



life.augmented

STM32G4图腾柱PFC 数字解决方案的设计考量

Chill Ye 叶润钊
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



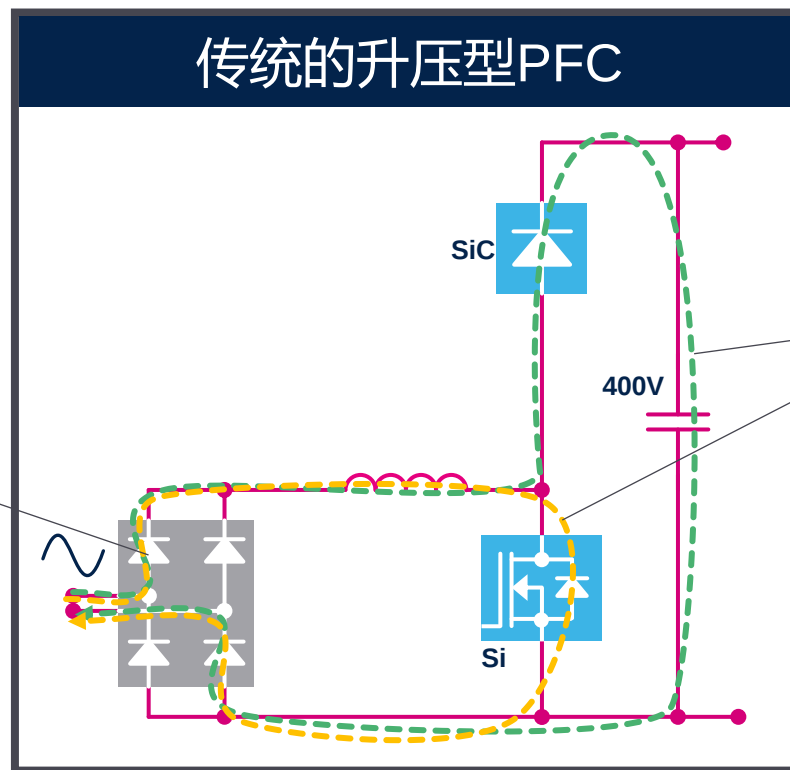
- 1 图腾柱PFC与设计挑战
- 2 3kW图腾柱PFC的数字解决方案
- 3 STM32G4主流系列
- 4 总结

图腾柱PFC与设计挑战

单相PFC拓扑/背景

如何改善影响PFC效率的关键因素？

传统的升压型PFC



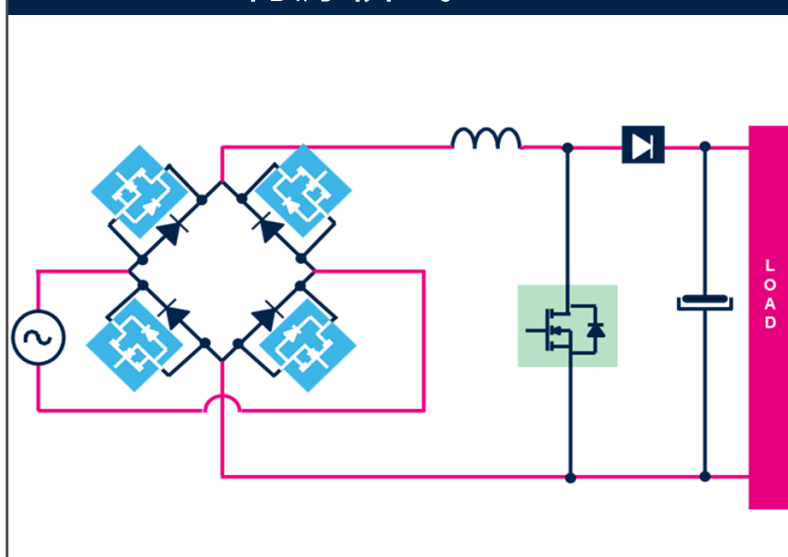
整流桥二极管 V_f 引起的导通损耗

功率回路上有3个分立元件串联在一起

PFC拓扑与效率提升的比较

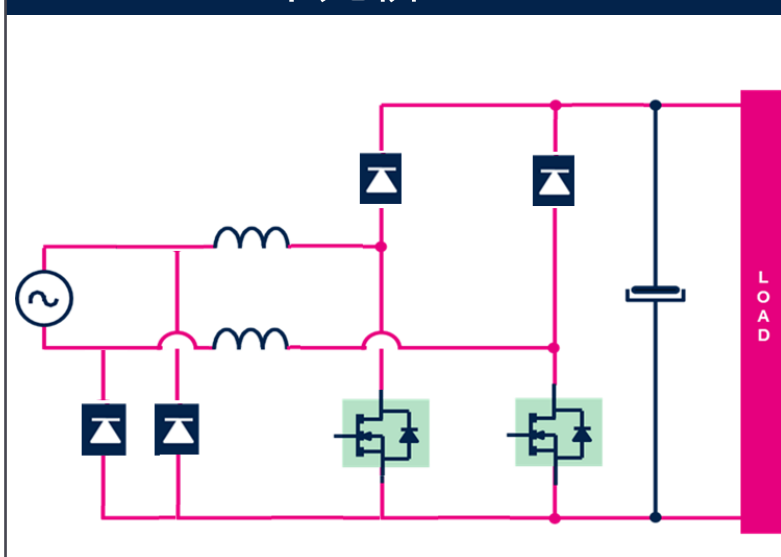
图腾柱配置有利于在PFC拓扑中实现高效率和高功率密度

有源桥式PFC



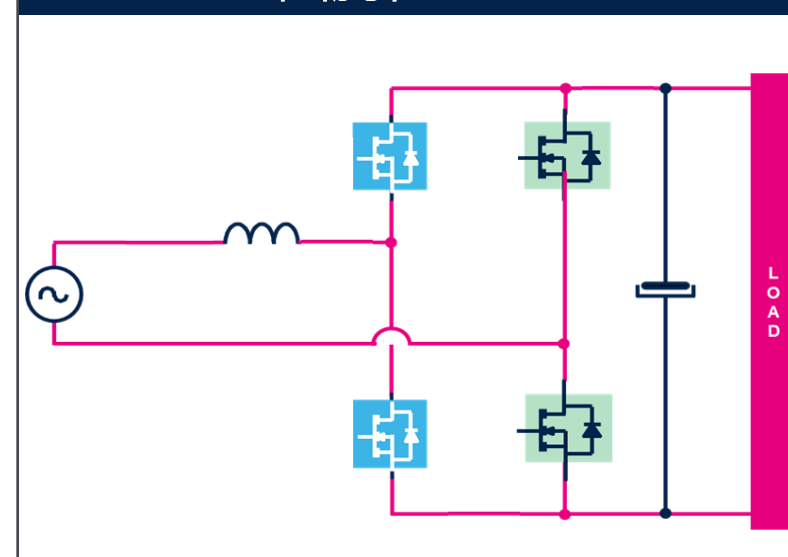
- + 控制：简单
- + 效率：优+ (~98.5%)
- 元件数：多
- 成本高 (低Rdson MOSFETx4)

半无桥PFC



- + 控制：简单
- + 效率：优+ (~98.0%)
- 元件数：多
- 电感利用率低

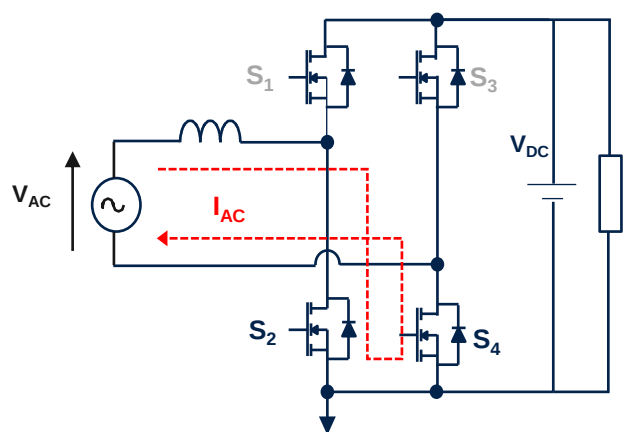
图腾柱PFC



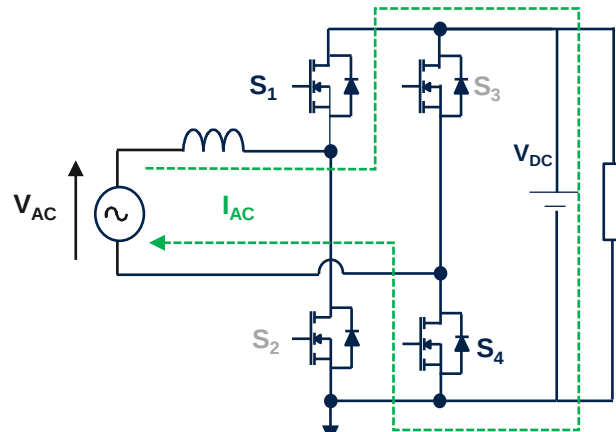
- 控制：复杂
- + 效率：优++ (98.5~99%)
- + 元件数：少
- + 功率密度：高

图腾柱PFC正半周工作原理

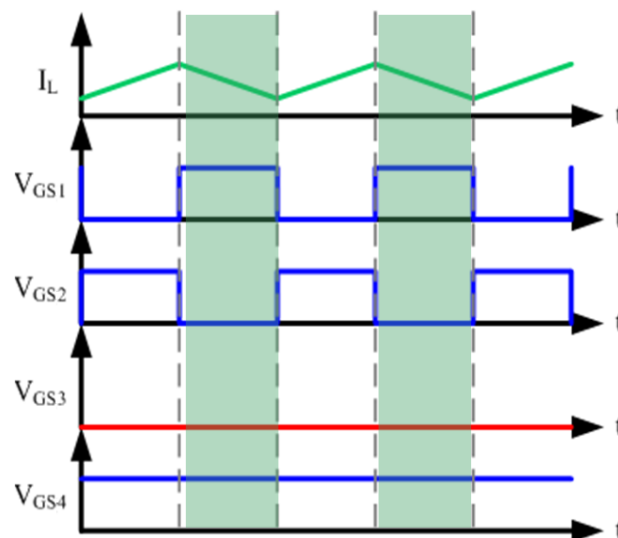
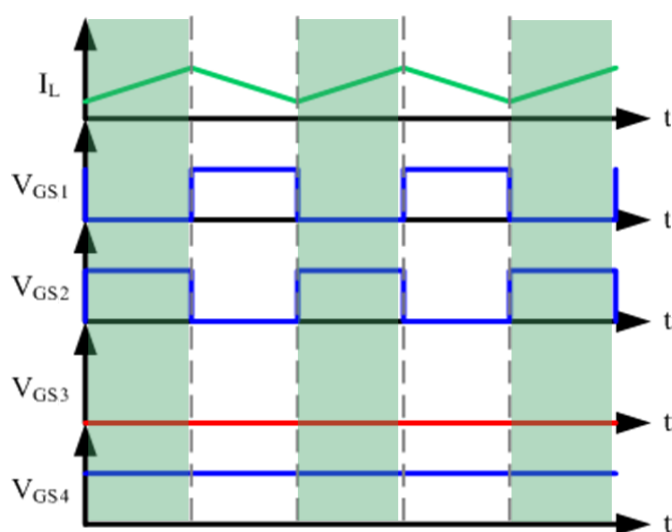
- S1、S2：高速开关
- S3、S4：低速开关



S2闭合，电感电流充电



S2断开，电感电流放电



正半周 ($V_{AC} > 0$)

主开关：S2控制向PFC电感充电的输入电流，以产生正弦波形

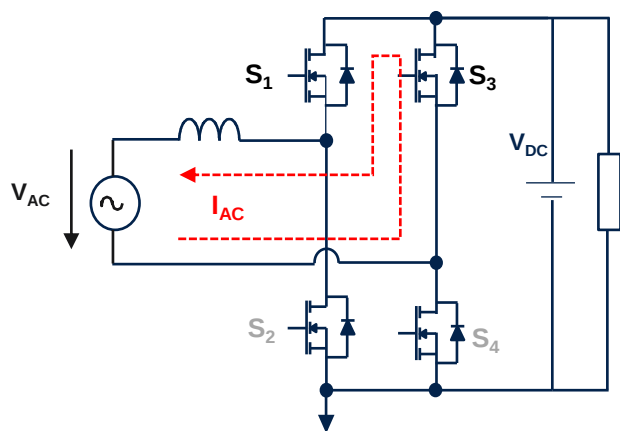
同步开关：S1是互补型开关，提供电感电流的放电路径

常闭开关：S4

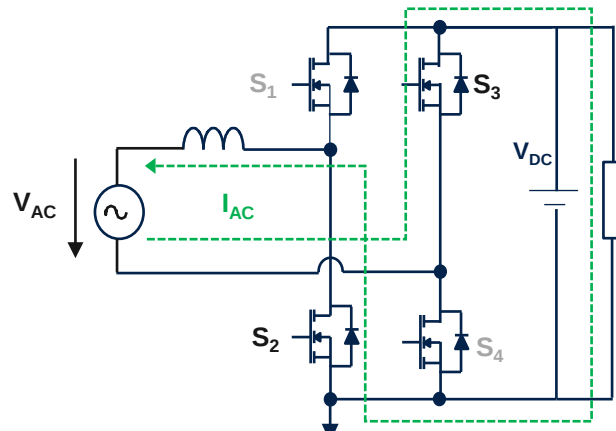
常开开关：S3

图腾柱PFC负半周工作原理

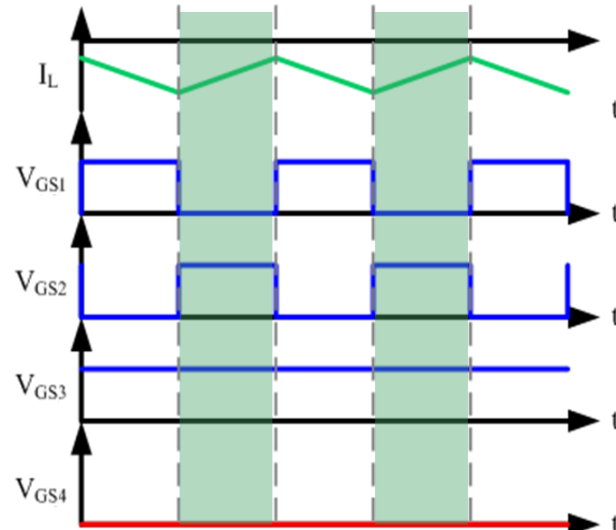
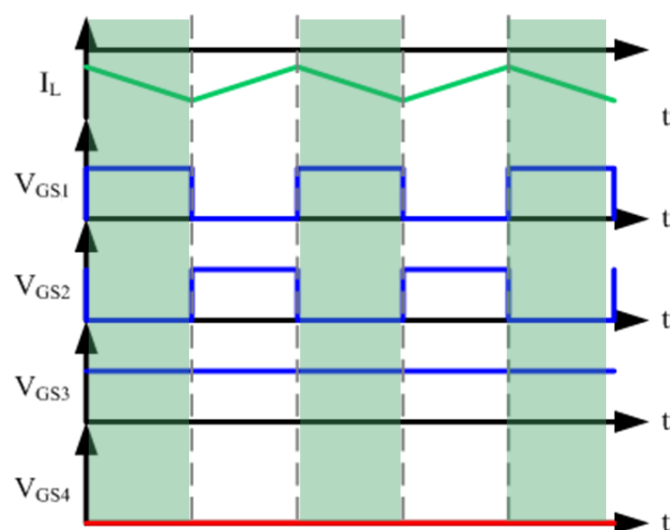
- S1、S2：高速开关
- S3、S4：低速开关



S1闭合，电感电流充电



S1断开，电感电流放电



负半周 ($V_{AC} < 0$)

主开关：S1控制向PFC电感充电的输入电流，以产生正弦波形

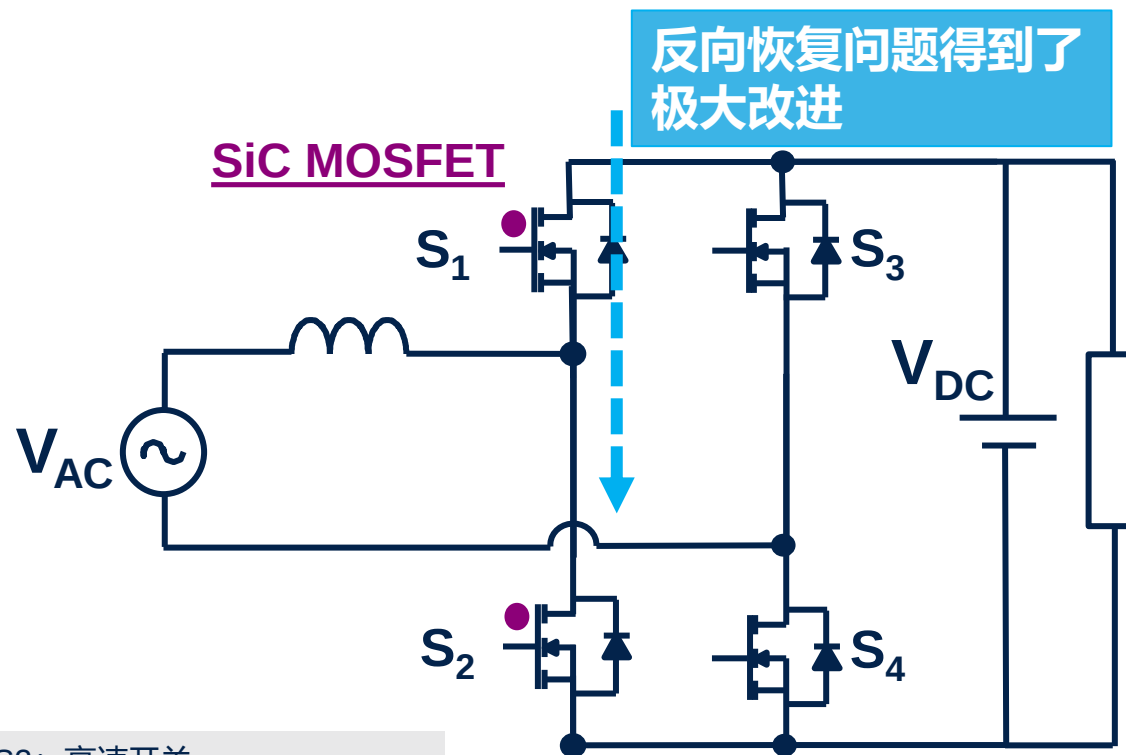
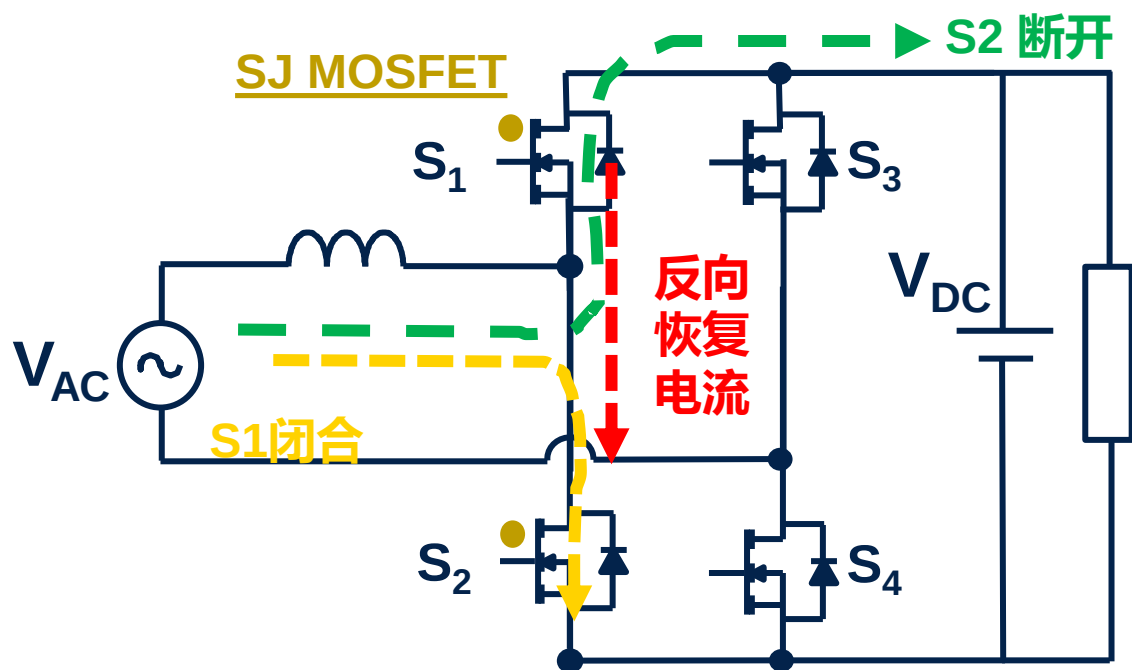
同步开关：S2是互补型开关，提供电感电流的放电路径

常闭开关：S3

常开开关：S4

图腾柱PFC中SiC MOSFET的优点

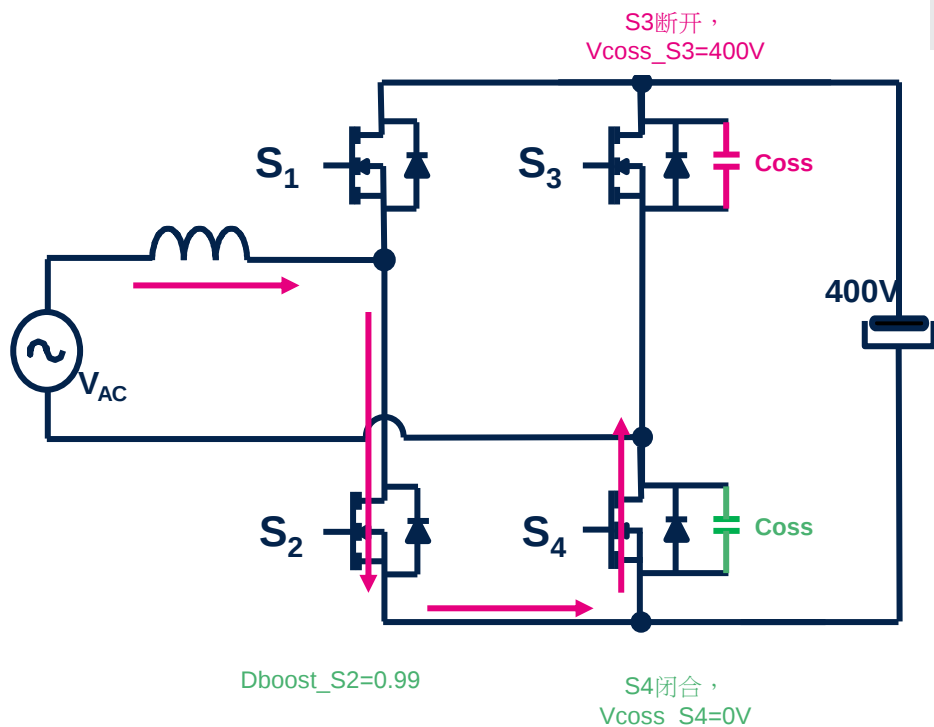
- 体二极管反向恢复时间少。
- 出色的品质因数导致开关损耗低
- 由于电阻随温度的变化较小，高温下的功耗低



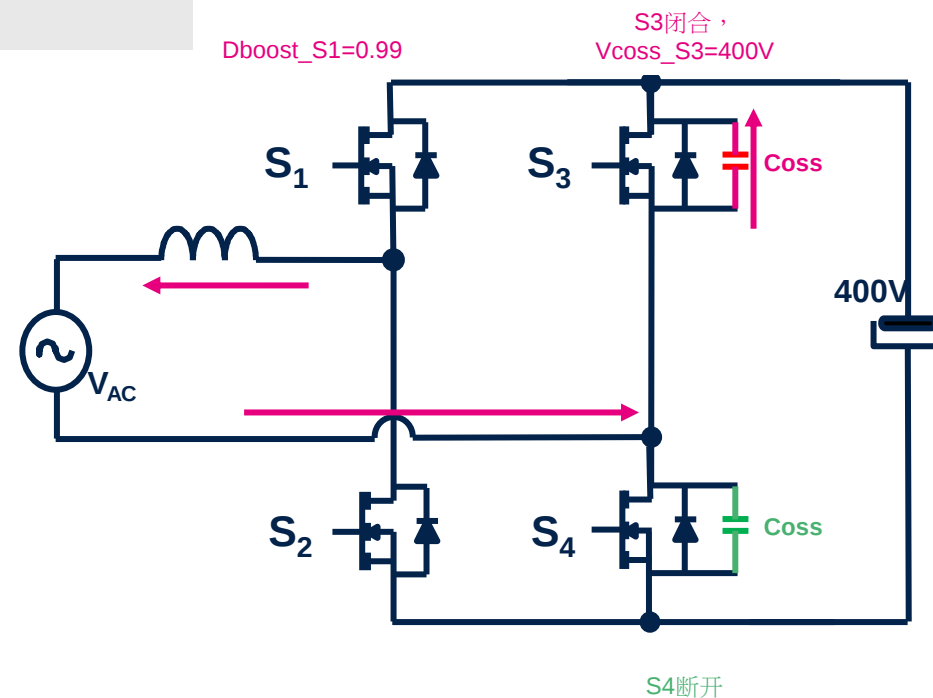
- S1、S2：高速开关
- S3、S4：低速开关

设计挑战： 交流过零时的尖峰电流

- S1、S2：高速开关
- S3、S4：低速开关

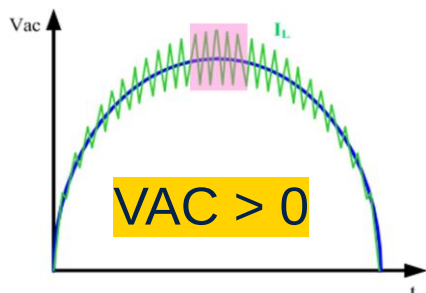


Vac过零
从正到负



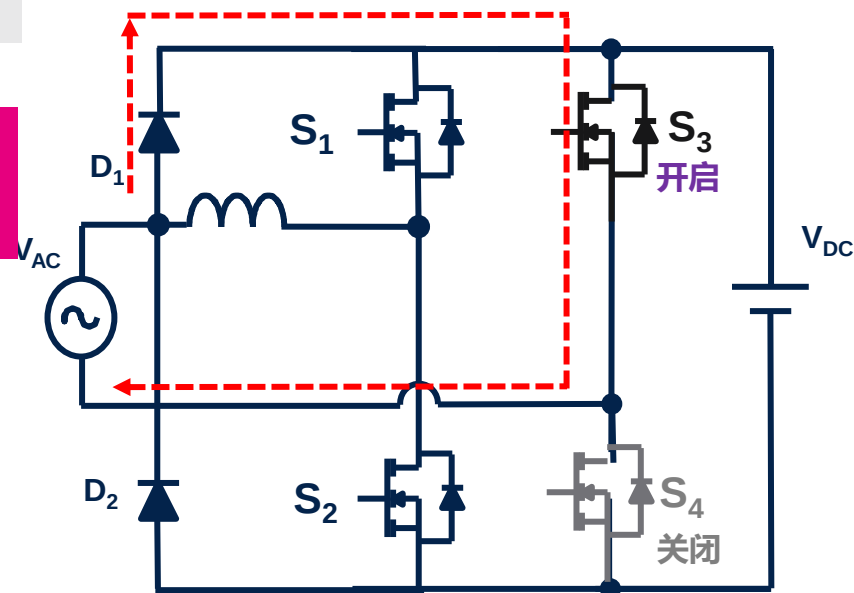
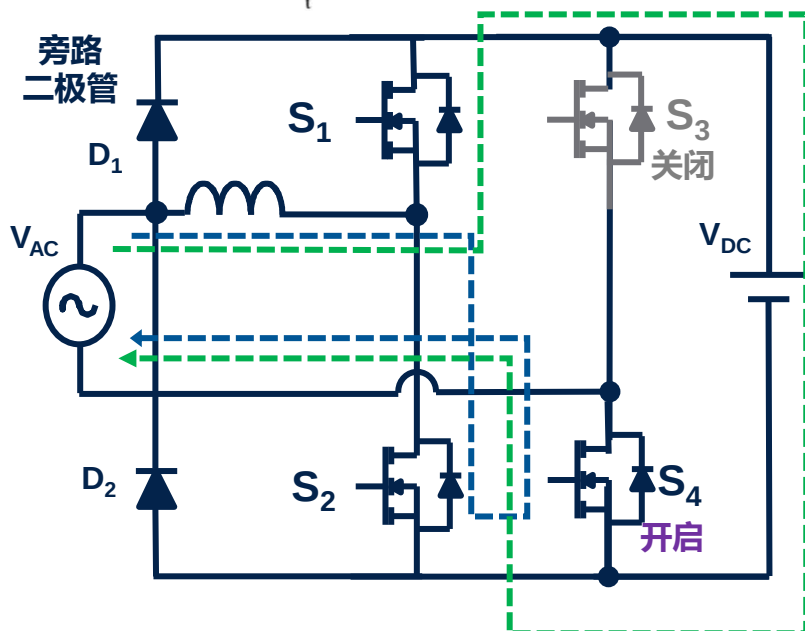
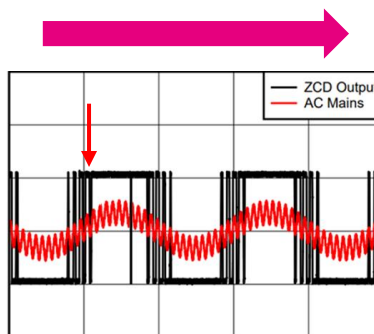
- 在过零时，当交流输入从正到负。
 - 过零之前， $V_{coss_S3}=400V$ ，S2的占空比 $D_{boost}=0.99$ ，S1的占空比 $(1-D_{boost})=0.01$
 - 过零之后， $V_{coss_S4}=400V$ ，S1的占空比 $D_{boost}=0.99$ ，S2的占空比 $(1-D_{boost})=0.01$
- 在过零时，如果 D_{boost} 突然改变， V_{coss_S3} 将引起尖峰电流。

设计挑战： 可靠的交流过零检测



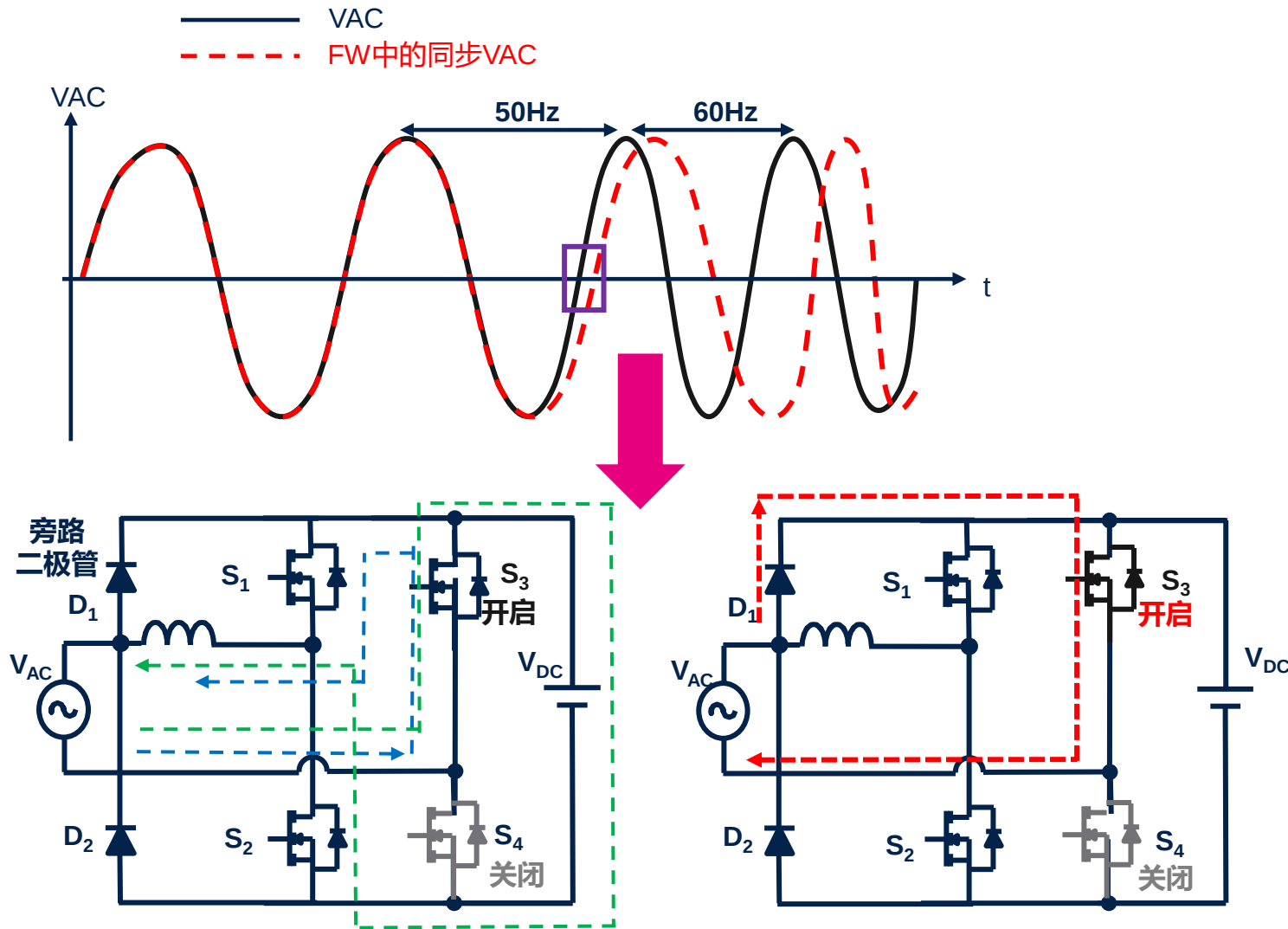
- S1、S2：高速开关
- S3、S4：低速开关

交流过零时的误触发
引起短路击穿问题



- 正常正半周运行：
 - 充电路径：S2（高速开关）+ S4（低速开关）
 - 放电路径：S1（高速开关）+ S4（低速开关）
- 当因误触发而转为负半周运行，将出现短路击穿路径：
 - D1 + S3（低速开关）

设计挑战： AC频率跳变测试



- FW仍按照负半周的逻辑工作，因此S3保持闭合，并通过D1和S3产生大电流尖峰



3kW TTP PFC的数字解决方案

3kW CCM图腾柱PFC解决方案

功率密度可达 82W/inch³

兼容: IEC61000-4-11和IEC61000-3-2



主要特性

- 输入AC电压: 90VAC 最高可达264VAC
- DC输出电压: 400VDC
- 开关频率: 70kHz
- 工作模式: CCM
- 峰值效率: 98.5% @ 230VAC
- 功率因数: >0.98 @ 100%负载
- iTHD: <5% @ 100%负载
- 峰值浪涌电流: <30A

可用的原型
最终版: Q4/21

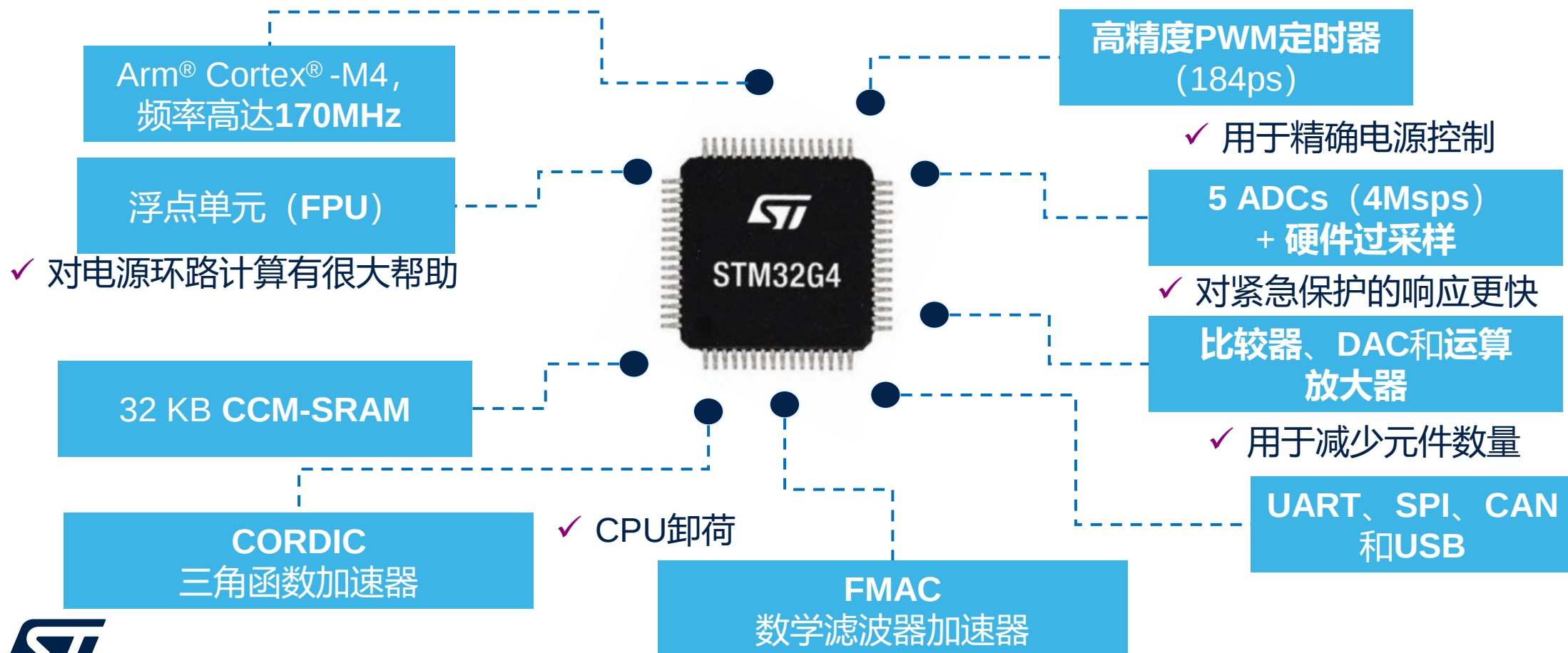


电信和5G PSU

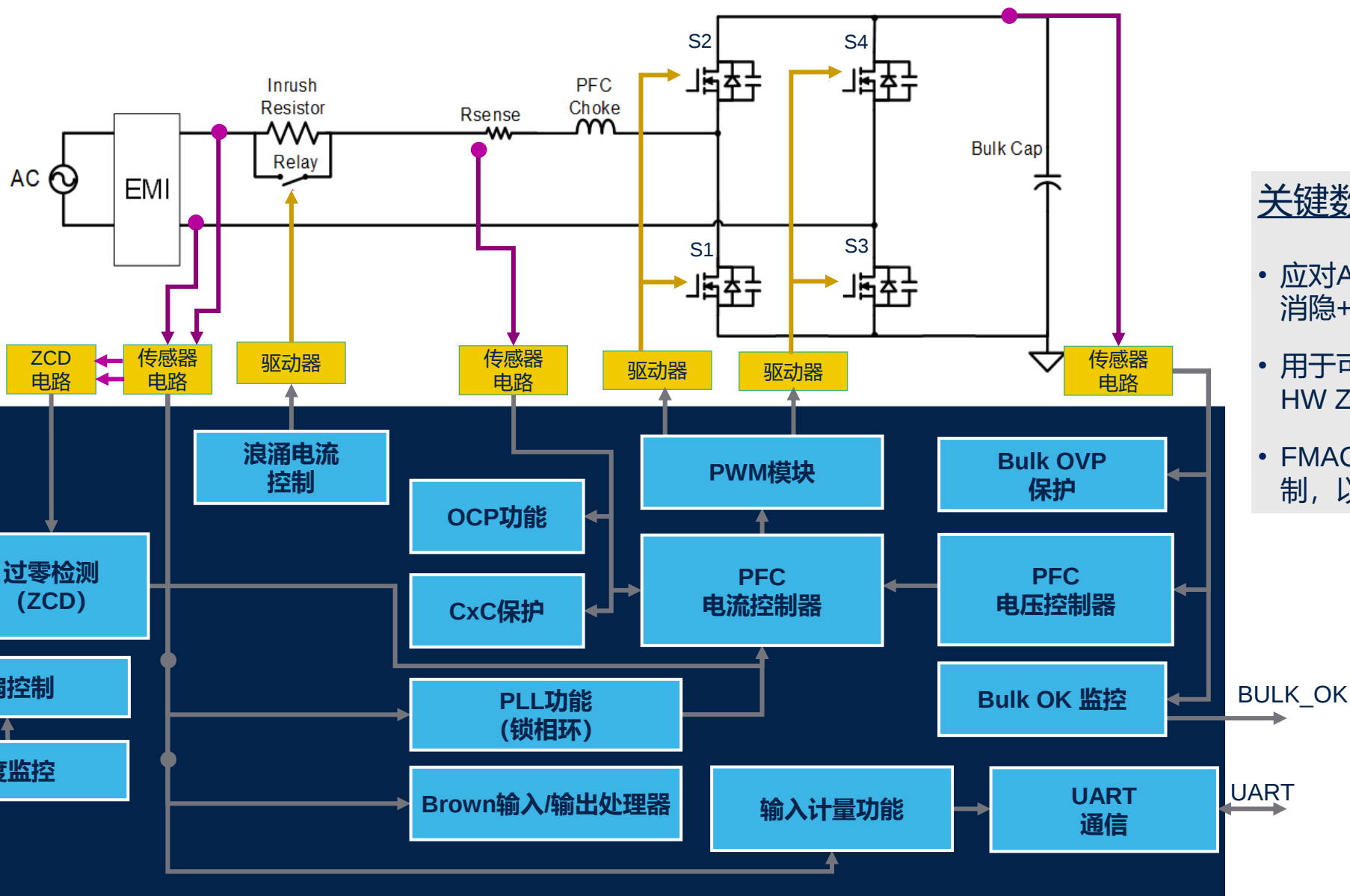


数据中心和服务服务器PSU

非常适合需要先进和丰富模拟外设的MCU的应用



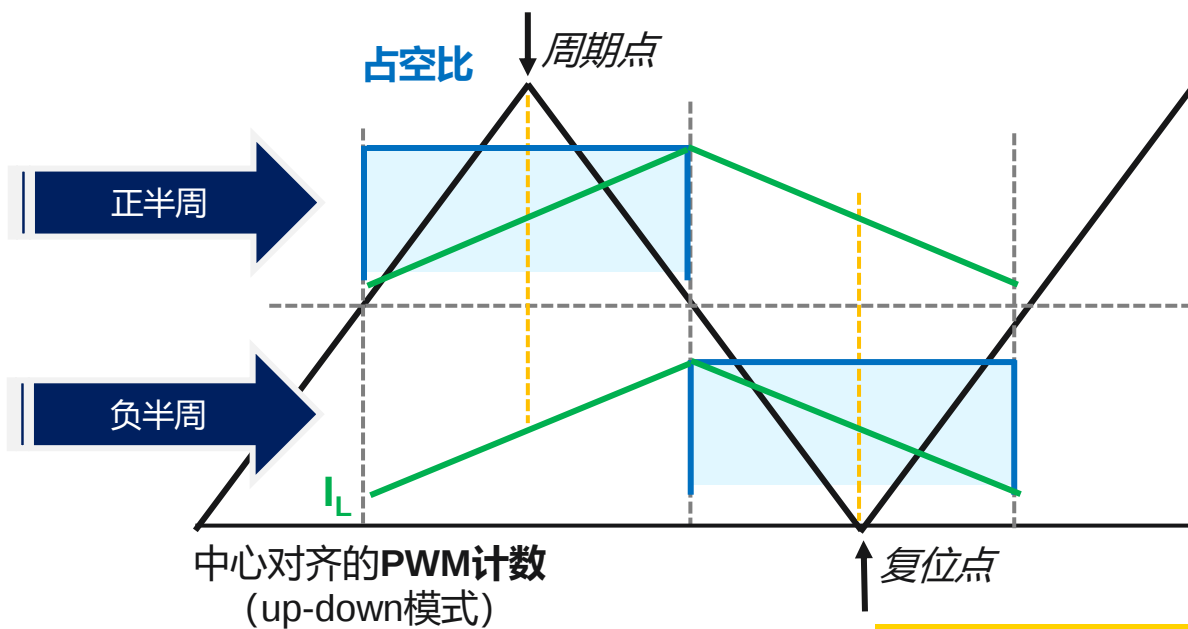
功能框图



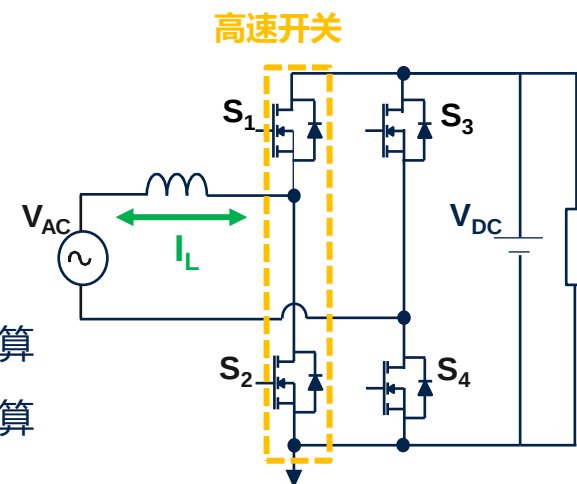
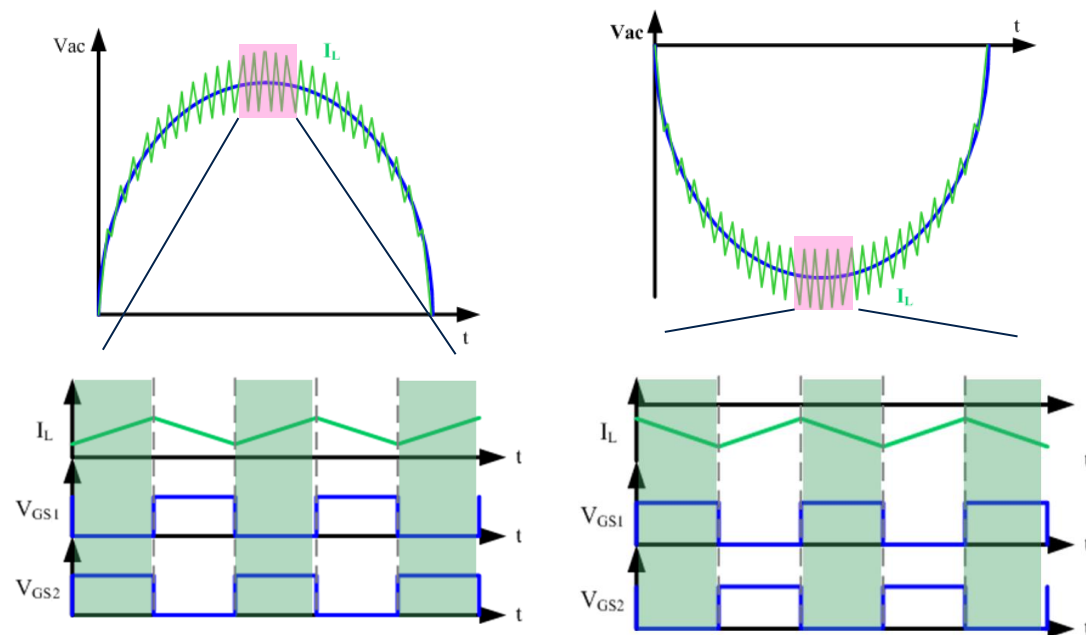
图腾柱中的电流采样策略

- 采样考虑因素和配置

- 根据交流极性交换有源开关
- 电感电流在有源开关开通时间的中点采样
- 采样的中断设置为PWM计数的周期点和复位点，即中断频率为开关频率的两倍



- 正半周：在PWM计数周期点进行电流采样 然后进行PI计算
- 负半周：在PWM计数复位点进行电流采样 然后进行PI计算

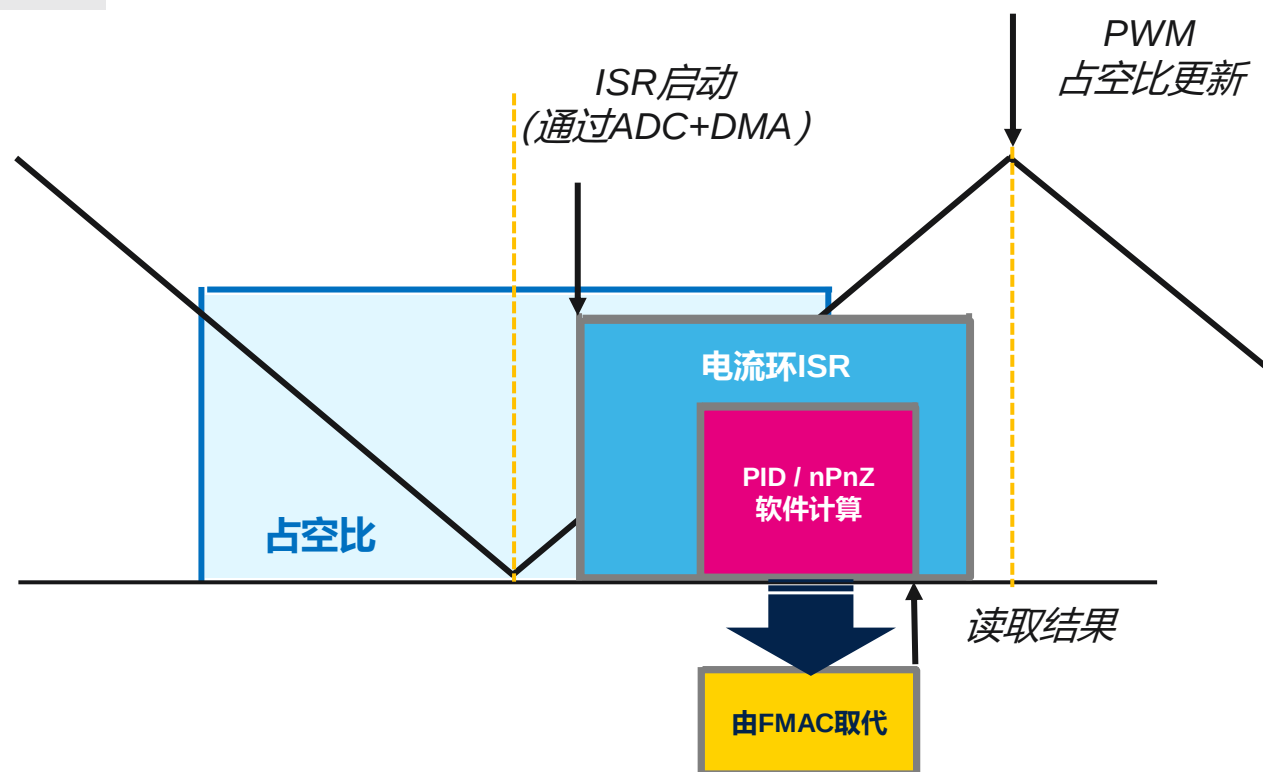
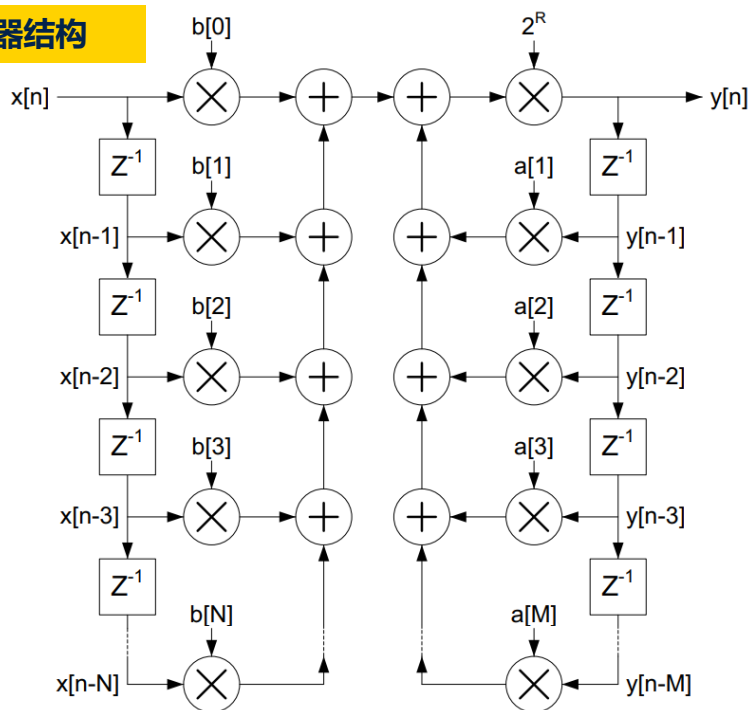


FMAC (数学滤波加速器)

FMAC释放CPU/中断资源，并允许添加更多软件算法（非线性控制、前馈等）

FMAC围绕2x16位乘法器和26位累加器构建，以提供有限脉冲响应（FIR）和无限脉冲响应（IIR）滤波器

IIR滤波器结构



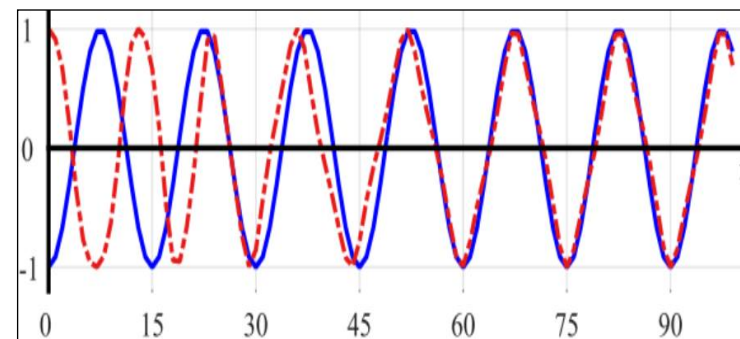
交流过零检测

HW ZCD电路+HW/SW滤波器

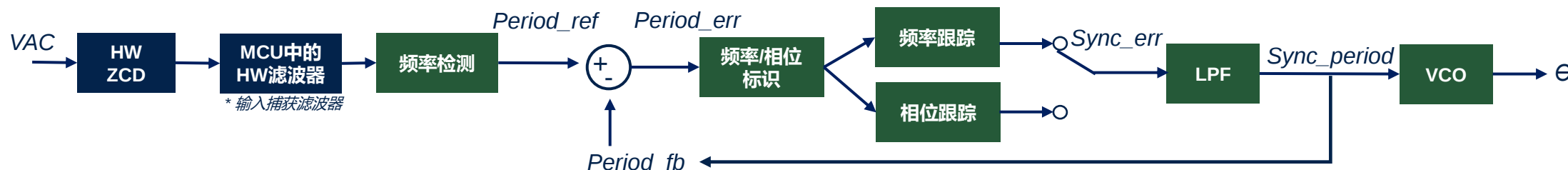
- 简单但对噪音敏感
- HW ZCD信号仅在每半个交流周期更新，因此响应速度有限



HW ZCD

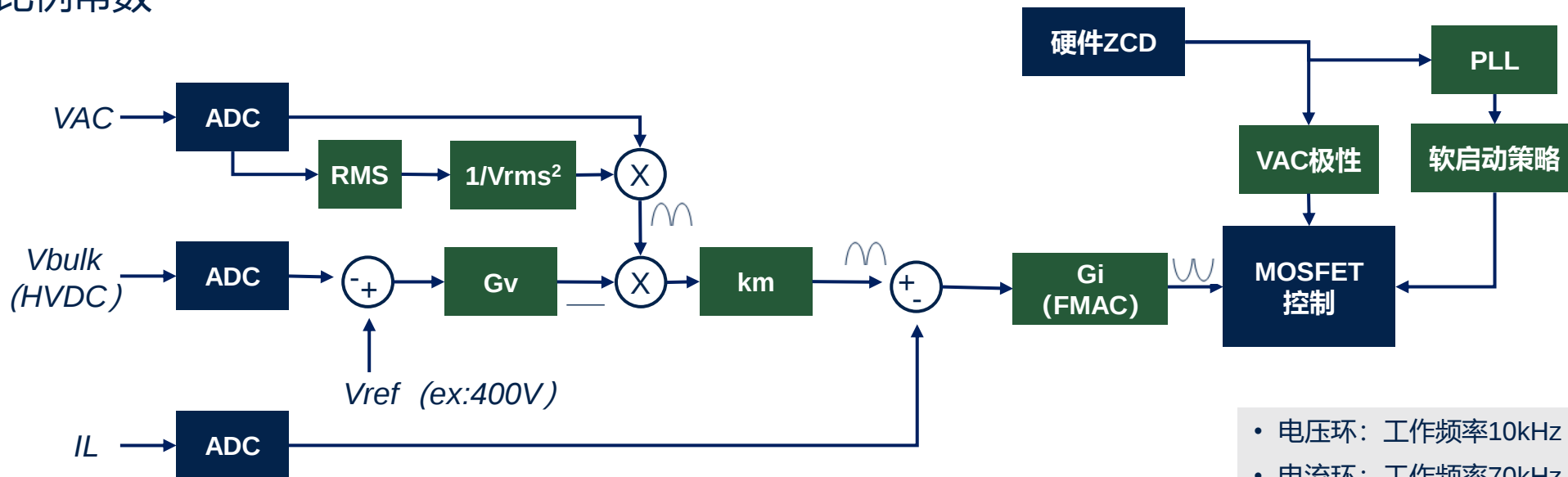


SW PLL (频率/相位跟踪)



PFC控制算法

- 具有输入电压前馈补偿的电压外环
- 基于内置硬件数字滤波器（FMAC）的电流内环
- PLL用于同步AC输入，以实现消隐 + 软启动方案
- K_m 是比例常数

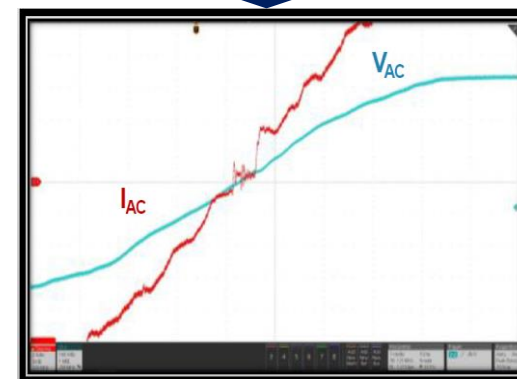
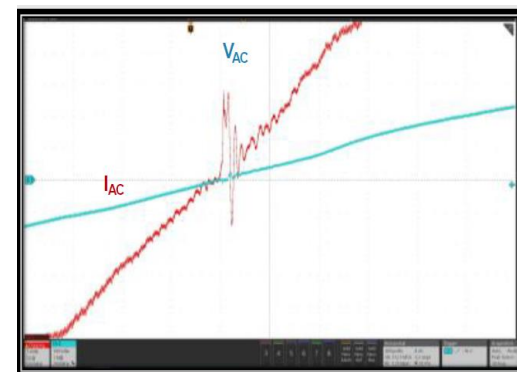
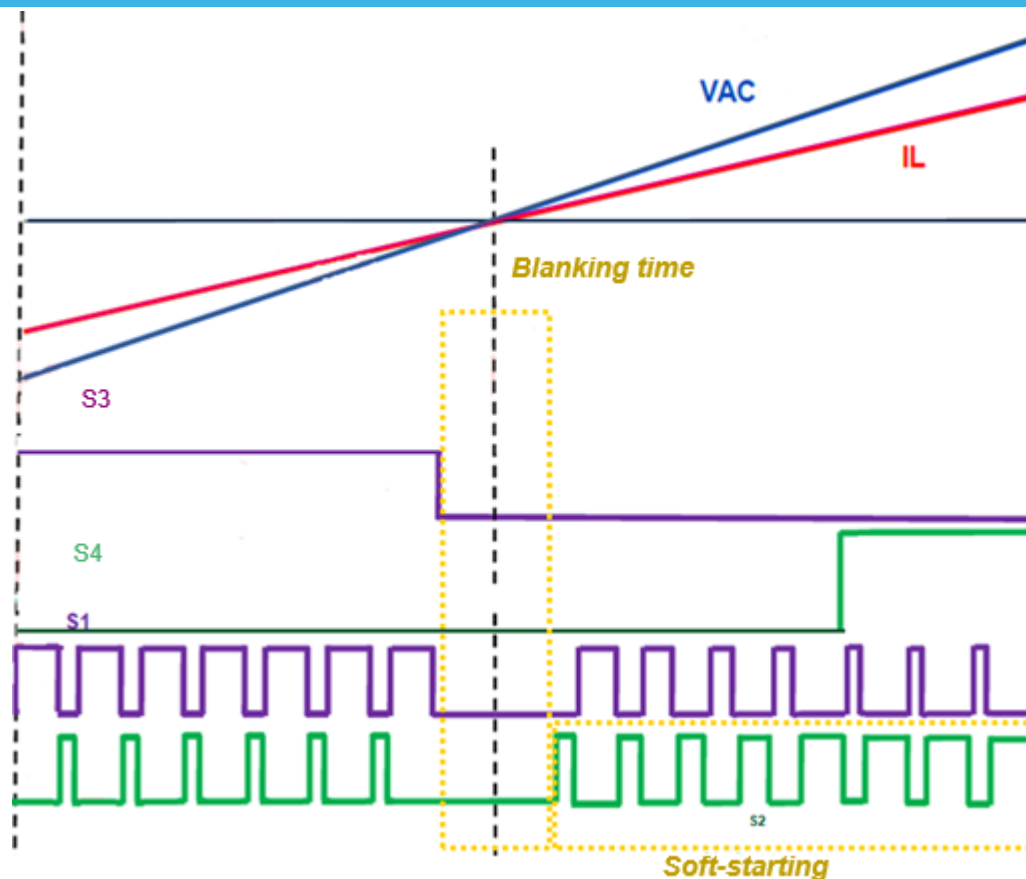
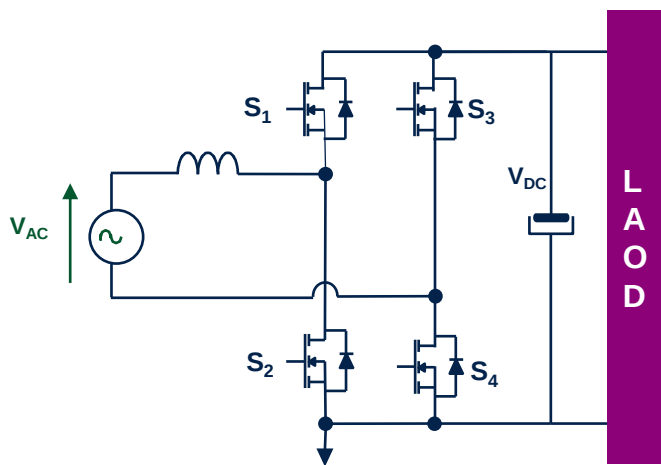


- 电压环：工作频率10kHz
- 电流环：工作频率70kHz

尖峰电流消除解决方案

在消隐期间，所有MOSFET都是关断的，以确保功率开关控制的安全，并避免输出直流电容短路。

- 消隐 + 软启动方案

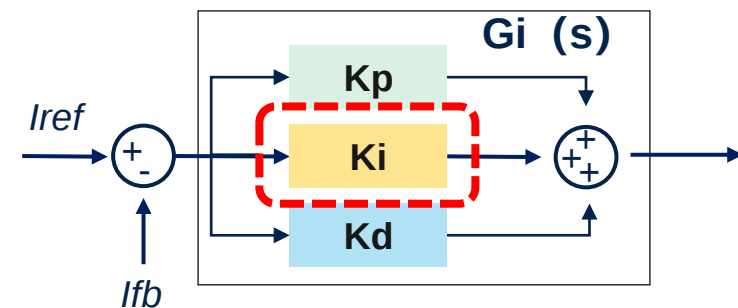
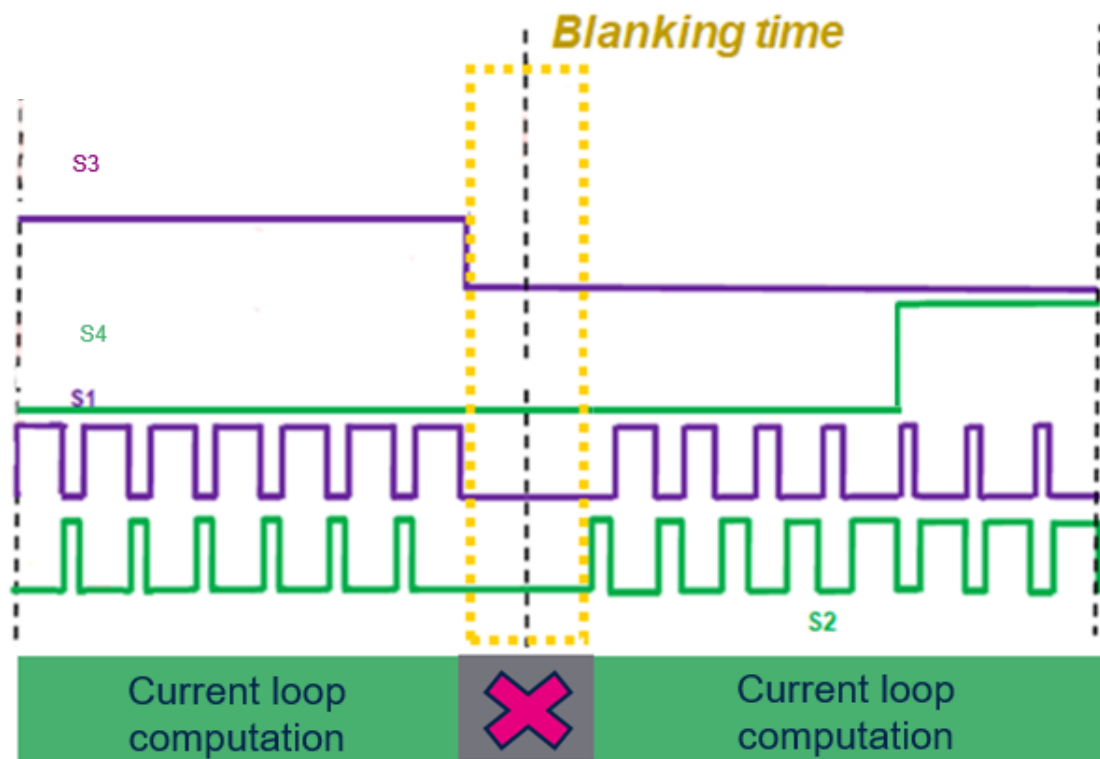


S1或S2有源开关由软占空比进行控制。

尖峰电流消除解决方案

在消隐期间暂停控制环路，以避免电流环积分器产生较大的PWM脉冲从而造成较大的电流尖峰。

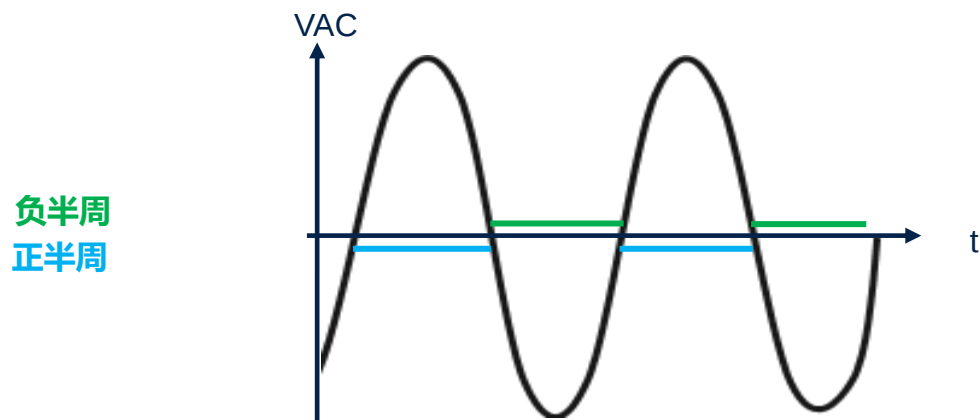
在消隐期间暂停电流环



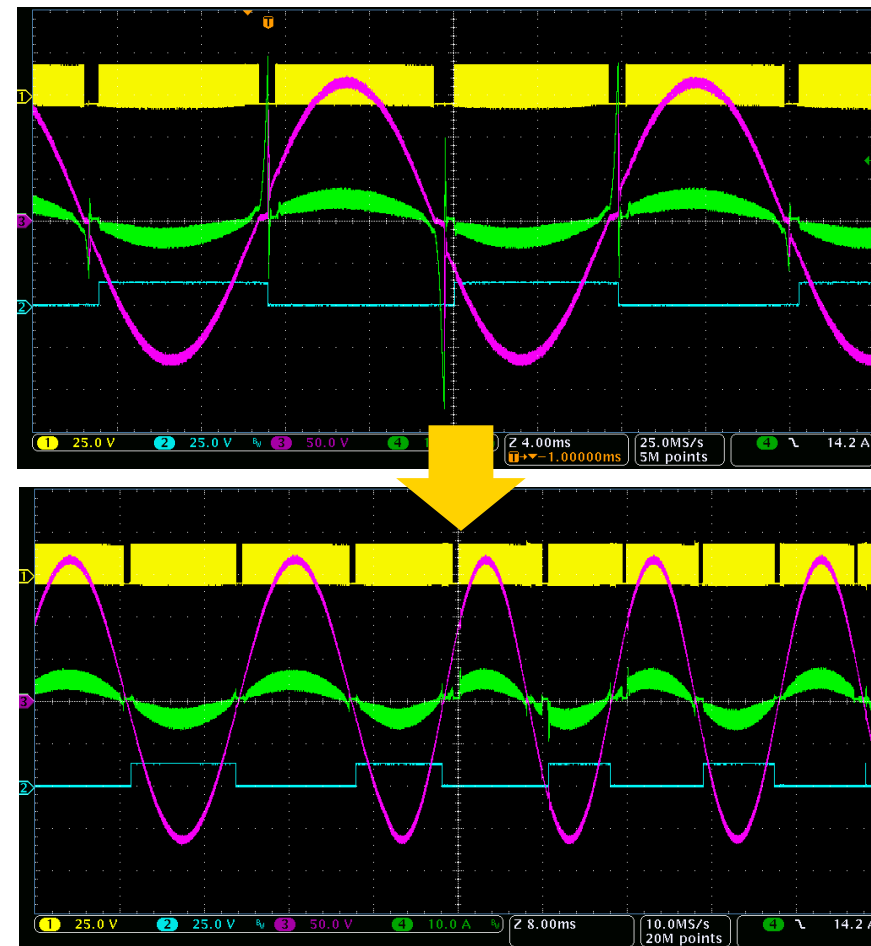
交流频率跳变解决方案

采用高速比较器来应对反向电流

- 动态设置正/负半周的相应阈值
- 触发阈值时，通过比较器关闭所有PWM



一旦发生反向电流，电流将被箝位



CH1: S2栅极 / CH2: S3栅极

CH3: VAC / CH4: 输入电流

STM32G4主流系列

STM32G474 MCU

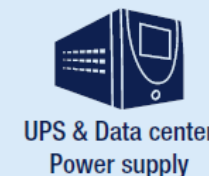
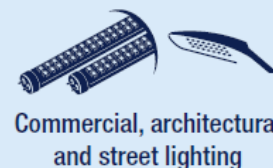
非常适合数字控制的高精度PWM和丰富的模拟外设



- 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



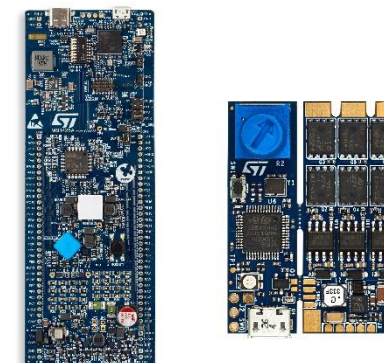
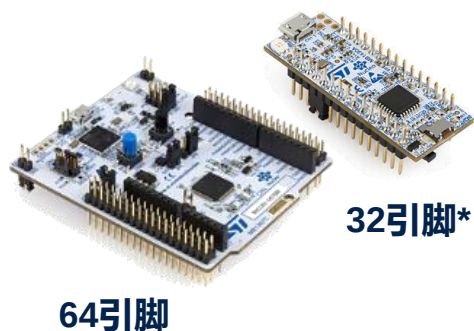
STM32G4产品组合



Legend: Crypto AES-256

STM32G4硬件解决方案

加快评估、原型制作和设计速度



STM32 Nucleo

灵活的原型

- NUCLEO-G431RB
- NUCLEO-G474RE
- NUCLEO-G431KB

评估板

全功能STM32G4
评估

- STM32G484E-EVAL
- STM32G474-EVAL

电机控制套件

全功能，用于电机
控制和模拟用途

- P-NUCLEO-IHM03

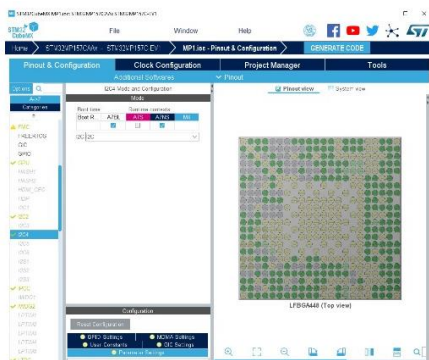
探索套件

主要特性原型

- B-G474E-DPOW1
- B-G431B-ESC1

STM32G4 软件工具

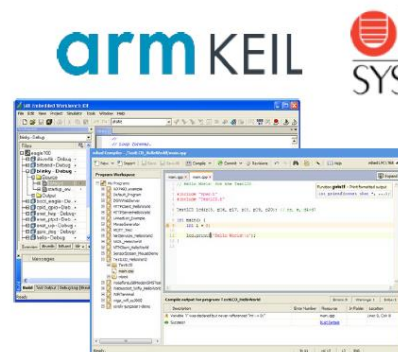
完全支持Arm Cortes-M生态系统



STM32CubeMX

STM32CubeMX

- 配置和生成代码
- 冲突处理器



IDE编译和调试

灵活的解决方案

- 合作伙伴IDE, 如IAR和Keil
- 基于Eclipse的免费IDE, 如STM32CubeIDE

All-in-one STM32 programming tool
Multi-mode, user-friendly



STM32编程工具

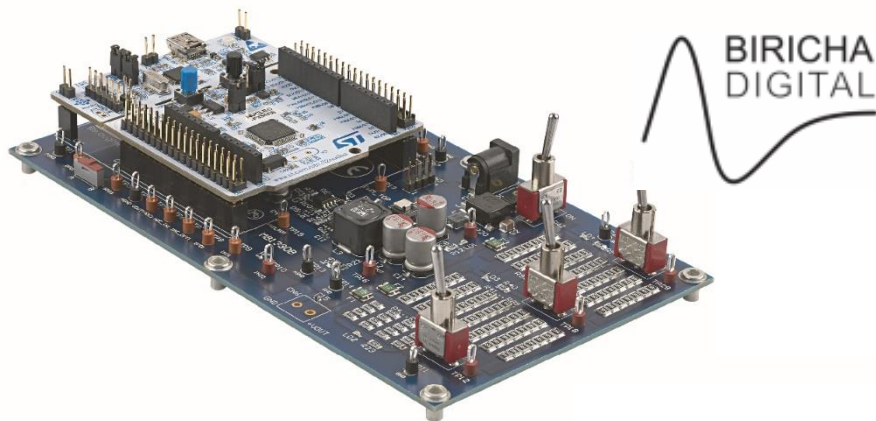
STM32CubeProgrammer

- 闪存和/或系统内存
- GUI或命令行接口

与Biricha合作开发的Digital power workshops

将行业领先的ST MCU与Biricha的工具和培训相结合

STM32 PSU/PFC design
Step-in Digital Power technology



Biricha digital power:

- 世界领先的数字电源专业知识和培训
- Workshop基于STM32F334 Nucleo及专用的数字电源扩展板
- 了解如何实现数字电源和功率因数校正

总结



基于STM32G4数字控制解决方案帮助您实现连续模式图腾柱PFC的高性能和高可靠性

与传统PFC相比，图腾柱PFC具有效率高、器件少等优点

为了应对图腾柱PFC的设计挑战，需要良好的尖峰电流控制策略和可靠的过零检测

在3kW参考设计的基础上，提出了连续模式的图腾柱 PFC的详细设计考量和概念

STM32G4生态系统提供完整的设计环境和满意的开发体验

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