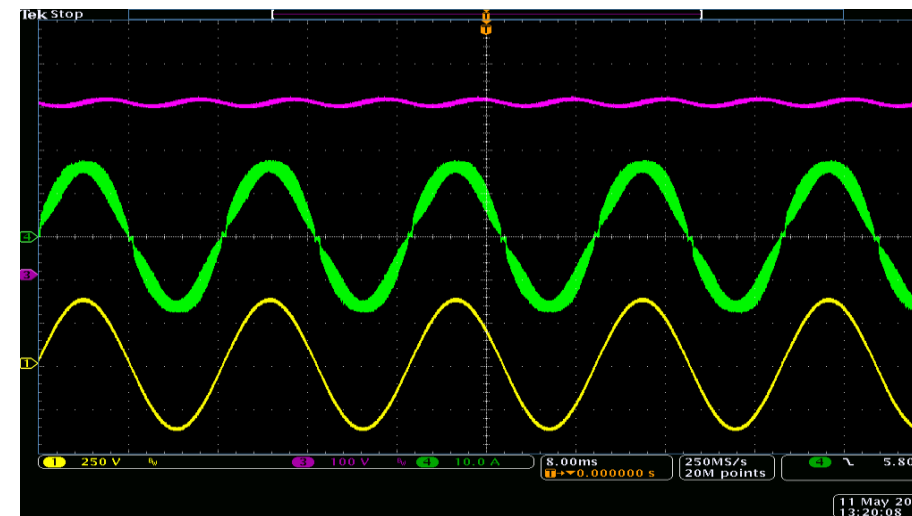
@ 264Vac, 60Hz

CH1: 输入电压
CH3: 大容量电容电压
CH4: 输入电流

264VAC, 50%负载

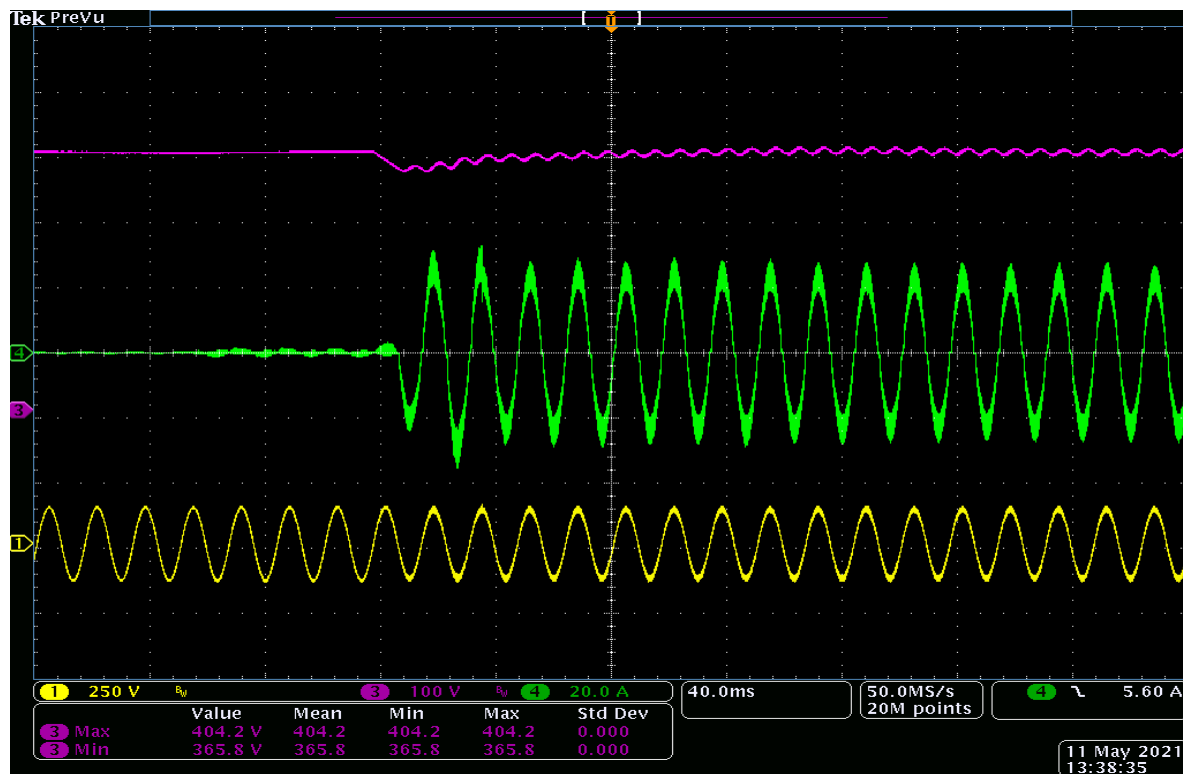


264VAC, 100%负载



负载瞬态响应

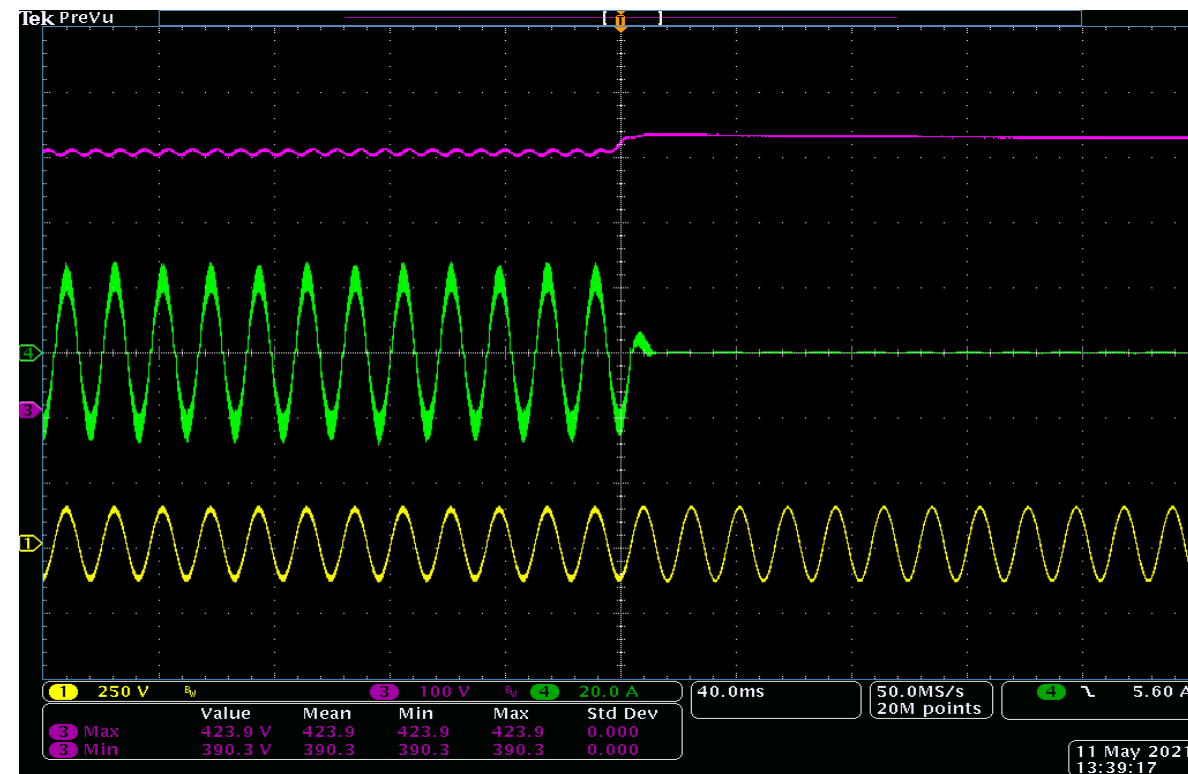
0W → 1500W



CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

1500W → 0W

@ 90VAC

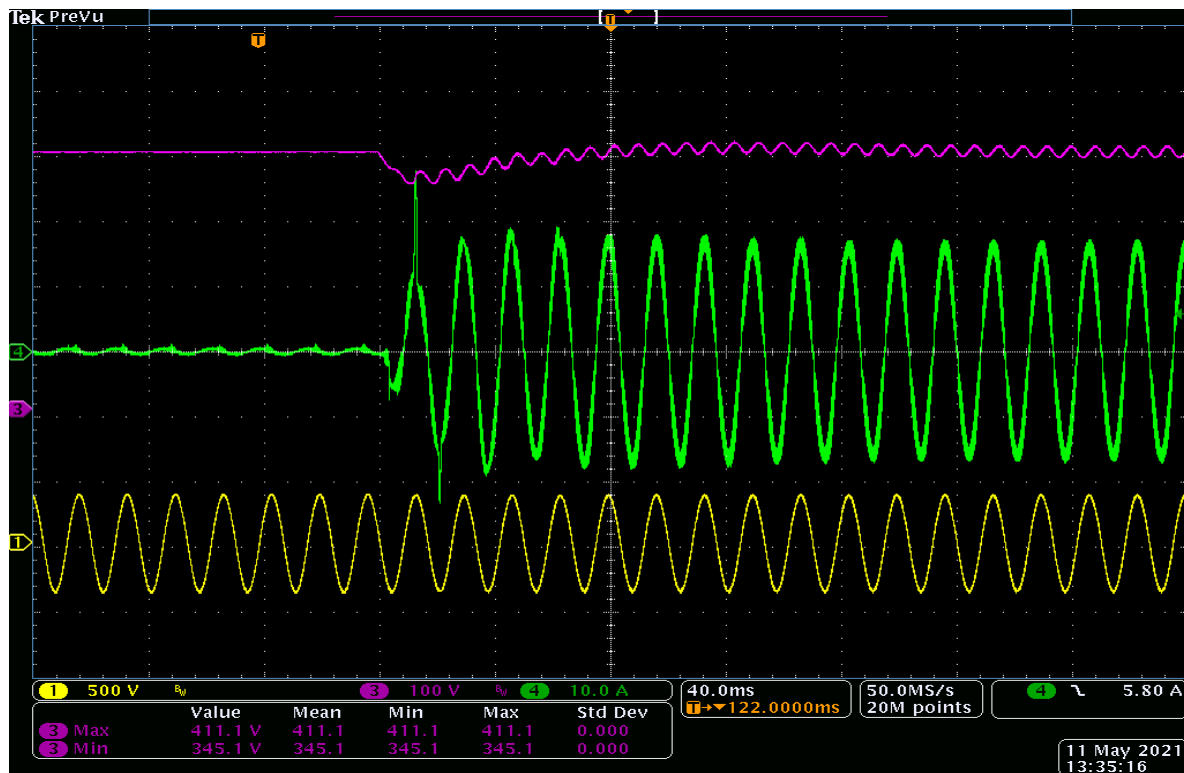


CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

负载瞬态响应

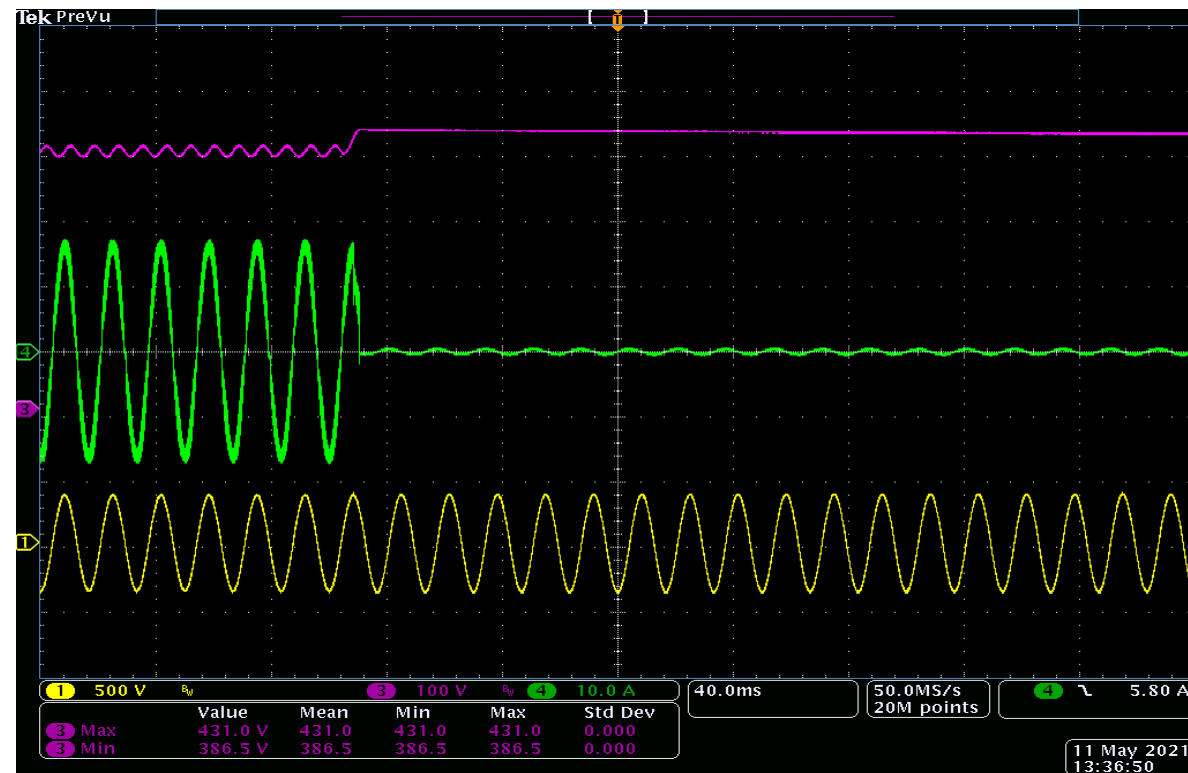
@ 264VAC

0W → 3000W



CH1: 输入电压
CH3: 大容量电容电压
CH4: 输入电流

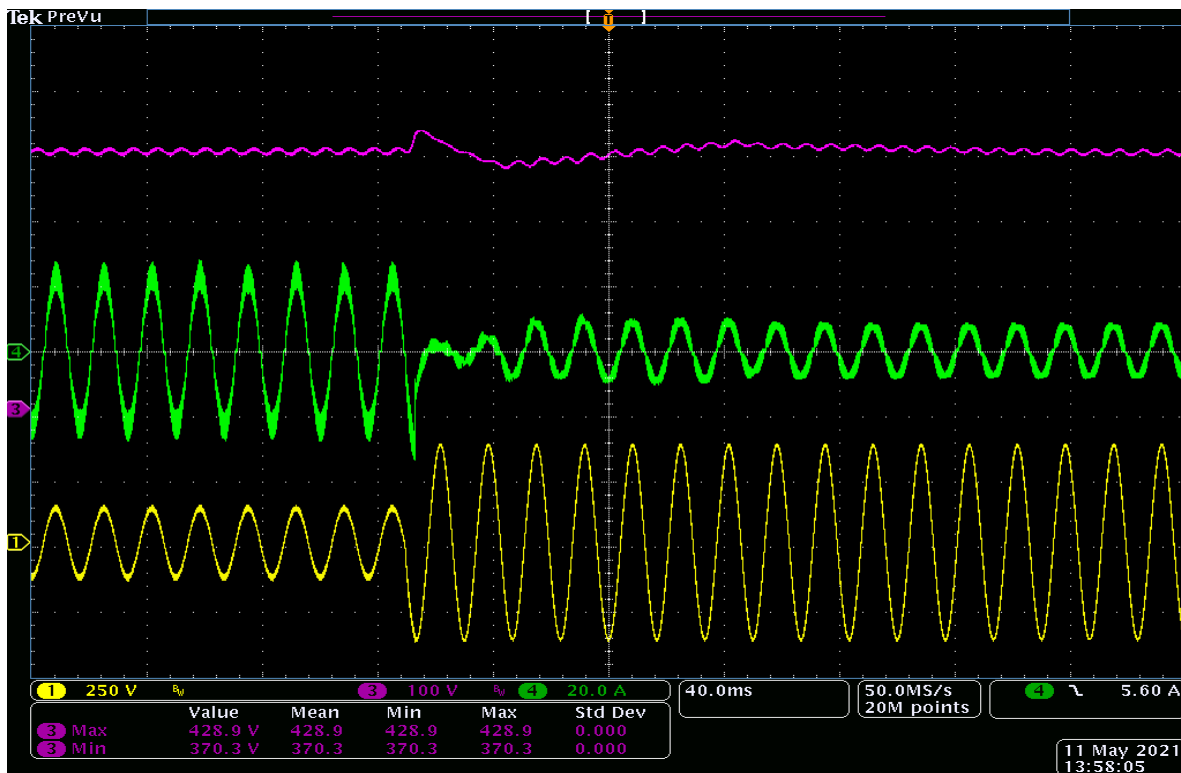
3000W → 0W



CH1: 输入电压
CH3: 大容量电容电压
CH4: 输入电流

输入电压跳变

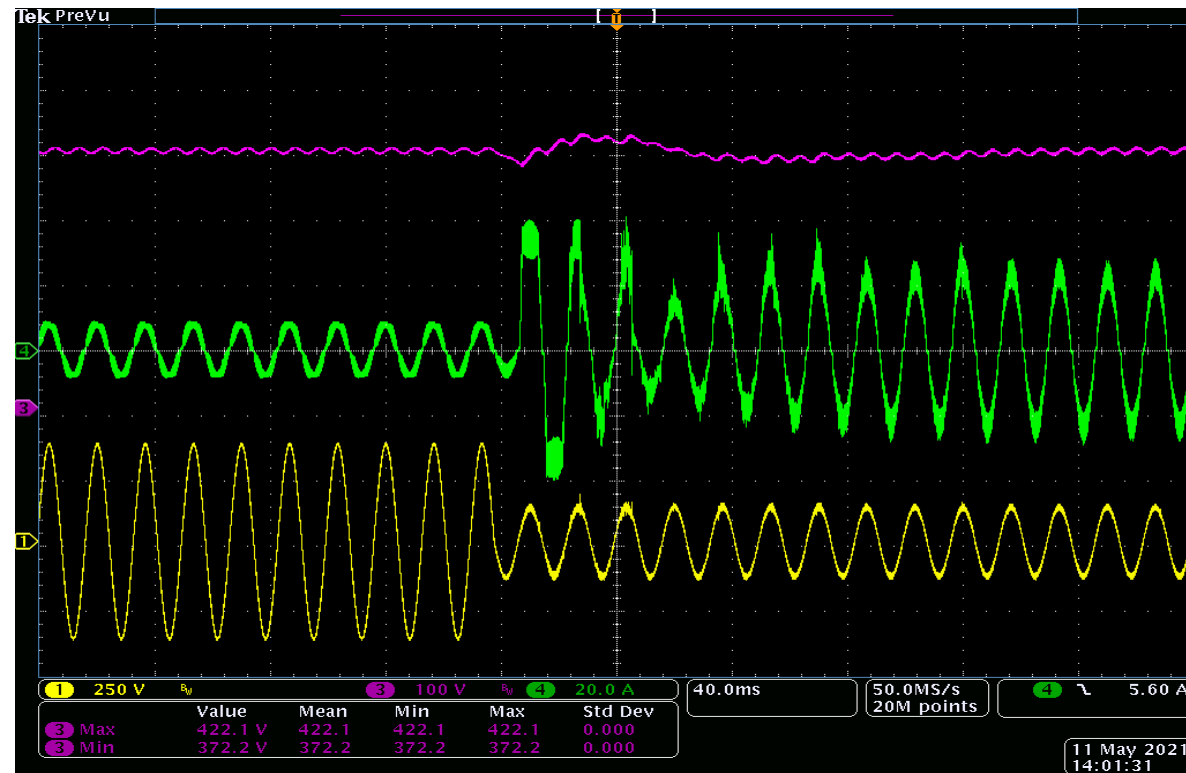
90VAC → 264VAC



CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

264VAC → 90VAC

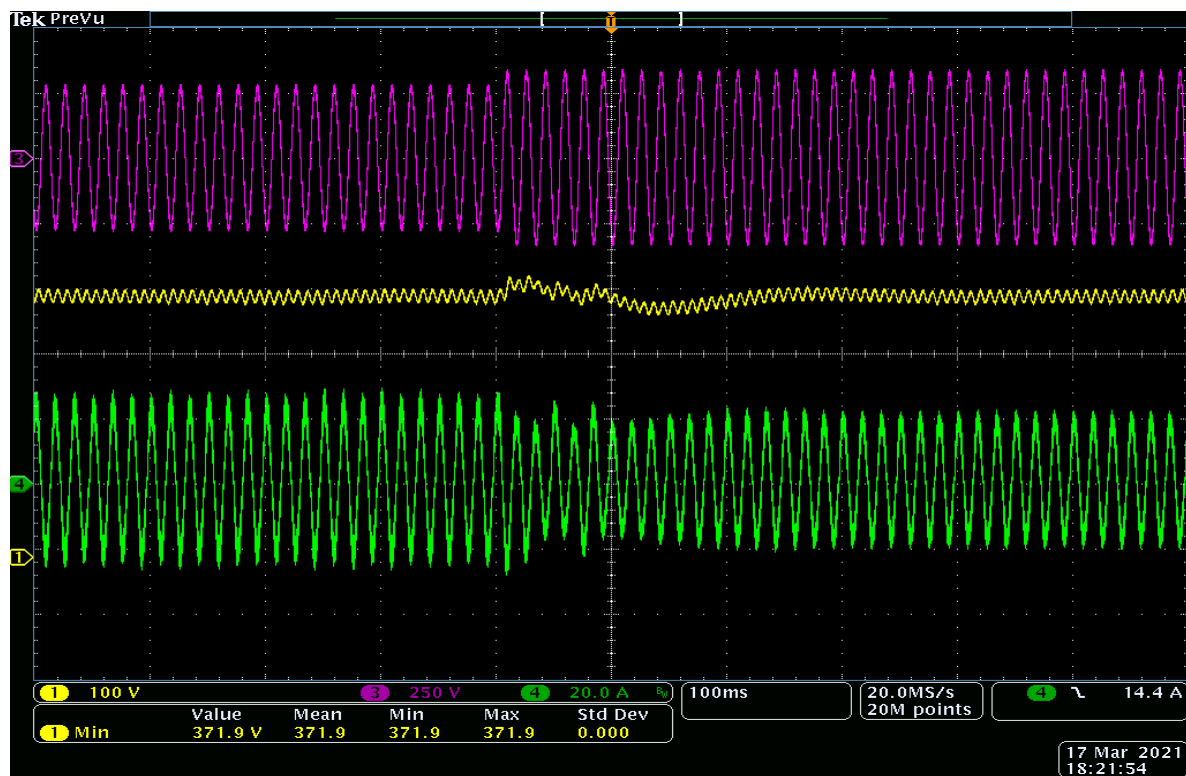
@ 1500W



CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

输入电压跳变

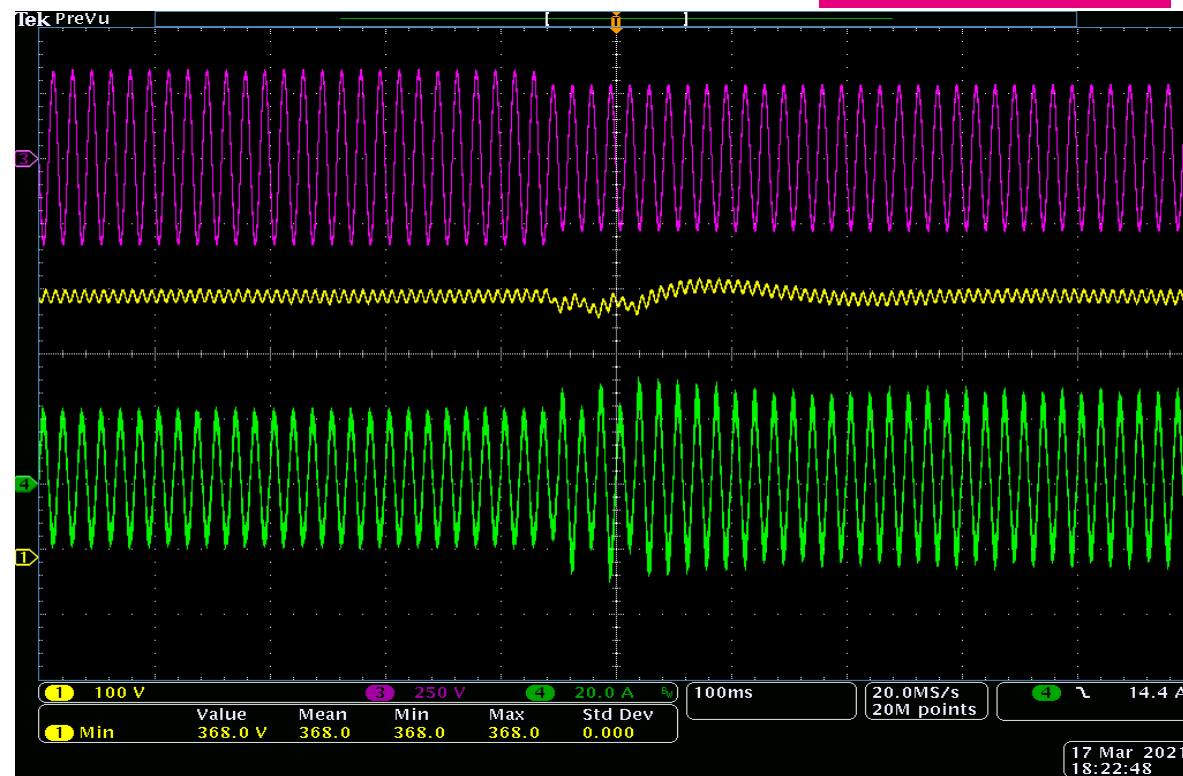
200VAC → 240VAC



CH1: 大容量电容电压 (100V/div)
CH3: 输入电压 (250V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

240VAC → 200VAC

@ 3000W负载



CH1: 大容量电容电压 (100V/div)
CH3: 输入电压 (250V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

输入电压跳变

1500W

90Vac->264Vac (1周期) ->90Vac



CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

输入频率瞬变

90Vac/1500W

63Hz → 47Hz



CH1: 总线电压 (100V/div)
CH3: 输入电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (10A/div)

47Hz → 63Hz

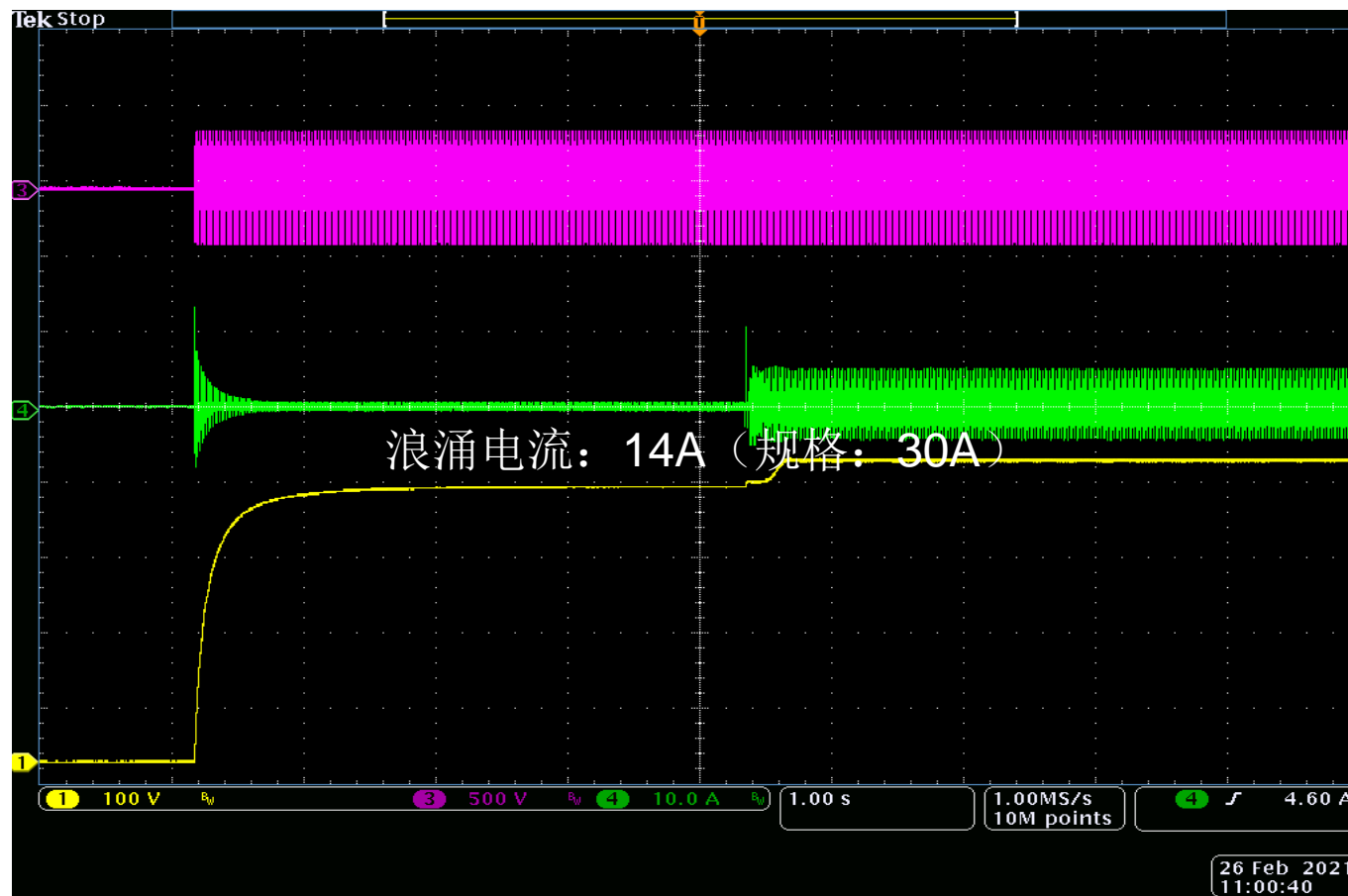


CH1: 总线电压 (100V/div)
CH3: 输入电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (10A/div)

由于PLL机制，提供了快速和准确的交流过零检测。

浪涌电流测量

264VAC, 90度



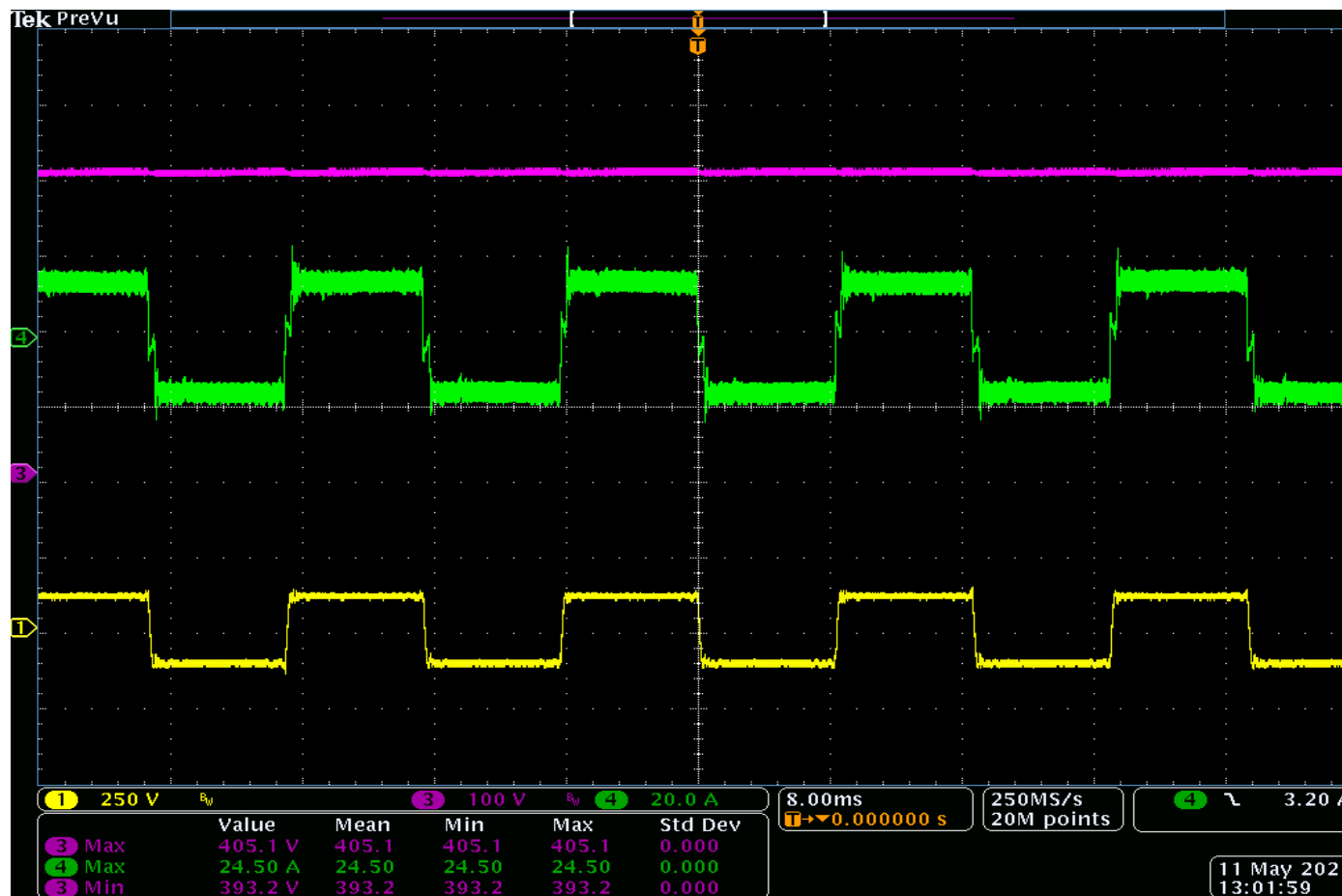
CH1: 总线电压 (100V/div)
CH3: 输入电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (10A/div)

利用继电器和NTC实现浪涌电流限制和功率损耗考量

平顶AC电压失真

115VAC, 1500W

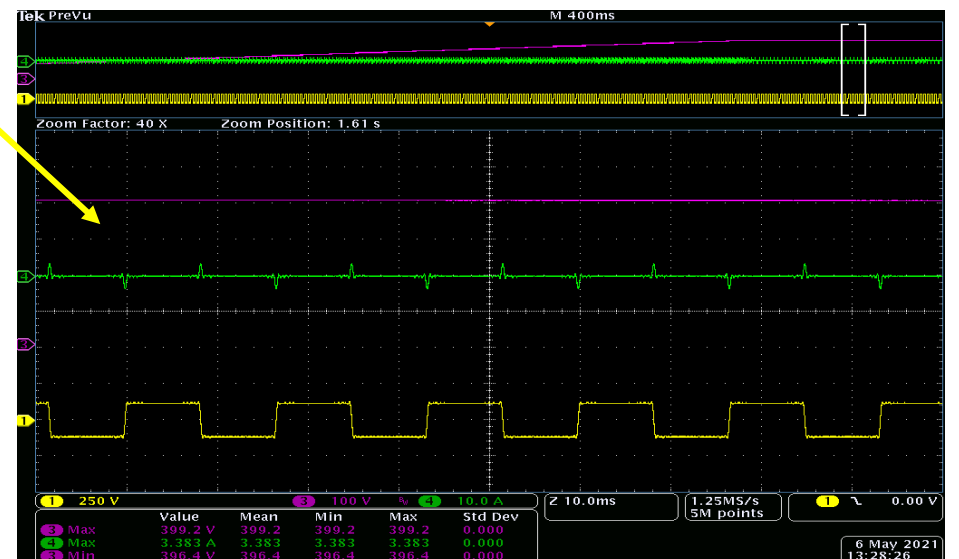
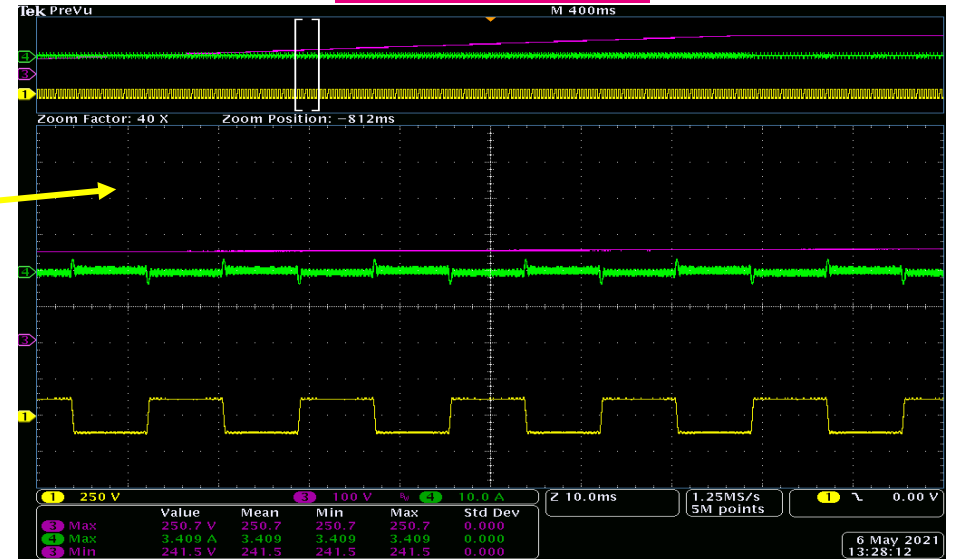
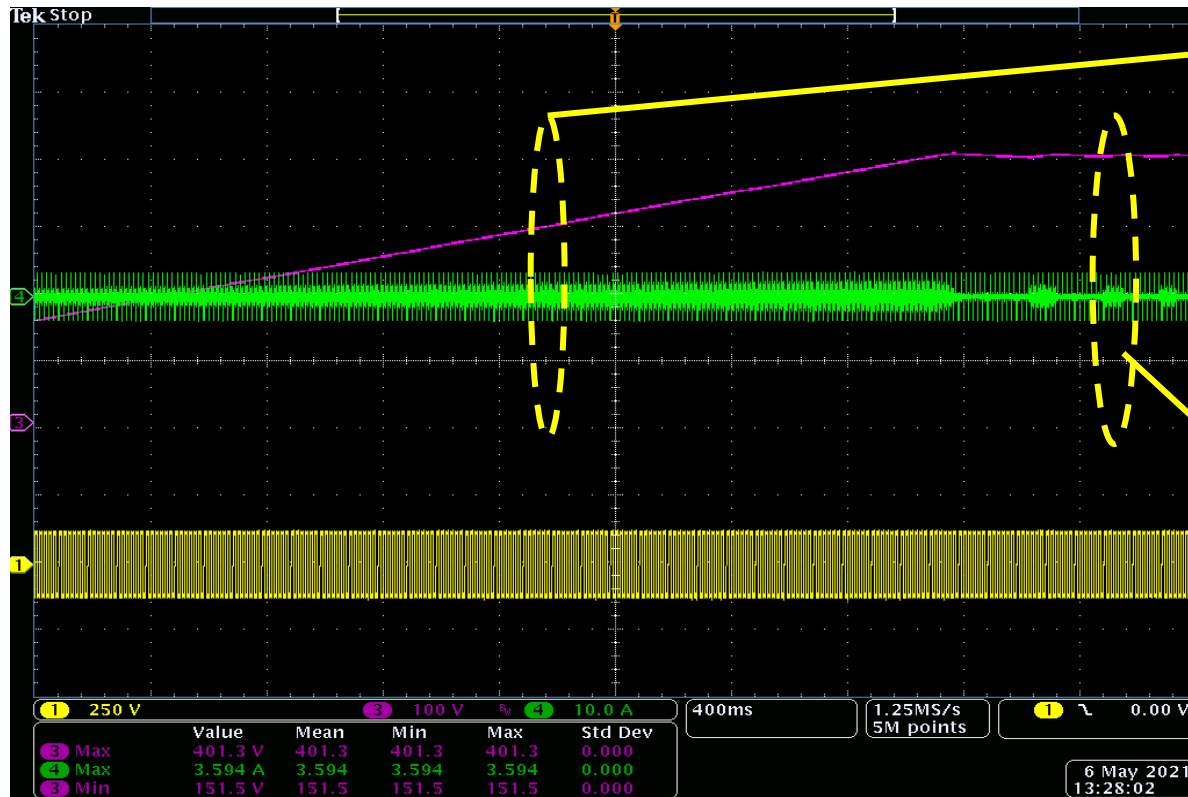
DST28条件



平顶AC电压失真

DST28条件

115VAC上电时序:

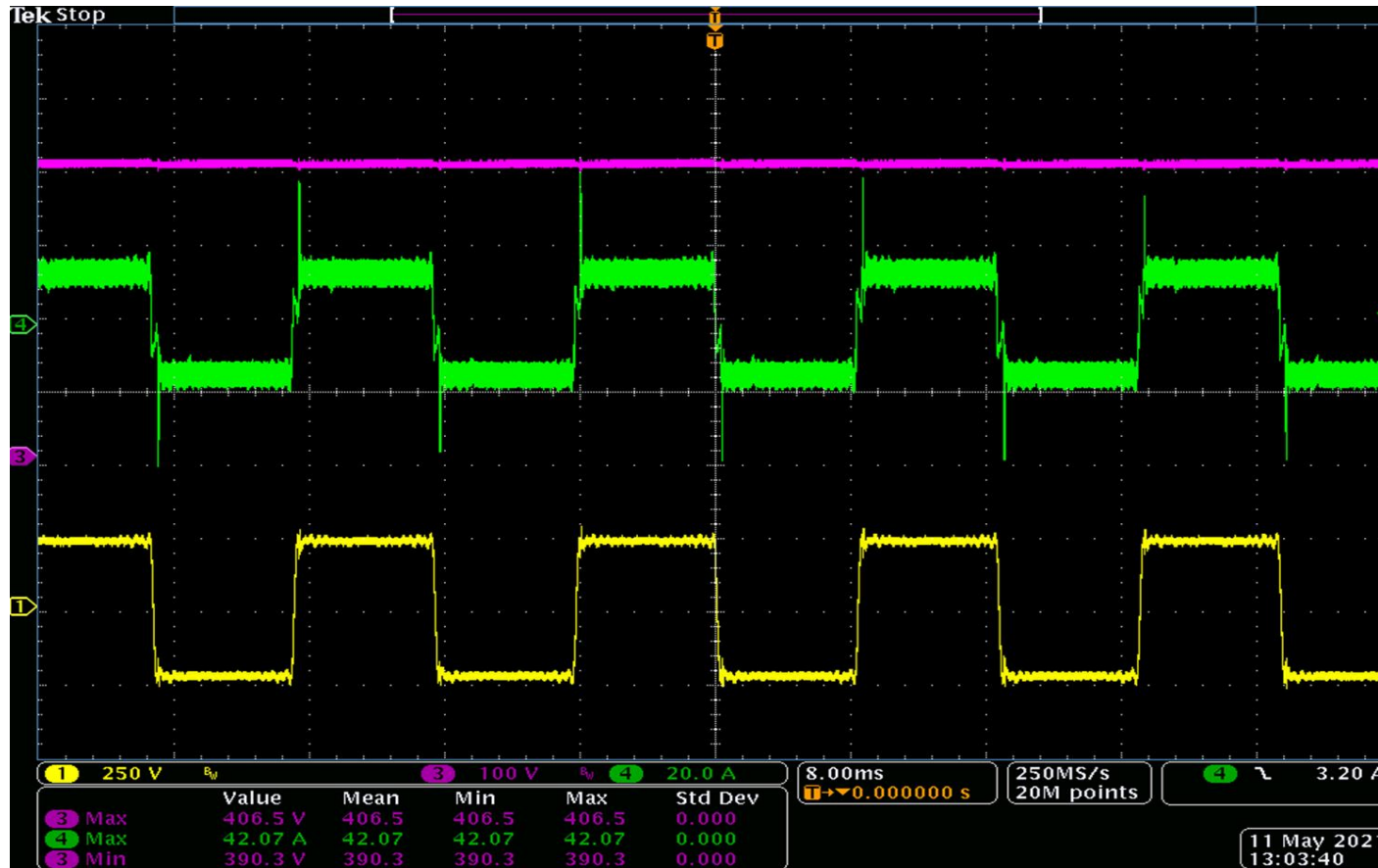


CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (10A/div)

平顶AC电压失真

230Vac, 3000W

DST28条件

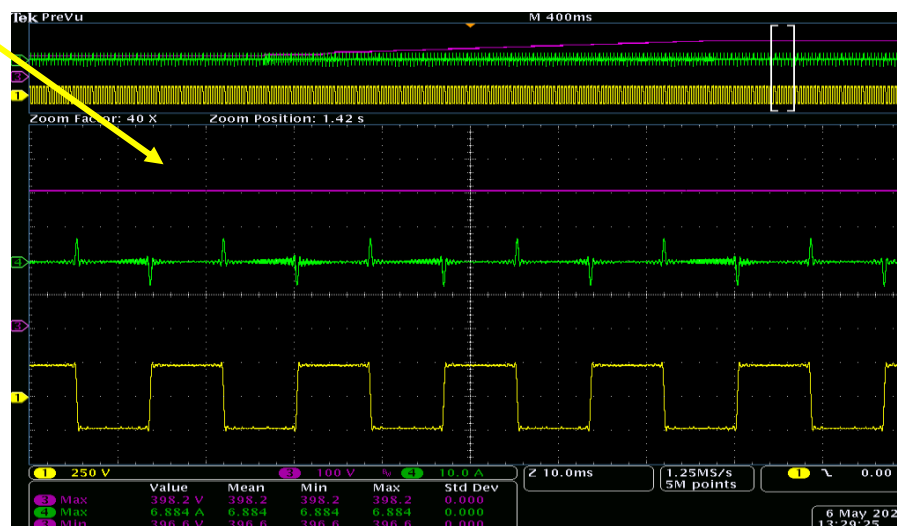
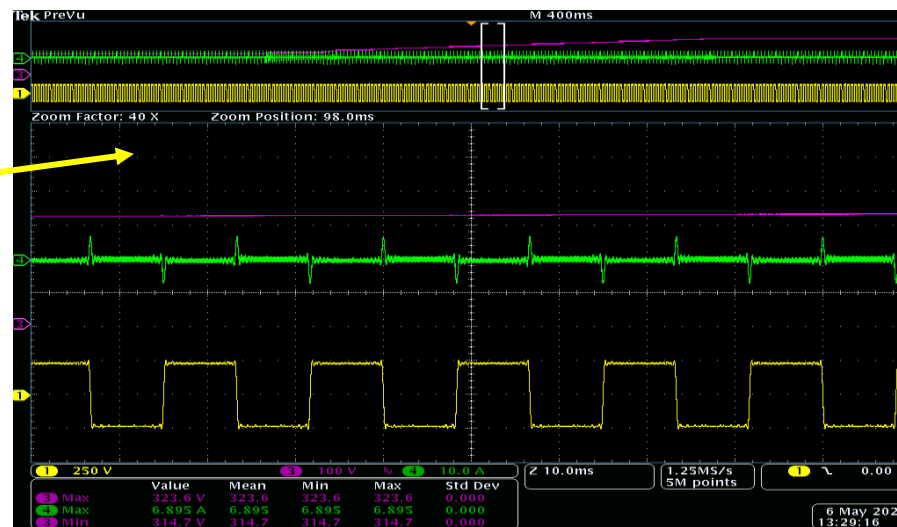
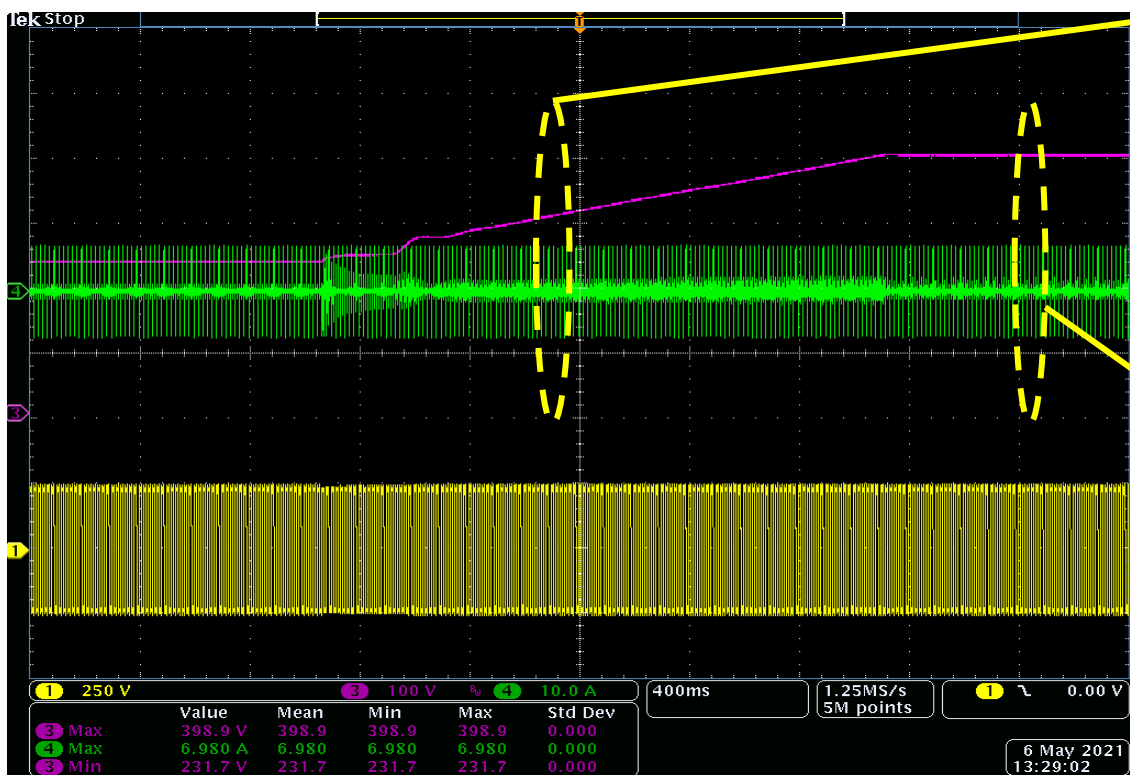


CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (20A/div)

平顶AC电压失真

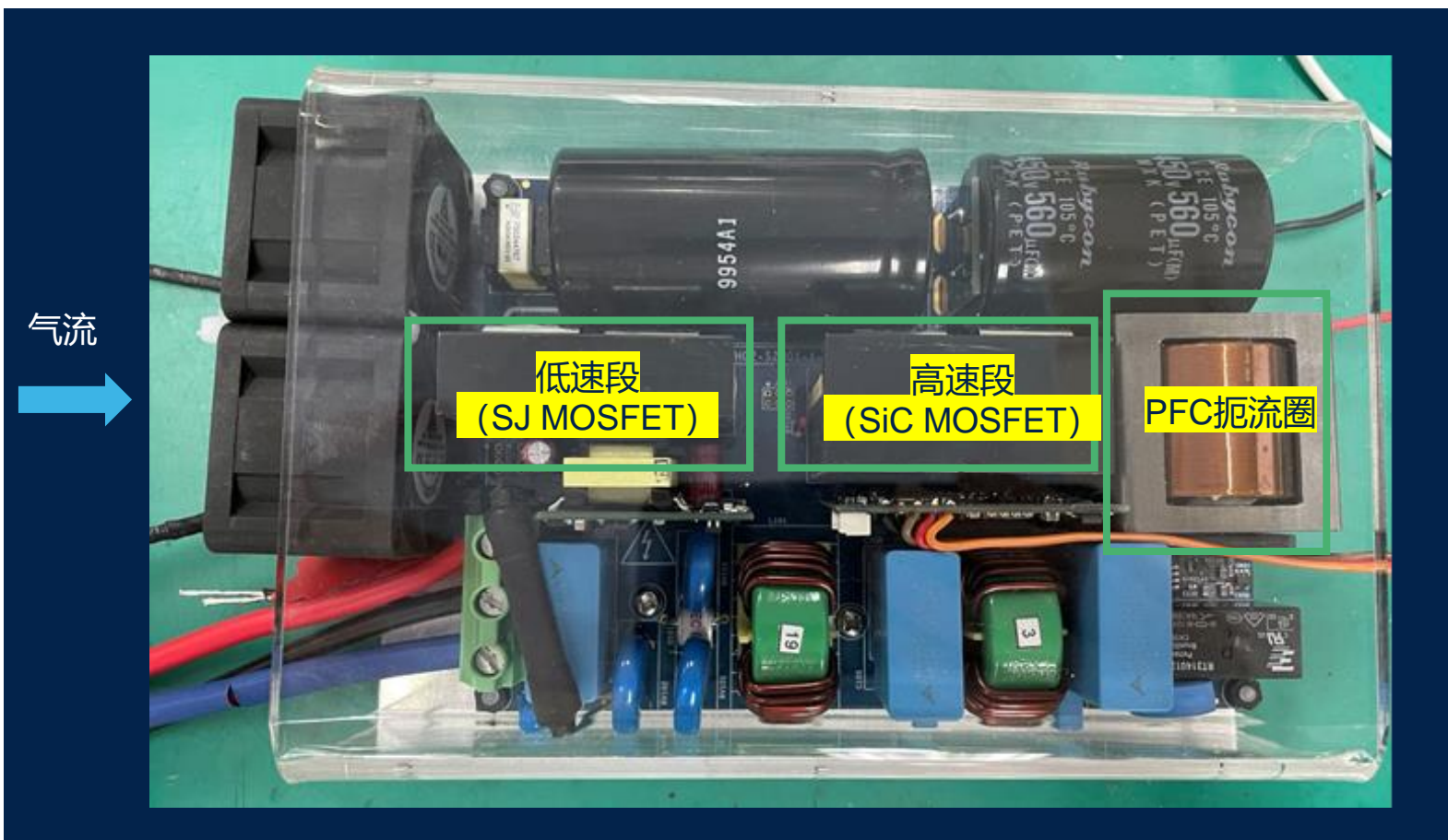
DST28条件

230VAC上电时序



CH1: 输入电压 (250V/div)
CH3: 大容量电容电压 (100V/div)
CH4: 输入电流 (10A/div)

热测试数据



	组件	115VAC 1500W 温度 (°C)	230VAC 3000W 温度 (°C)
1	SiC MOSFET	53.9	56.2
2	SJ MOSFET	33.4	35.3
3	驱动器IC	34.6	36.0
4	PFC扼流圈	45.6	48.4
5	大容量电容	35.9	38.7
6	环境	28.2	28.7

风扇外部电源热试验

230Vac/50Hz

CH		0A	0.5A	1A	1.5A	2A	2.5A	3A	3.5A	3.75A	4A	4.5A	5A	5.5A	6A	6.5A	7A	7.5A
101	PFC母线电解电容	29.6	29.8	30.2	30.1	30.9	31	31.8	32.5	33.1	33.4	32.1	33.3	34.2	35.4	36.5	37.4	38.7
103	高频开关管驱动芯片	30.7	30.8	31.3	31	31.6	31.7	32.3	32.6	33.5	33.5	32.3	33	33.5	34.2	35	35.5	36.3
104	辅助电源控制芯片	38.8	38.6	39.2	38.8	39.3	39.4	40	40.3	40.9	40.8	39.4	39.7	40	40.5	41.1	41.3	42
105	高频开关管低侧MOS	30.6	31.9	33.7	34.1	35.4	36.3	37.8	39.4	40.5	41.2	41.3	43.4	45.5	48	50.6	53.1	56.2
106	工频开关管高侧MOS	28.1	27.9	28.5	28.2	28.7	29	29.7	30.3	31	31.1	30.1	30.9	31.6	32.6	33.5	34.2	35.3
107	驱动辅助电源PWM驱动器	41.8	41.8	42.2	41.9	42.3	42.4	42.8	43.2	43.8	43.7	42.5	43.1	43.4	44	44.2	44.4	44.9
108	环境1-输入端口	27.2	27.2	27.9	27.7	27.7	28.1	28.1	29	29.4	29.6	27.4	28.5	28.7	29	29.2	29.5	29.9
109	环境2-室外	26.4	26.9	26.9	27.1	27.4	27.6	28	28.5	28.3	28.9	27	27.4	27.8	28	28.3	28.3	28.7
110	PFC电感	33.2	33.5	34.2	34.2	34.9	35.6	36.2	37.2	38.2	38.6	38	39.7	41	42.9	44.6	46.2	48.4

180V/50Hz

CH		0A	0.75A	1.5A	2.25A	3A	3.75A	4.5A	5.25A	6A	6.75A	7.5A
1	PFC母线电解电容	29.3	27.4	27.6	28.3	29.8	31.1	32.5	34	35.8	37.6	39.7
2	输入X电容C105	28.6	27.7	28.1	29	30.1	31.3	32.3	33.5	34.8	36.3	38
3	高频开关管驱动芯片	27.5	28	28.3	28.9	30.1	30.8	31.7	32.5	33.3	34.1	34.8
4	辅助电源控制芯片	33.8	34.1	34.4	35.1	36.1	36.8	37.4	38	38.5	39.2	39.7
5	高频开关管低侧MOS	27.7	29.9	31.4	33.5	36	38.9	42.1	45.6	49.7	54.6	60.2
6	工频开关管高侧MOS	25.5	25.7	26.1	26.8	27.9	29	30.2	31.2	32.4	33.9	35.1
7	驱动辅助电源PWM驱动芯片	35.8	35.8	36.1	36.7	37.8	38.2	38.7	39.1	39.5	40	40.4
8	环境1-输入端口	24.5	24.7	24.8	25.8	26	27	27.6	27.8	28.1	28.4	28.9
9	环境2-机壳外侧	24.6	24.8	25	25.8	26.2	27.1	27.5	27.8	28	28.5	28.6
10	PFC电感	34.2	32	32.6	33.9	35.8	38.2	40.6	43.3	46.6	50.5	54.6

115V/50Hz

CH		0.5A	1A	1.5A	2A	2.5A	3A	3.5A	3.75A
101	PFC母线电解电容	27.7	28.3	29.3	30.6	31.6	33	34.7	35.9
103	高频开关管驱动芯片	29.1	29.5	30.2	31.1	32.1	32.8	33.6	34.6
104	辅助电源控制芯片	37.2	37.5	37.9	38.5	38.8	39.4	39.8	40.3
105	高频开关管低侧MOS	31.7	33.4	35.8	38.5	42.1	46	50.8	53.9
106	工频开关管高侧MOS	26.4	26.8	27.6	28.5	29.9	31.1	32.4	33.4
107	驱动辅助电源PWM驱动芯片	40.2	40.5	40.9	41.4	41.9	42.3	42.8	43.1
108	环境1-输入端口	25.4	25.8	26.3	26.5	27.1	27.7	28.1	28.2
109	环境2-机壳外侧	25.4	25.8	26.1	26.3	26.3	26.7	26.9	27.1
110	PFC电感	31.1	32.2	33.7	35.4	37.6	40.2	43.6	45.6

测试条件:

环境温度Ta=25°C,

30分钟热机老化

2个风扇 Vfan=7.4

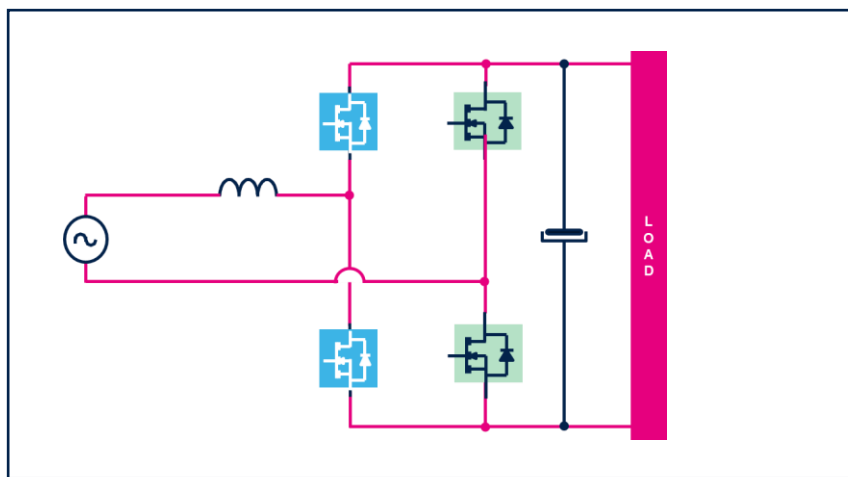
测试样机为2#, 软件

版本为V08



ST适用于图腾柱PFC产品介绍

意法半导体面向图腾柱PFC提供的产品



SiC MOSFET

STPOWER SiC MOSFET: 650 V Gen2

Part Number	V _{DS} (V)	R _{DS(ON)} Typ @ 25° C (Ω)	I _D (A)	Package			
				HiP247	HiP247-LL	HiP247-4LL	H2PAK-7L
				T _J MAX= 200°C			T _J MAX= 175°C
SCTx35N65G2V	650	0.55	45	X	X		
SCTWA35N65G2V-4*						X	
SCTH35N65G2V-7							X
SCTW35N65G2VAG*				X			
SCTH35N65G2V-7AG							X
SCTx90N65G2V	650	0.018	119	X	X		
SCTWA90N65G2V-4*						X	
SCTH90N65G2V-7							X
SCTW100N65G2AG				X			
SCTH100N65G2-7AG							X
		0.020	100				

STPOWER SiC MOSFET: 1200 V Gen2

Part Number	V _{DS} (V)	R _{DS(ON)} Typ @ 25° C (Ω)	I _D (A)	Package			
				HiP247	HiP247-LL	HiP247-4LL	H2PAK-7L
				T _J MAX= 200°C			T _J MAX= 175°C
SCTW40N120G2VAG	1200	0.075	33	X			
SCTW40N120G2V*		0.070	45	X			
SCTWA40N120G2V-4*						X	
SCTW60N120G2AG		0.045	60	X			
SCTW70N120G2V		0.025	95	X			
SCTWA70N120G2V-4*							X

KEY FEATURES

- Very low switching losses
- Low power losses at high temperatures
- Higher operating temperature (up to 200 °C)
- Body diode with no recovery losses
- Easy to drive

KEY BENEFITS

- Smaller form factor and higher power density
- Reduced size/cost of passive components
- Higher system efficiency
- Reduced cooling requirements and heatsink size



SiC MOSFET的隔离式栅极驱动

1700 V电流隔离单通道和双通道



STGAP2S
STGAP2SC



STGAP2D

电流隔离, 高达1700 V的
高压导轨

极高的瞬态抗扰性, 高达
 $\pm 100 \text{ V / ns}$



快速开关频率
(仅Tp 80ns)

高电流能力
 $4\text{A } I_{\text{sink}} / I_{\text{source}}$

6000 V电流隔离单通道和双通道



STGAP2HS
STGAP2HSC

STGAP2SiCS
STGAP2SiCSC

电流隔离, 高达6000 V的
高压导轨

极高的瞬态抗扰性, 高达
 $\pm 100 \text{ V / ns}$



快速开关频率
(仅Tp 80ns)

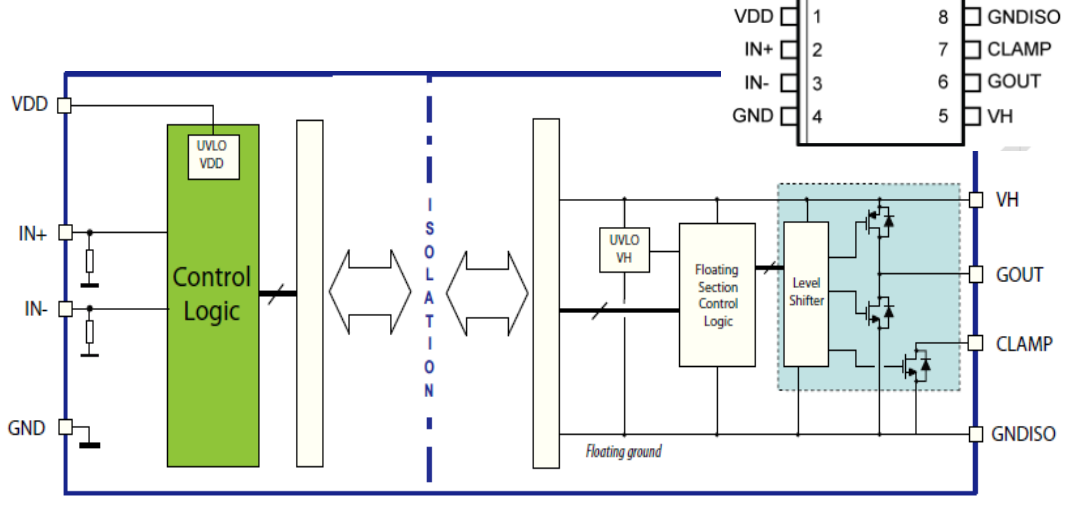
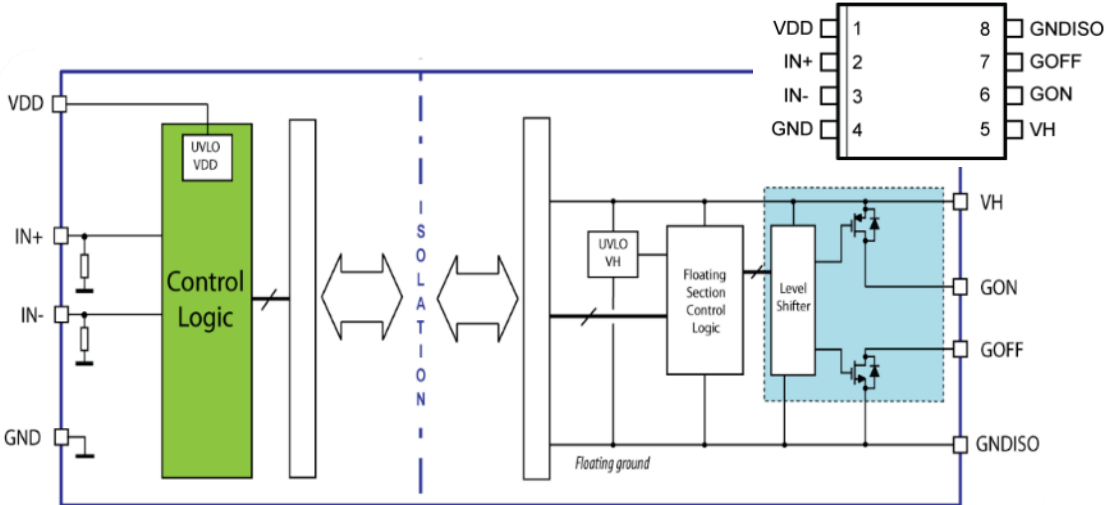
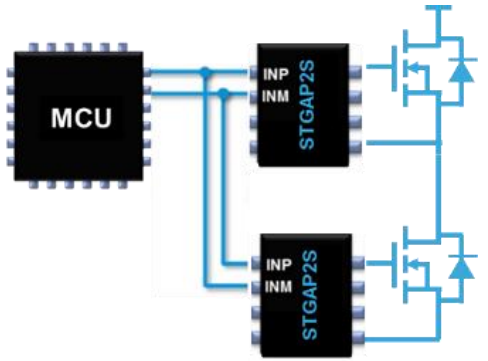
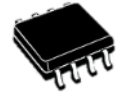
高电流能力
 $4\text{A } I_{\text{sink}} / I_{\text{source}}$

STGAP2S, STGAP2SC

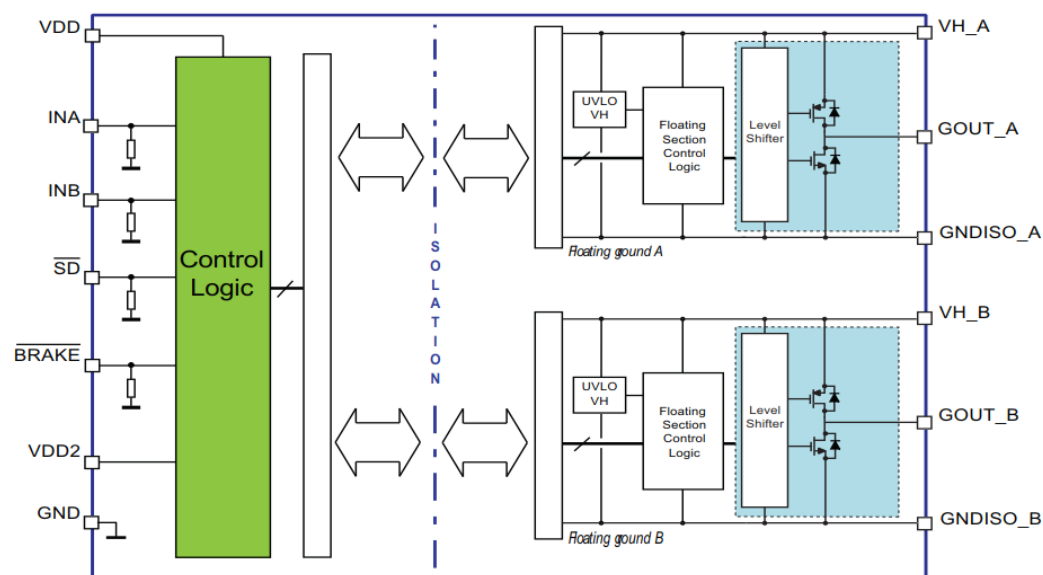
1700 V, 4A隔离式栅极驱动器

- 3V3 / 5 V逻辑输入 (逻辑阈值, VDD的1/3、2/3)
- 电源电压可达26 V
- 4 A灌/拉电流能力
- 较短的传输延时: 80 ns
- UVLO功能
- 待机功能
- 100 V/ns CMTI
- 高压导轨达1700 V
- 温度关断保护

- 有源高输入引脚与有源低输入引脚, 用于硬件互锁
- **STGAP2S**: 独立的输出选项, 轻松实现栅极驱动速度调谐
- **STGAP2SC**: Miller钳位引脚选项 避免感应电压引起的误导通
- 负栅极驱动能力
- SO8 封装



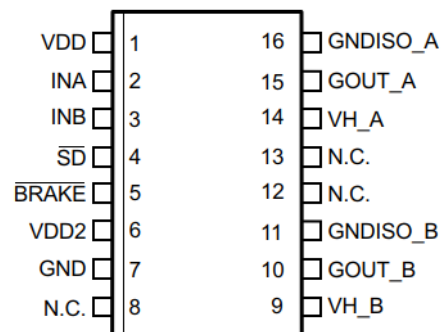
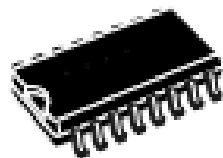
1700 V, 4A隔离式栅极驱动器



- 3V3 / 5 V逻辑输入 (逻辑阈值, VDD的1/3、2/3)
- **电源电压可达26 V**
- **4 A灌/拉电流能力**
- 较短的传输延时: 80 ns
- UVLO功能
- 待机功能
- 100 V/ns CMTI
- 高压导轨达1700 V
- 温度关断保护

主要应用

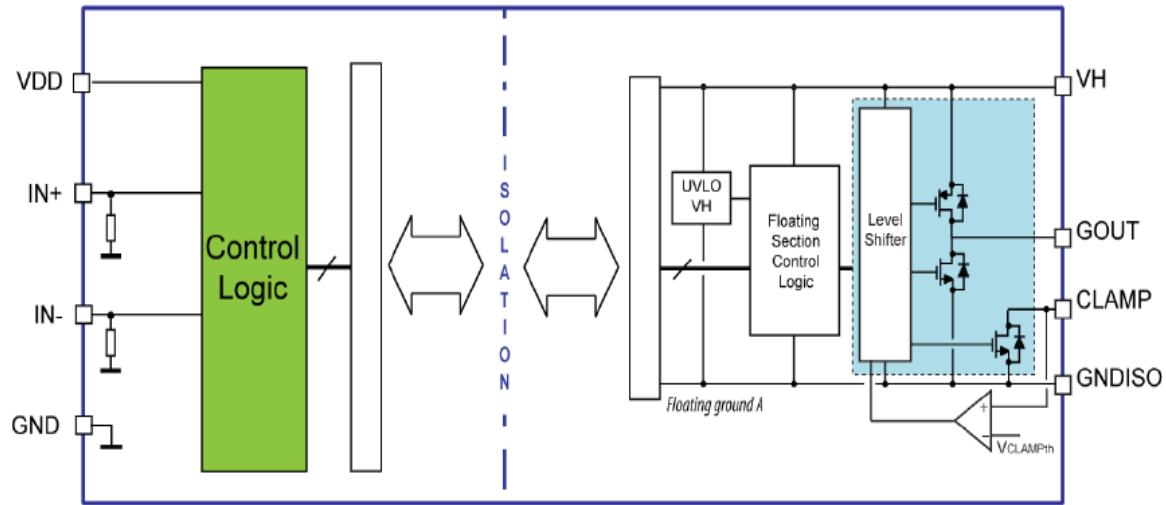
- 电机控制
- 工厂自动化
- 工业驱动和风扇
- DC-DC转换器
- 感应加热
- 焊接



- 单一输入引脚, 与输出同相
- 关断SD引脚, 集成了下拉电阻
- 断路引脚
- 互锁
- 负栅极驱动能力
- SO16 封装

STGAP2SICS, STGAP2SICSC

6kV隔离单通道, 4 A栅极驱动器适用于SiC



主要应用

- 电机控制
- 工厂自动化
- 工业驱动和风扇
- DC-DC转换器
- 焊接



关键优势 & 特性

高性能, 适用于SiC

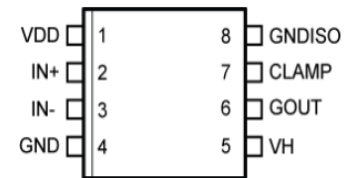
- 电气隔离, 最高可达6kV
- 4 A灌/拉驱动器电流能力
- > 100 V / ns瞬态抗扰度
- 具有迟滞的3.3 V至5 V TTL / CMOS输入
- 传输延迟80ns

稳健性

- UVLO 针对SiC进行了优化
- Miller钳位
- 热保护

最小的尺寸, 最轻的重量

- 布局紧凑简化的SO8W封装



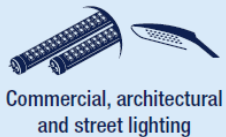
STM32G474 MCU

高分辨率PWM和丰富的模拟外设使STM32G474 MCU适合数字控制

STM32G474基于32位Arm® Cortex®-M4内核，具有在170 MHz下运行的FPU和DSP指令，非常适合数字电源转换

- 32位Arm® Cortex®-M4核心带FPU，运行频率170MHz
- CCM-SRAM程序执行加速器可达32 kb
- 数学运算硬件加速器（CORDIC / FMAC）
- 高分辨率定时器（184ps）用于精确的PWM控制
- 丰富、先进的模拟
- USB Type-C电力传输（PD）
- +/- 1%内部时钟

MAIN APPLICATIONS



Commercial, architectural and street lighting



Server/Telecom



Welding



Charging station



UPS & Data center Power supply



Solar inverters



life.augmented

Connectivity	Arm® Cortex®-M4 Up to 170 MHz 213 DMIPS	Timers
4x SPI, 4x I²C, 6x UxART		5x 16-bit timers
1x USB 2.0 FS, 1x USB-C PD3.0 (+PHY)		2x 16-bit basic timers
3x CAN-FD		3x 16-bit advanced motor control timers
2x I²S half duplex, SAI	2x 32-bit timers	
External interface	Floating Point Unit	1x 16-bit LP timer
FSMC 8-/16-bit (TFT-LCD, SRAM, NOR, NAND)	Memory Protection Unit	1x HR timer (D-Power) 12-channel w/ 184ps (A. delay line)
Quad SPI	Embedded Trace Macrocell	Analog
Accelerators	16-channel DMA + MUX	5x 12-bit ADC w/ HW overspl
ART Accelerator™	Up to 2x 256-Kbyte Flash memory / ECC Dual Bank	7x Comparators
32-Kbyte CCM-SRAM	96-Kbyte SRAM	7x DAC (3x buff + 4x non-buff)
Math Accelerators		6x Op-Amp (PGA)
Cordic (trigo...) Filtering		1x temperature sensor
		Internal voltage reference

总结

本评估板主要用于图腾柱PFC变换器，该变换器通过消除二极管电桥损耗的方式提高效率。

- 在高频开关管采用SiC MOSFET，工频开关管采用低导通阻抗的MDmesh MOSFET，进一步提高了整体效率。
- 意法半导体提供最新的技术（SiC/STGAP/MDmesh MOS/STM32G4），用于实现高功率和效率的图腾柱PFC解决方案。
- 该参考设计提供：
 - 面向图腾柱PFC变换器的数字电源解决方案
 - 峰值效率约为98.5%
 - 功率密度高达82W/inch³
 - 最大负载时的iTHD失真低于5%
 - 最大负载时PF高于0.99



life.augmented

扫描以下二维码
获得功率及模拟产品更多资讯



PDSA 微信公众号



能以致动子网站



Our technology starts with You



了解更多信息，请访问www.st.com

© STMicroelectronics - 保留所有权利。

ST徽标是STMicroelectronics International NV或其附属公司在欧盟和/或其他国家的商标或注册商标。若需意法半导体商标的更多信息，请参考www.st.com/trademarks。

其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。



life.augmented