基于碳化硅MOSFET串联的中压直流变压器

浙江大学 邵帅副教授

直流配电技术

Power Management Innovation Consortium

直流配电技术减少能源变换环节，提高能源新消纳能力， 提升配电传输容量。

电源直流化

光伏

风电

储能

传统交流方式

DC/DC — DC/AC — AC/DC — DC/DC

- 提升能效
- 提升容量

未来直流方式

DC/DC — DC/DC

负荷直流化

电动汽车

数据中心

照明

直流变压器 (DC Transformer)

直流变压器是直流配网中的核心装备

[1]李彬彬. 中压配电网中的电力电子变技术探讨. 2021.09.26.

现有工业界直流变压器样机

PMIC
Power Management Innovation Consortium

研究所Z 1MW
134kW/m³ ±8kV/±375V

企业N 2.5MW
~118kW/m³ ±10kV/±375V

企业Z 2.5MW
~109kW/m³ ±10kV/±375V

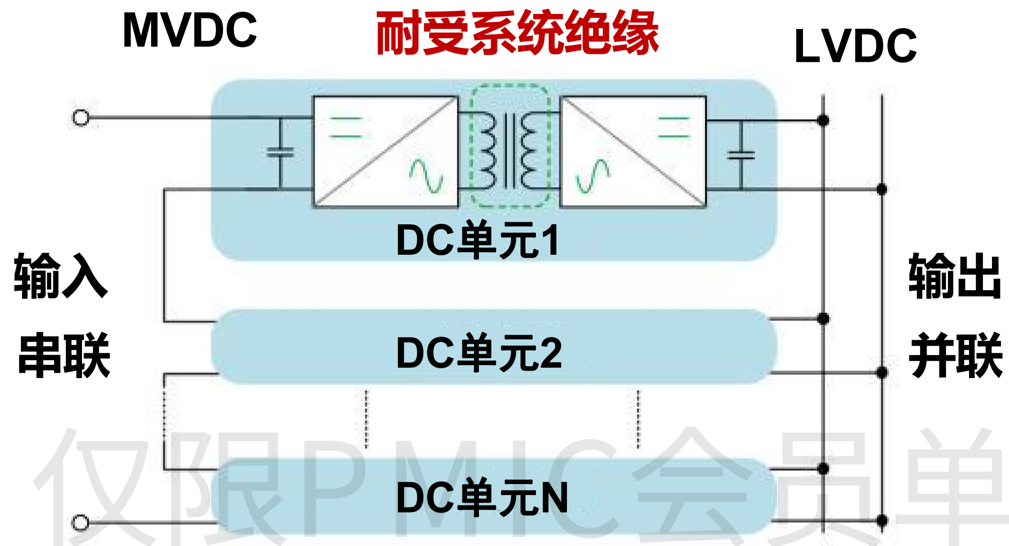
主功率柜功率密度＜140kW/m³

企业X 2MW
~97kW/m³ ±10kV/±375V

企业T 2MW
~72kW/m³ ±10kV/±375V

企业J 0.5MW
~71kW/m³ ±10kV/±375V

直流变压器功率密度分析



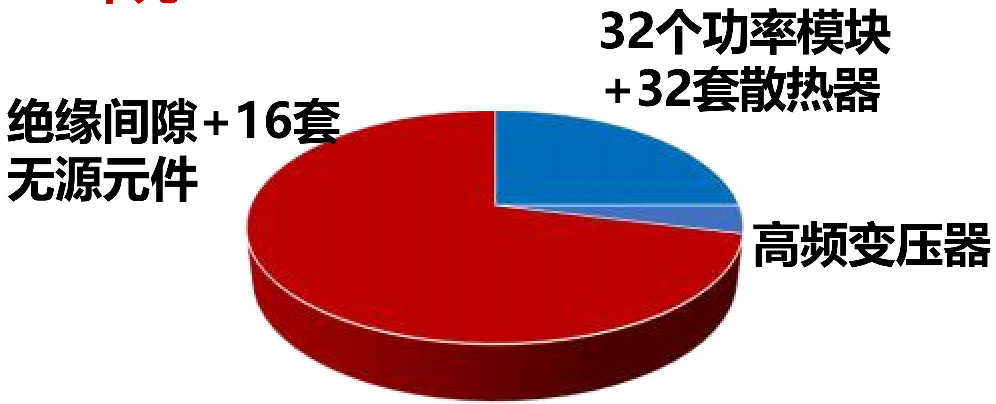
传统直流变压器拓扑

研究所Z 1MW样机体积分析

±8kV/±375V 1MW

16个DC单元

元件	体积/m³
32个功率模块+32套散热器	1.861
绝缘间隙+16套无源元件	5.3
高频变压器	0.291

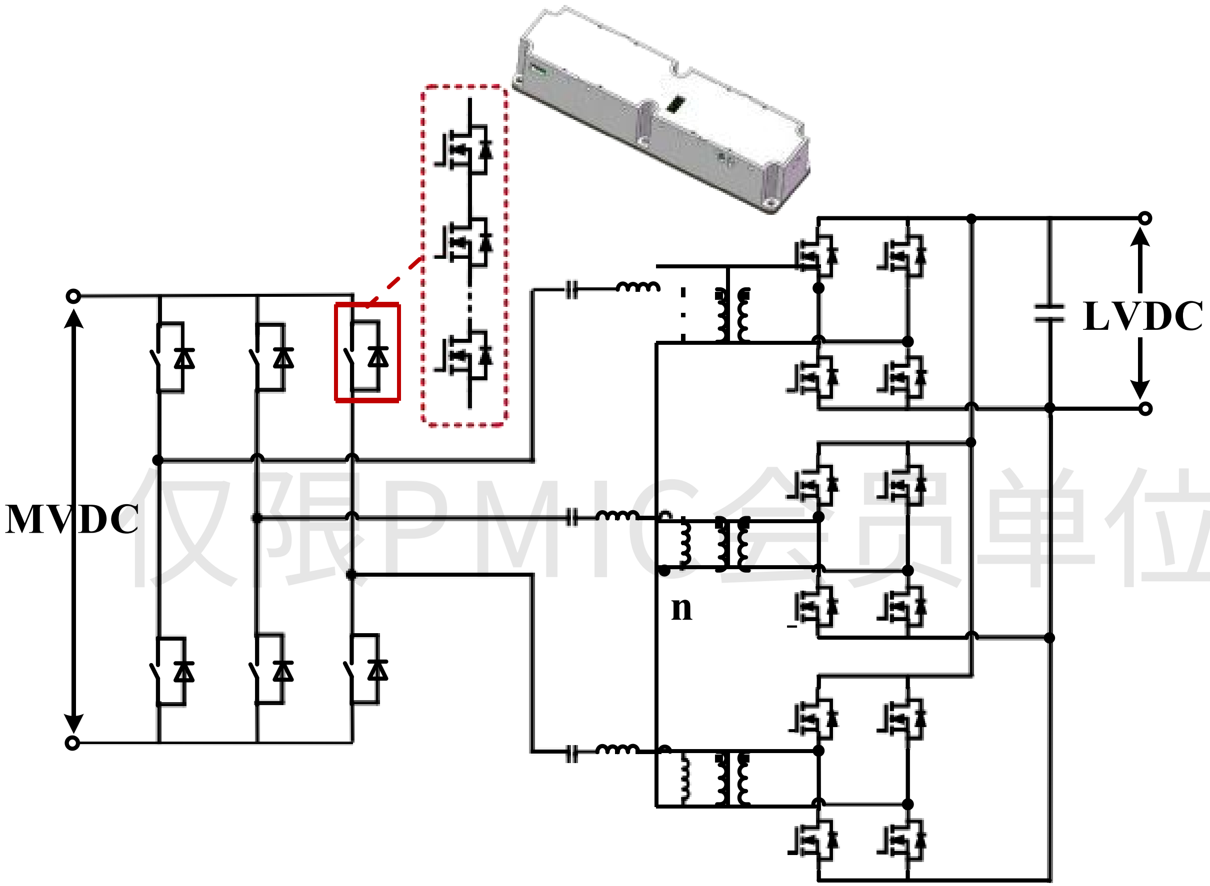


功率密度低原因：

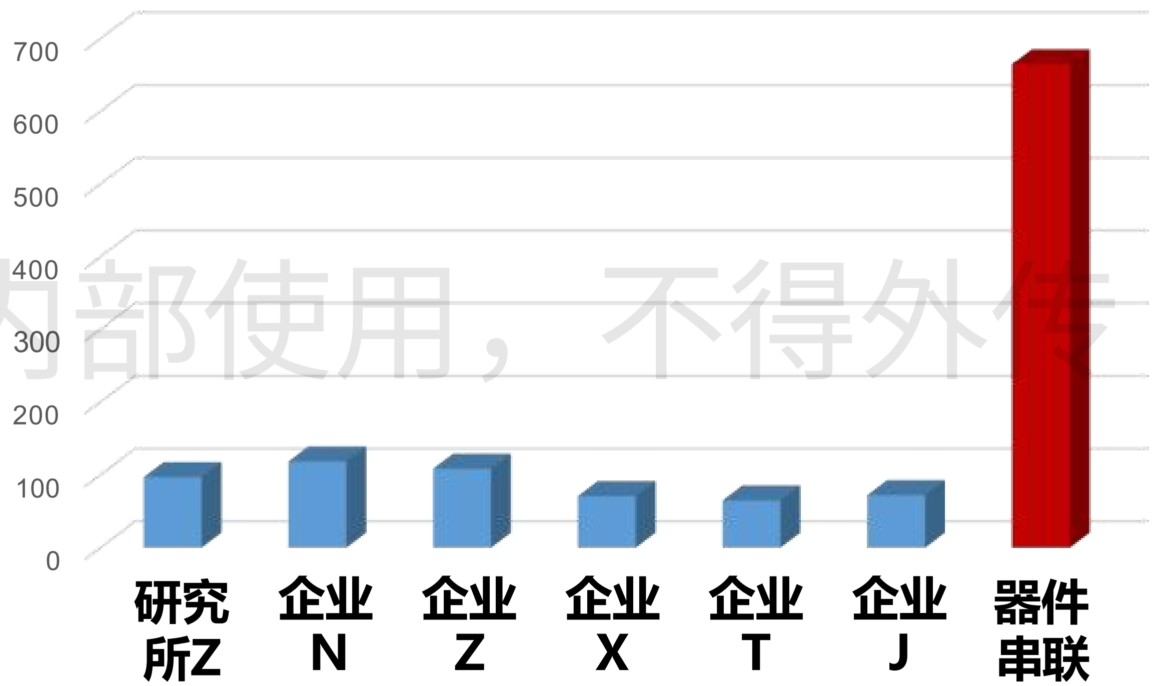
- DC单元数目多 → 器件数目多
- DC单元耐受系统绝缘 → 绝缘间隙大

[1]李子欣, 高范强, 徐飞,等. 中压配电网用10kVac-750Vdc/1MVA电力电子变压器功率密度影响因素研究[J]. 电工电能新技术, 2016.

基于器件串联的直流变压器



功率密度(kW/m³)



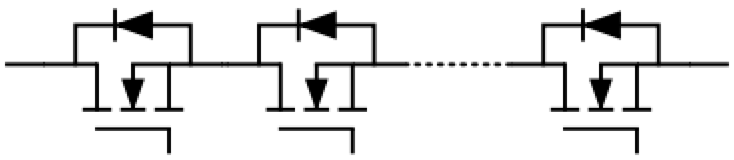
器件串联+集成封装 → 减小元件数目

集中式变压器 → 减小绝缘间隙

功率密度提高到5倍

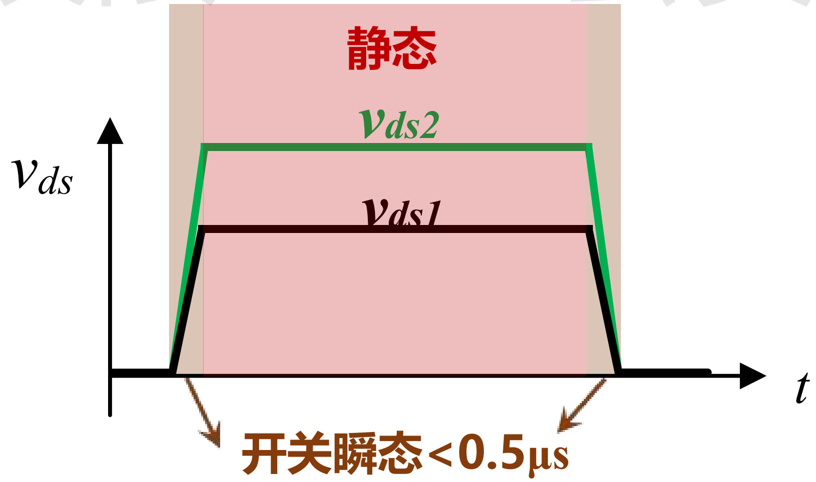
器件串联关键技术问题——均压

▢ 功率器件串联



过压 → 损坏

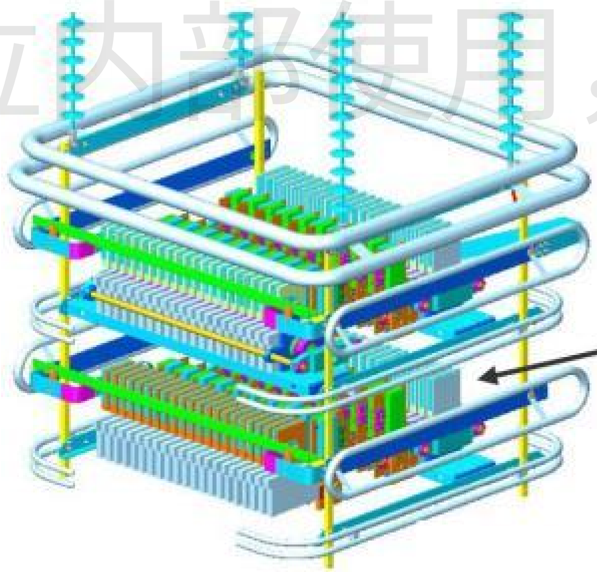
关键技术问题：串联器件的电压均衡

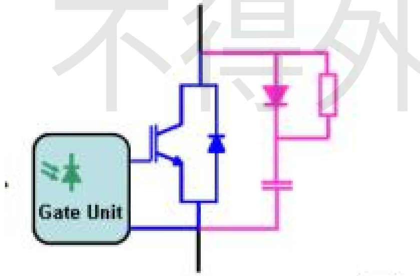


▢ 影响均压的因素

- 器件内部参数： 阈值电压、寄生电容、漏电流等
- 外部电路参数： 驱动延时、驱动电阻、寄生参数、温度等

- **仅ABB公司开发了基于IGBT串联的商用设备[1]**





RCD缓冲电路

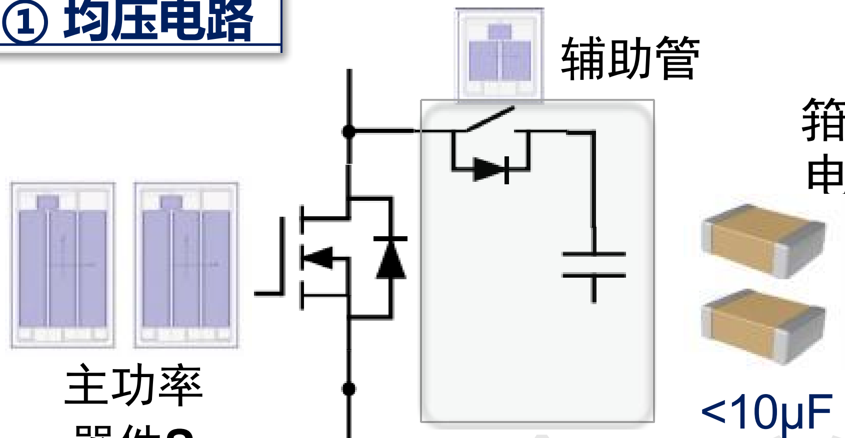
优点: 结构简单、技术成熟

缺点: 降低器件开关速度、损耗大、体积大

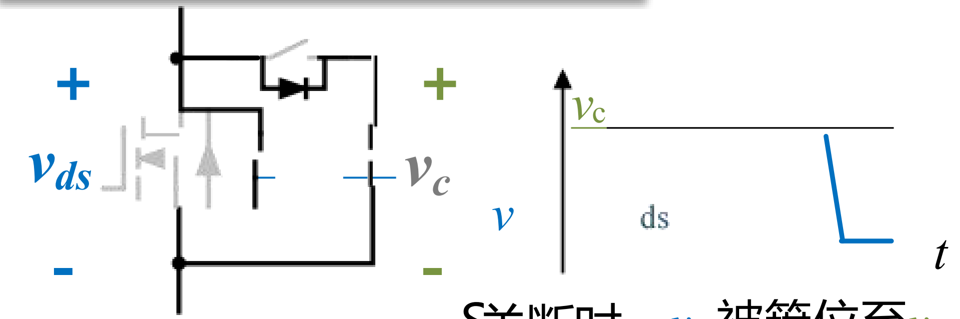
[1] Magnus Callavik, Anders Blomberg, Jürgen Häfner, Björn Jacobson ABB Grid Systems .The Hybrid HVDC Breaker An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids

有源箝位串联均压技术

① 均压电路

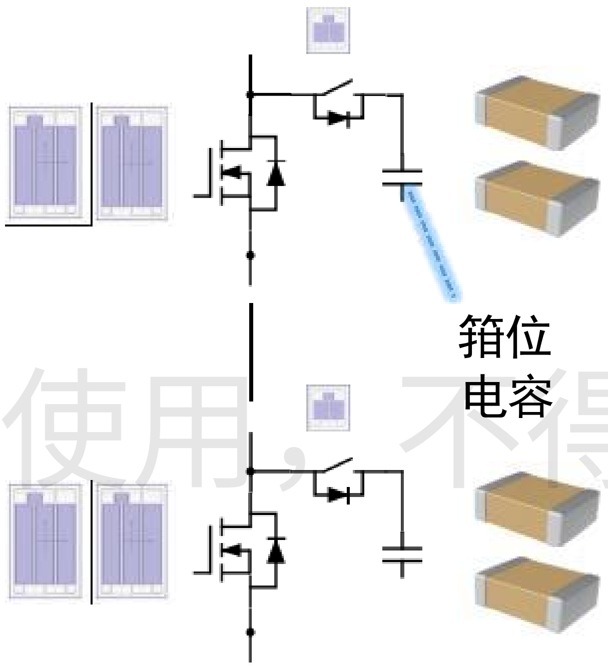


② 箝位过程：过压就被箝位



S关断时，$-v_{ds}$被箝位至v_c

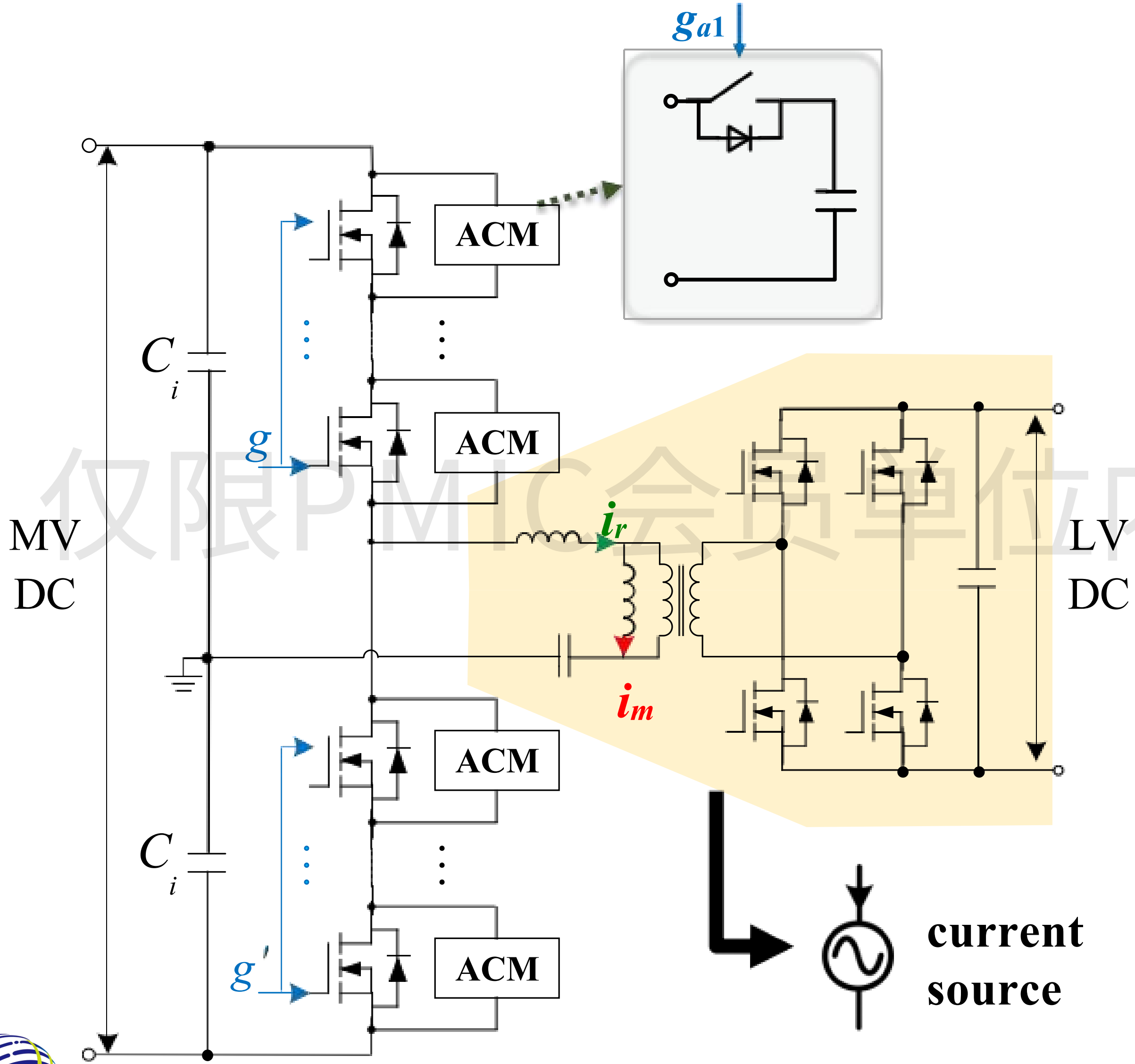
③ 均压思路

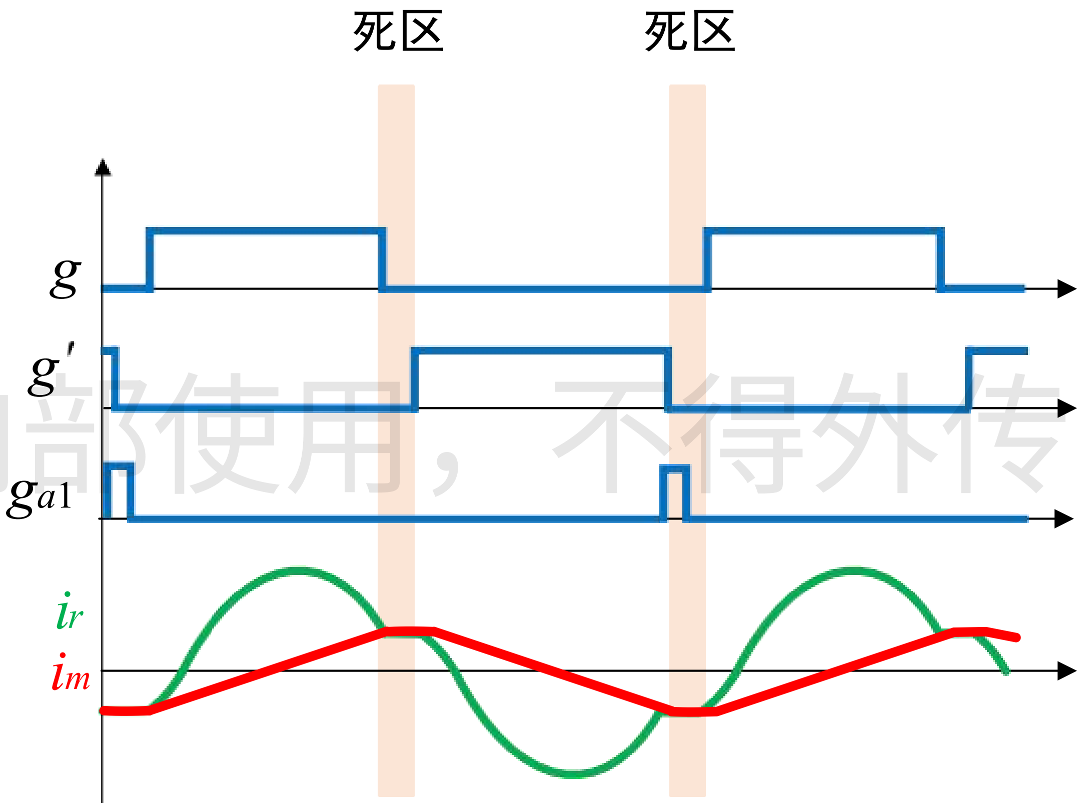


箝位电容电压均衡 → **串联器件电压均衡**

[1] J. Zhang, S. Shao, et al, “A Voltage Balancing Method for Series-Connected Power Devices in an LLC Resonant Converter,” IEEE TPEL 2021
[2] Z. Gao, S. Shao, et al, “A Voltage Balancing Method for Series-Connected Power Devices Based on Active Clamping in Voltage Source Converters,” IEEE TPEL 2022.

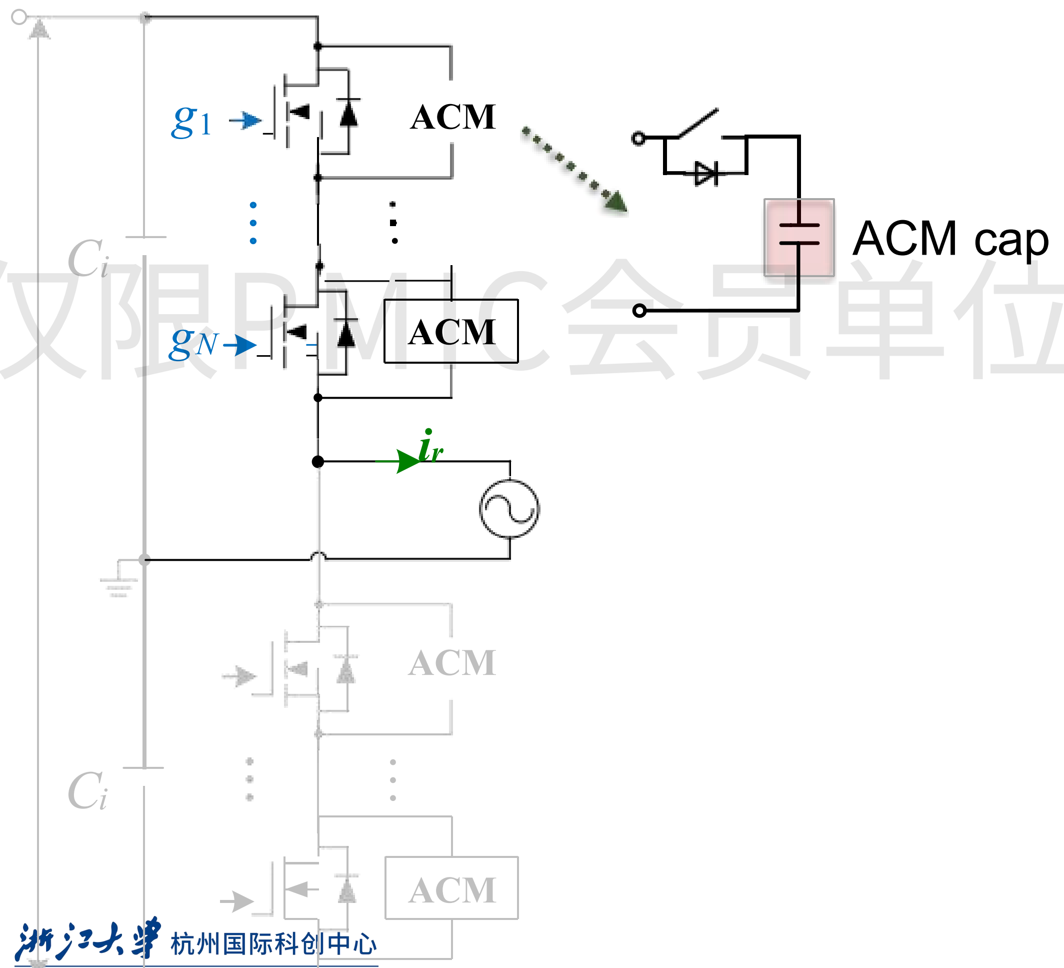
基于器件串联的单相直流变压器

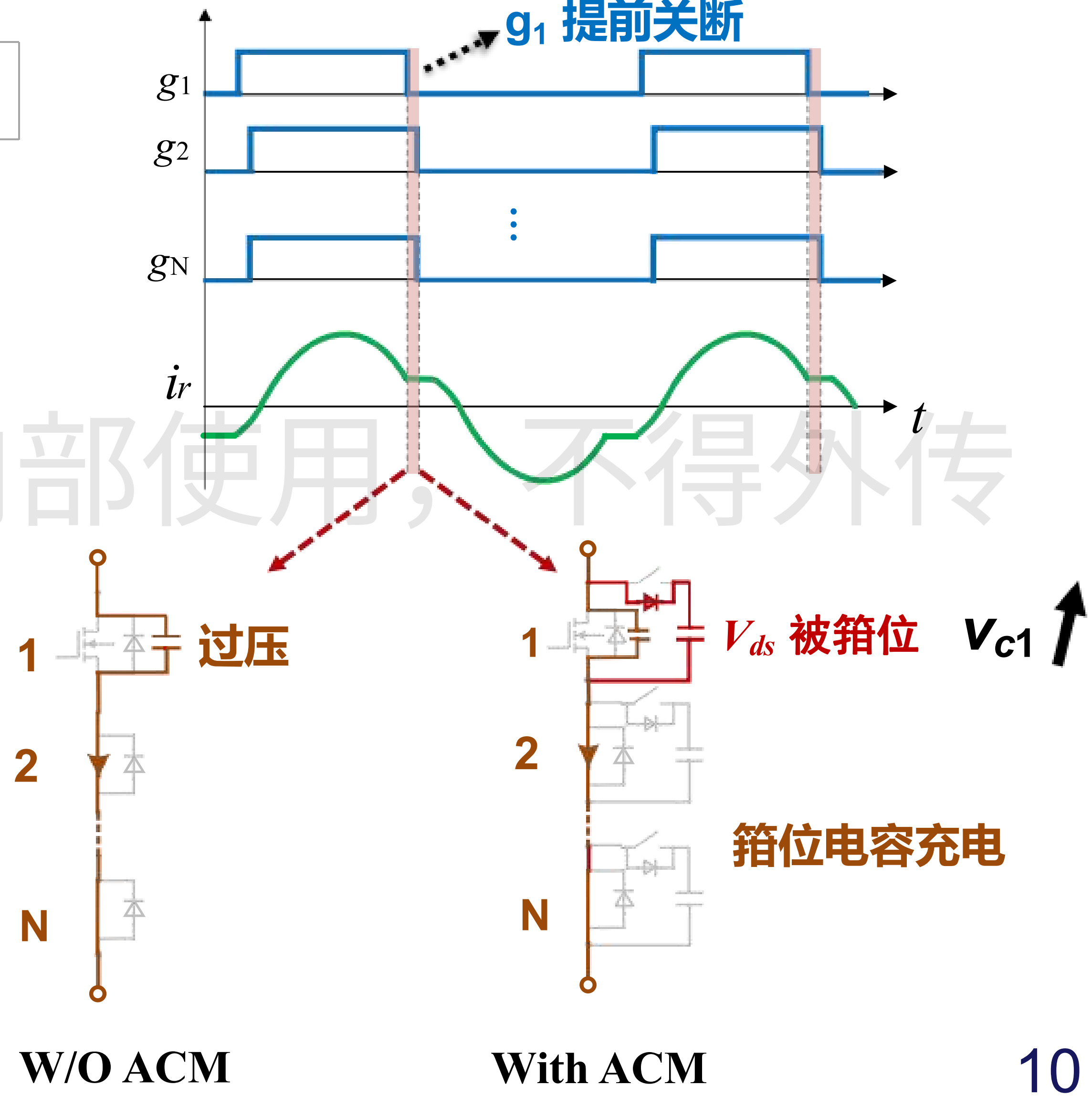




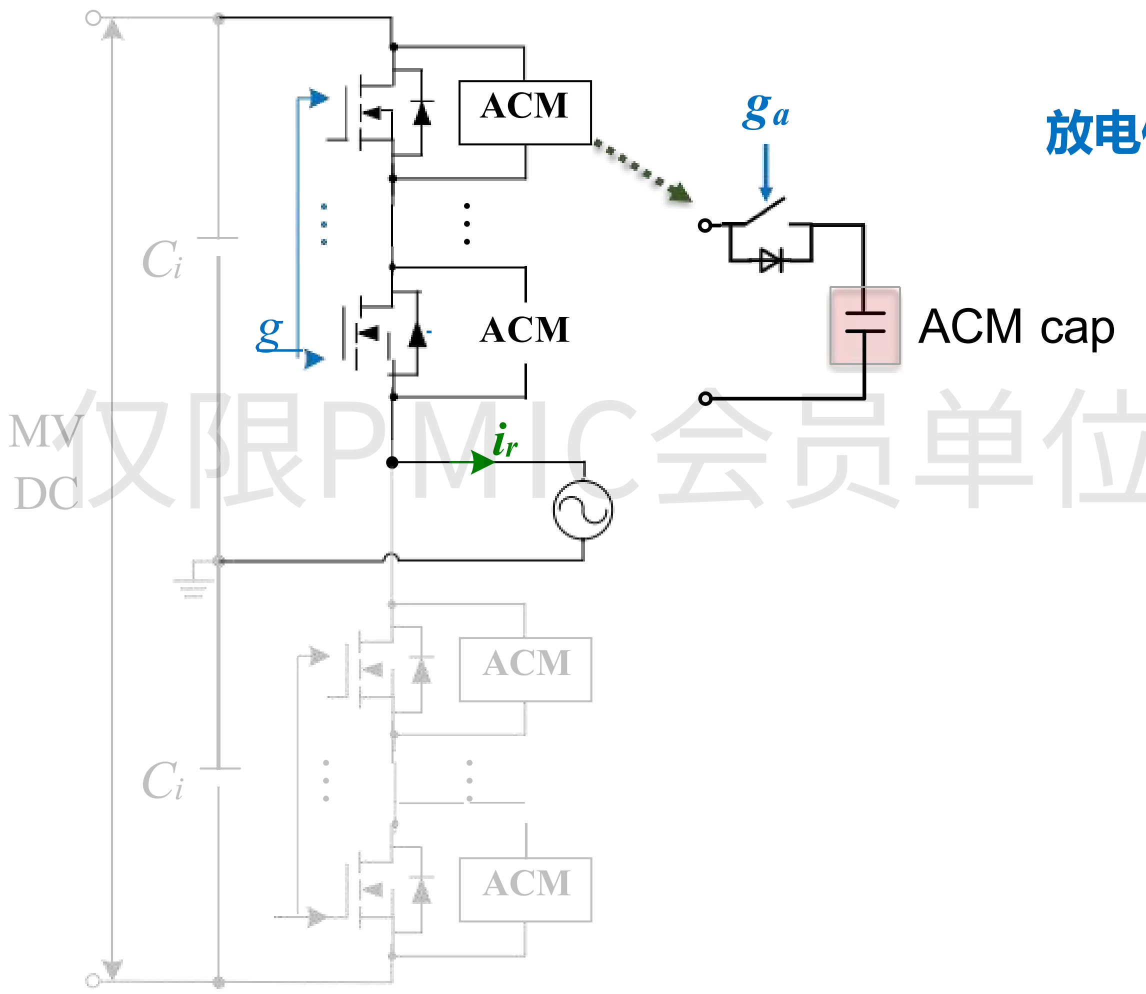
箝位电容充电

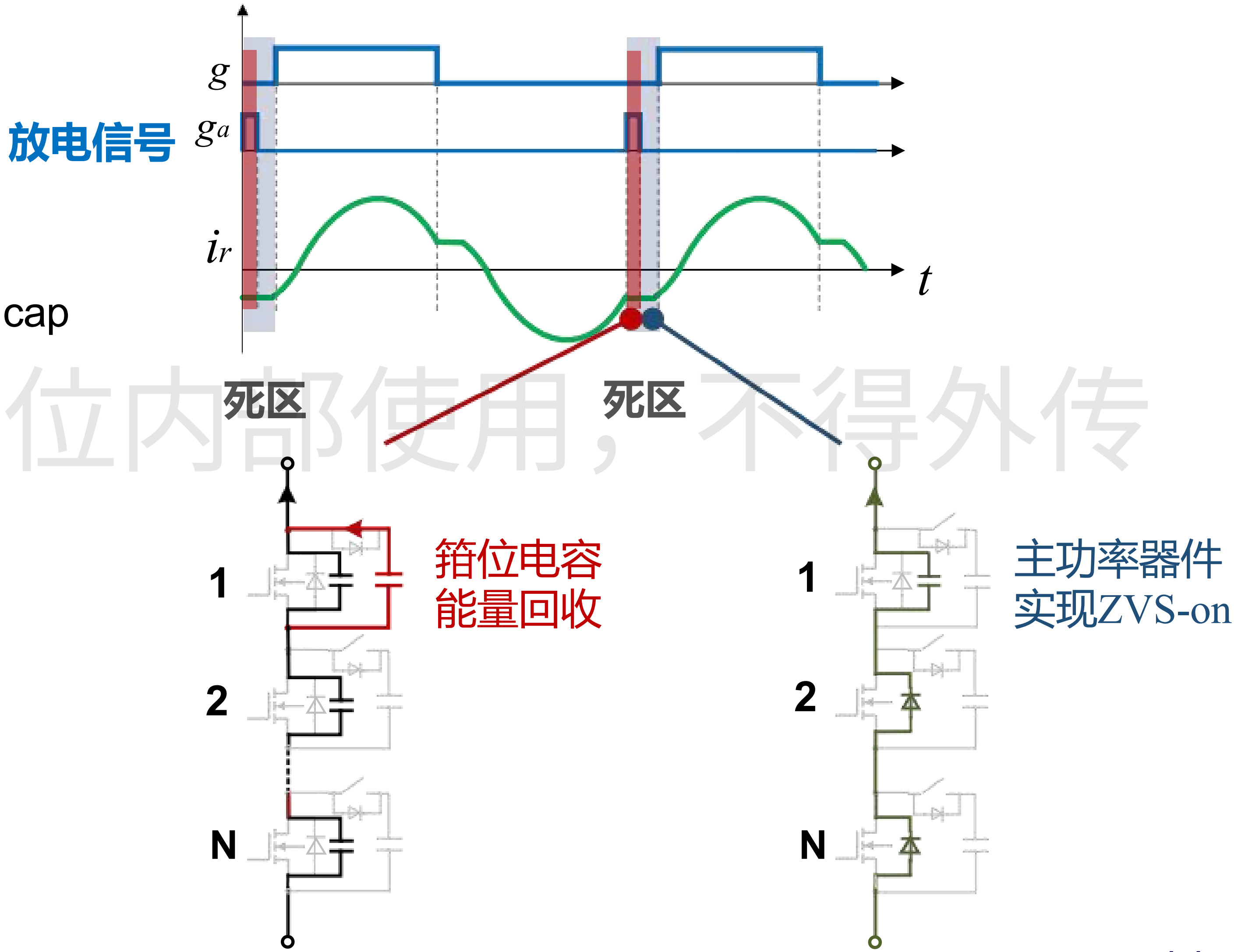
任何开关不同步均会导致箝位电容充电



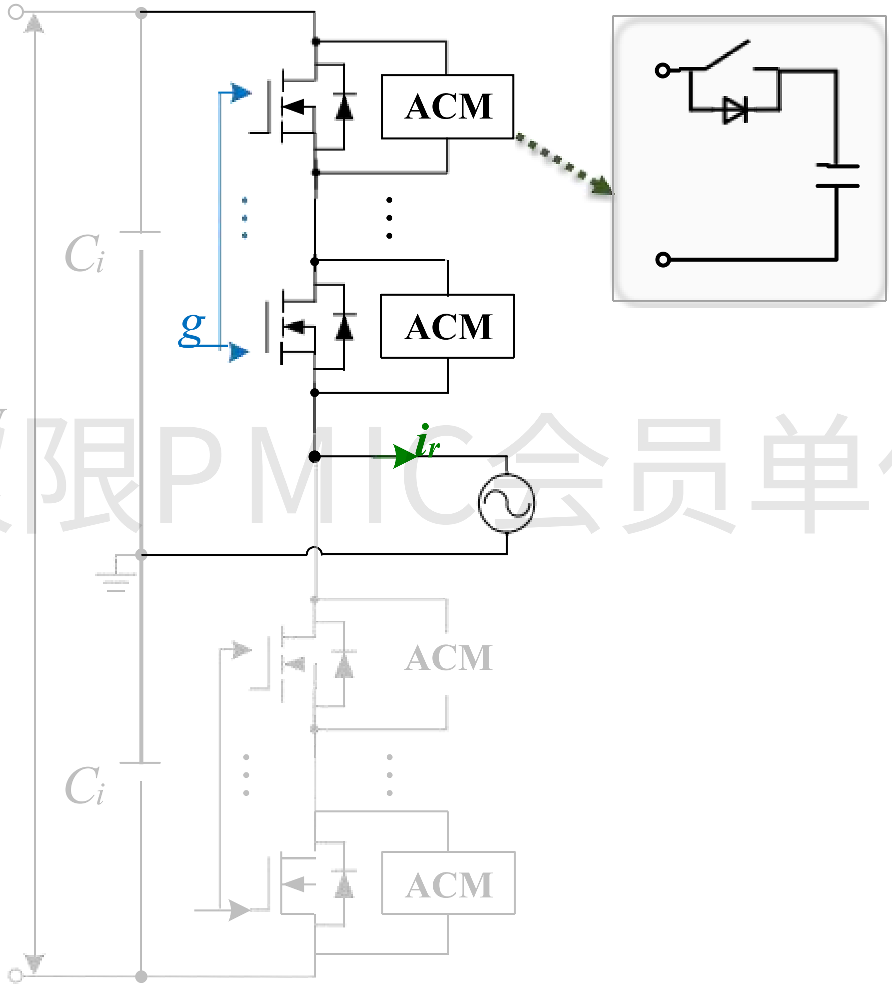


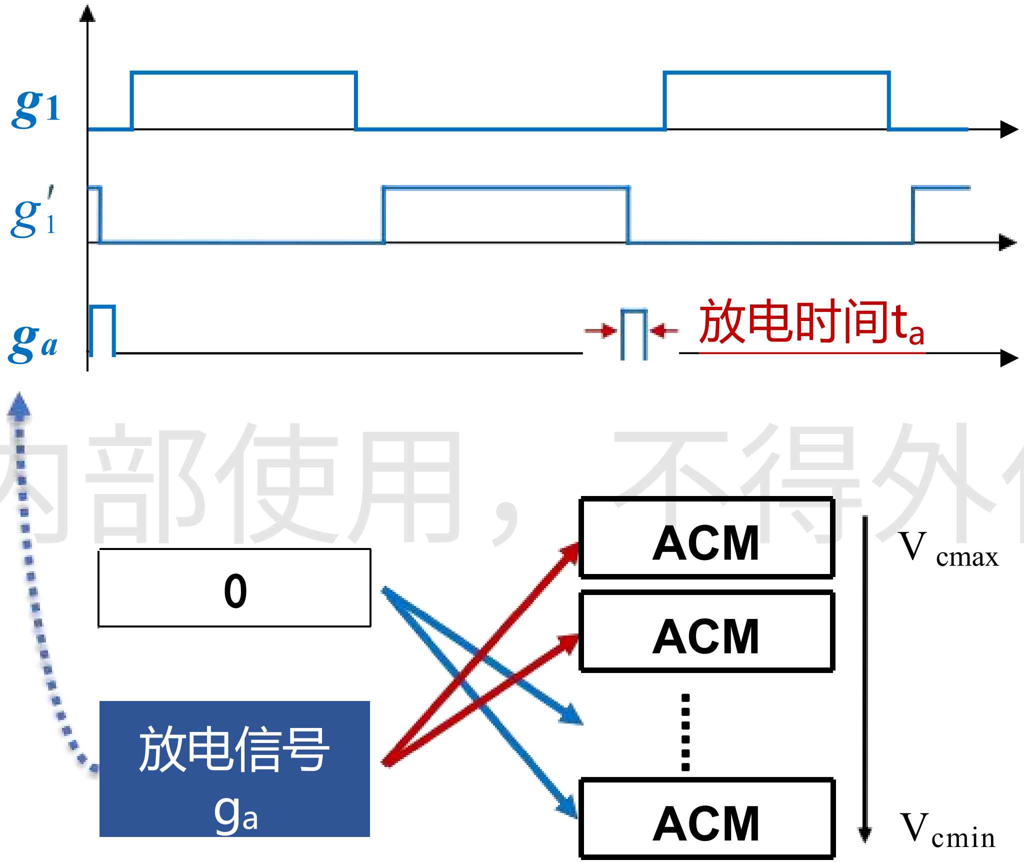
箝位电容放电（能量回收）


ACM
ACM
ACM
ACM
g_a
g
i_r
C_i
C_i
MV
DC
ACM cap


放电信号
g
g_a
i_r
t
死区
死区
1
2
N
箝位电容
能量回收
1
2
N
主功率器件
实现ZVS-on

均压控制策略

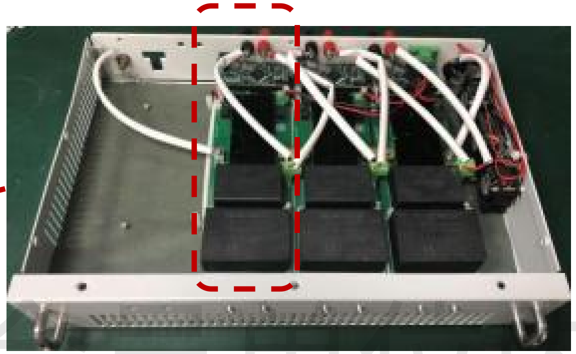




选择电压较高的箝位电容放电

第一代直流变压器样机

Power device and its ACM



6个SiC MOSFET串联

样机参数

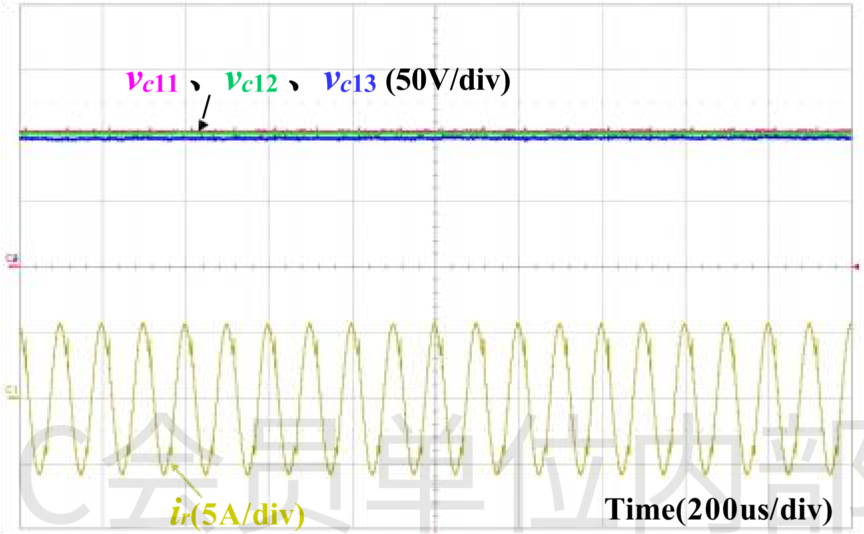
参数	值
中压	3kV
低压	750V
功率	30kW
串联器件数目	6
开关频率	10kHz
死区	2μs
放电时间	1μs
箝位电容	20μF

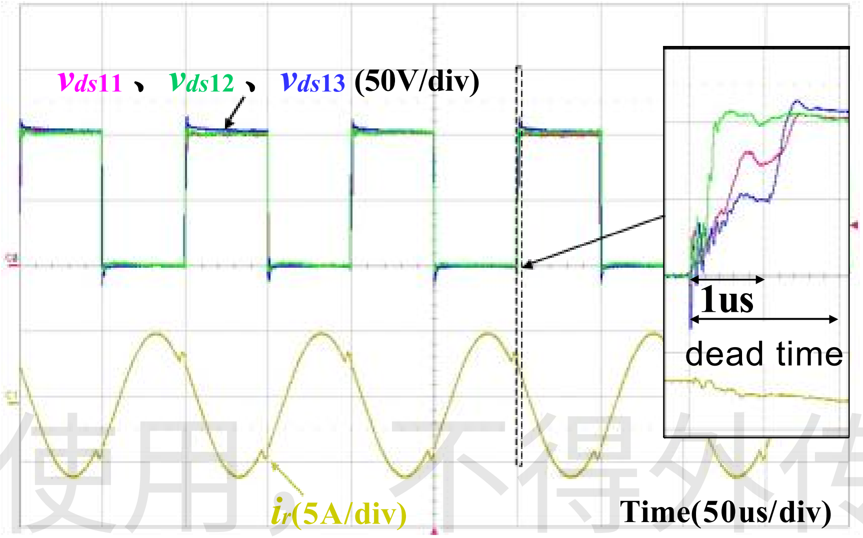
直流变压器实验结果

Power Management Innovation Consortium

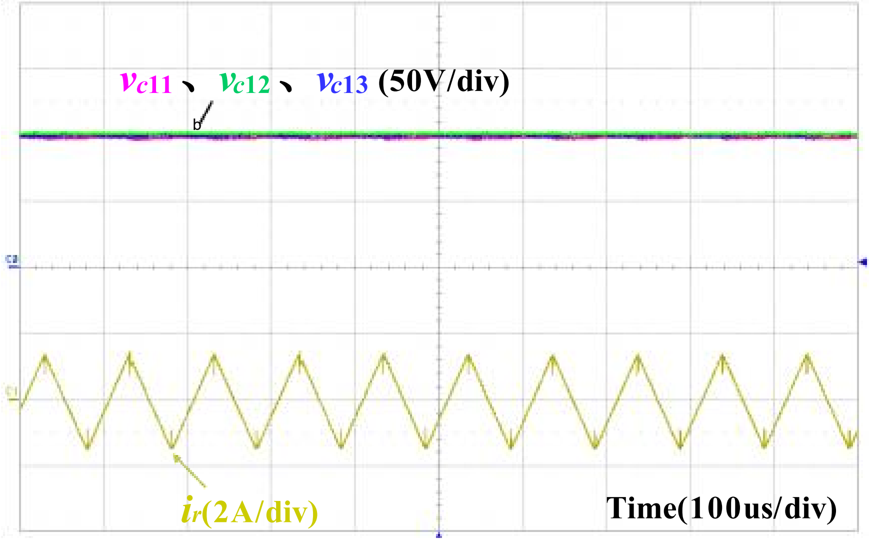
V_i=600V， P=1kW

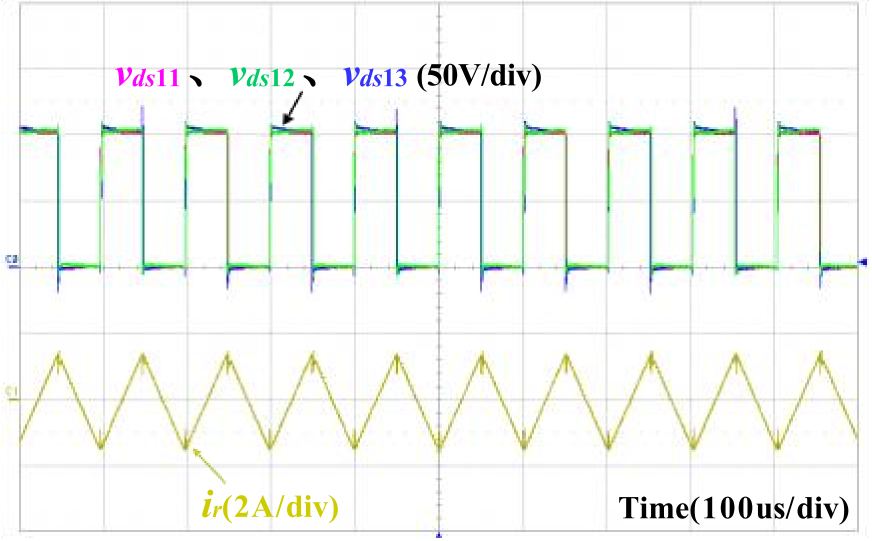
不均压度< 5%





V_i=600V， No load

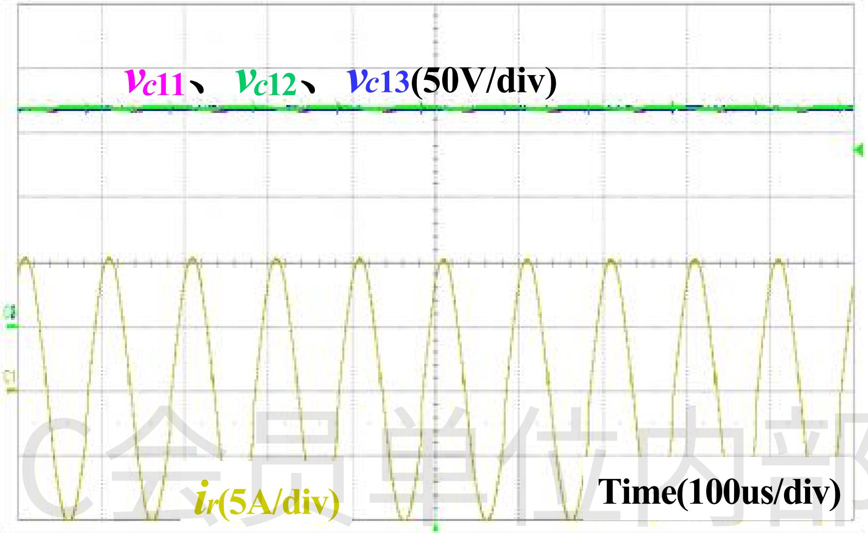


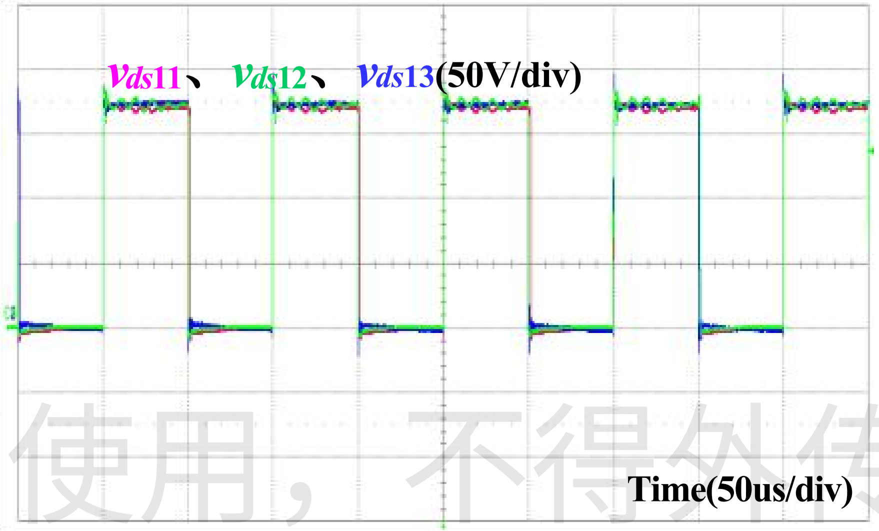


浙江大学 杭州国际科创中心
ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center

直流变压器实验结果

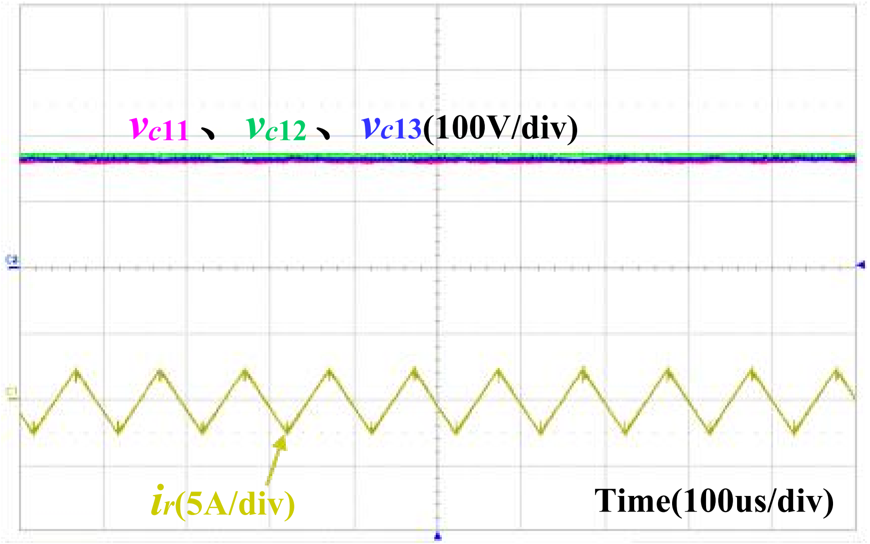
V_i=1kV， P=3.3kW

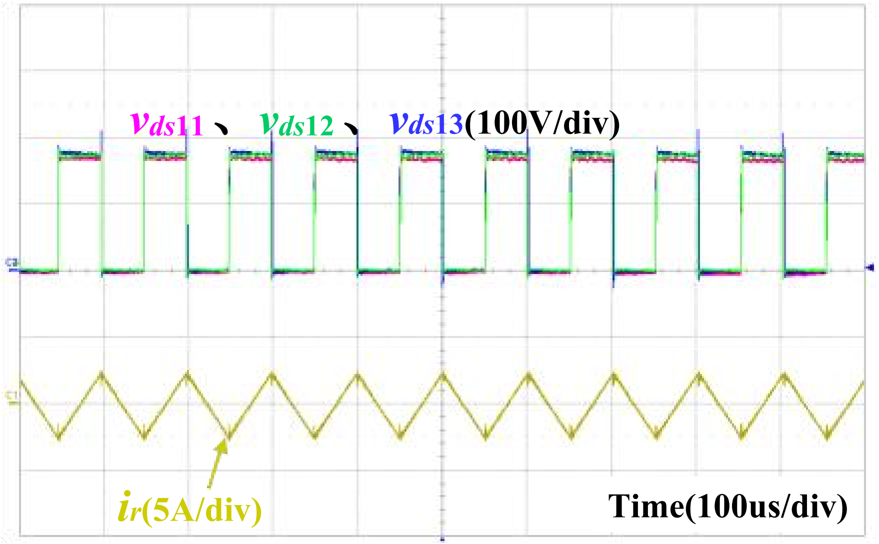




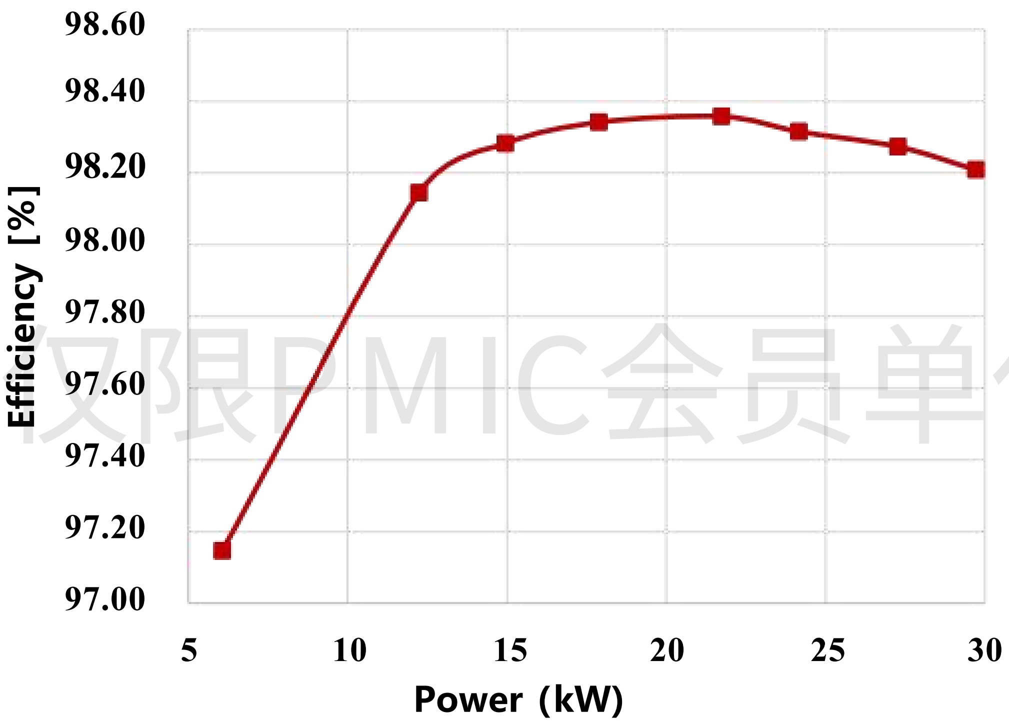
不均压度< 5%

V_i=1kV, No load

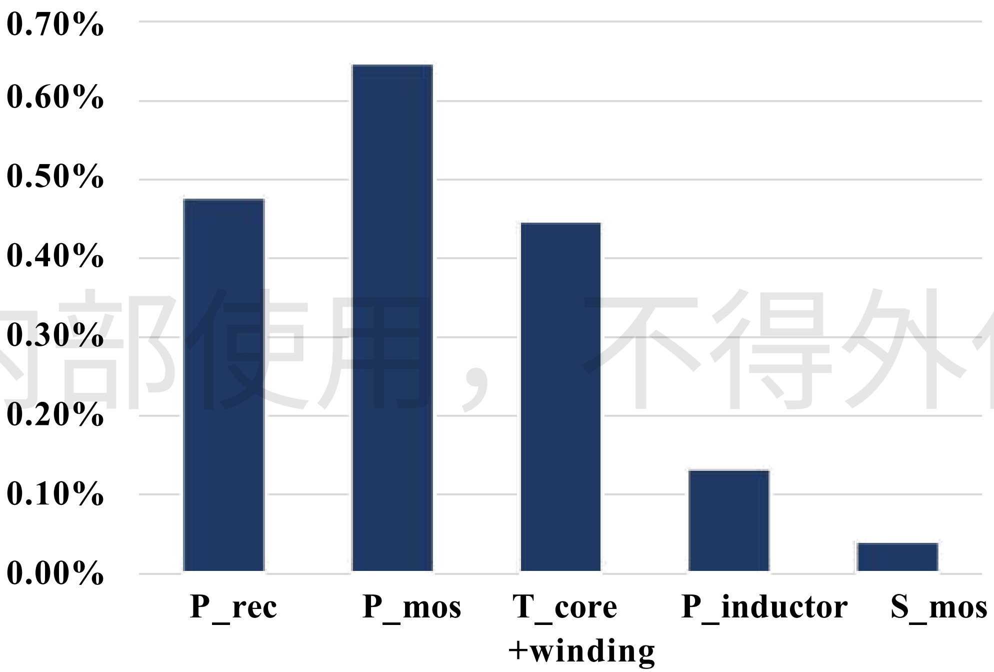




直流变压器实验结果



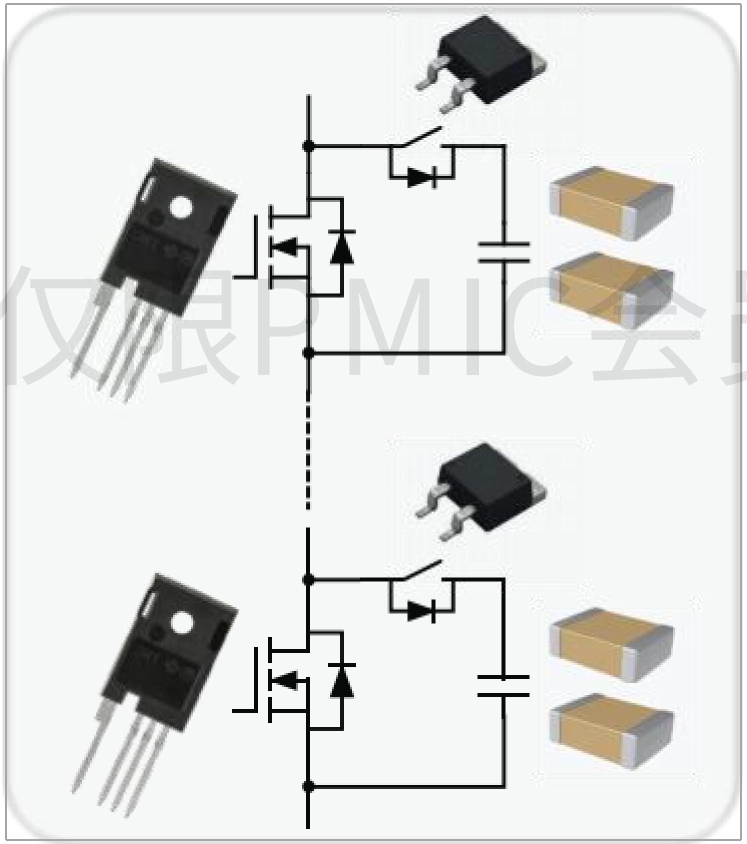
@3kV input



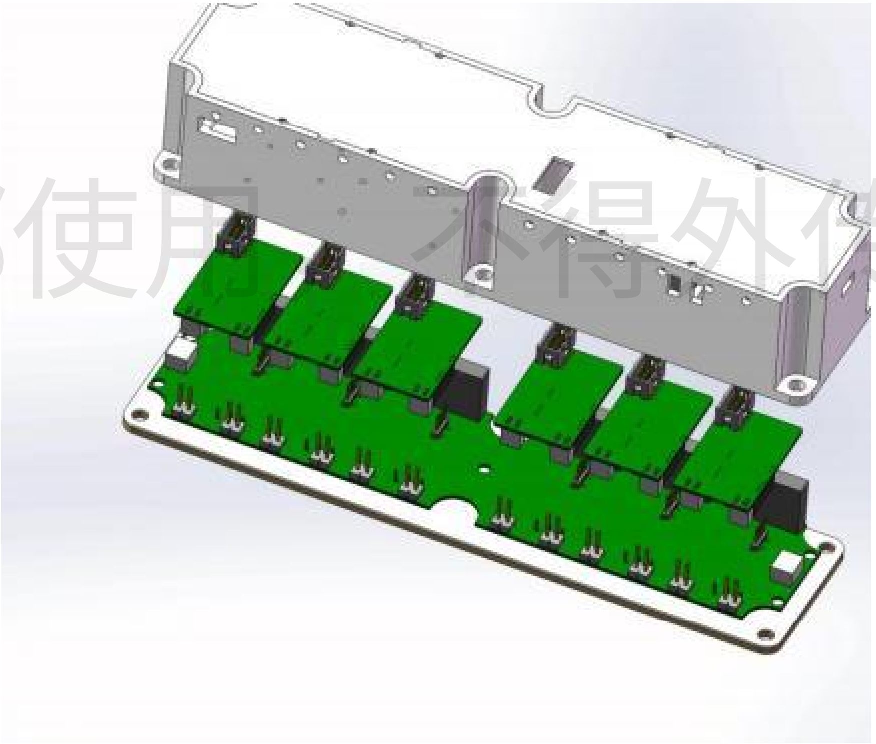
损耗分析 @3kV/30kW

7.2kV SiC MOSFET模组

- 集成封装主功率器件、均压电路、驱动电路



集成封装

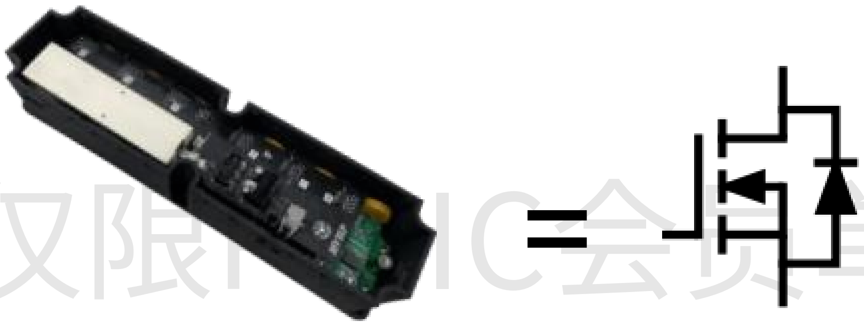


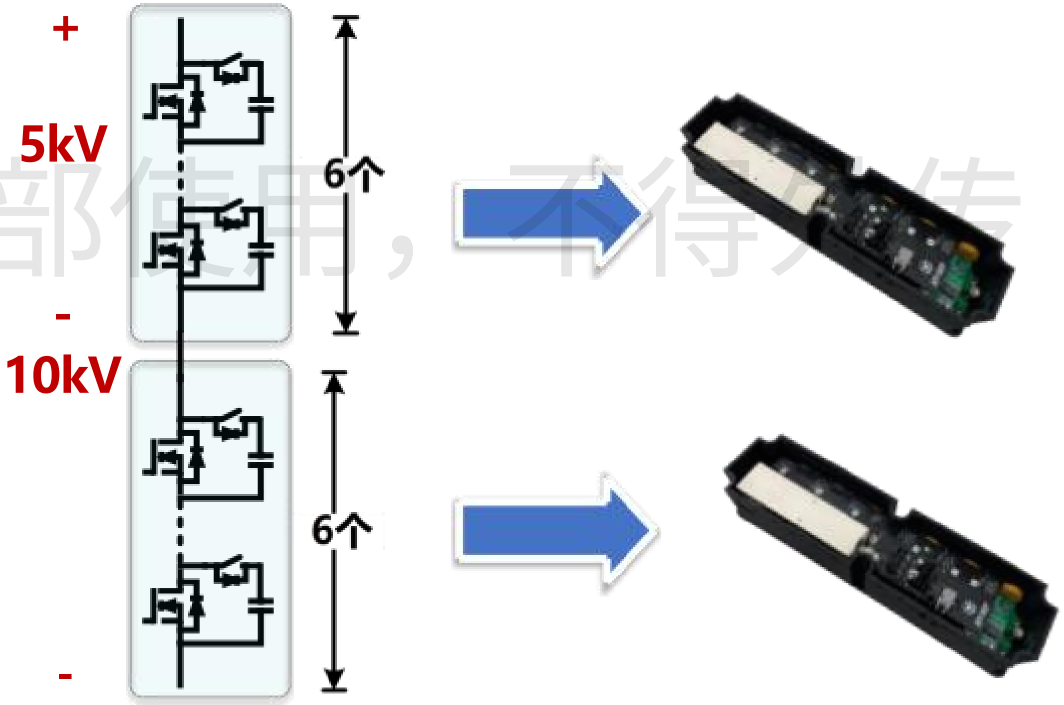
7.2kV SiC MOSFET 模组

7.2kV SiC MOSFET模组

等效为单个7.2kV/75A
SiC MOSFET 器件

模组具备可扩展性

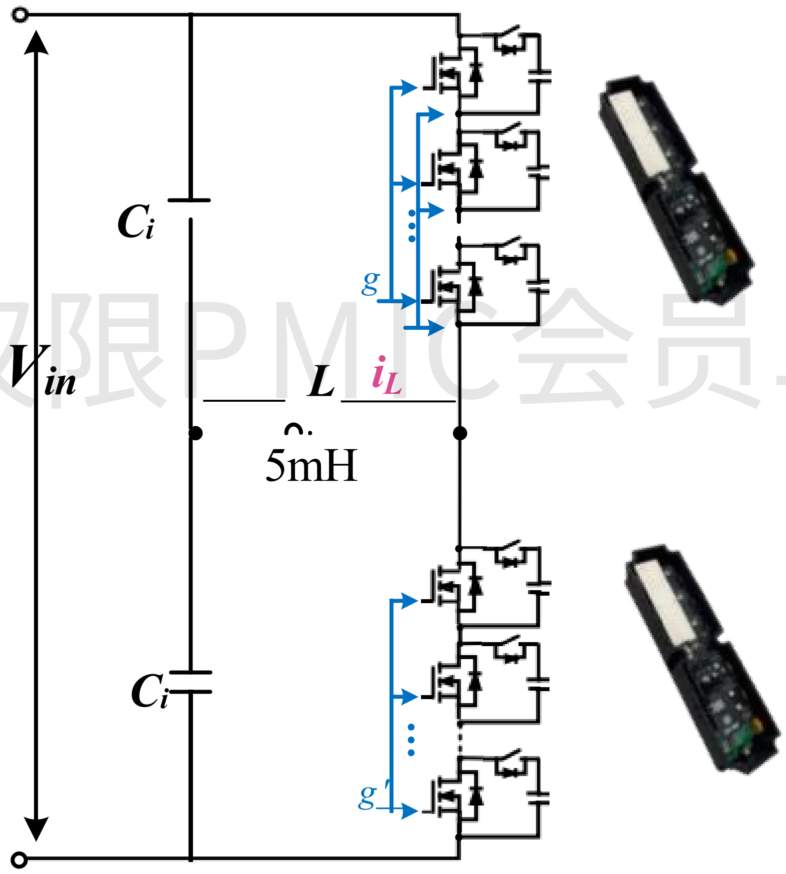


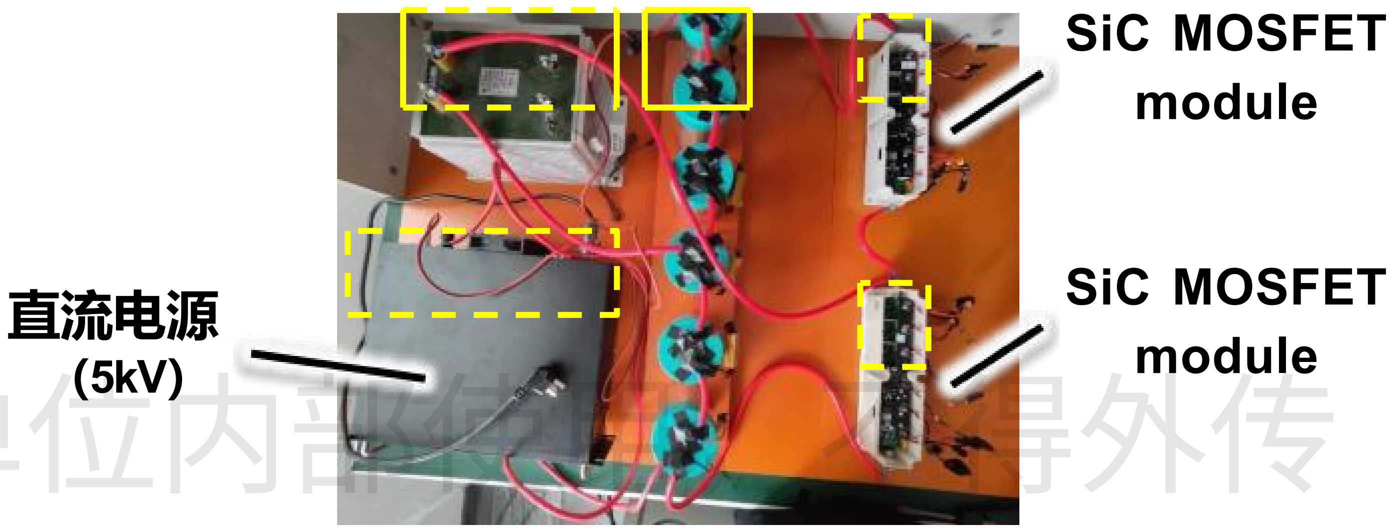


Parameters	Value
Drain-source voltage	7.2kV
Continuous Drain Current	75A
On-state resistance	6×21ma

额定电压测试 @5kV

测试电路

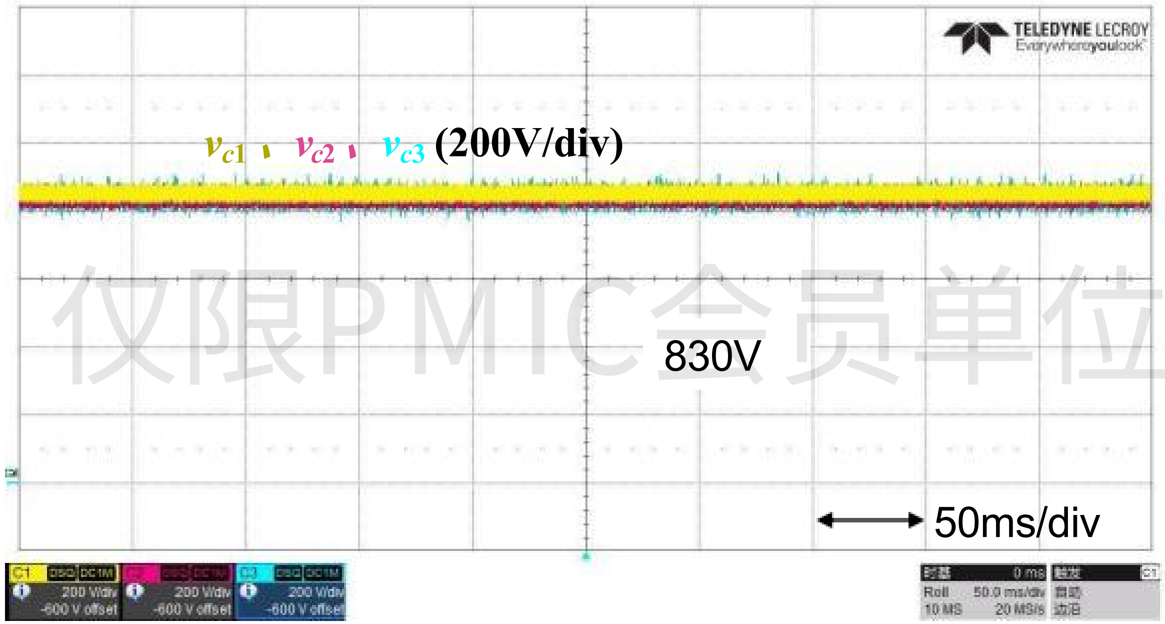




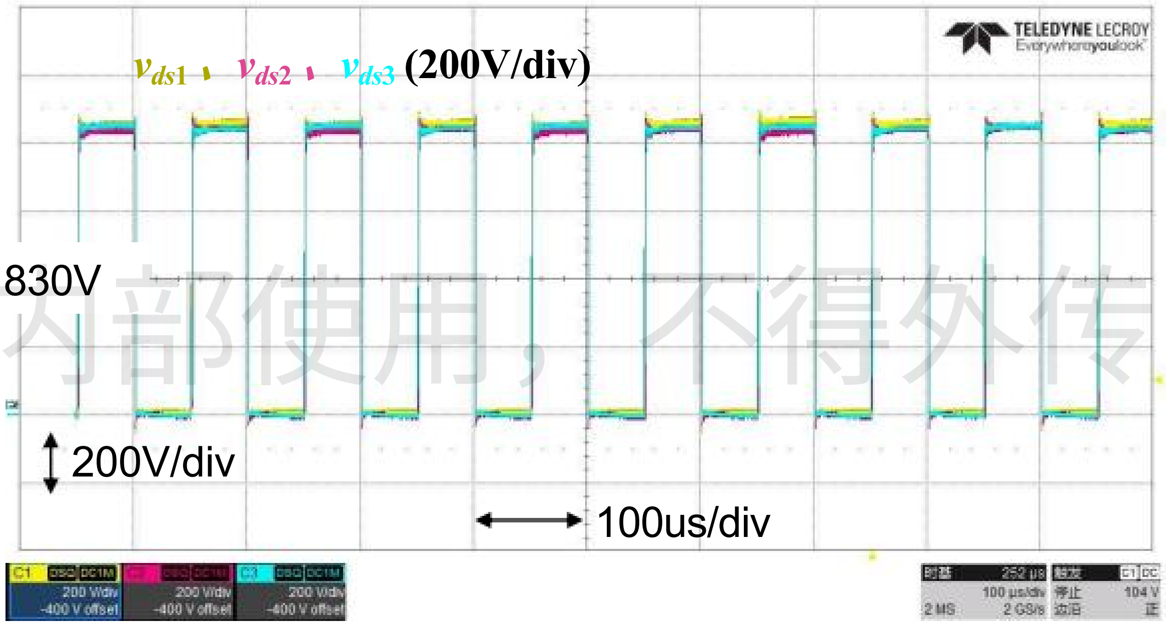
Parameters	Value
V_{in}	5000V
L	5mH
Switching frequency	10kHz

实验结果 @ 5kV

箝位电容电压



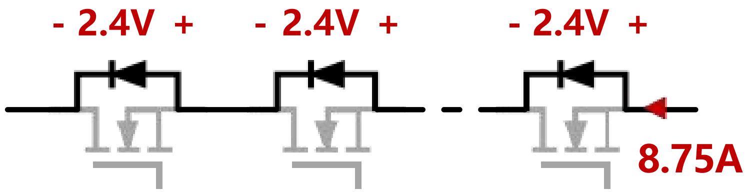
串联SiC MOSFET电压

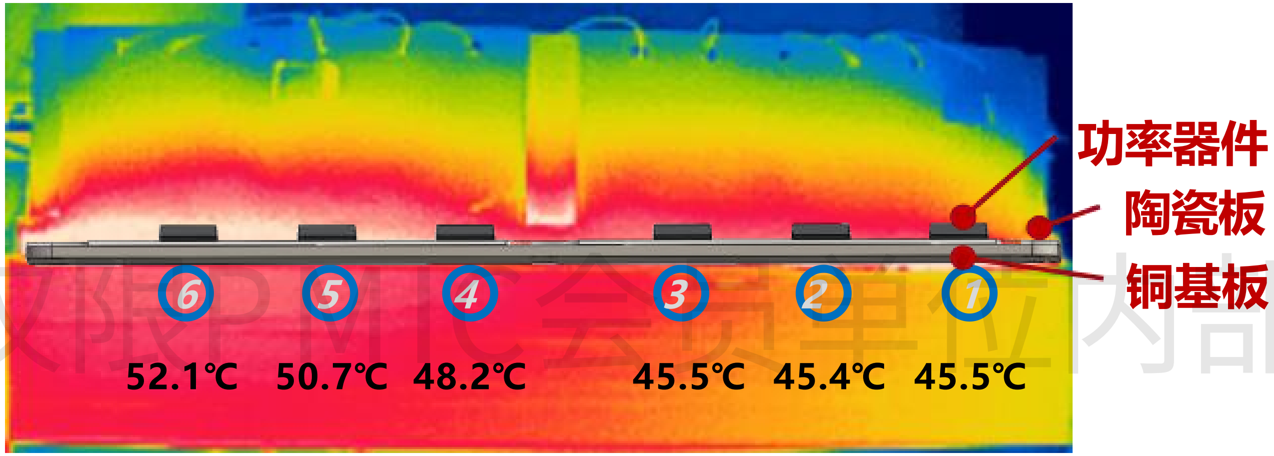


串联器件不均压度 ＜ 5%

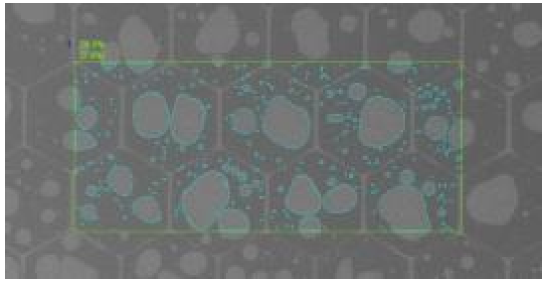
串联模组散热测试@21W 60min

散热测试结果



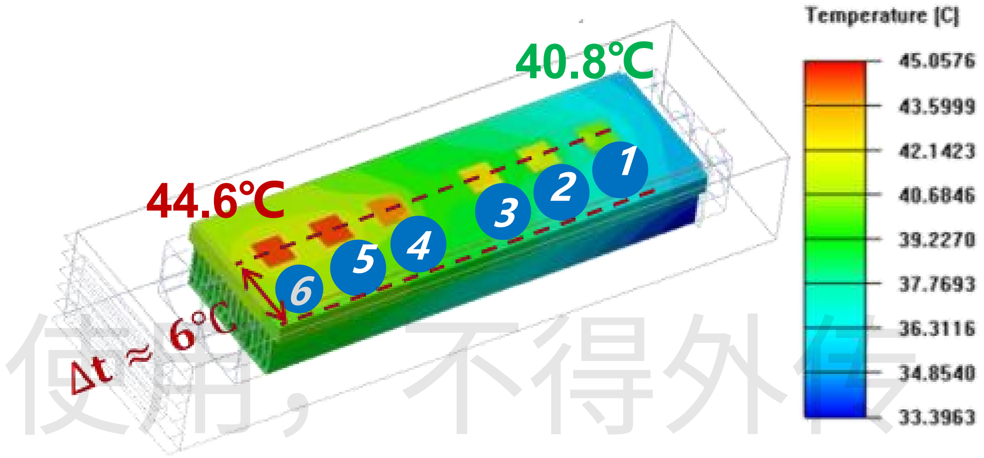


测试结果比仿真结果高13.5℃



☹

散热仿真结果

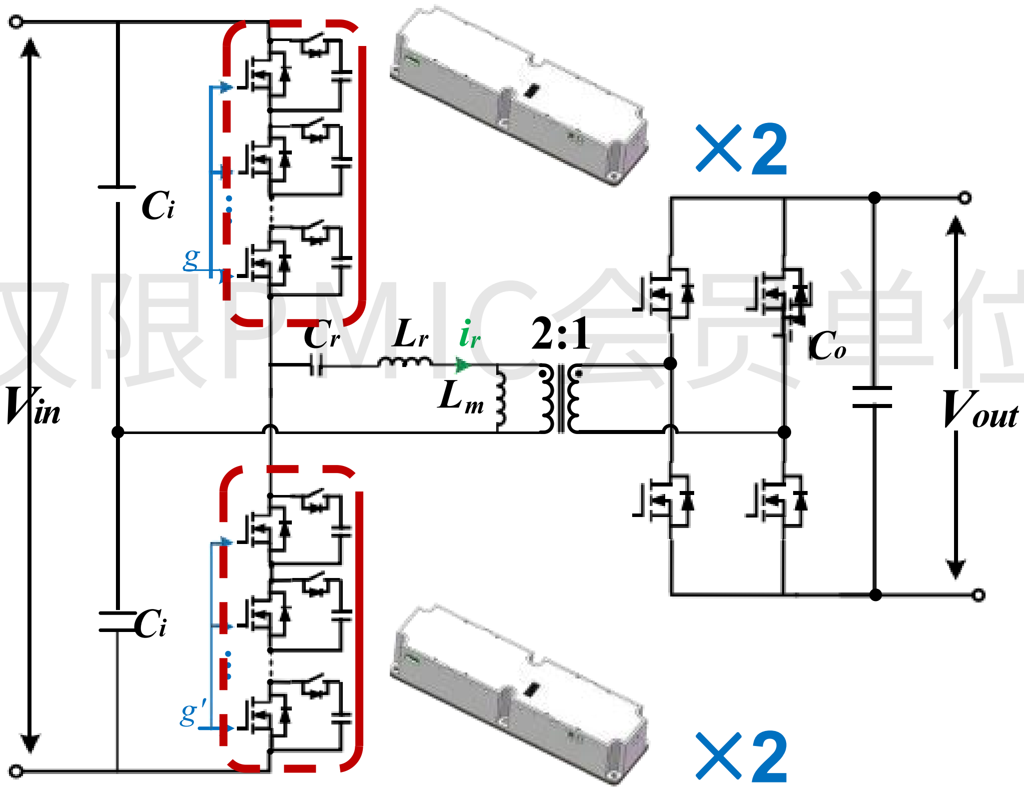


- 热源到铜基板边缘温差约为6℃
- $R_{\theta Jc}$ = 0. 32℃/W

模组中最高结温<70℃

串联模组扩展性验证@2kV 16.6kW

基于器件串联模组的单相直流变压器

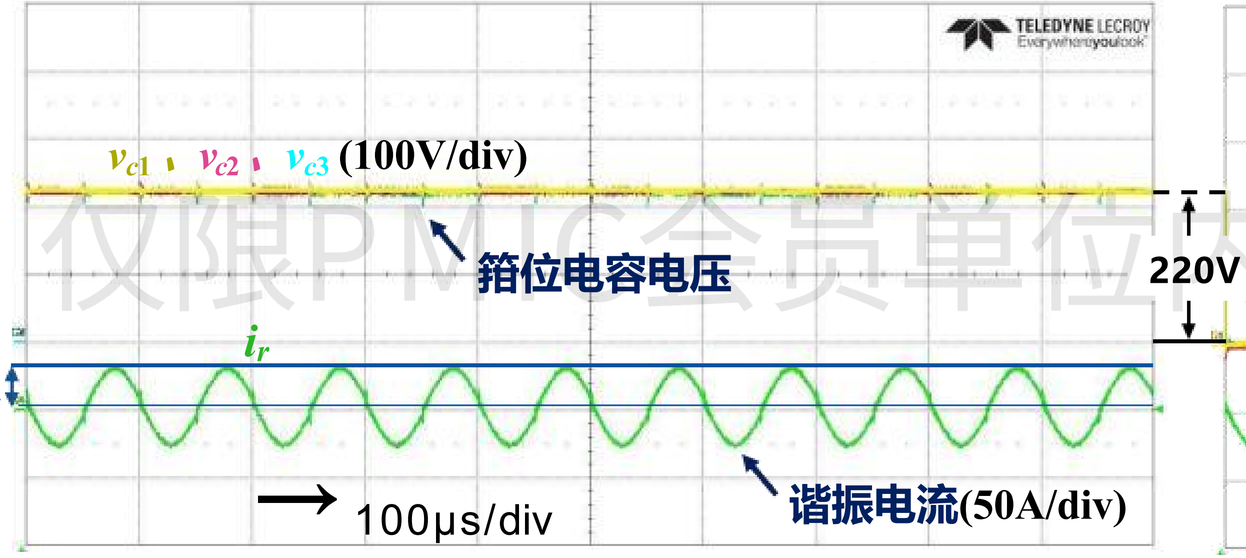


电路参数	值
V_{in}	2000V
V_{out}	500V
L_m	5mH
开关频率	10kHz
功率	16.6kW
上桥臂器件串联个数	12个
下桥臂器件串联个数	9个

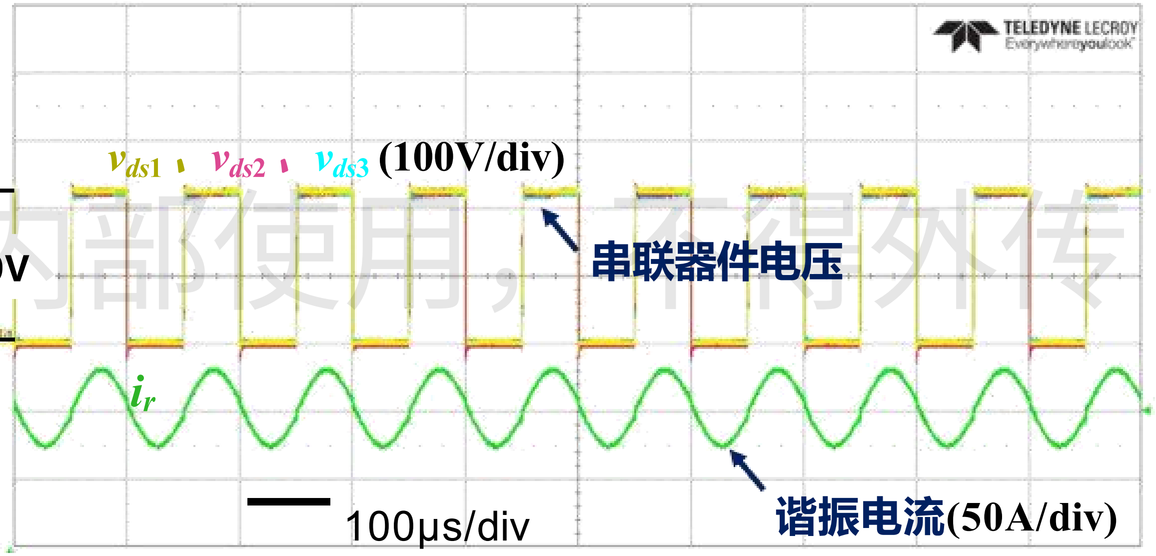
串联模组扩展性验证@2kV 16.6kW

■ 下桥臂（9个器件串联）相关波形

□ 箝位电容电压波形



□ 串联器件电压波形



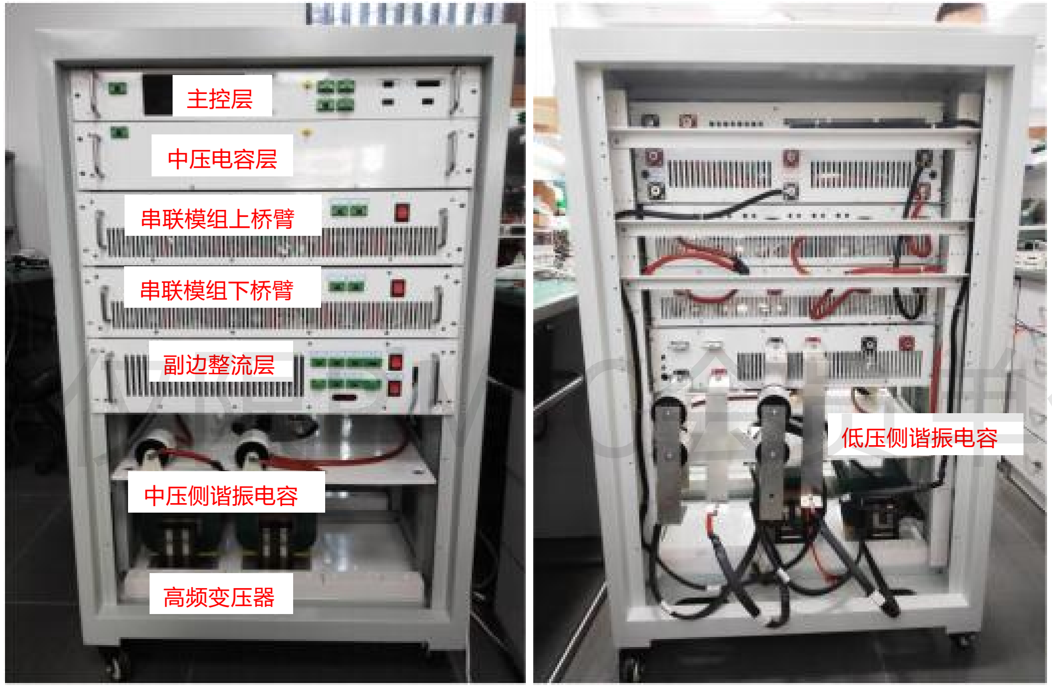
箝位电容电压不均衡度<5%

串联器件电压不均衡度<5%

模组扩展后均压效果良好

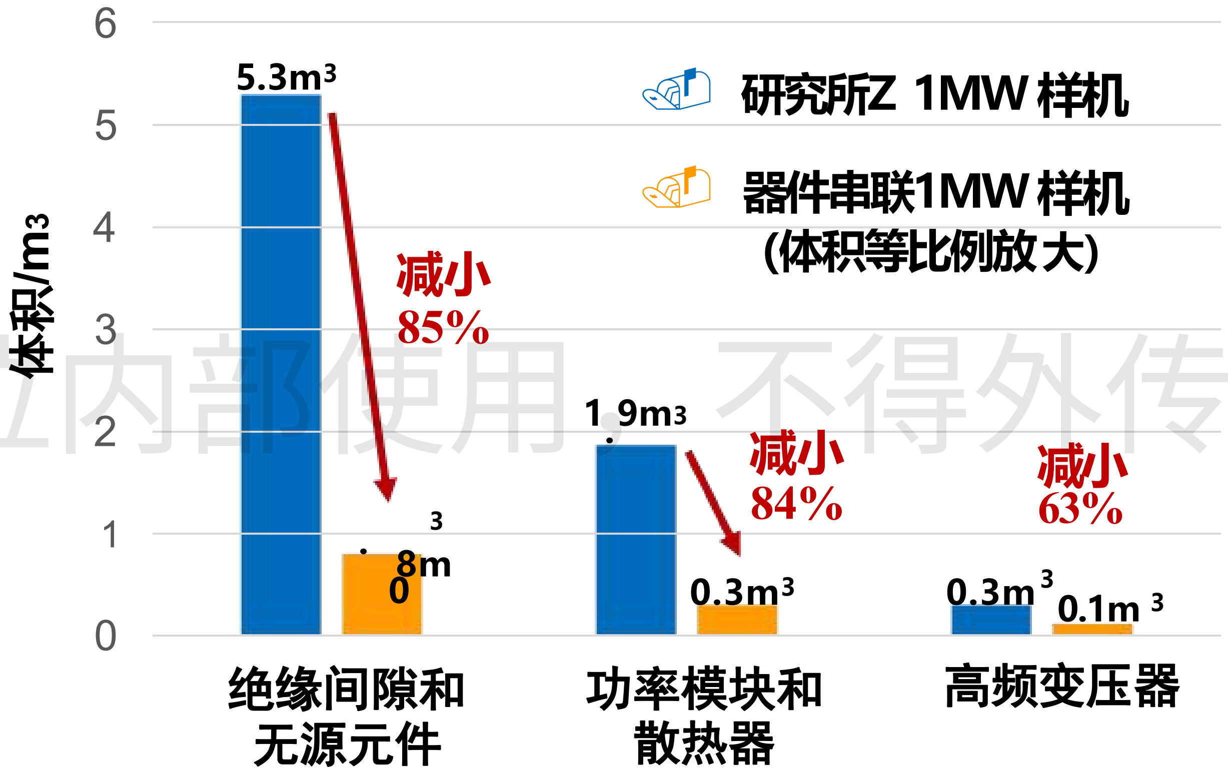
第二代实验样机—— 10kV/750V 500kW

PMIC
Power Management Innovation Consortium



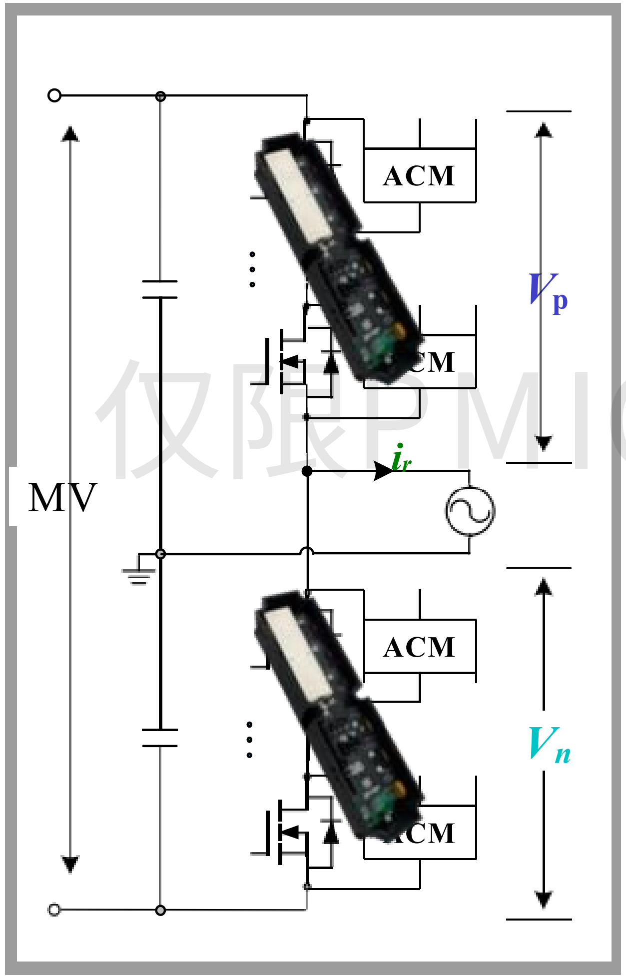
调试中

体积对比

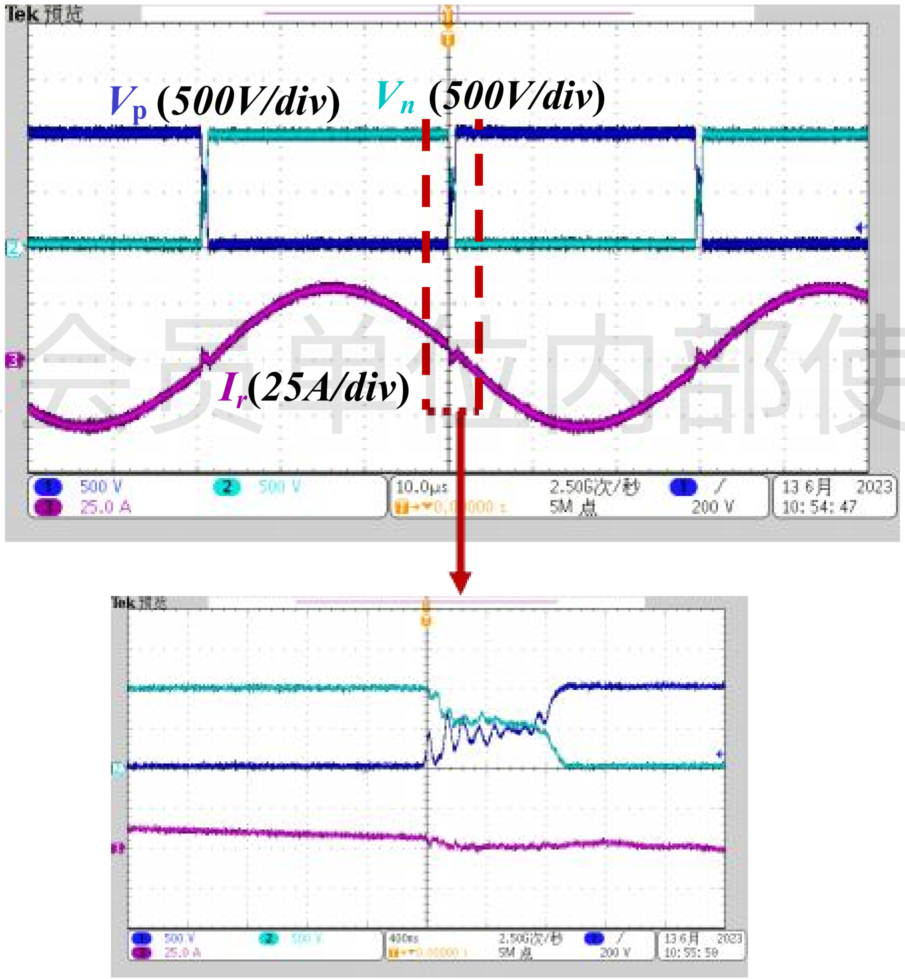


功率密度： 665kW/m³
预期峰值效率： 99%

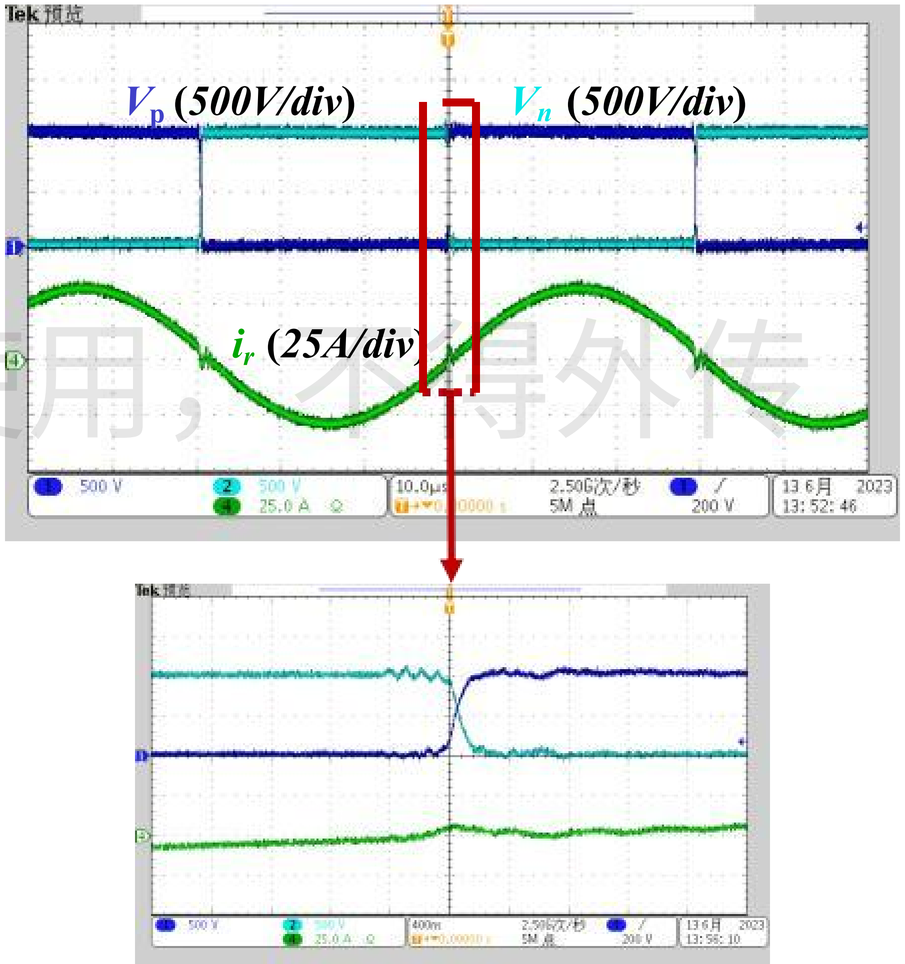
双向运行实验结果



中压 → 低压 @1kV/10kW



低压 → 中压 @1kV/10kW



总结

- 提出了基于有源箝位电路的器件串联技术
  - 均压损耗小
  - 开环实现均压控制
  - 实现了12个SiC MOSFET串联，动静态不均压度 ＜ 5%

- 直流变压器
  - 第一代样机3kV/750V，峰值效率98.4%
  - 第二代样机功率密度大幅提升，预期峰值效率99%

Acknowledgement

The author would like to thank

CUI Wentao
崔文韬

LI Yucen
李雨岑

ZHAGN Jianjia
张建佳

WANG Xin
汪欣

WU Tong
吴彤

for their contributions.