



电力电子技术及应用新进展

徐德鸿教授

浙江大学

2012年12月22日



背景

传统角色

- ✓ 为计算机、通讯系统、自动化、家电等提供高质量的交流或直流电源
- ✓ 用于电机调速以提升运动控制的静态、动态特性，以提升生产力
- ✓ 电力电子技术无处不在，但是一个无名英雄

新角色

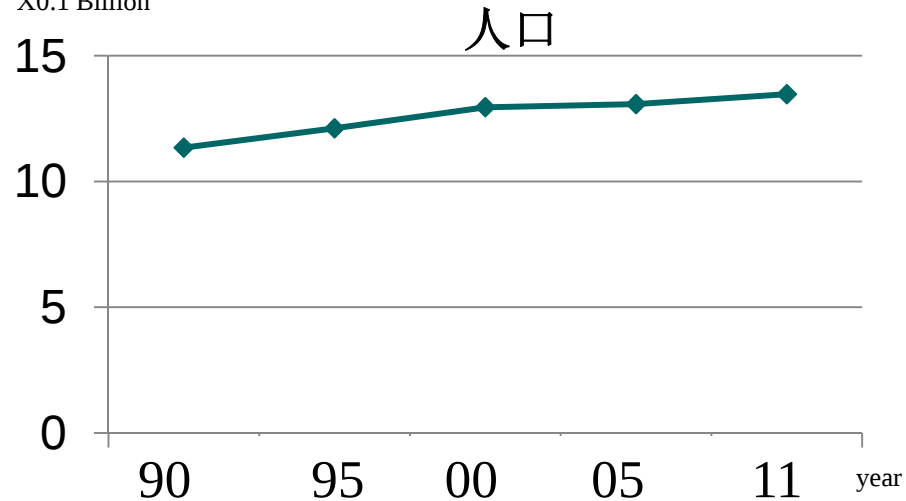
- ✓ 节约能源
- ✓ 节约材料
- ✓ 新能源和智能电网
- ✓ 电动汽车与高铁
- ✓ 减排和环境保护

电力电子从后台走到了前台！

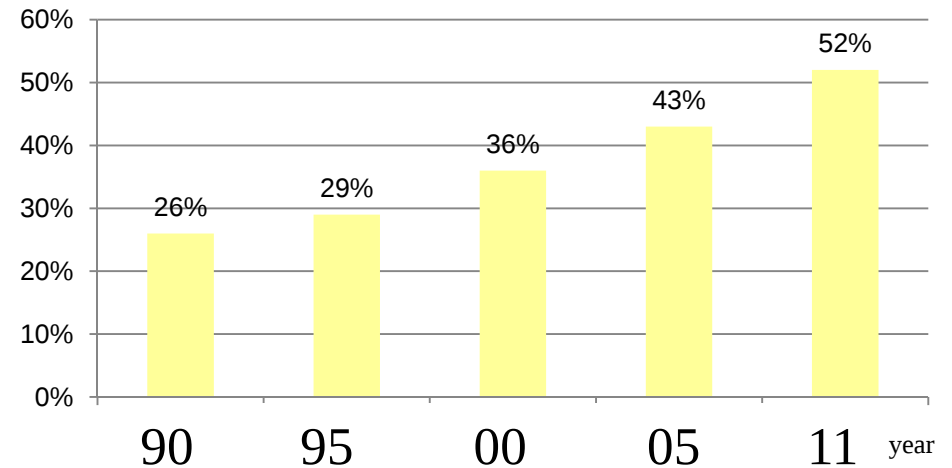


人口与城市化

X0.1 Billion



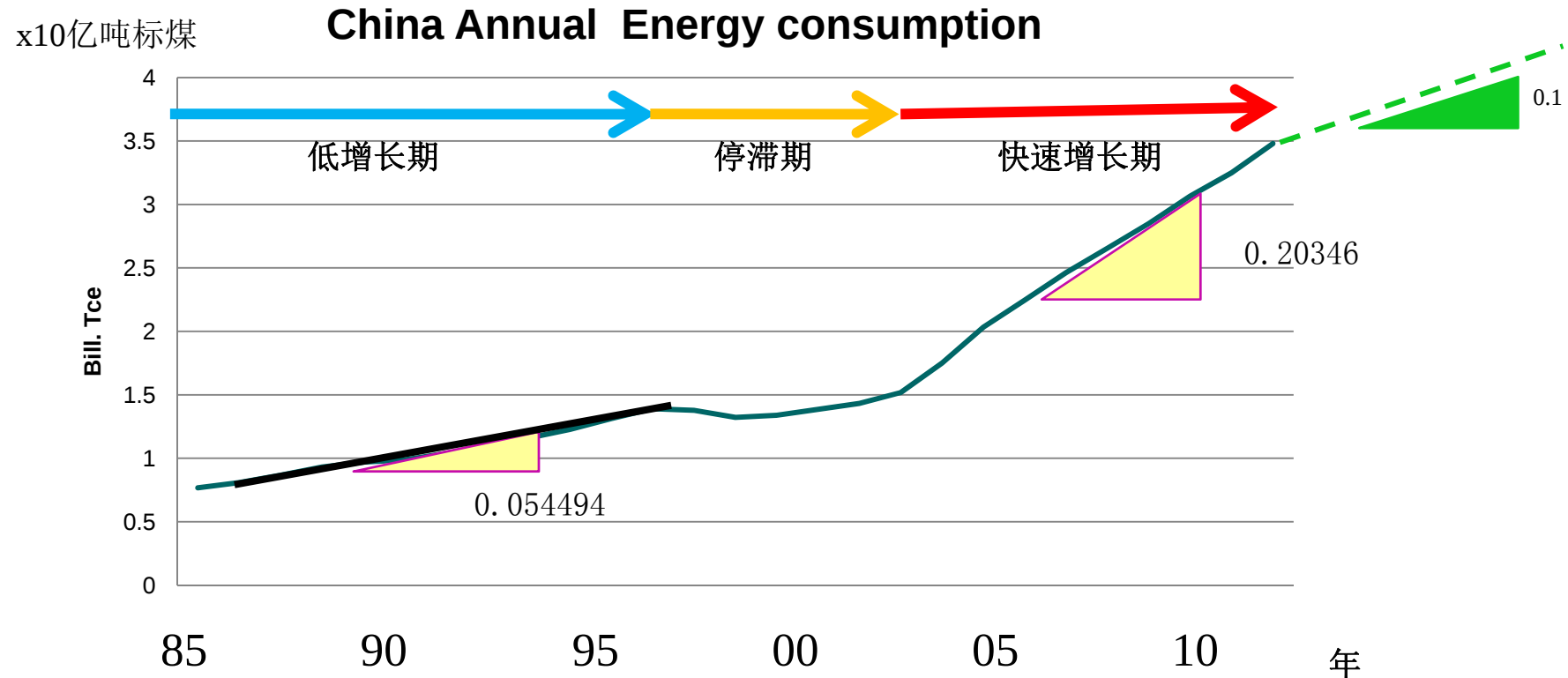
城市化率



- 人口：13亿，增长率：0.48%
- 城市化快速推进
- 城市化推动能源消费的增长



我国能源消耗



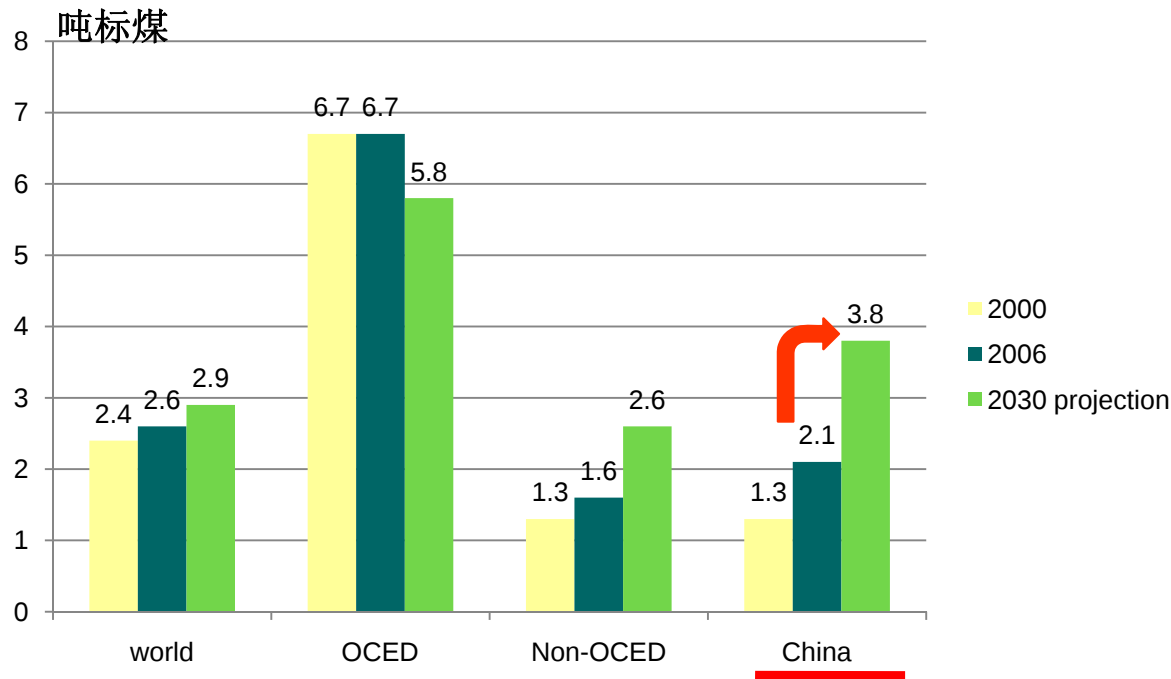
- 可以分成3阶段
- 2003年开始能源消费起飞

1 Tce (ton of standard coal equivalent)=29.4GJ

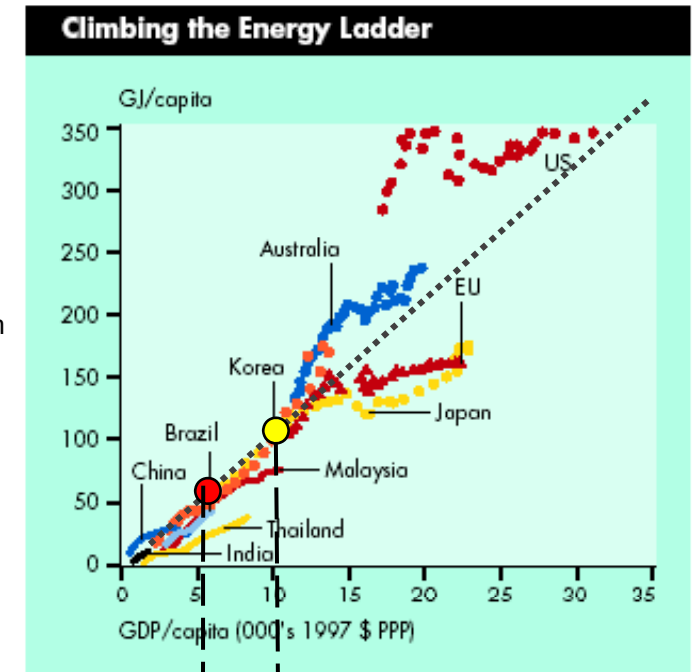
1kg Oil=1.4286kg of standard coal



人均能源消耗



Source: IEA, WEO2008, IMF, World Economic Outlook database 2008

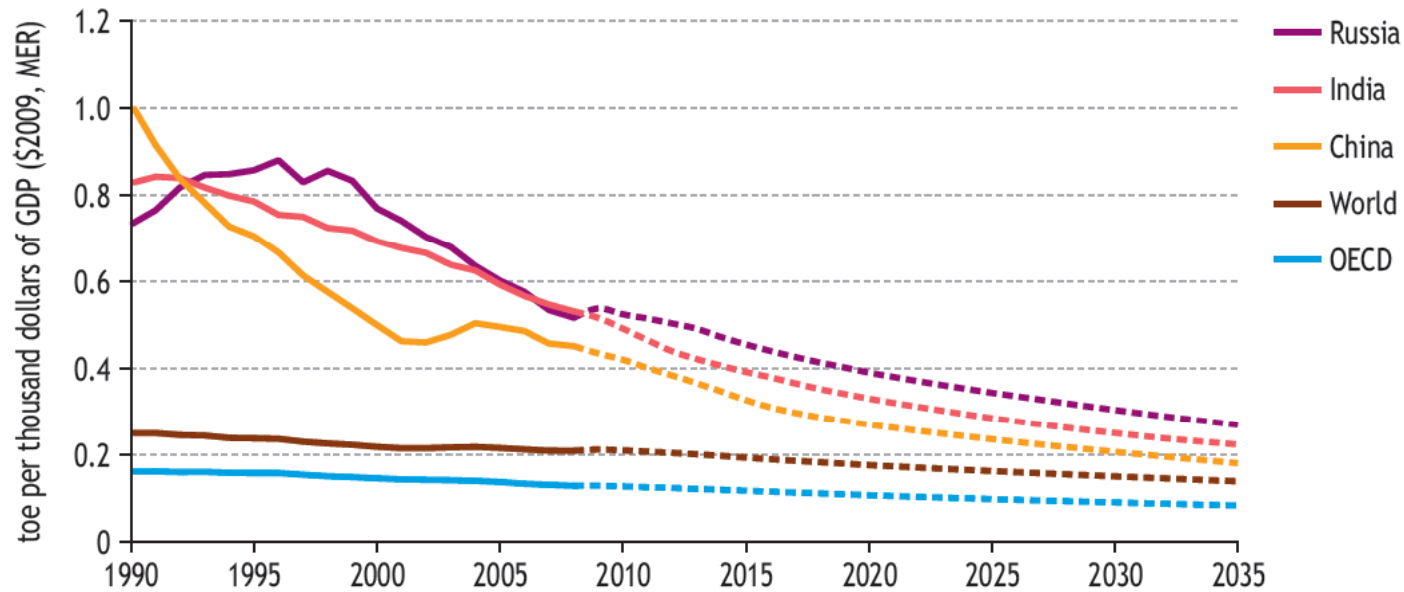


0.48万美国
1万
美国

- 2011年我国人均能耗为2.6Tce，是2000年的两倍
- 能源消费面临快速增长的压力
- 矛盾：人均能耗偏低，但总能耗已居世界第一



单位GDP能耗比较

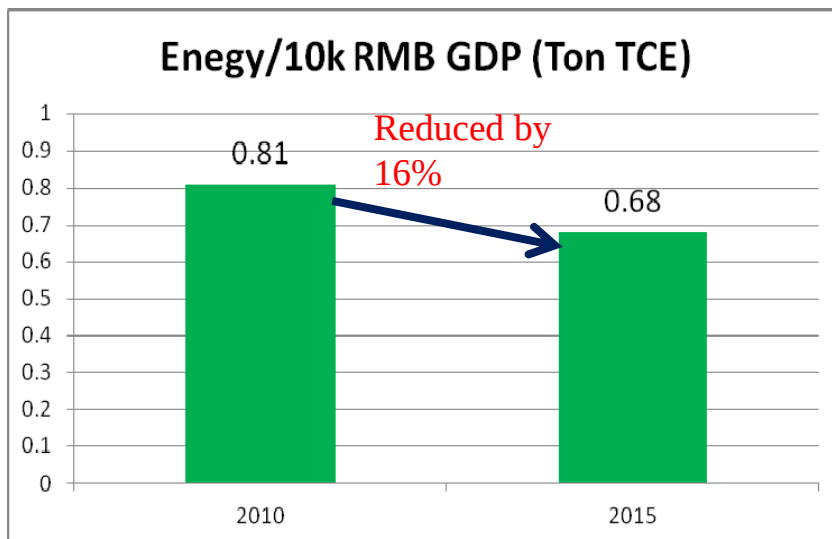
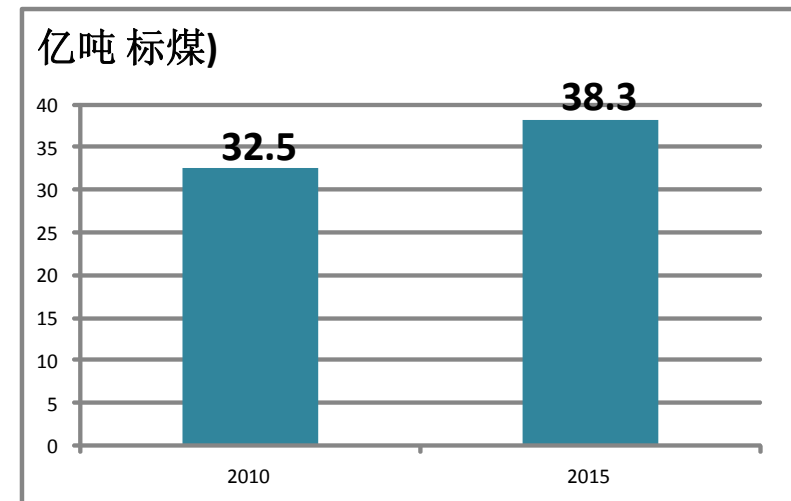
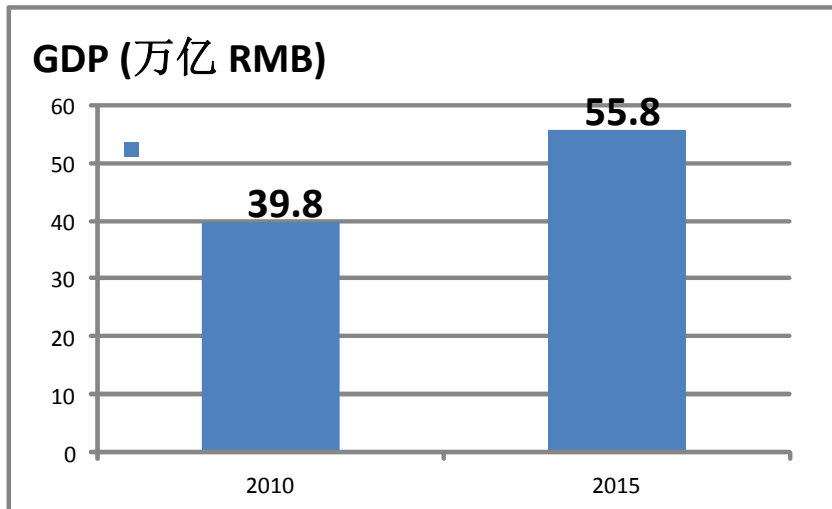


@IEA,2000

■单位GDP能耗是发达国家(OCED)的3倍，世界平均值的两倍



国家“十二”节能规划



- 十一五，已实现单位GDP能耗再下降20%的目标
- 十二五，单位GDP能耗再下降16%



节能的领域

➤ 70% 产业结构调整

➤ 30% 运用节能技术

Renewably power generation



Smart grid



Electronic Vehicles



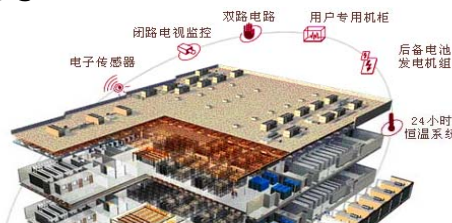
High speed railway



Energy-efficient computer and appliance in homes



Energy saving technology in IDC



Energy saving for Manufacturing process



电力电子技术是支撑技术!



节约能源：电能节省

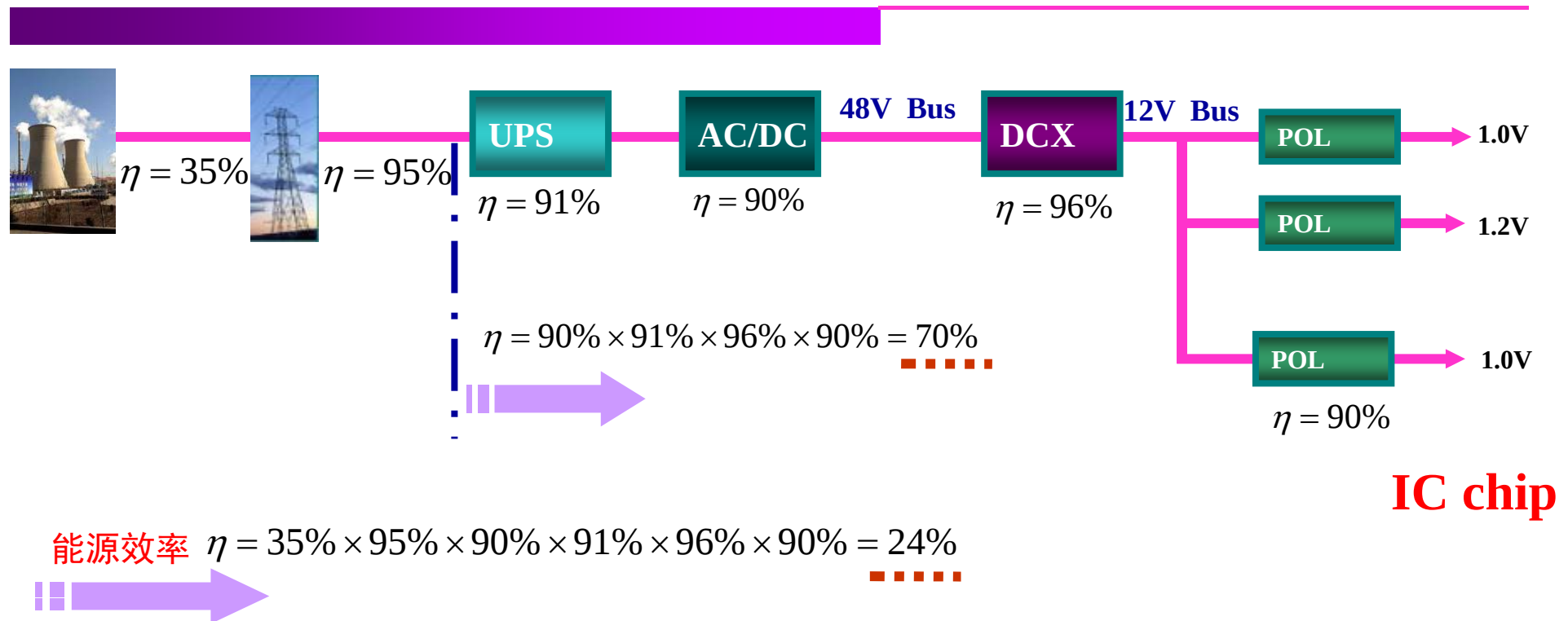
2011年我国电能占终端消费能源比重约21% ， 2030年进一步提高到30% ， 因此节约电能具有重要的意义

负荷分类		预期节能	
Power supply: - stand-by, - active, ... - Computing	IT, 通讯, 消费 24%	- 待机 - 运行 80+ / 90+	>90% 10% 5%
EC-Ballast Daylight dimming HID, LED, ...	照明 21%	电子控制	>25%
Factory autom. Process engineering Heavy industry, Light industry, ...	电机 55%	调速	>30%
Transportation: Train, Bus, Car, ...		调速+ 能量回馈	>25%
Home appliance: Fridge, WM, HVAC		调速	>40%

Source: ZVEI, Siemens, CEMEP, CPES, EPA, NRDC



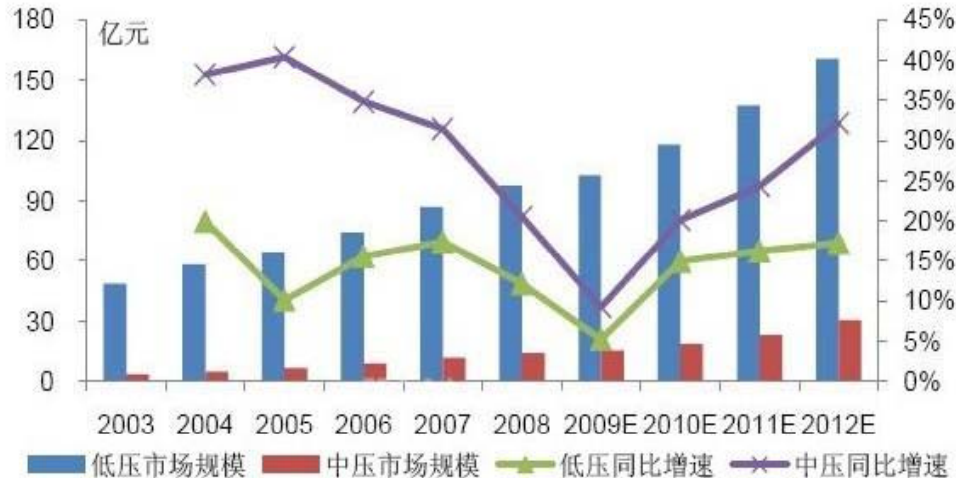
IT数据中心的问题



供电链太长，能源效率大幅度下降



中压电机节能

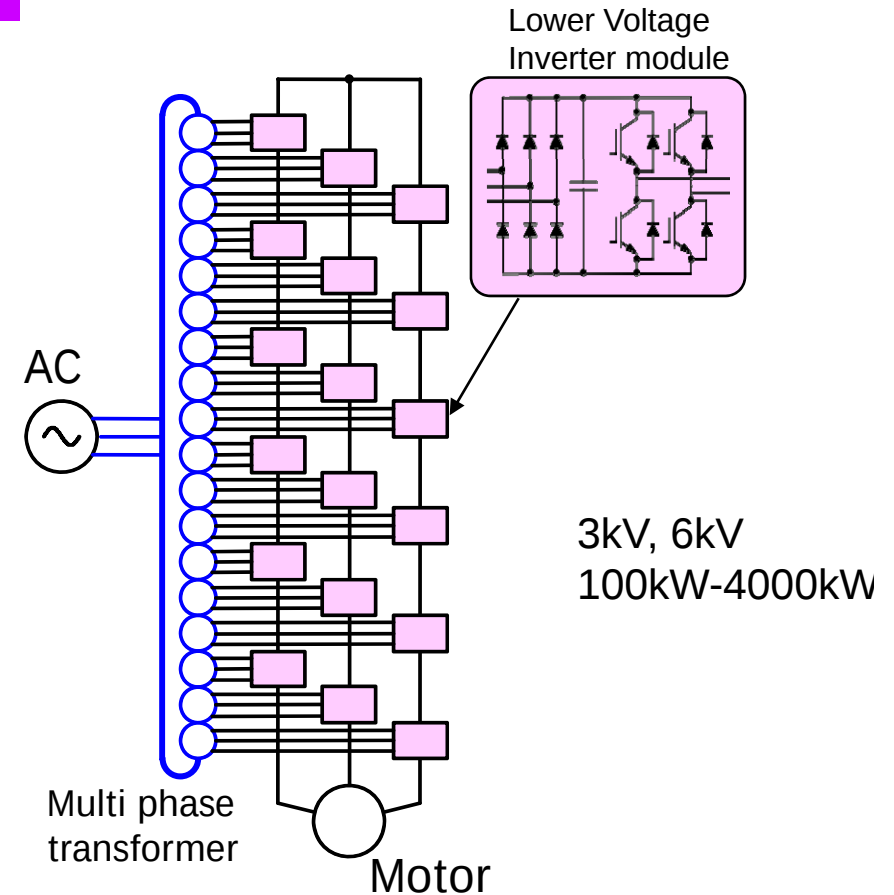


□ 我国电动机总装机容量:5.8 亿千瓦，占全国总耗电量的60%

□ 电动机采用变频调速控制比例 < 10%

□ 变频控制 可以节电30%

□ 中压电机变频器市场年增长率达30%

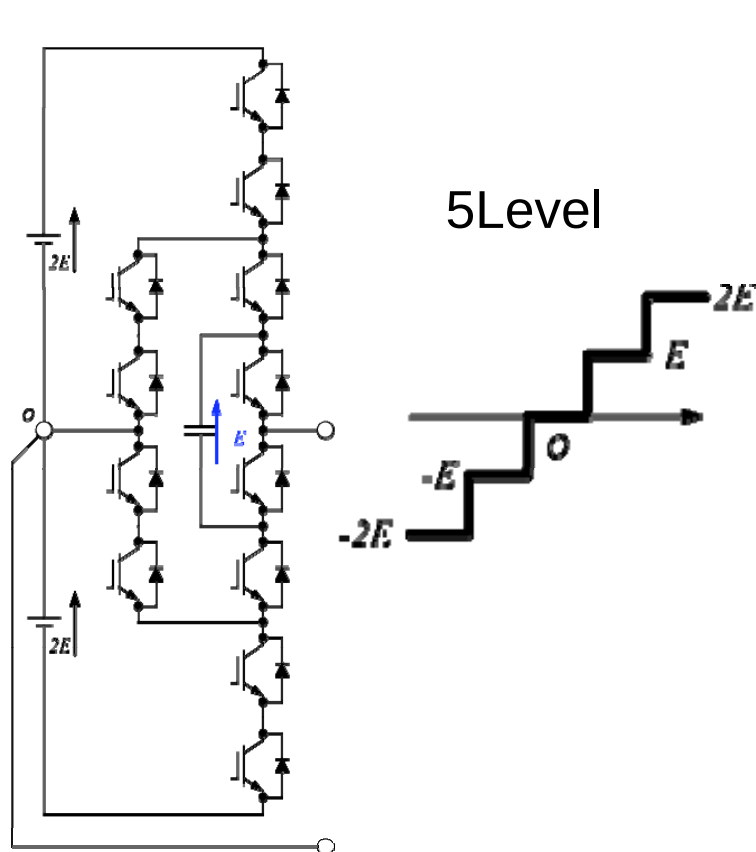


级联式结构

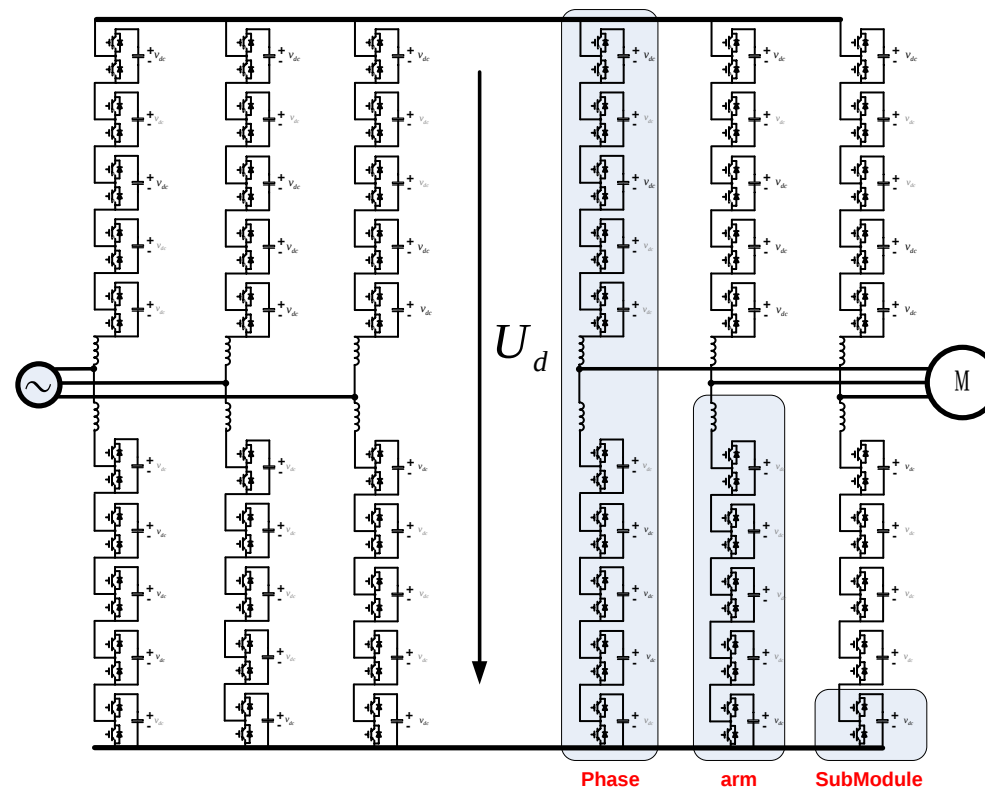
- 变压器复杂，体积大
- 多绕组，可靠性问题
- 电能质量差



新颖中压变流电路拓扑



Active Neutral Point Clamped 5 Level inverter



Modular Multilevel Converter

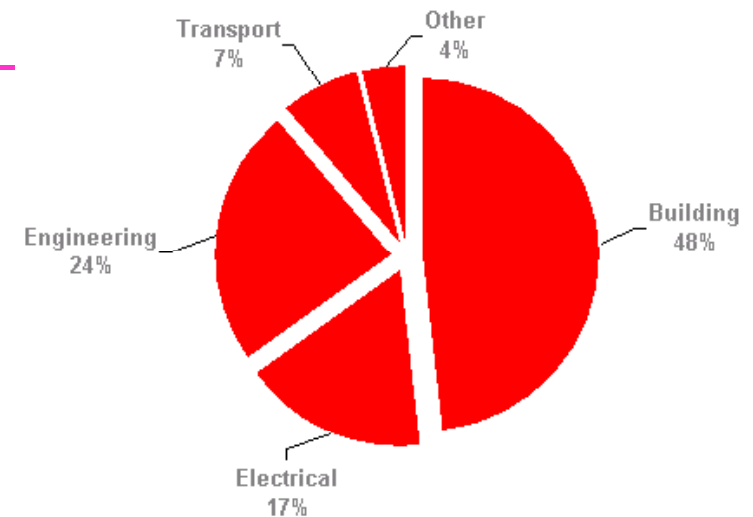
□ 近十年出现的新颖电路拓扑



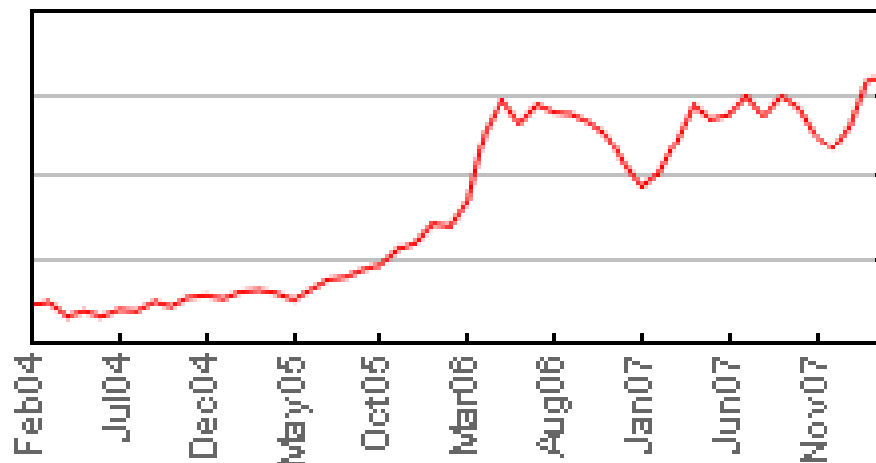
节约资源

- 铜、钢材的原材料的价格攀升
- 高频变压器替代工频变压器,
- 电力电子装置中无源元件的小型化
- 非50Hz电 动机
- 多用硅（半导体），少用铜

Uses of Copper



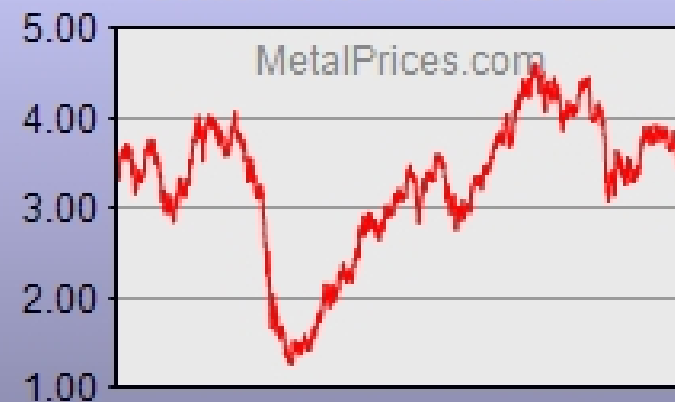
Monthly Copper USD 3M



More Si, less

LME Copper Prices 5 Years

LME Copper Settlement 5 Years - \$/LB

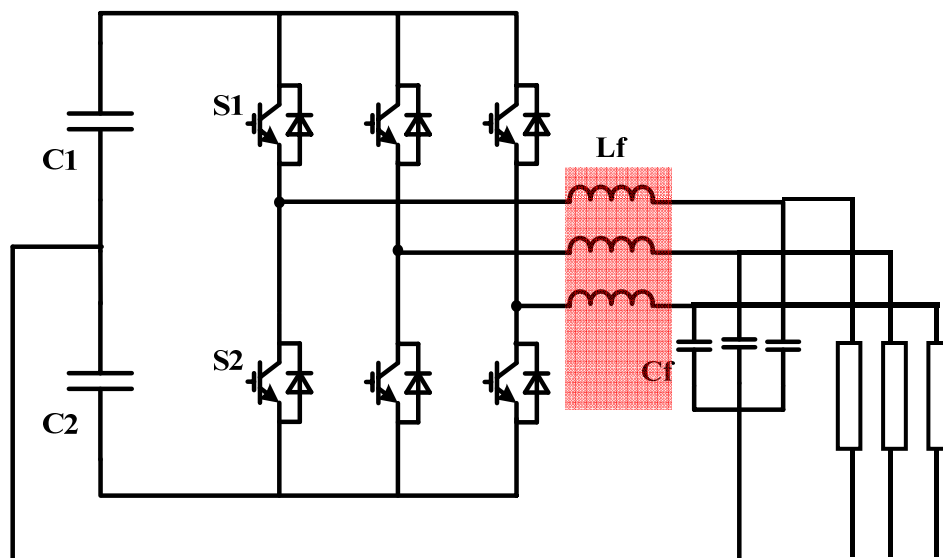


25 Jun, 2007 - 22 Jun, 2012

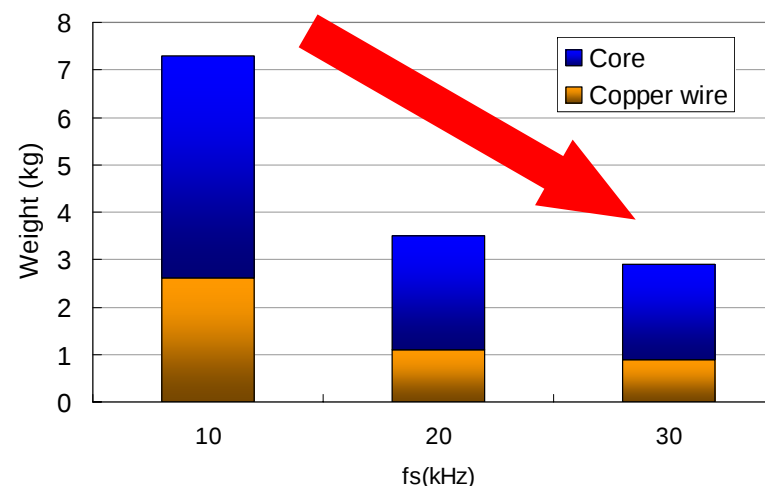


电抗器耗材 vs. 开关频率

□ 电磁元件的成本是不间断电源或光伏逆变器15-30%



- ◆ Vdc: 700V DC Vo: 220V AC
- ◆ 3-phase Po: 10kW
- ◆ $L_f = 2.8\text{mH}$ (10kHz) / 1.5mH (20kHz)
- ◆ S1/S2: 40A/1200V IGBT

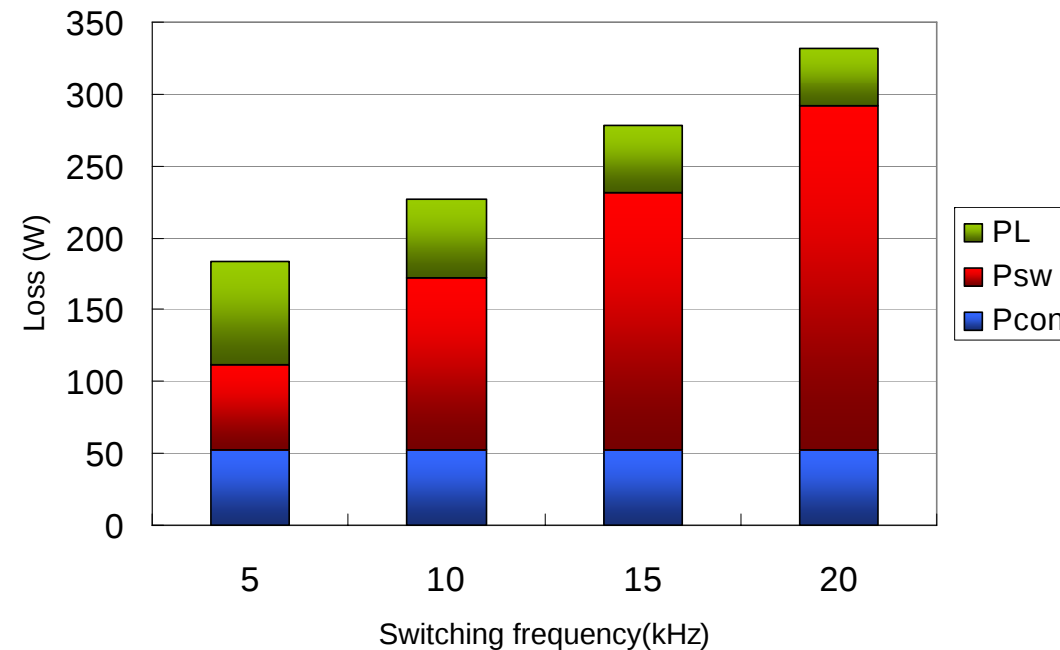


滤波电抗的重量 vs. 开关频率 $f_s^{-1/4}$

□ 提升开关频率可以减小电抗器重量



如何突破开关频率的极限

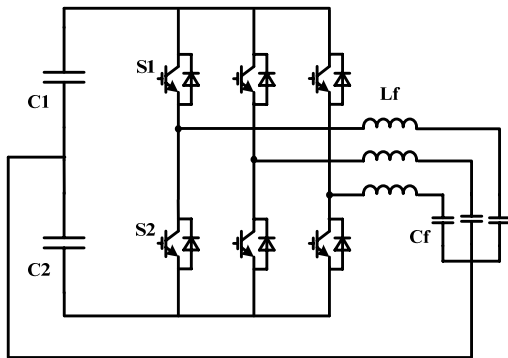


逆变器的开关损耗vs. 开关频率 f_s

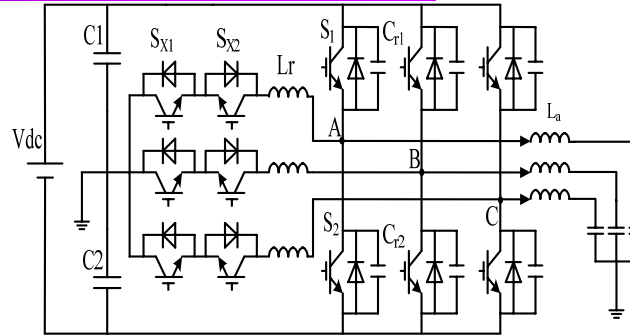
- ❑ 随着开关频率的增加，逆变器的开关损耗快速增加
- ❑ 减少开关损耗是关键：新功率器件，有利于减少开关损耗的电路技术（软开关技术），新的磁材料



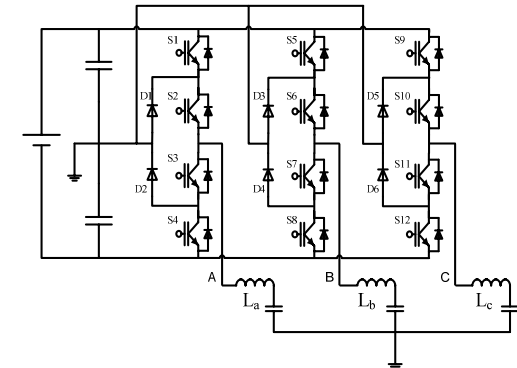
减少开关损耗的电路技术：软开关和三电平



普通逆变器

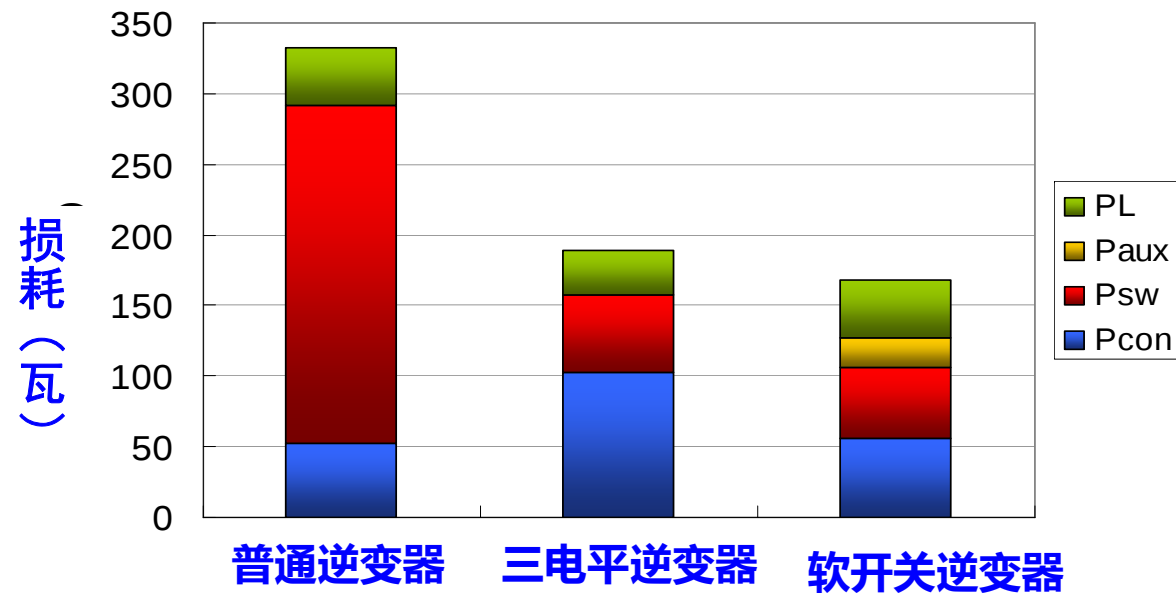


软开关逆变器



三电平逆变器

- ◆ Vdc: 700V DC Vo: 220V AC
- ◆ 3-phase Po: 10kW
- ◆ Lf=1.5mH(20kHz)
- ◆ S1/S2: 40A/1200V IGBT
- ◆ Output THD: 5%

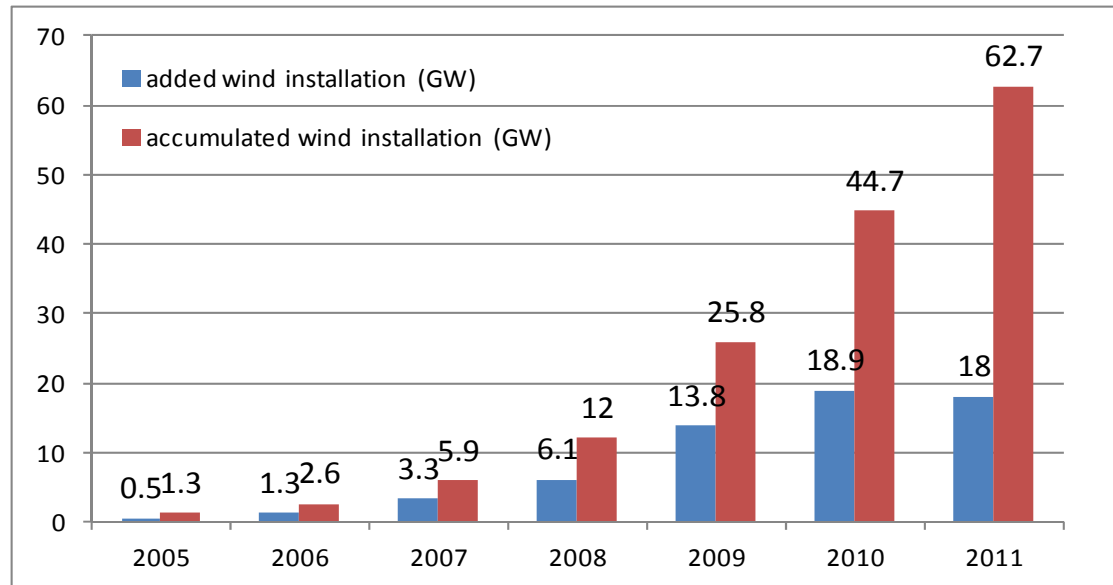


fs=20kHz

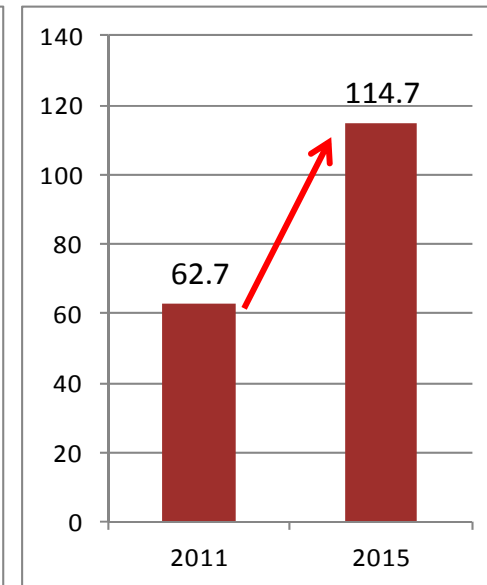


风力发电规划

China added and accumulated wind installation



52GW new wind installation!

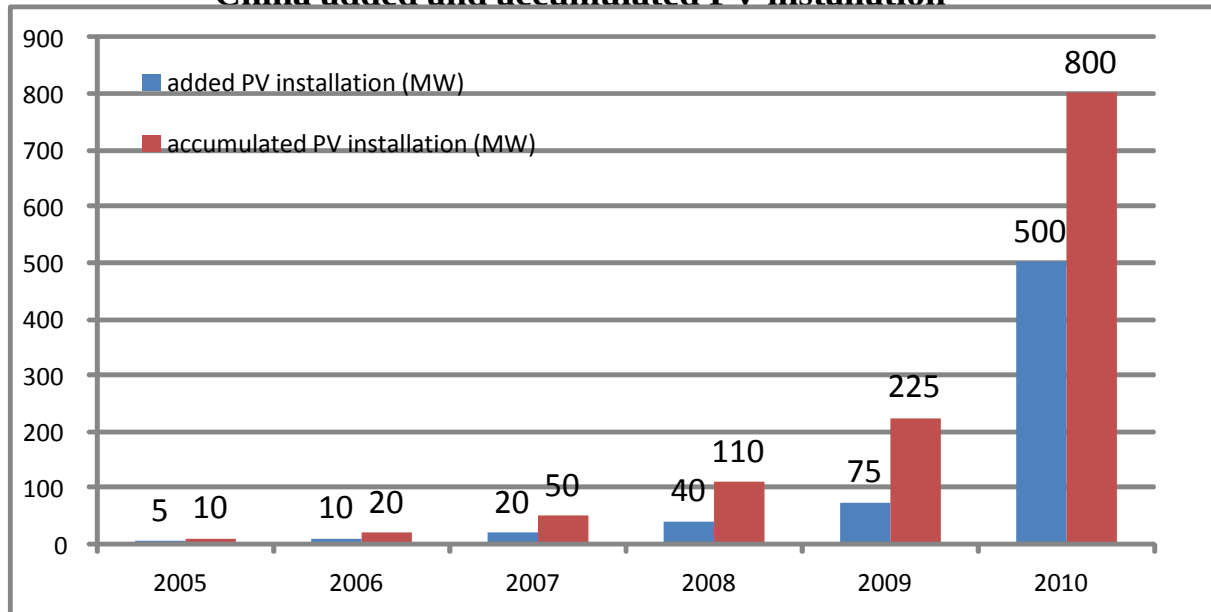


- 2010, top in world
- 十二五新增装机7千万kW
- 乐观估计到2020将达到2亿kW

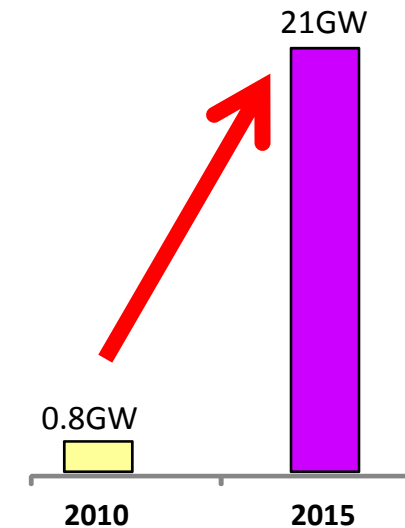


光伏发电规划

China added and accumulated PV installation



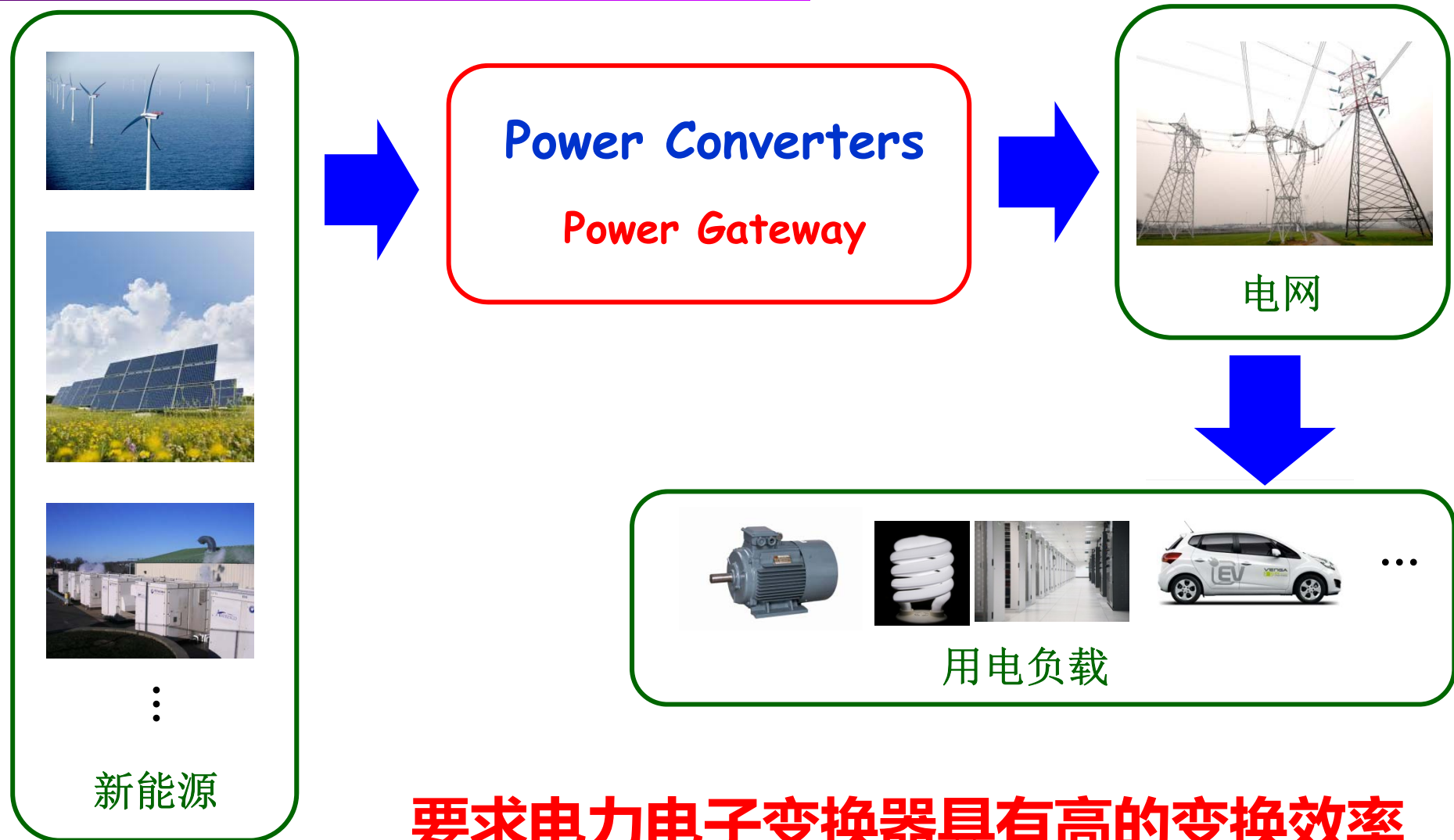
4.2 GW new PV installation!



- 十二五新增装机2000万kW
- 集中电站与分布式发电结合

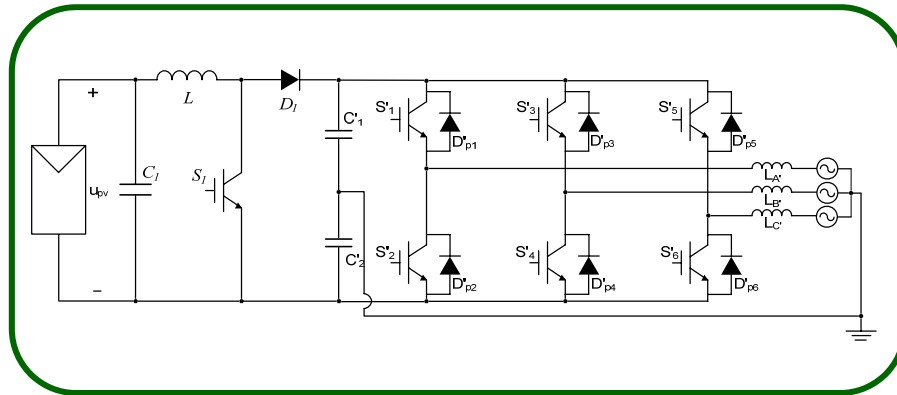


电力电子是新能源接入电网的功率路由器

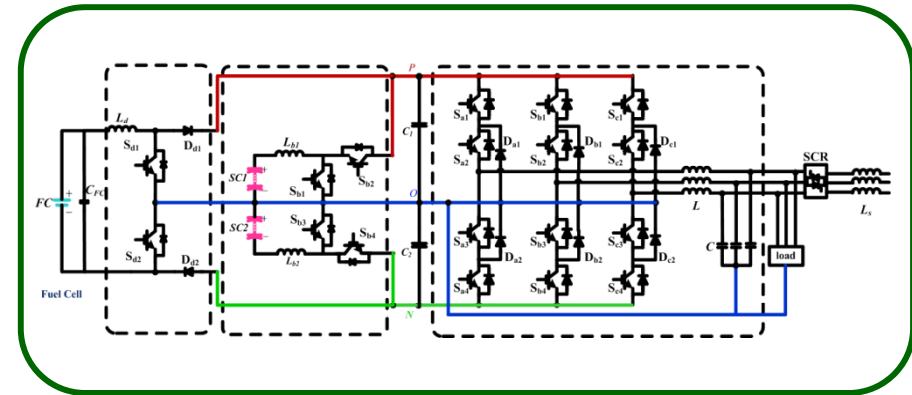




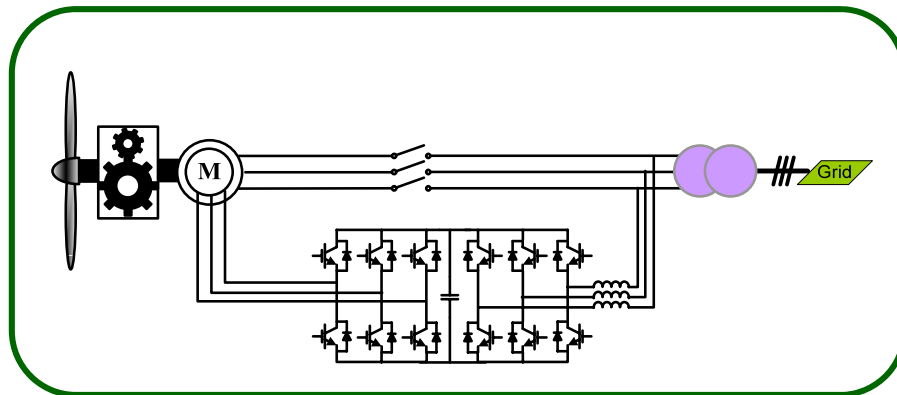
面向新能源应用的各种电力电子变换器



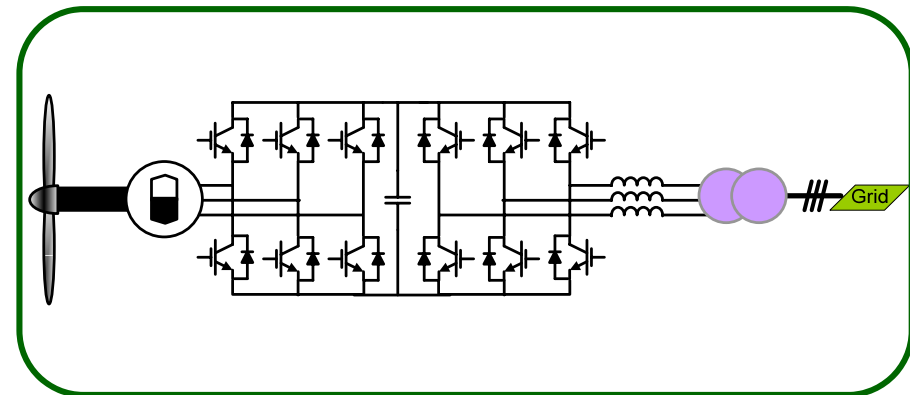
PV



Fuel Cell



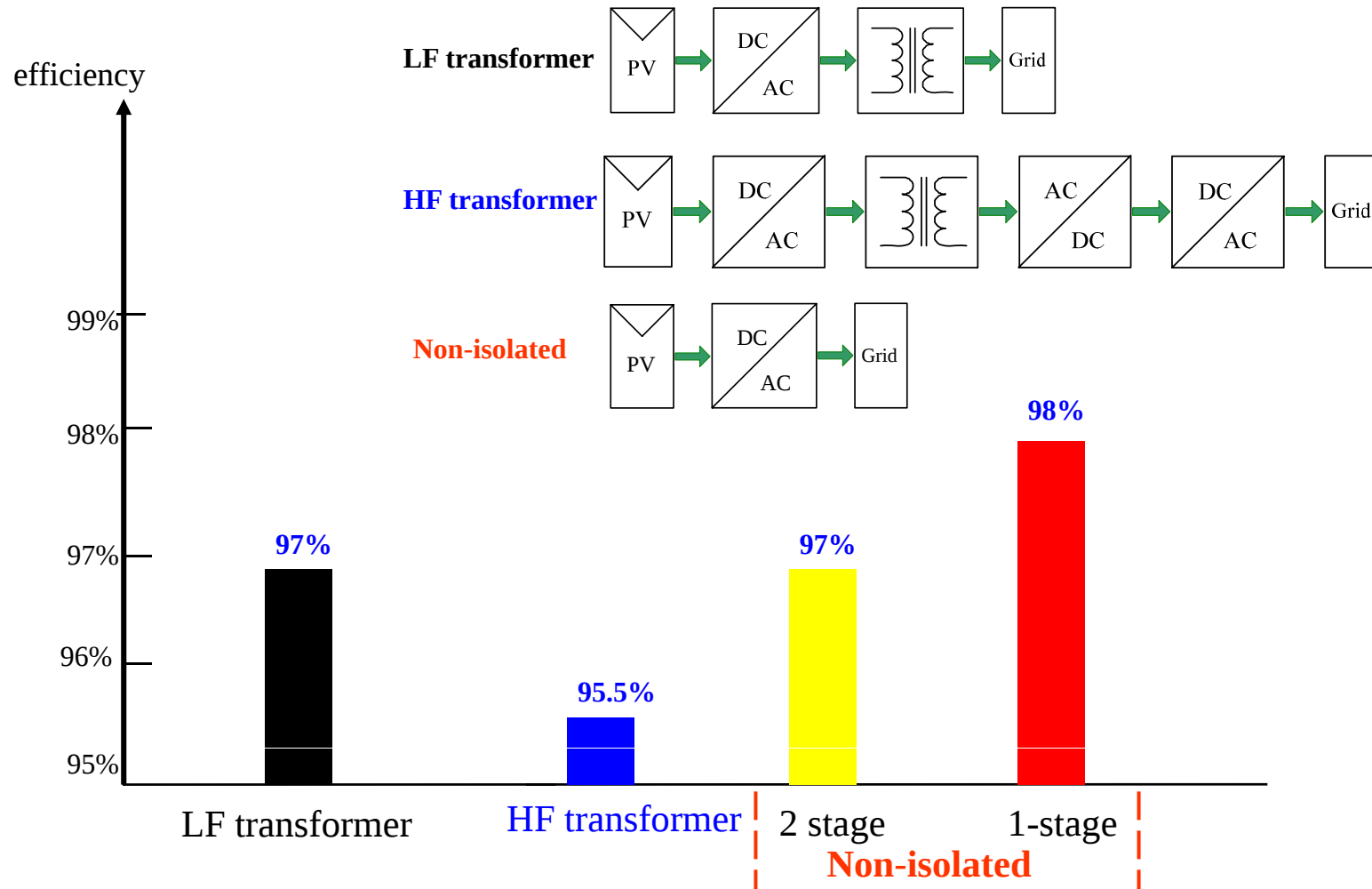
DFIG



PMSG



PV逆变器效率 vs. 结构



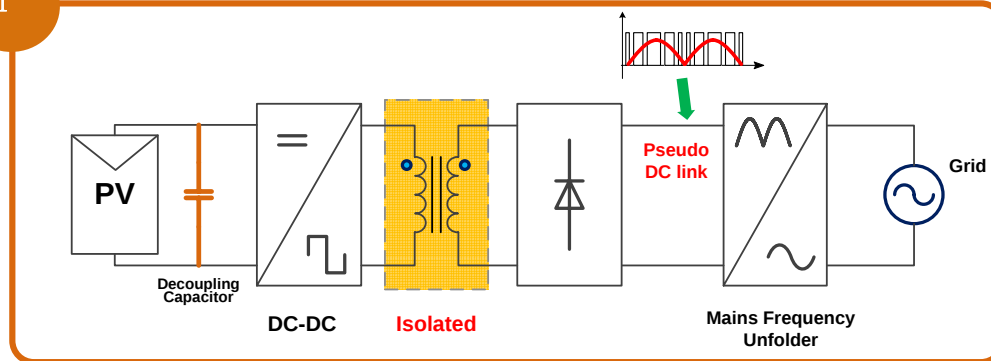
Using SiC or GaN device may increase the efficiency by 1%



微逆变器

1980年 Werner Kleinkauf, Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET)

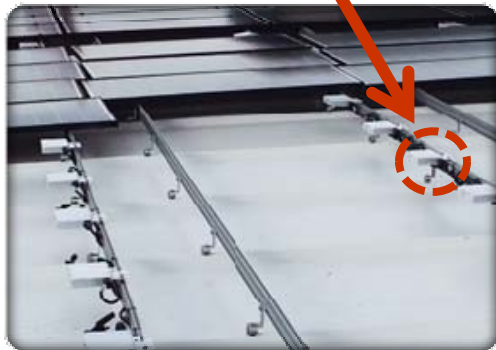
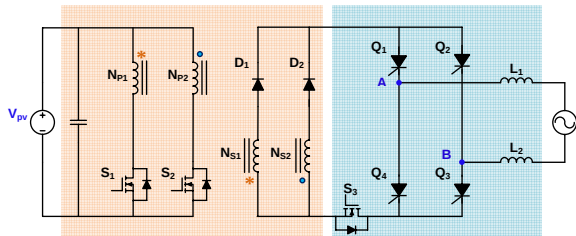
1



Advantage:

- ❑ 每个电池板独立进行最大功率跟踪，其中个别电池板有阴影、尘埃、积雪等不影响其他电池板
- ❑ 模块化：标准化、批量生产、
- ❑ 安装方便、与建筑材料一体化
- ❑ 维护方便
- ❑ 减少停机时间

微逆变器



$$\text{eff}_{\text{max}} = 96\%$$

@enphase



Enphase 2011年9月已售出 1百万个微逆变器

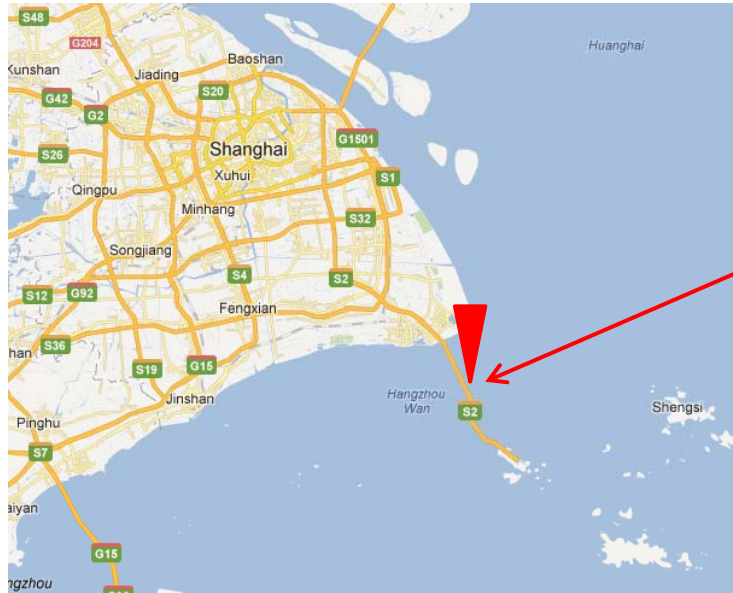
Disadvantage:

- ❑ 每峰瓦成本高
- ❑ 工作环境恶劣，高低温、湿度等
- ❑ 逆变器效率低

- ❑ 效率较低
- ❑ 运行条件恶劣,20年可靠性问题



海上风电

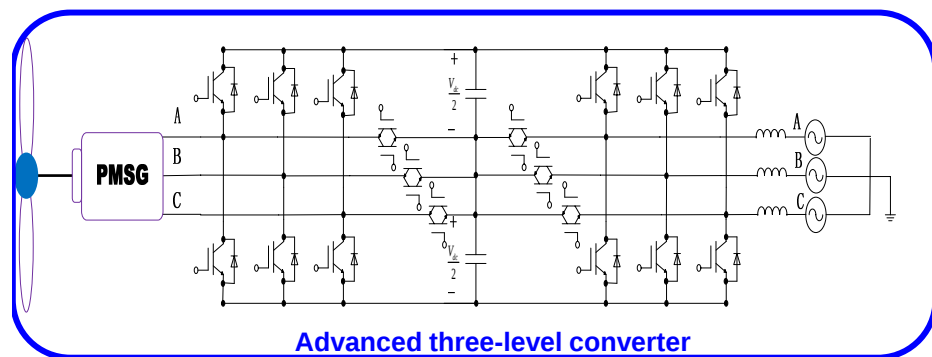
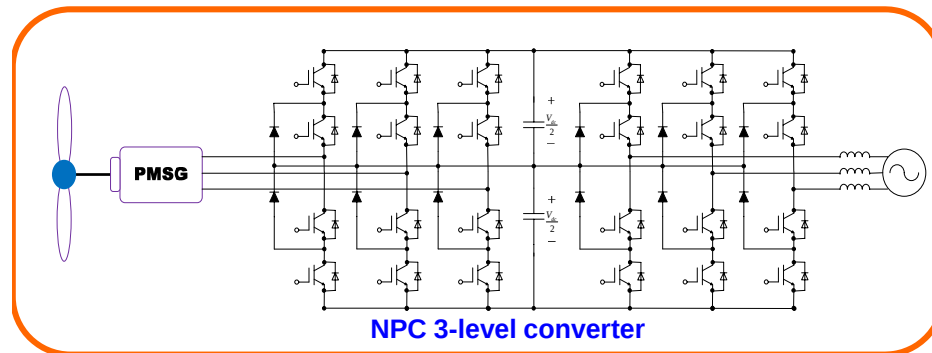
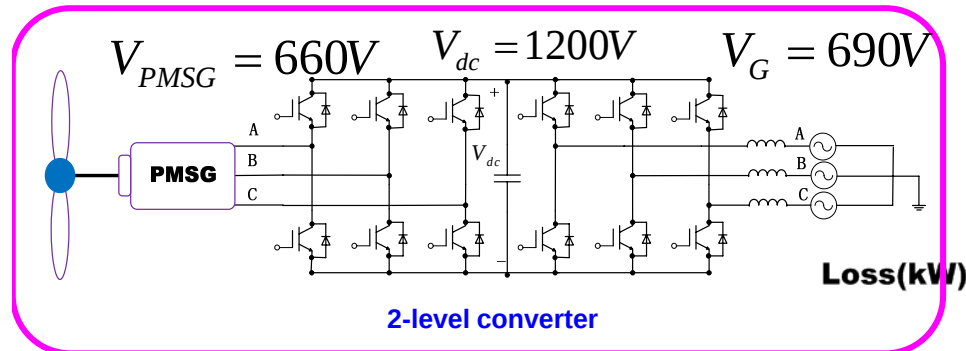


上海东海大桥海上风电
容量: 102MW

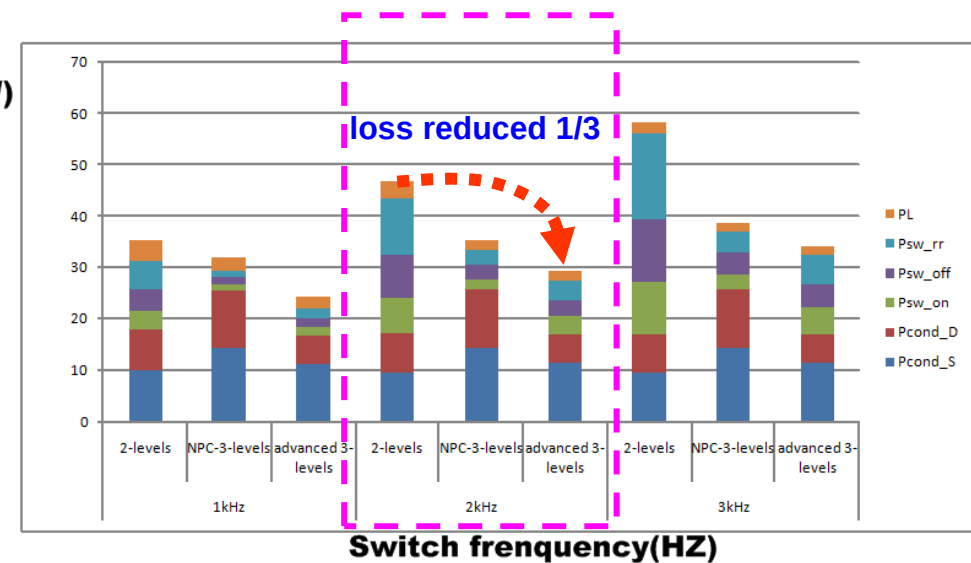
- 34台3.0MW风电 装置
- 亚洲第一个海上风电



风电变流器的效率提升



2L vs. NPC 3L vs. Advanced 3L converter (690V/2MW PMSG)



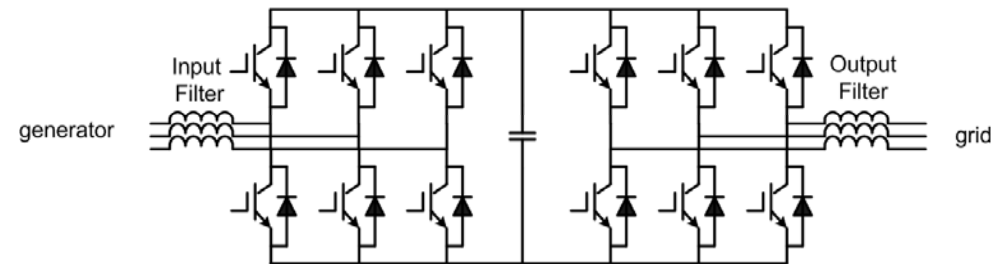
三电平变流器可以减少损耗1/3
(@开关频率 2kHz)



未来5-10 MW风电的电制：中压？

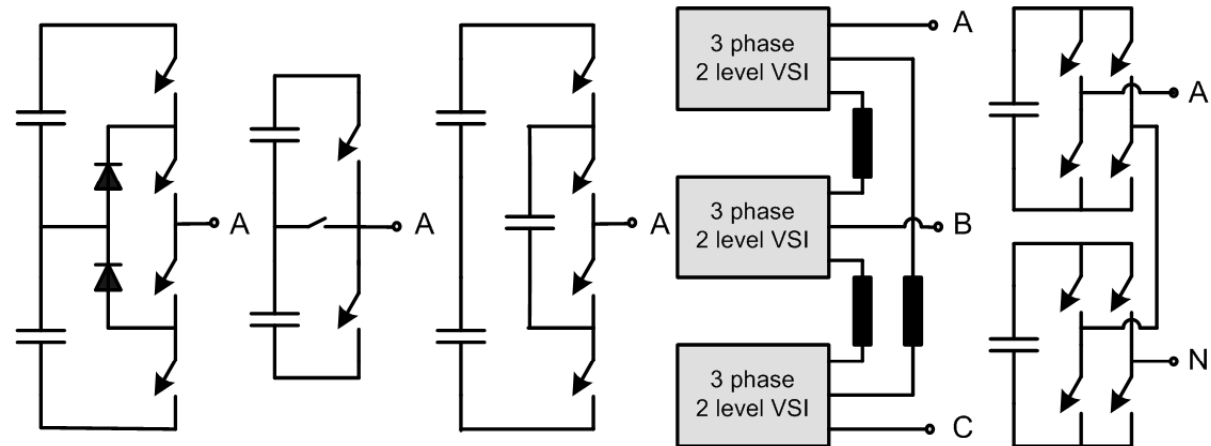


3MW/3kV PMSG



中压的优点

- 效率高
- 降低电缆费用
- 减少升压变压器
- 降低重量和节省材料



中压多电平拓扑



高速铁路

- 到2011年, 5,000公里高速铁路,运行的高铁列车 786列
- 到2020年,高速铁路将到达20,000 公里, 是2011年的四倍

估计需求的列车数目:

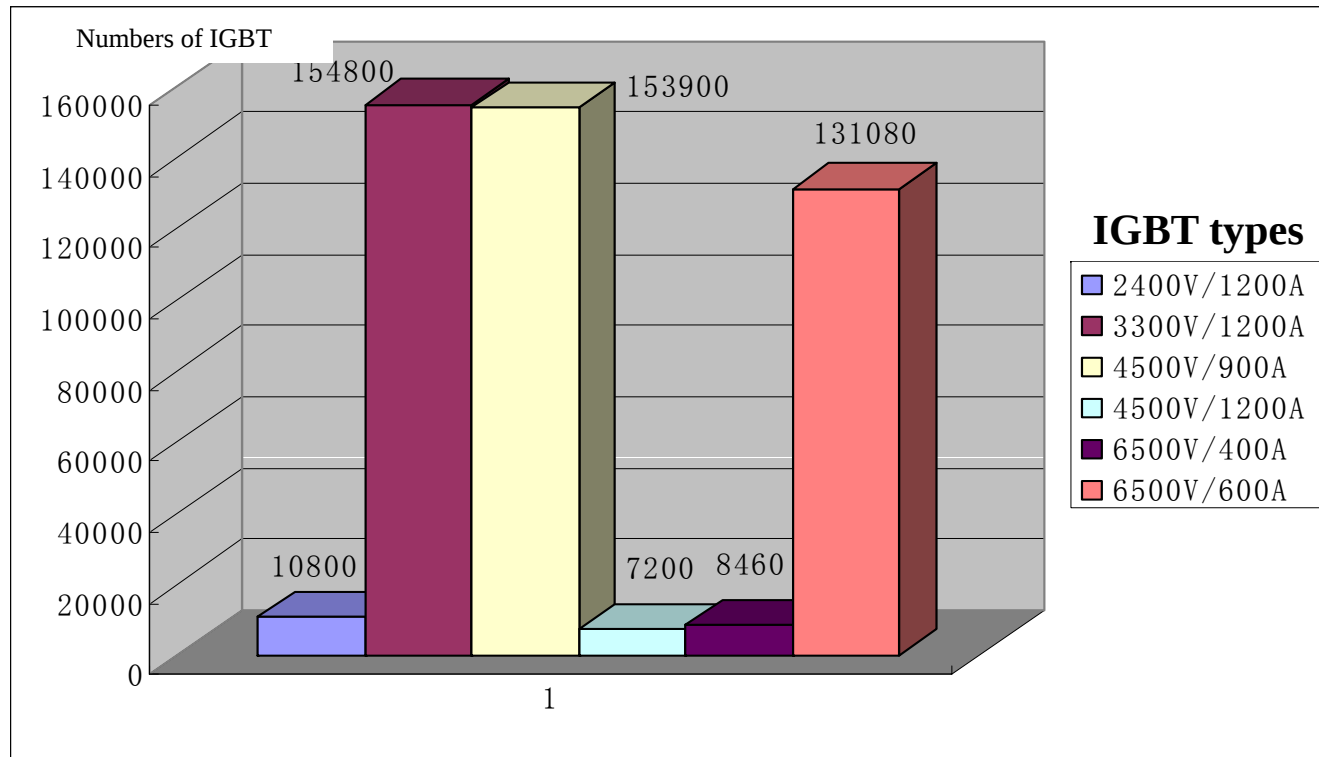
$$\left(\frac{20,000}{5000} - 1\right) \times 786 = 2358$$



High speed railway network



HV-IGBT 在高铁中使用情况



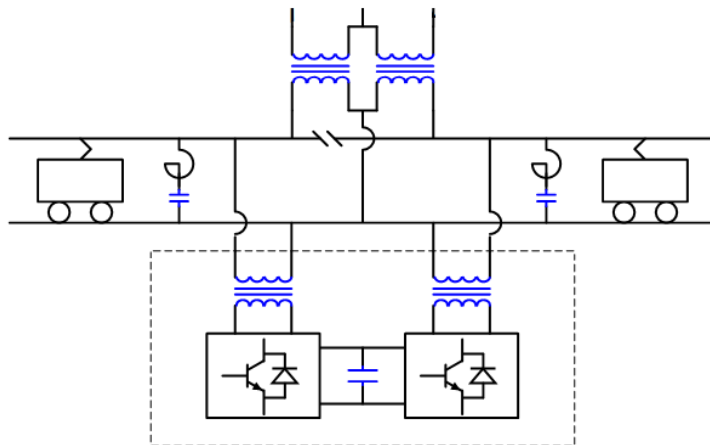
- 3300V/1200A:33%
- 4500V/900A:33%
- 6500V/600A:28%
- Other IGBT devices : 6%

□被3-4家国外公司所垄断



轨道交通对电力电子的需求

- HV IGBT
- 辅助电源，电机驱动逆变器
- SVG，SVC，APF



同相装置





能源基地与消费中心的地理错位

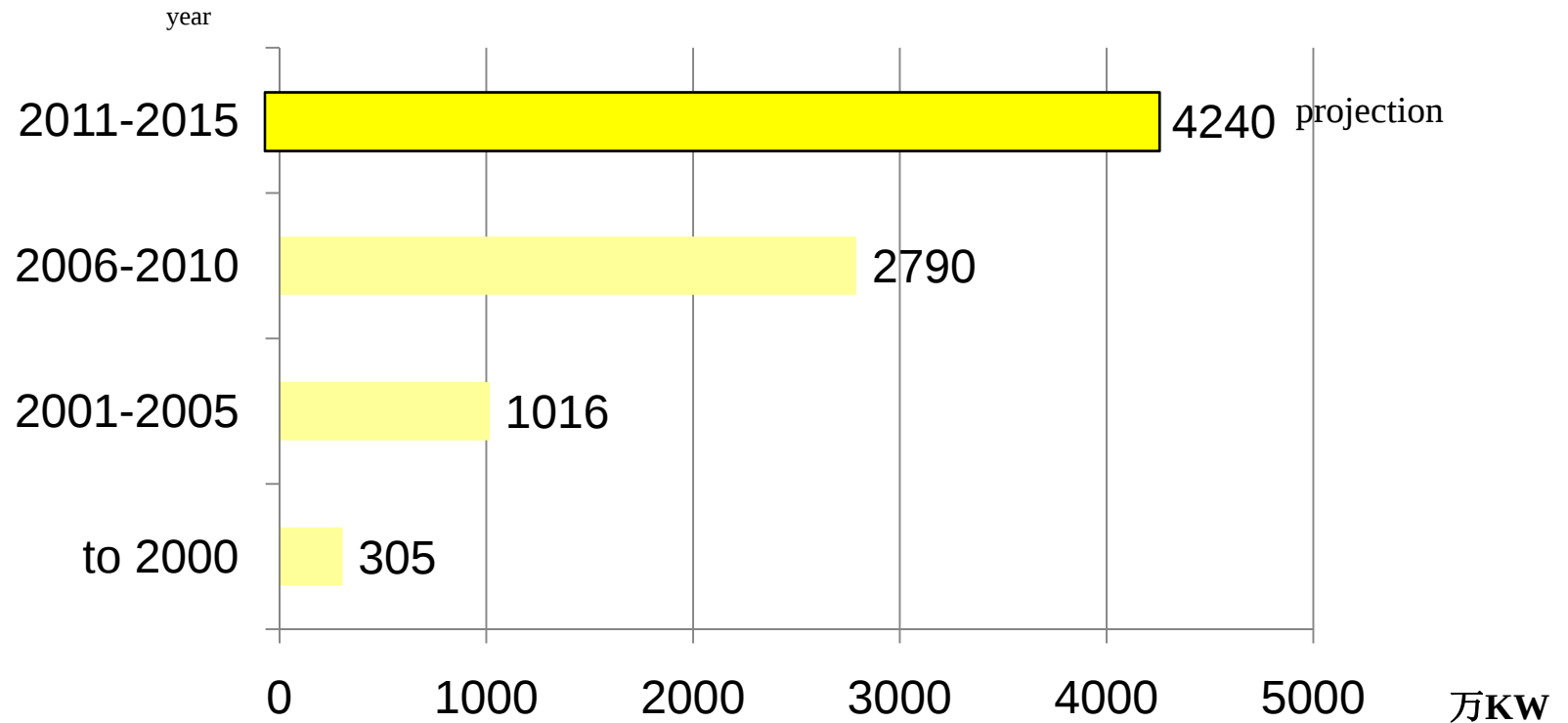


- 2/3 水电在西南，2/3 煤电在西北部
- 负荷中心在东部沿海
- 能源基地相距负荷中心500-2000 公里

发展长距离大容量传输



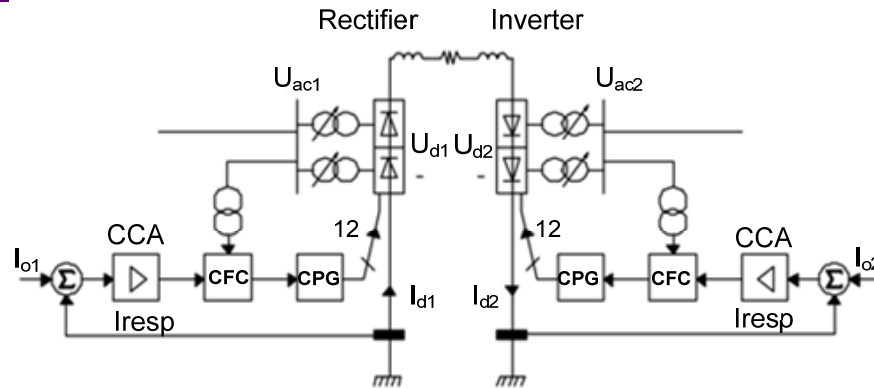
新增HVDC 输电容量



42GW HVDC will be added from 2011 to 2015

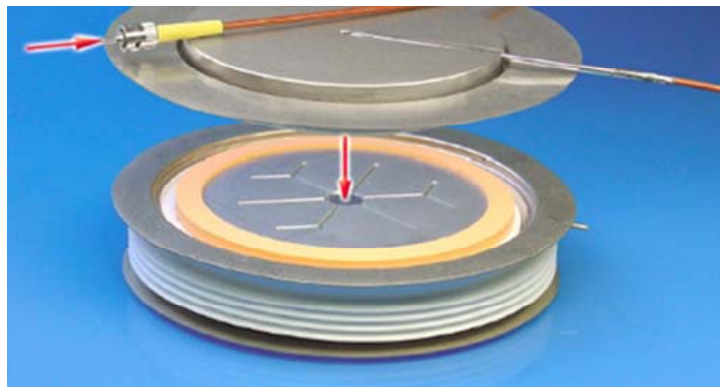


电流源直流输电 (CSC- HVDC)



直流输电高压变流阀

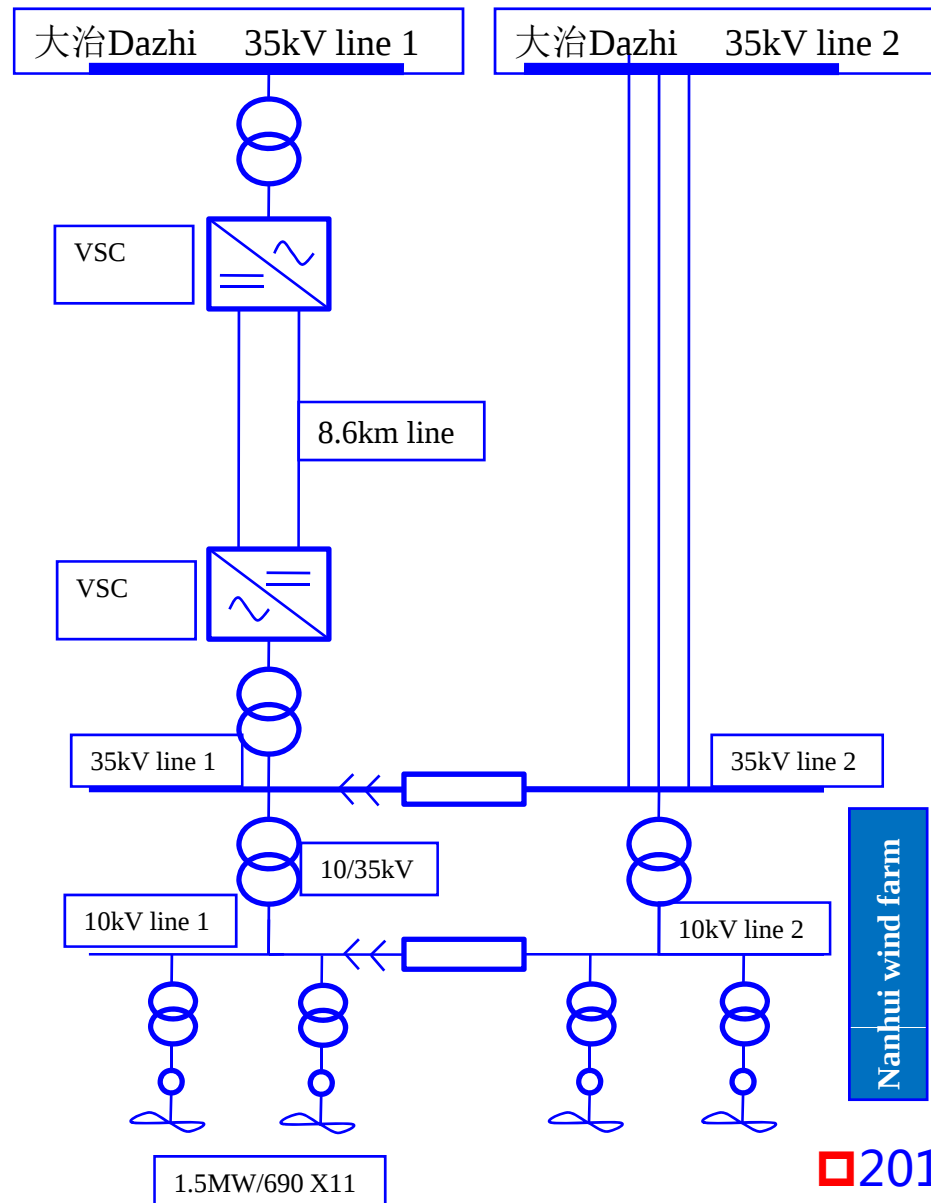
- ❖ 12-pulses 容量1500MW
- ❖ LTT 3kA/8kV SCR
- ❖ 直流电压 500kV/800kV.
- ❖ 高压变流的阀效率 98% (不包含变压器).



@China Southern Power Grid LTD



电压源直流输电VSC-HVDC



- 体积小，占地小
- 电能效率高
- 末端可以无源
- 可以实现多端连接
- 适合海上风电和城市供电

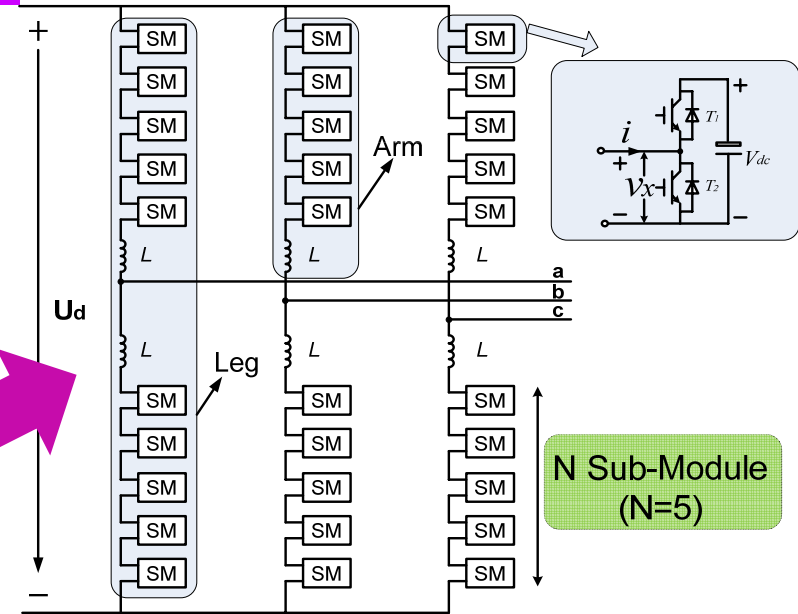
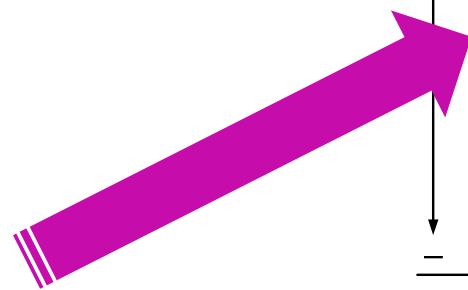
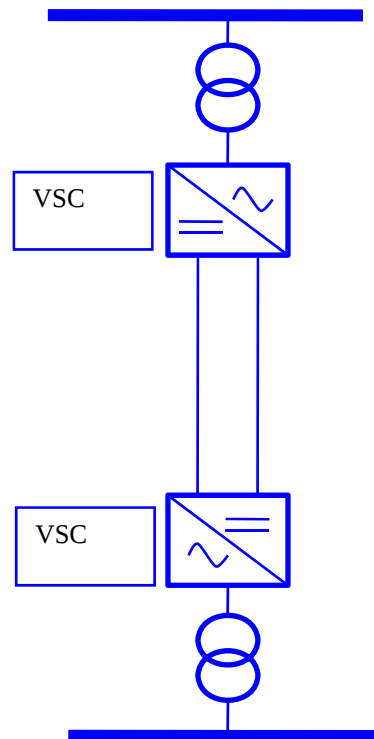
VSC
Voltage: $\pm 30\text{kV}$
Current: 300A
Rate power: 20MW
DC transmission distance: 8.6km

□2011年上海建成中国第一条VSC HVDC



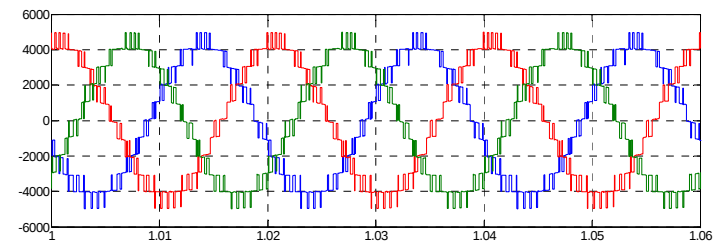
VSC HVDC 拓扑

那种电路结构?
2 电平变流器 or 3 电平变流器 or
MMC 变流器?



Modular Multilevel Converter

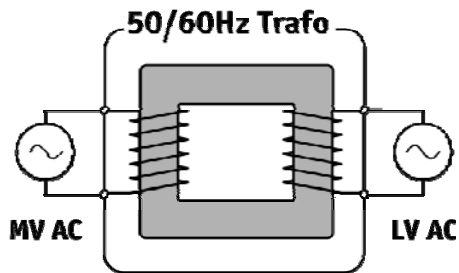
- ◆ 模块化，冗余，易拓展，适用于高压大功率场合
- ◆ 较高的电能质量
- ◆ 较低的开关损耗，效率高



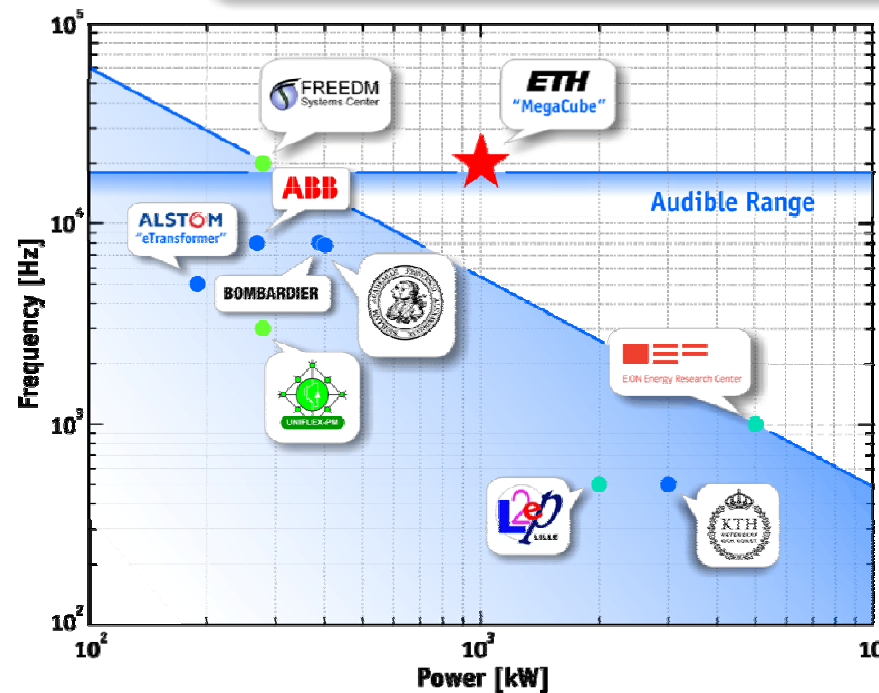
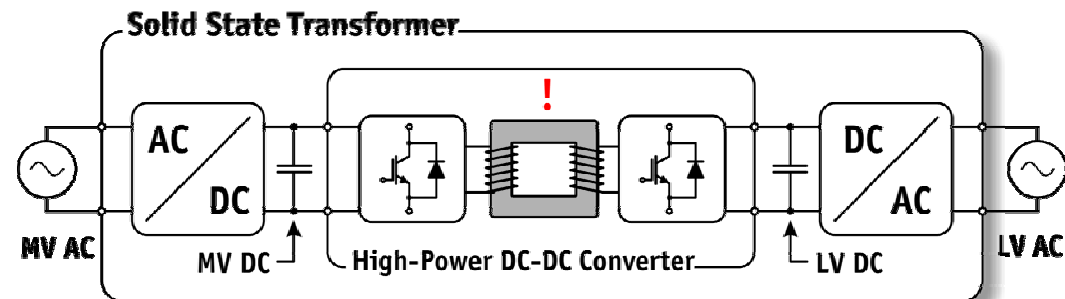


固态变压器(Solid state transformer)

50/60 Hz Transformer



Solid State Transformer

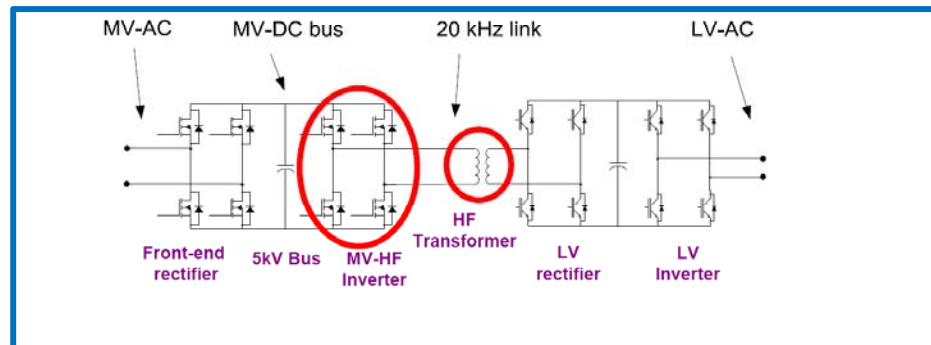
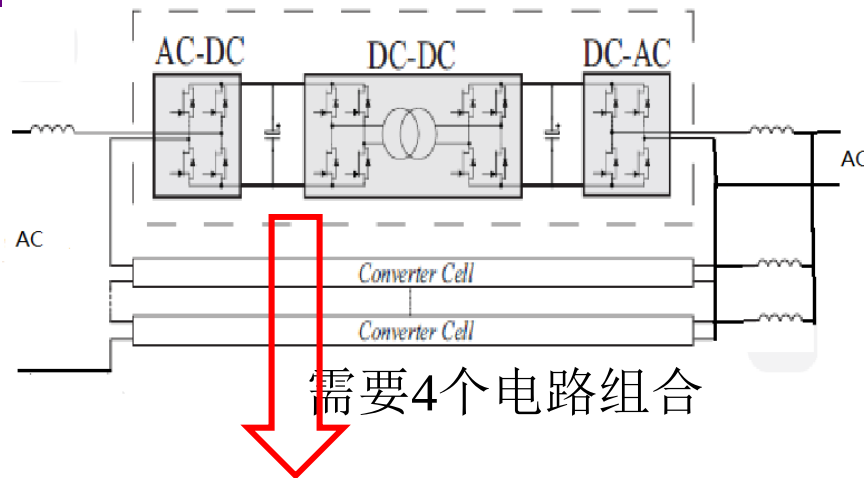


SST Research over the Last 10 Years... plus

@J. Kolar,ETH



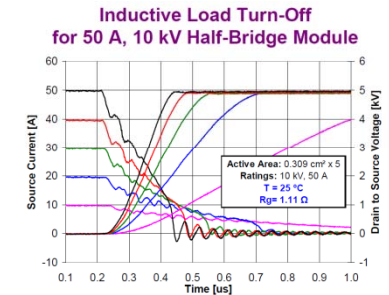
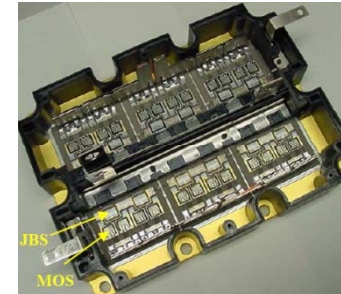
2.75 MVA, 13.8 kV / 465 V 固态变压器



- ◆ 10 kV SiC MOSFET 模块
- ◆ 13.8 kV to 465/√3 V, 1 MVA 单相
- ◆ 4 级 AC / AC 变流电路, 采用软开关技术
- ◆ 20 kHz 纳米晶变压器
- ◆ 50% 体积减小
- ◆ 97% efficiency

@A. R. Hefner

@Mrinal K. Das, Craig Capell, David E. Grider

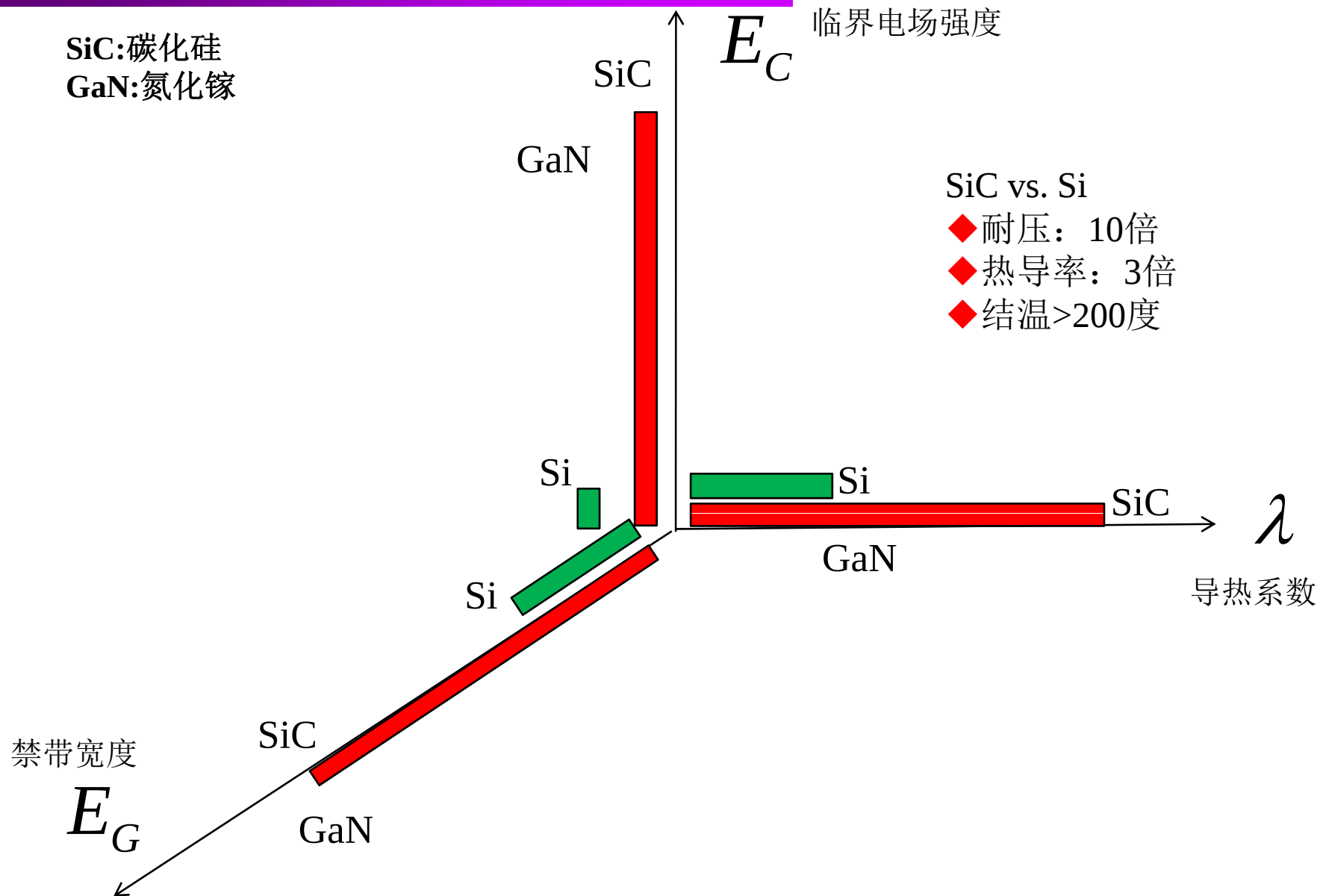


SiC MOSFET: 10 kV/100 A



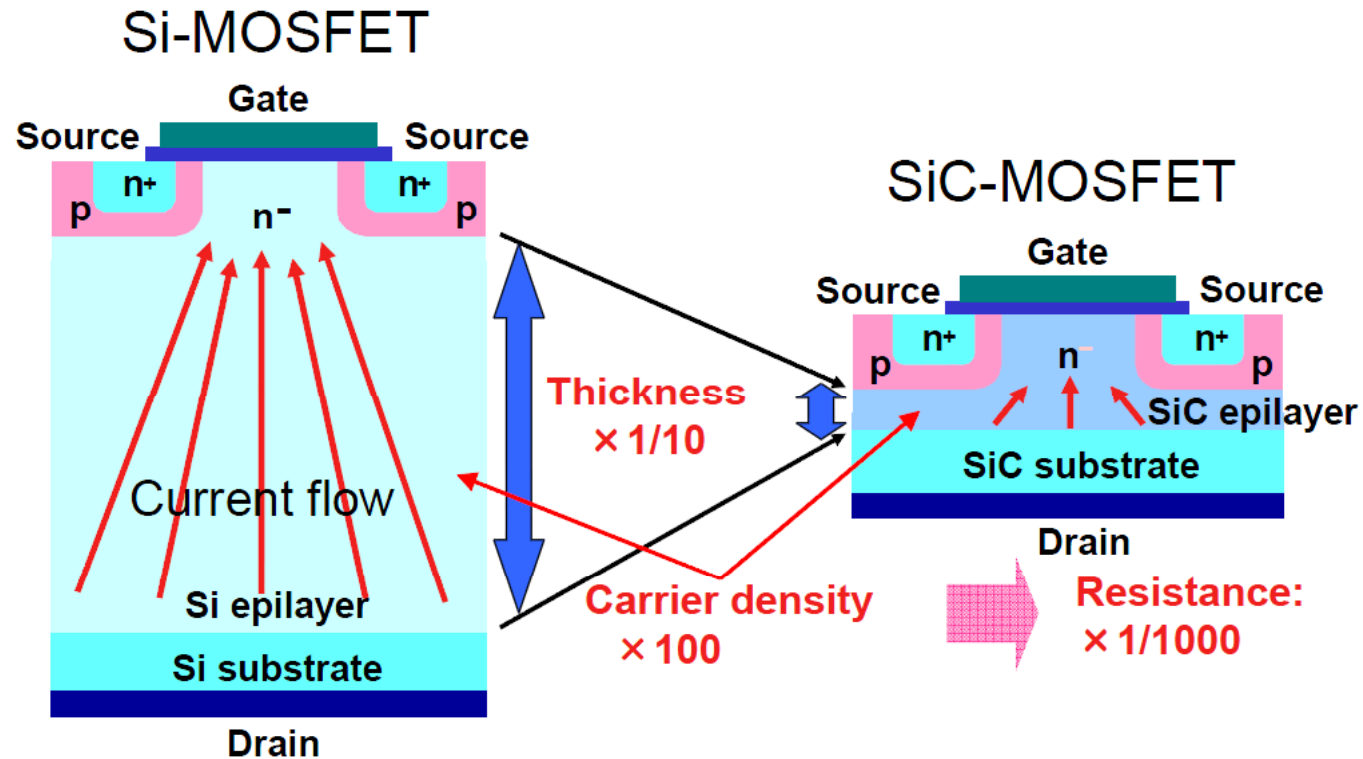


新一代电力电子器件：SiC（碳化硅）器件





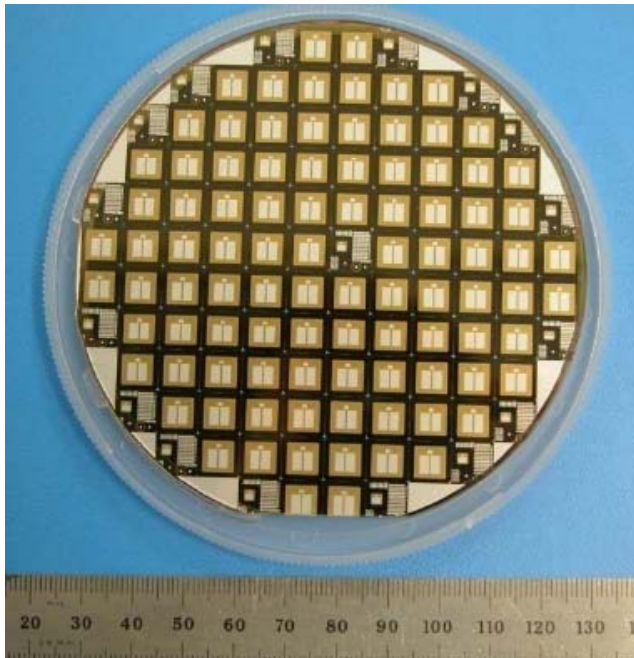
SiC器件与Si器件比较



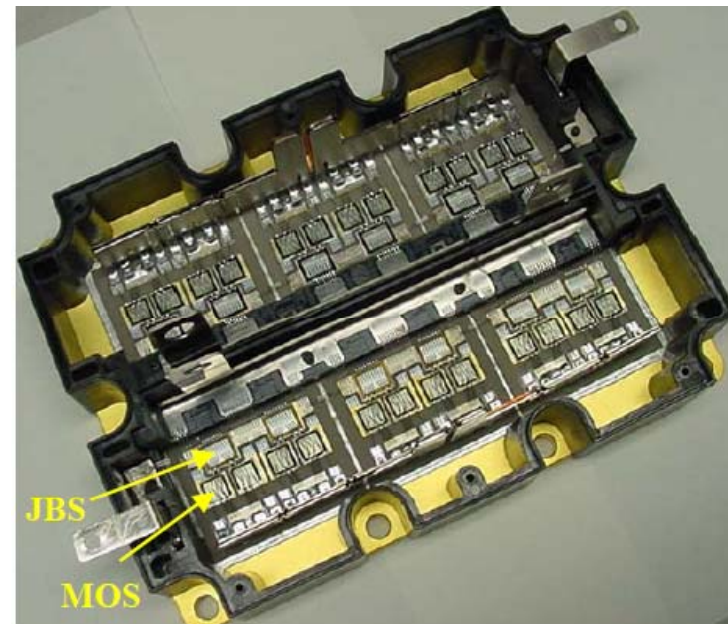
- ✓ 更低损耗
- ✓ 开关速度高
- ✓ 可以运行在更高的温度, >200度
- ✓ 体积显著减少



高电压SiC MOSFET



10kV/10A MOSFET(8.1x8.1mm²)on 10cm SiC Wafer

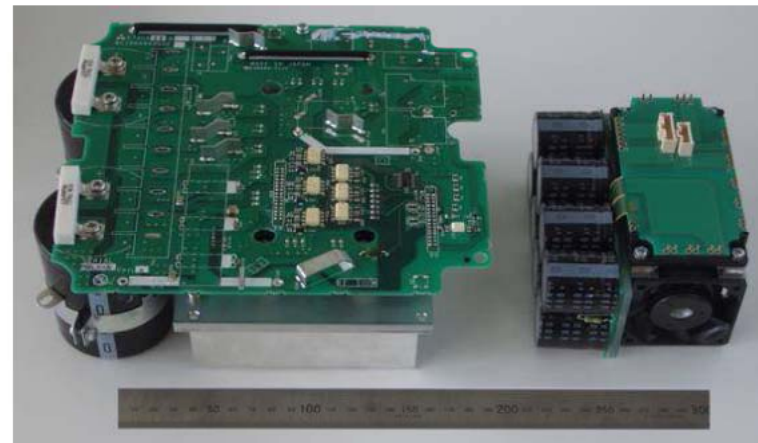
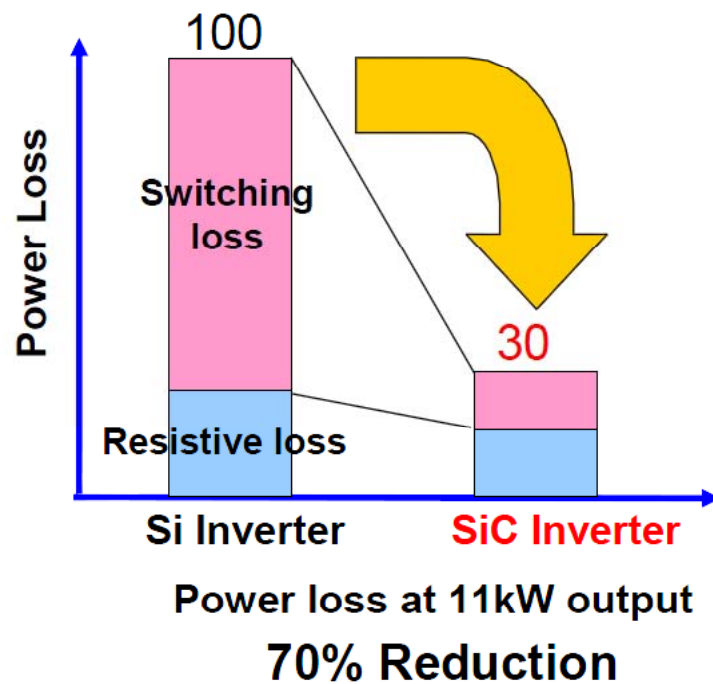


10kV/120A SiC MOSFET half H-bridge module(12 MOSFETs and 6 diodes)

@CREE

Prototype SiC Inverter

◆ Power loss 70% reduction, 1/4 Volumes with SiC



Si Inverter

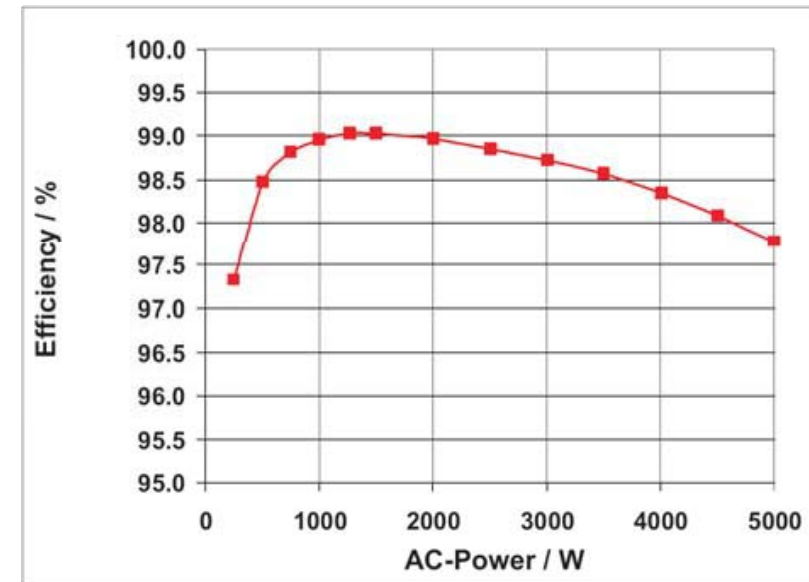
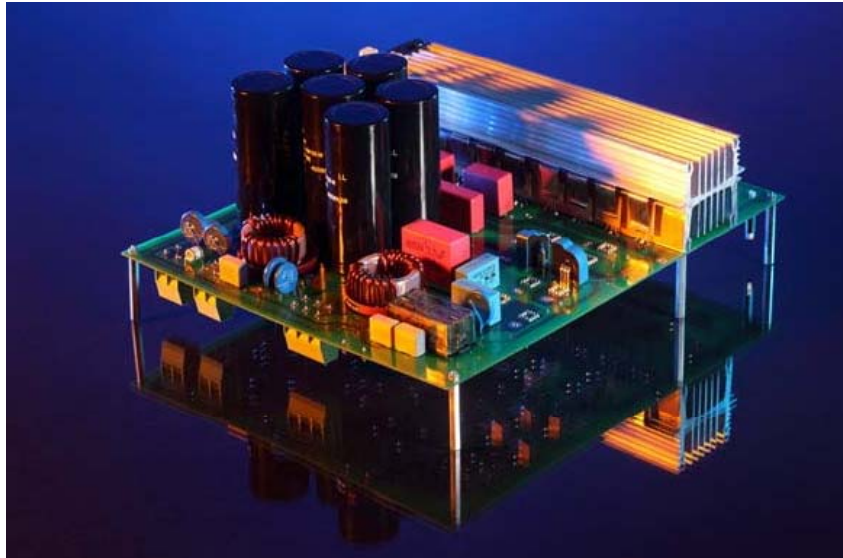


SiC Inverter

11kW Inverter
1/4 Volumes



SiC PV 逆变器



- ◆ 最高效率99 %
- ◆ 采用SemiSouth 的SiC JFET

(Source: Fraunhofer ISE, Germany)



总结

- GDP增长和城市化促进了能源消费的增长
- 电力电子在节能、节材发挥重要的作用
- 电力电子也是新能源、智能电网、现代交通（高铁、航空、船运、陆运）支撑技术
- 电脑、网络、家电的普及需要更高效率的电源技术
- 未来十年电力电子将迎来更广泛的应用





谢谢各位!