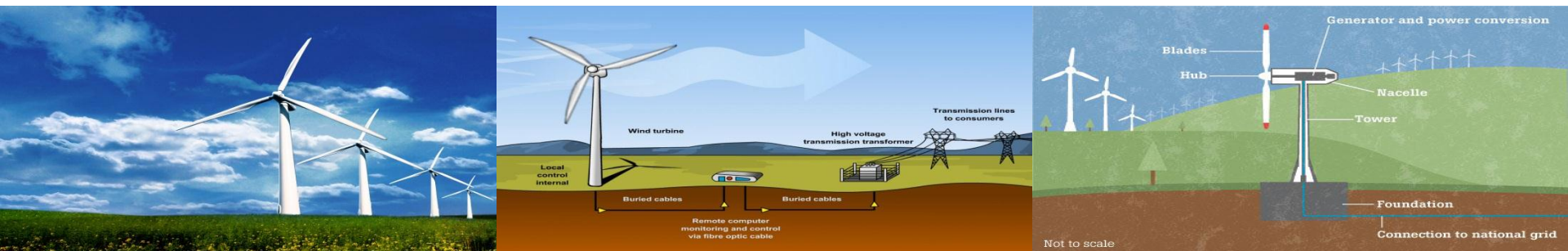




未来微电网形态格局发展演变、电力变换及其控制技术的发展趋势



单位：上海交通大学

报告人：蔡旭 [xucai@sjtu.edu.cn](mailto:xucaai@sjtu.edu.cn)

时间：2016.03.15

开发利用可再生能源是全世界的共识

1. 开发利用可再生能源已成为世界各国保障能源安全、加强环境保护、应对气候变化的重要途径。
2. 建立以电为主、多能综合利用的能源体系是国家能源供给的基本战略。



风力发电和太阳能发电是实现能源战略目标的必然选择

规模化发电利用

建设大型风电场和太阳能电站是大规模集中开发风能、太阳能的主要方式。



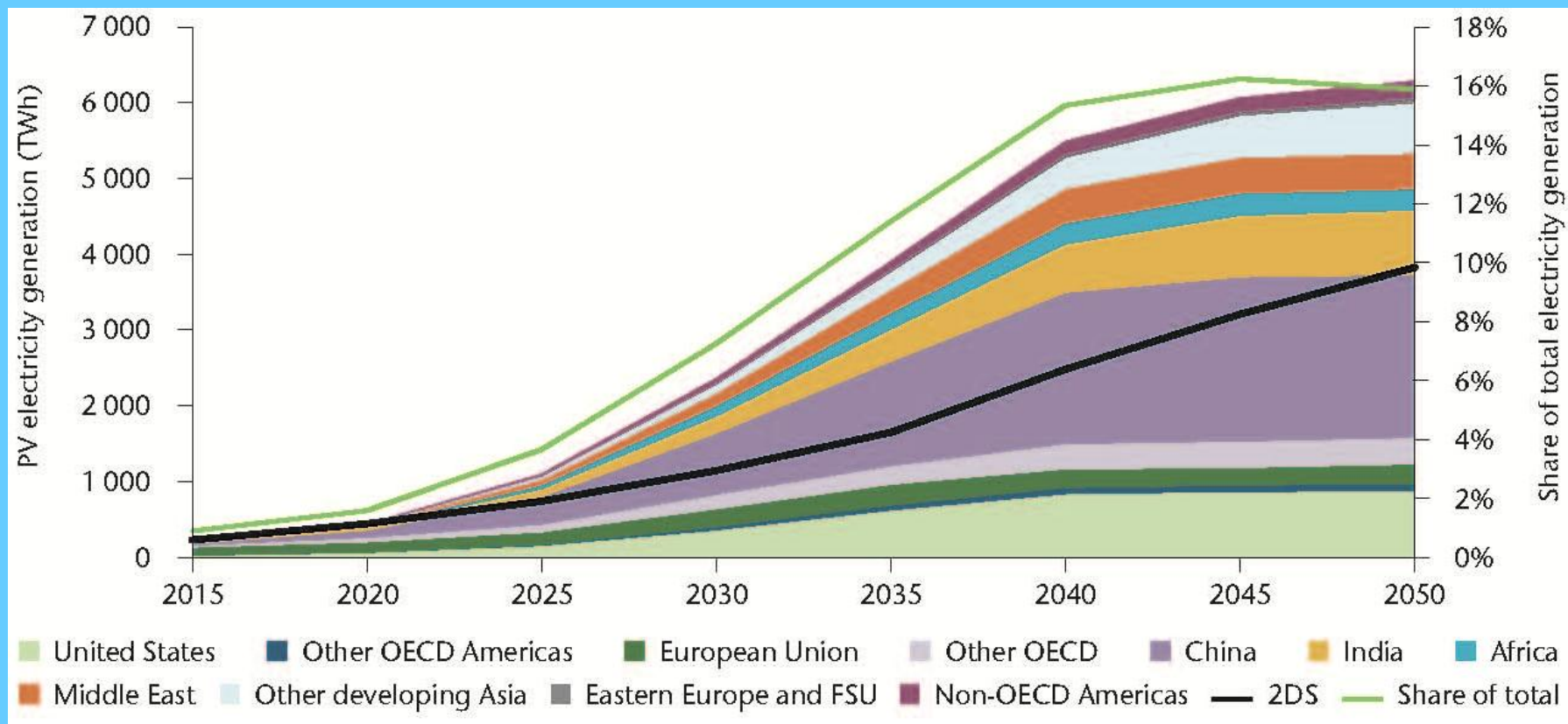
分布式综合利用

建筑光伏发电和光热利用是未来分布式供能的主力，小风电、生物质能发电、小水电等是分布式发电的有效补充。



可再生能源将会蓬勃发展

全球各地区光伏发电预测

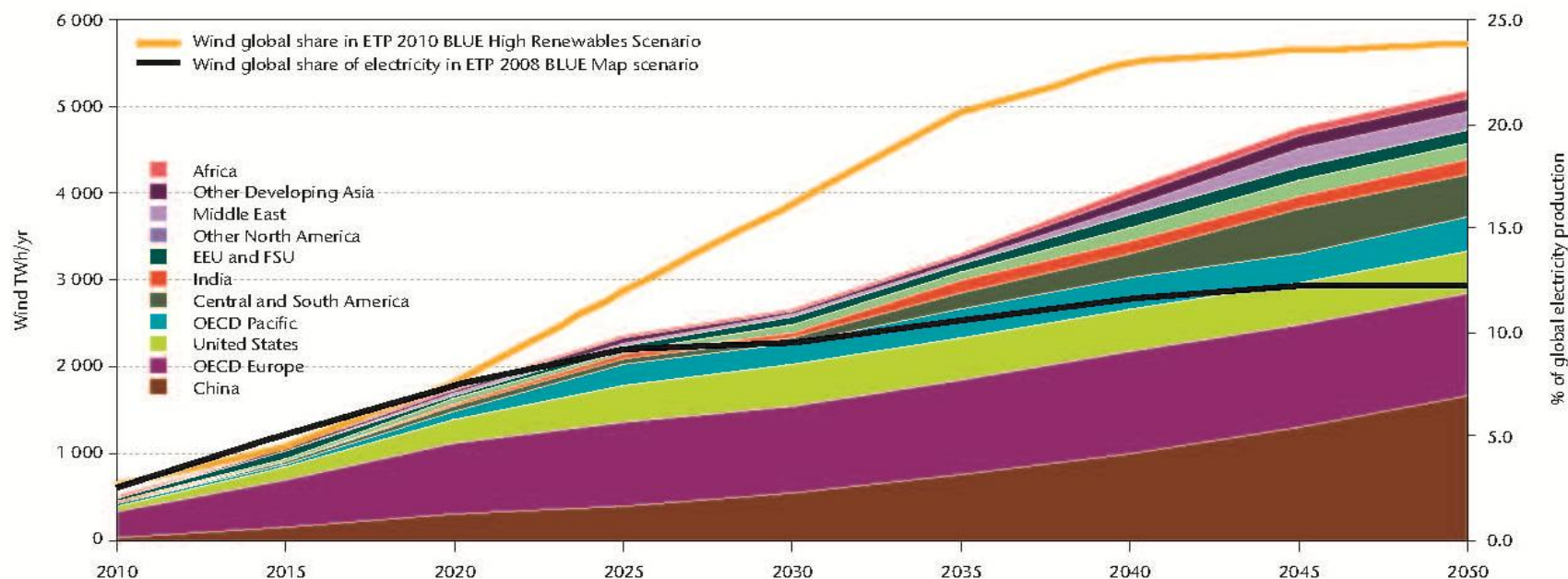


来源: IEA 2014 光伏发电技术路线图

可再生能源将会蓬勃发展

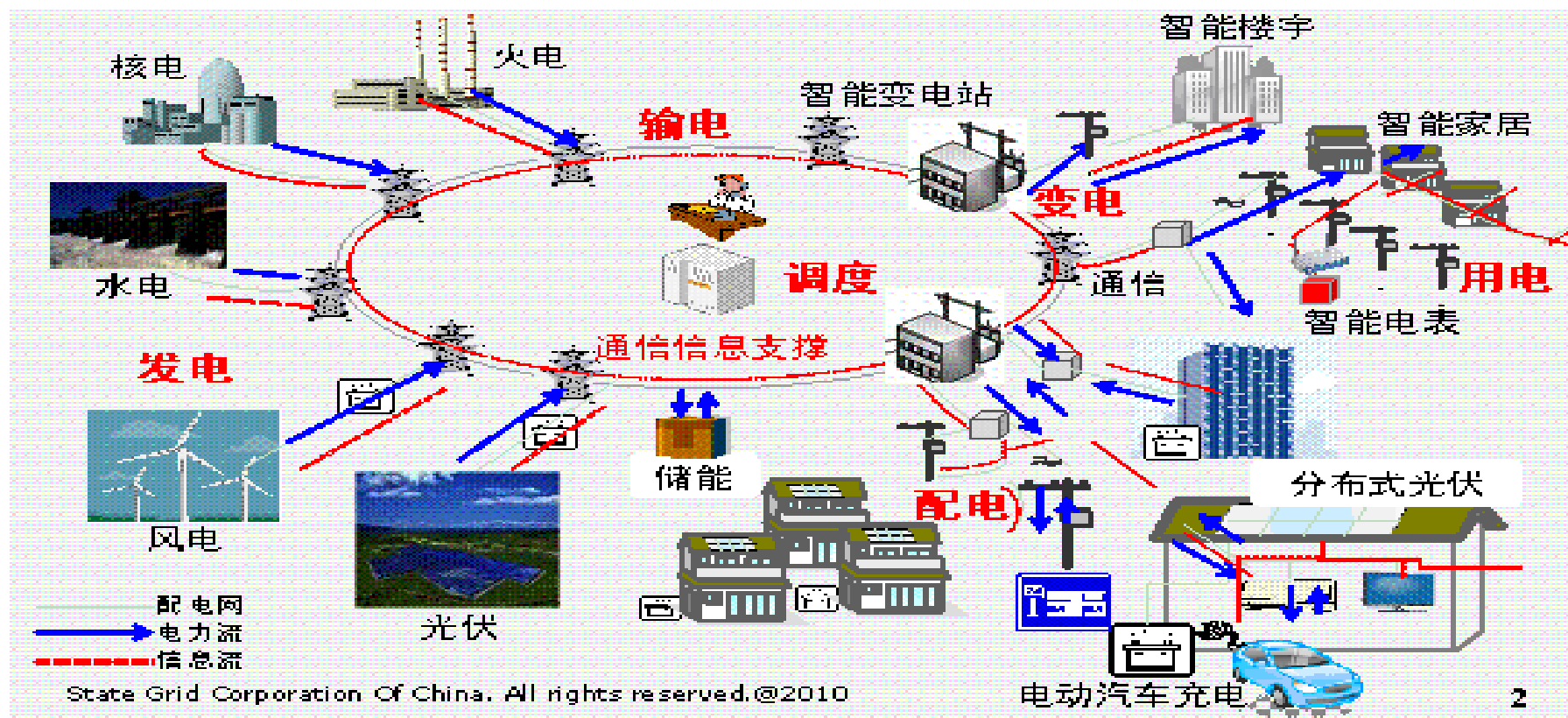
全球各地区风力发电预测

Regional wind power shares of global electricity (TWh), 2000-2050



来源: IEA 2013 风能技术路线图

特高压互联电网实现大范围电力资源的调配
数量众多的分布式发电推动微电网快速发展



分布式能源的发展历程

- ① 第一代：热电厂模式、300MW以下、单一燃料热电输出、传统的热电联产
- ② 第二代：冷热电三联共模式、50MW以下、清洁燃料输入、冷热电输出、区域或楼宇的冷热电多联产
- ③ 第三代：能源微网模式、可再生能源和清洁能源为代表的多能源品种发电、多能源形式输出、通过能源互联网共享资源

微电网—以电能为主的能源微网

微电网由分布式电源和电力负荷构成，可以工作在并网和独立两种模式下，具有高度的可靠性和稳定性。（美国能源部）

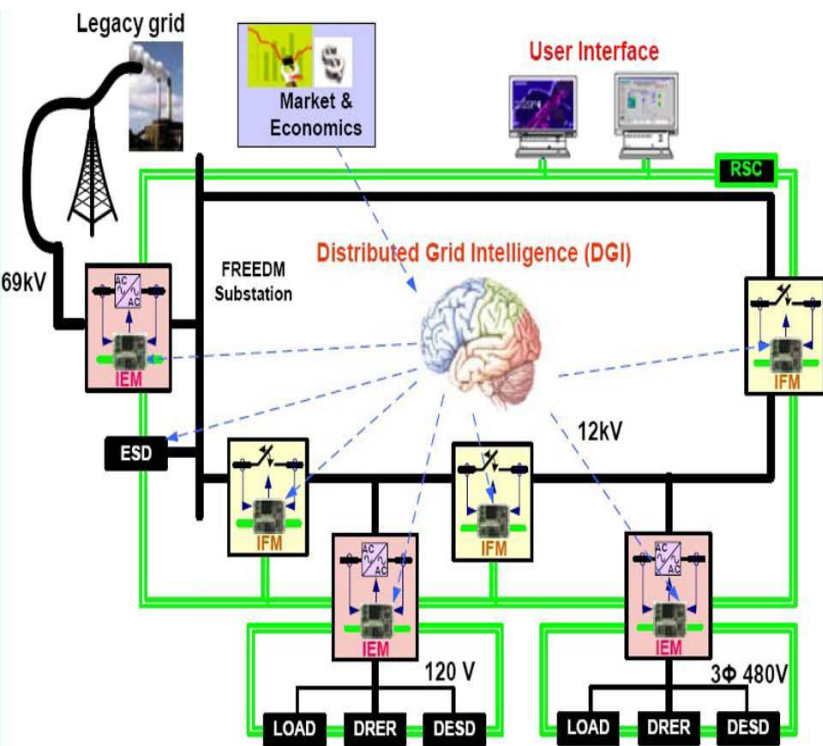
微电网是由分布式电源、储能装置、负荷以及监控和保护系统构成的小型可控独立发配电系统，能实现自我控制、保护和管理相对独立的自治系统，对大电网来说，微电网可视为大电网中的可控单元，对用户侧来说微电网可满足用户侧特定需求。（我国定义）

- 包含分布式电源与电力负荷，通常配有储能装置，具有并网和孤网运行功能，可减少大规模分布式电源接入对电网造成的冲击
- 容量在一千瓦到数兆瓦之间，通常接入中低压电网（35kV以下），联接终端用户，电能就地利用，微电网内部电力电量能实现全部或部分自平衡

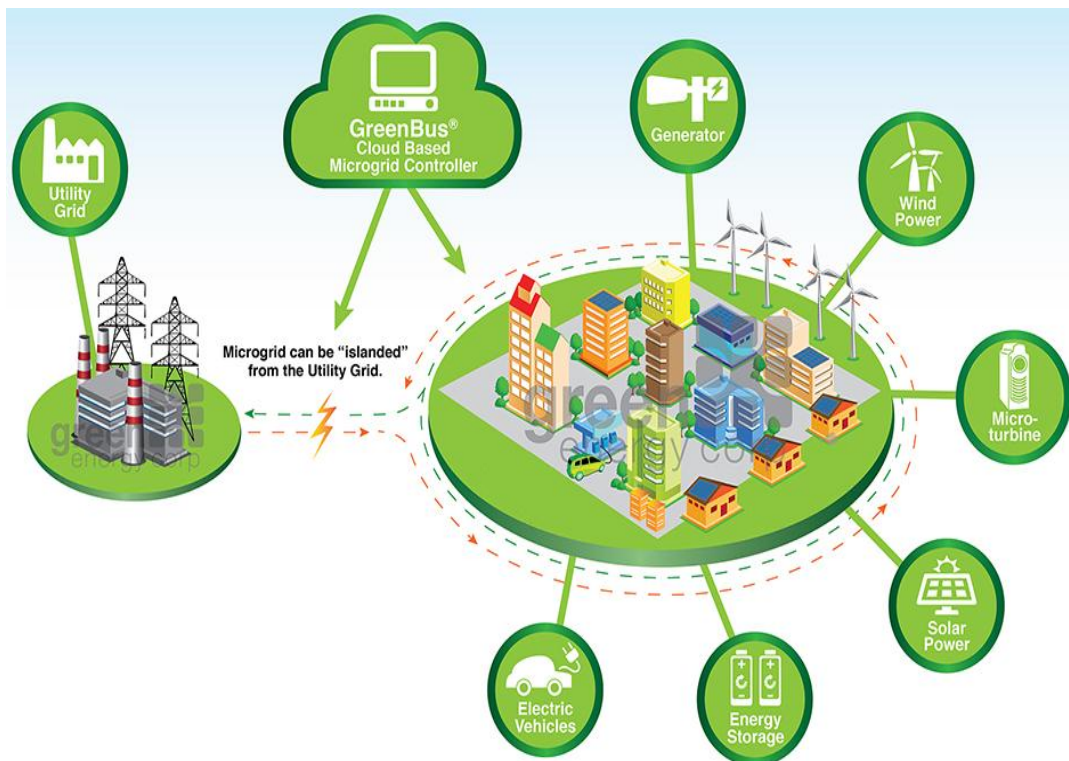


微电网是配电网和分布式电源及负荷的纽带

- 一个公共耦合点
- 对电网体现为电源或负荷
- 电源间协调优化
- 自我控制、保护和管理缓冲对电网的影响



(b)



④ 基于第三代分布式电源：

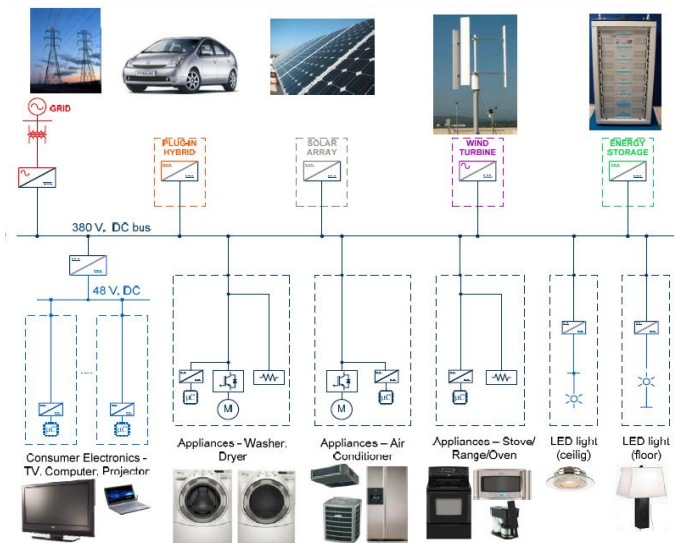
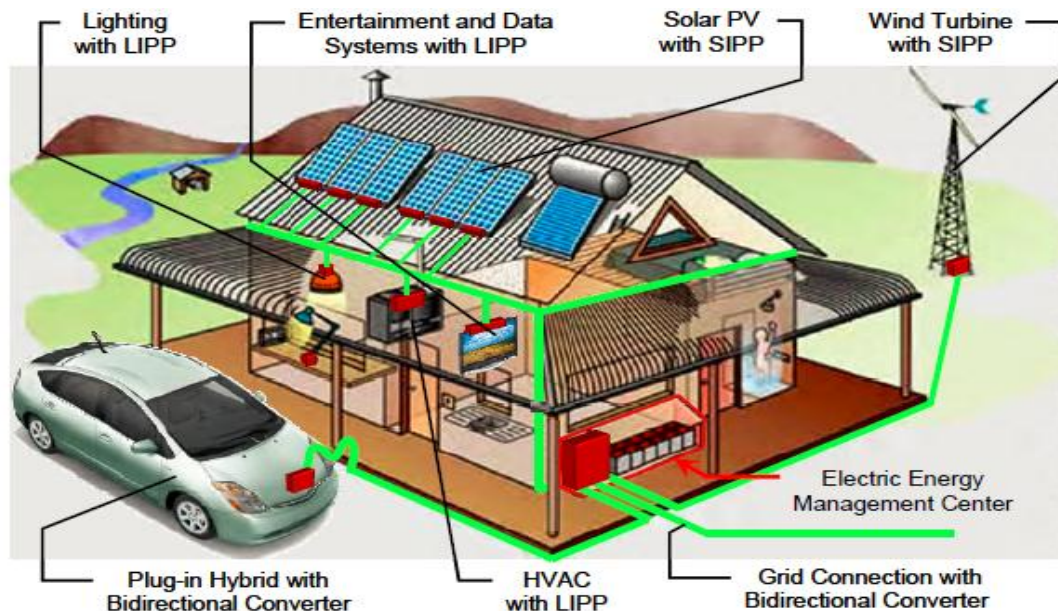
- (1) 小于1MW的太阳能光伏
- (2) 小于500kW的风电机组
- (3) 电池储能
- (4) 小于6MW的天然气发电机组
- (5) 小于6MW的柴油机发电机组
- (6) 紧凑性和高度自动化使机组可以放在建筑物内
- (7) 基于互联网的信息互联

④ 电能形式多样化：交流微网、直流微网、交直流混合微网

④ 主电源形式：柴油发电机、微型燃气轮机、电池储能系统

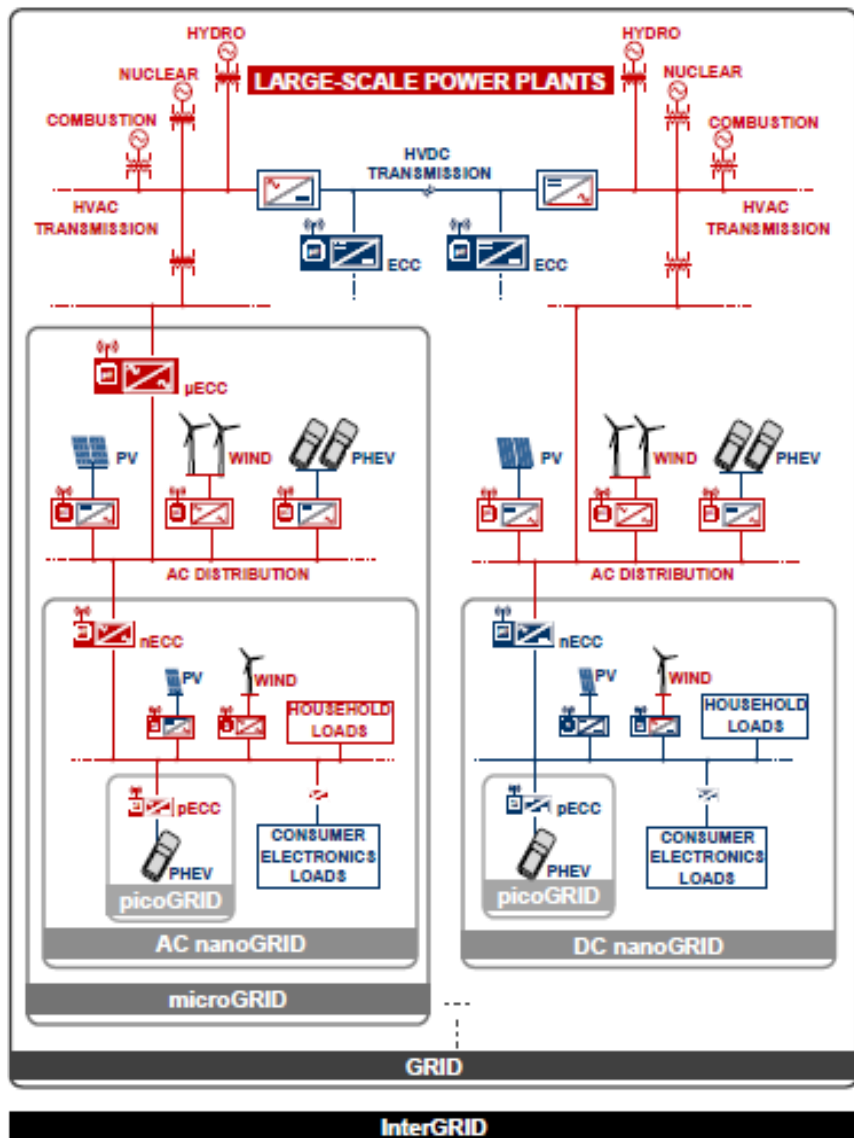
微电网主要结构

直流微电网



- 最早由VTEC的CPES中心提出拓扑，具有380V和48V两条直流母线，这两个电压等级恰好等同于单相系统PFC输出电压以及通讯电源工业标准母线电压
- 380V直流母线用于厨房电器和家电，48V母线用于家用通信系统等

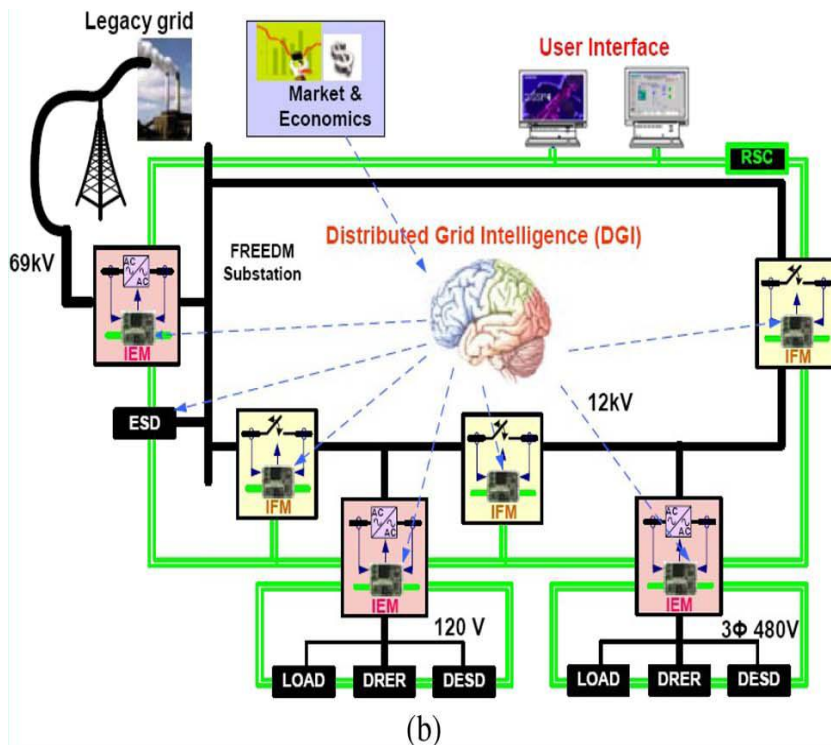
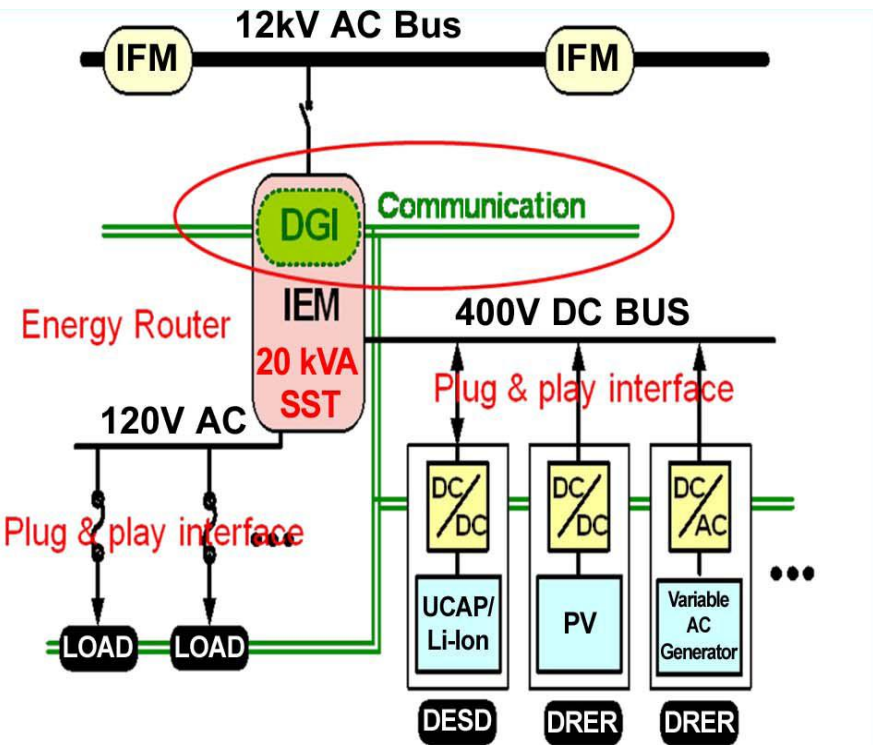
交直流混合微电网



- 由VTEC的CPES中心提出拓扑
- 具有不同电压等级的多条直流和交流母线，分层互联

微电网主要结构

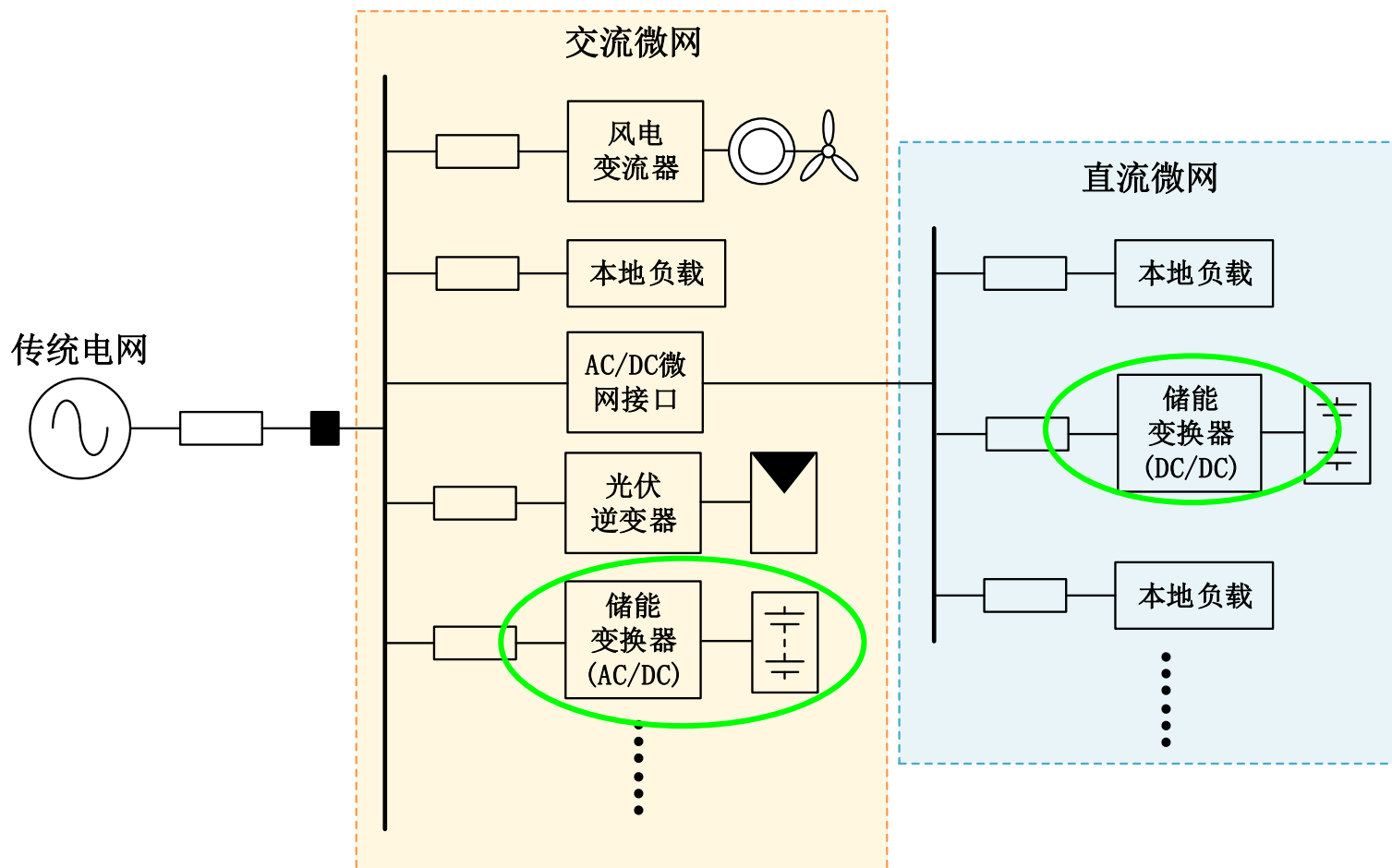
交直流混合微电网



- 由NCSU的FREEDM中心提出基于未来可再生能源分配与管理的微网拓扑
- 包含400V直流母线和120V交流母线的即插即用接口，连接12kV交流中压配电母线
- 具有智能能量管理装置(又称为能量路由器)，开放标准的分布式电网操作系统。
- 分布式电源、储能单元主要联接在直流母线上

以储能作为主电源的微电网

应用于微网中的储能系统



微电网作为配电网和分布式电源的纽带，需要接入大量种类不同、归属不同、分散接入的分布式电源，微电网控制技术包括：

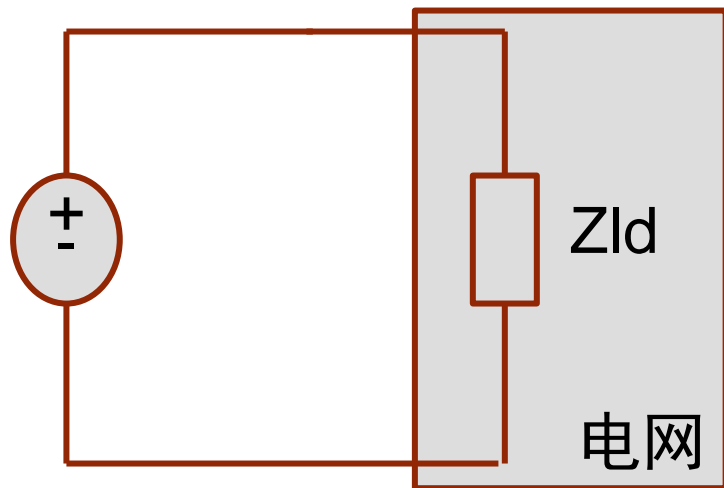
- 微网中电源的电力变换控制技术

- 恒功率控制
- VF控制
- 下垂控制
- 虚拟同步发电机控制

- 微电网运行控制与能量管理

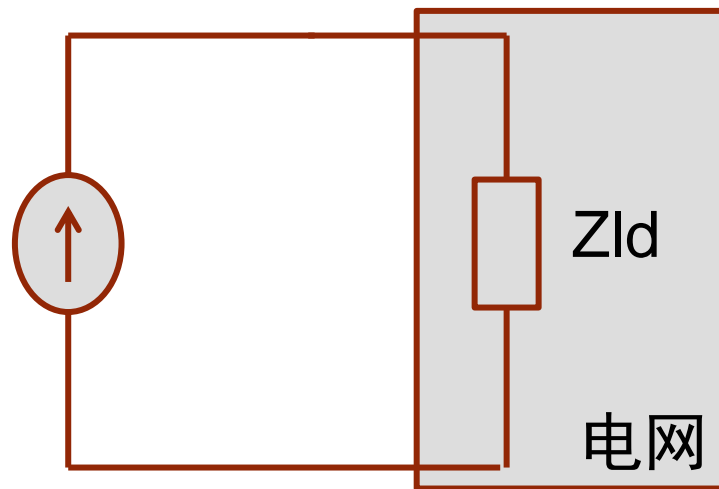
- 基于主从控制的集中控制结构
- 基于即插即用的对等控制结构
- 基于智能管理的分层控制结构

电源的特性--电流源型与电压源型



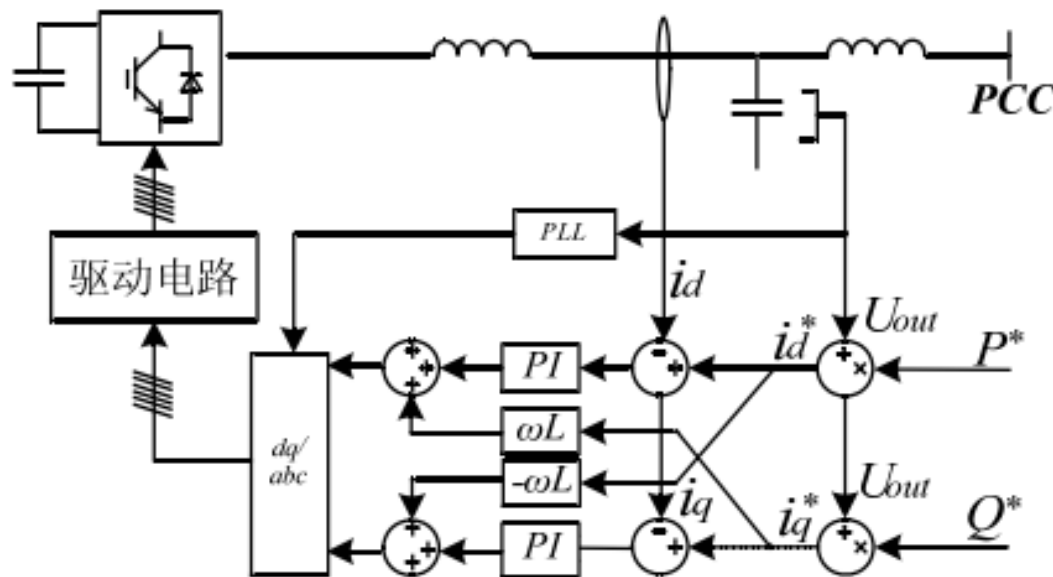
电压源

电压源
(自动响应负荷需求)



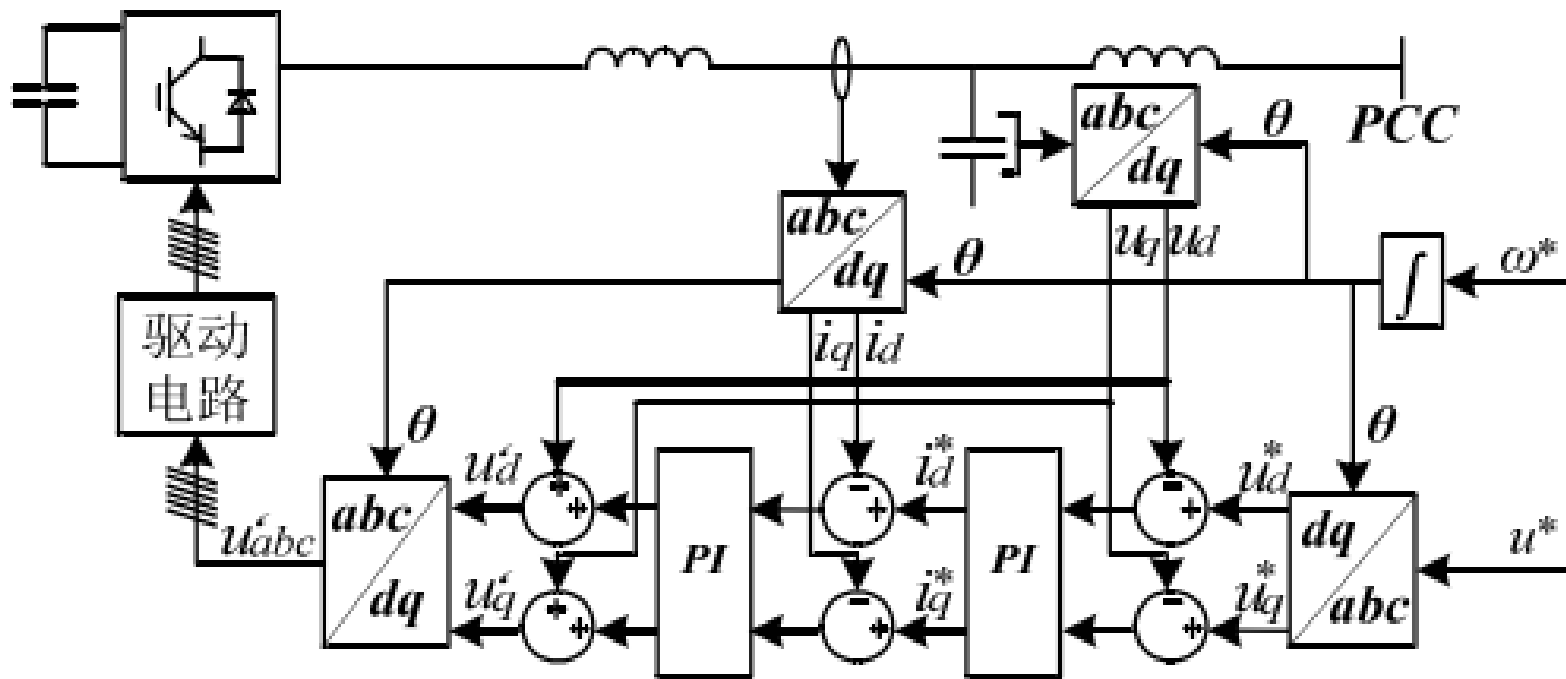
电流源

电流源
(负荷几乎不影响注入功率)



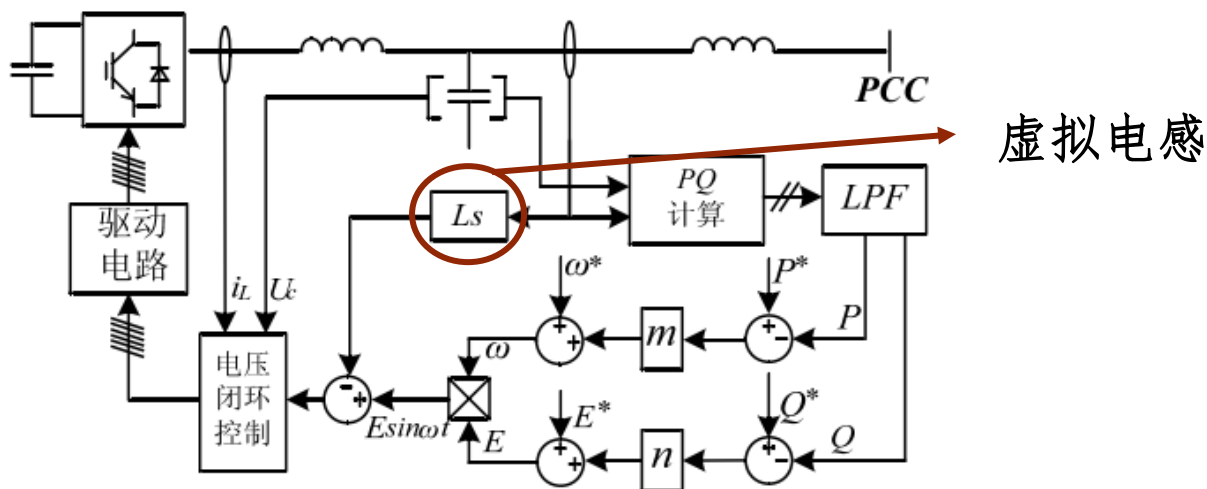
• 电压频率控制技术（电压源型控制）

- 采用电压频率控制的变换器为电压型控制，用于支撑电网电压，适合孤网运行控制。



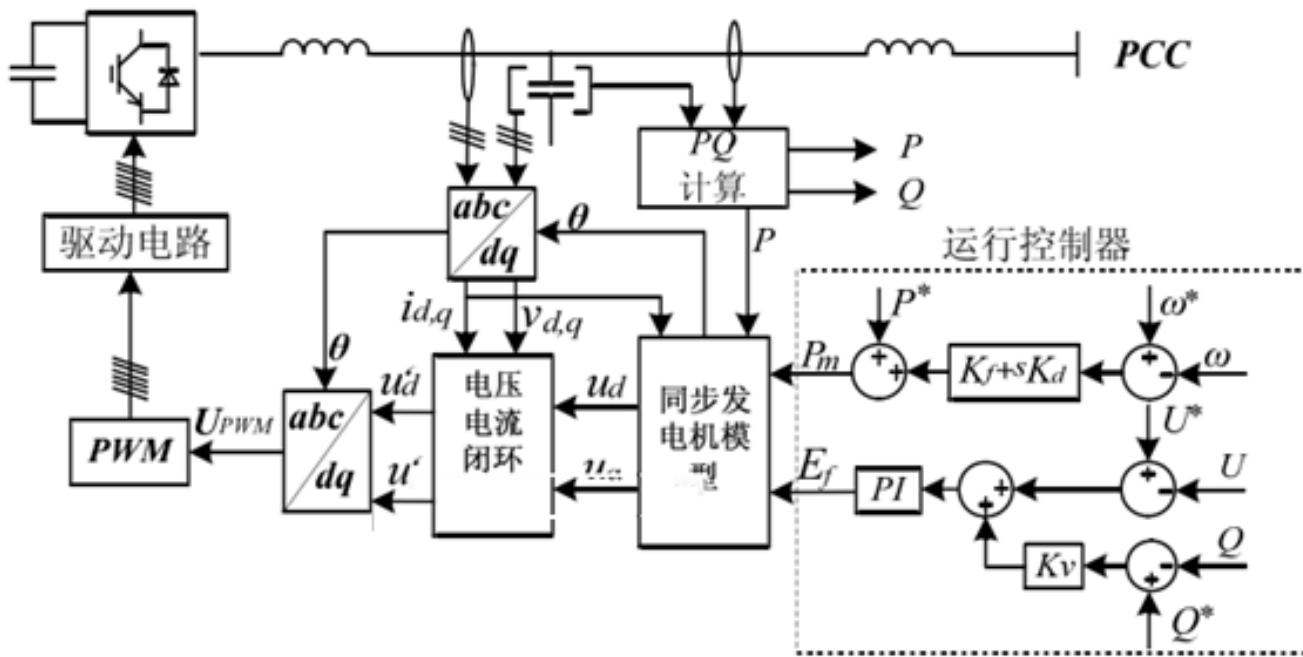
•下垂控制技术

- 微网孤网运行时，往往需要多变换器联合供电并能合理分担负荷
- 下垂控制模拟了多同步电机并列运行时的外特性，有利于多变换器功率精确分配



• 虚拟同步发电机控制技术

- 每台变换器模拟模拟同步发电机的惯量、阻尼和励磁特性，参与微网的调频调压过程，共同维持微网电压频率稳定



传统的微电网运行控制

主从控制

主微源采用恒压恒频控制，从微源采用恒功率控制，借助通信实现功率平衡☺ 控制技术成熟

☹ 对主控制器的全局调度要求高；过度依赖主机，扩展性差；无法实现并网/孤岛的无缝切换

对等控制

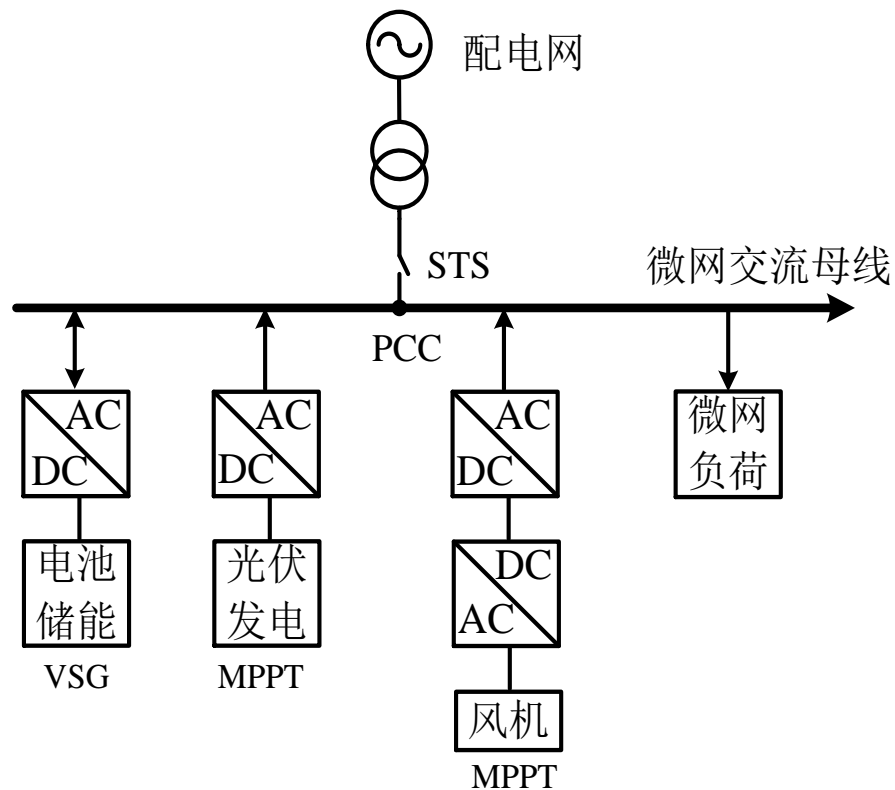
各微源采用下垂控制，彼此地位对等，通过下垂特性实现功率分配

☺ 不依赖高速通信，即插即用，冗余性好；并网/孤岛控制模式一致，可实现无缝切换

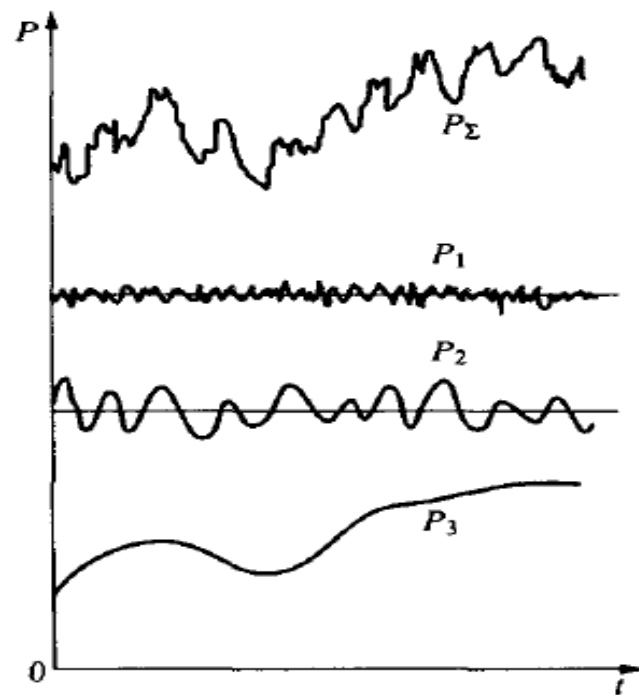
☹ 功率控制对微源阻抗特性敏感，有功/频率响应速度迅速，频率稳定性较差

■ 电力电子变流器具有低惯量、响应速度快的特点，以上两种控制方式均无法为电力系统提供惯量支撑。

■ 典型储能微网及微源的控制方式



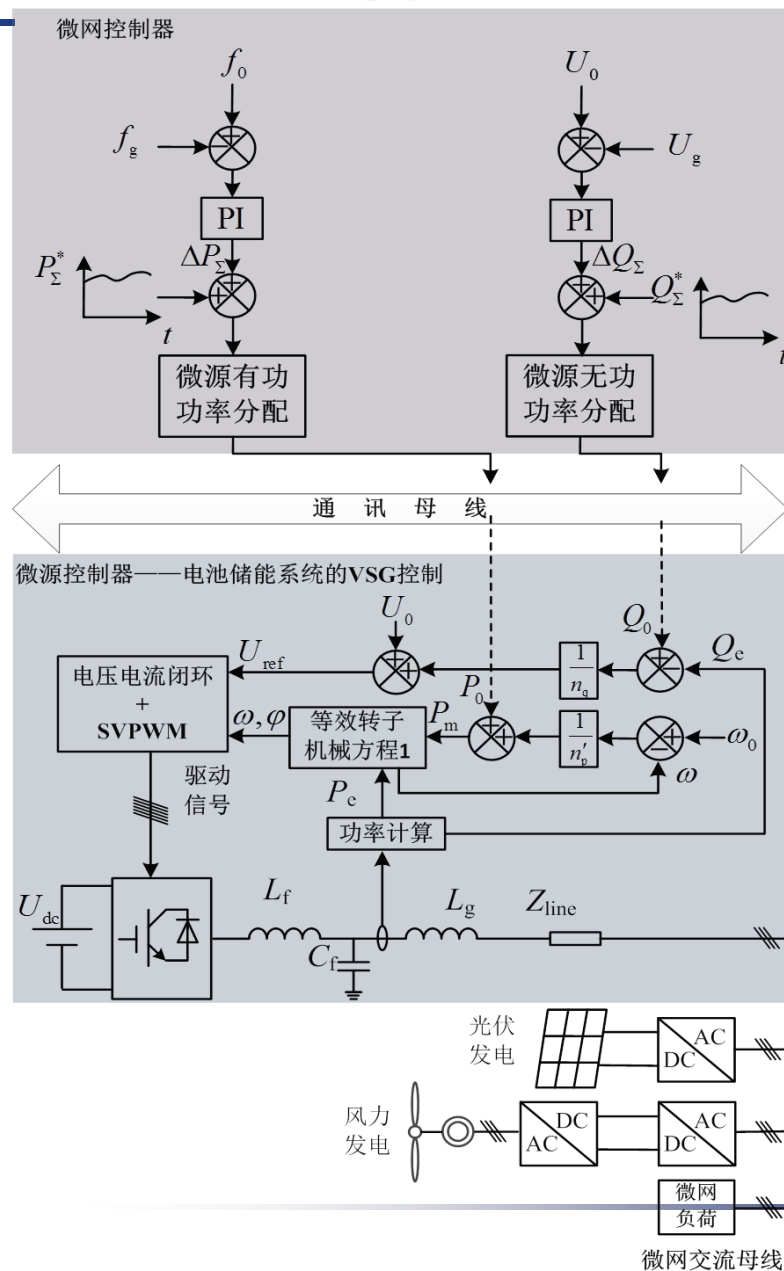
■ 微网负荷曲线 (包括非VSG控制的微源)



微网孤岛运行

■ 第二层控制-微网控制器：
负荷预测，通过二次调频、
调压保证微网母线电压的
幅值和频率处于额定值

■ 第一层控制-储能控制器：
通过一次调频、调压实现
功率平衡



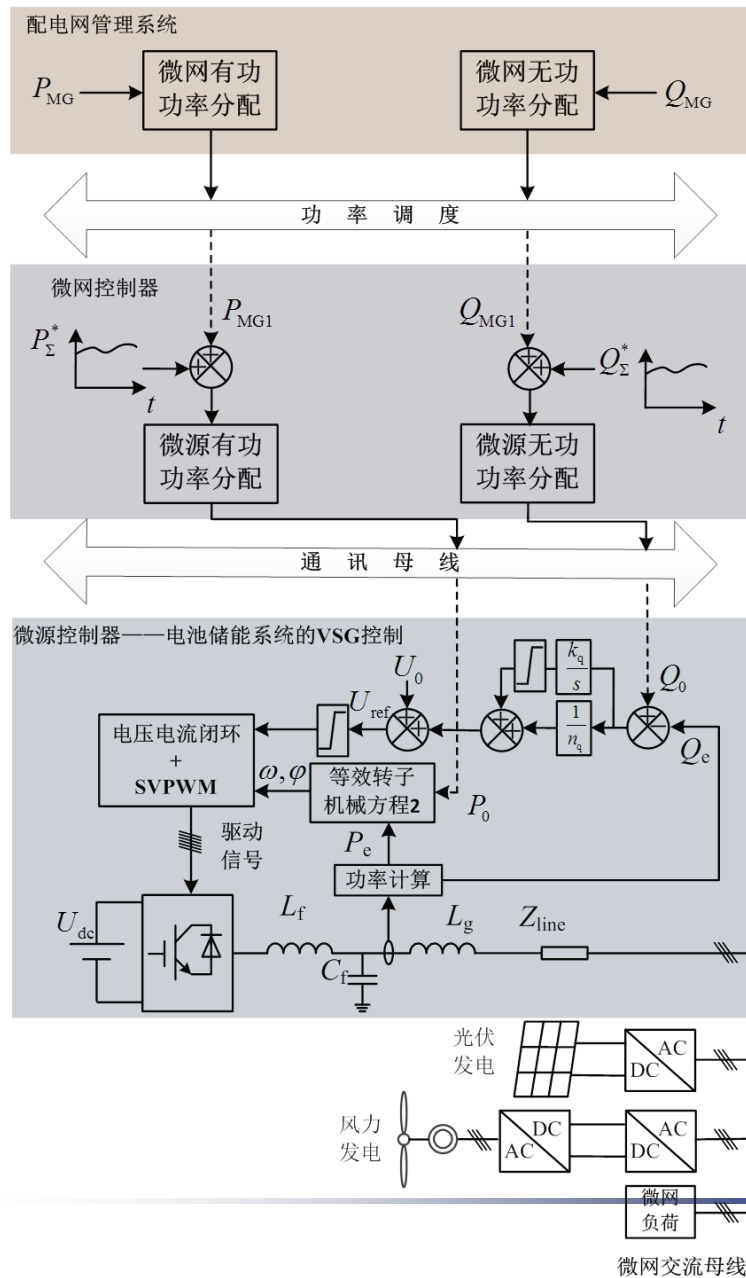
-
- Figure 10-10 illustrates the control system of a microgrid, divided into three main sections:
- Microgrid Controller (Top):** This section manages the active and reactive power distribution. It receives grid frequency (f_{grid}), grid voltage (U_{grid}), and local measurements (f_g , φ_g , U_g). The active power control loop uses a PI controller to adjust the active power reference (P_{Σ}^*) based on the active power error ($\Delta P_{\Sigma 1}$). The reactive power control loop uses a PI controller to adjust the reactive power reference (Q_{Σ}^*) based on the reactive power error (ΔQ_{Σ}). Both loops output signals to the "Microgrid Active Power Distribution" and "Microgrid Reactive Power Distribution" blocks, respectively.
 - Microgrid Controller - Battery Energy Storage System VSG Control (Middle):** This section details the VSG control for the battery energy storage system. It includes a "Voltage Current Closed-loop + SVPWM" block that generates the driving signal for the inverter. The control system also includes an "Equivalent Rotor Mechanical Equation 1" block, which calculates the mechanical power (P_m) and the mechanical power reference (P_c). The system also calculates the active power (P_0) and the reactive power (Q_0) based on the reference values and the grid conditions. The "Power Calculation" block outputs the active power reference (P_c) to the VSG control block.
 - Microgrid AC Bus (Bottom):** This section shows the microgrid AC bus connected to various energy sources and loads. It includes a "Photovoltaic Generation" block, a "Wind Generation" block, and a "Microgrid Load" block. The bus is connected to the microgrid AC bus through a transformer and a circuit breaker.

微网并网运行及切换至孤岛

- 第三层控制-配电网管理系统：为实现电网的最优化运行，控制微网与电网的能量交互
- 第二层控制-微网控制器：负荷预测，孤岛检测，接受上级调度指令
- 第一层控制-微源控制器：按照指令功率输出并通过一次调频、调压响应电网波动

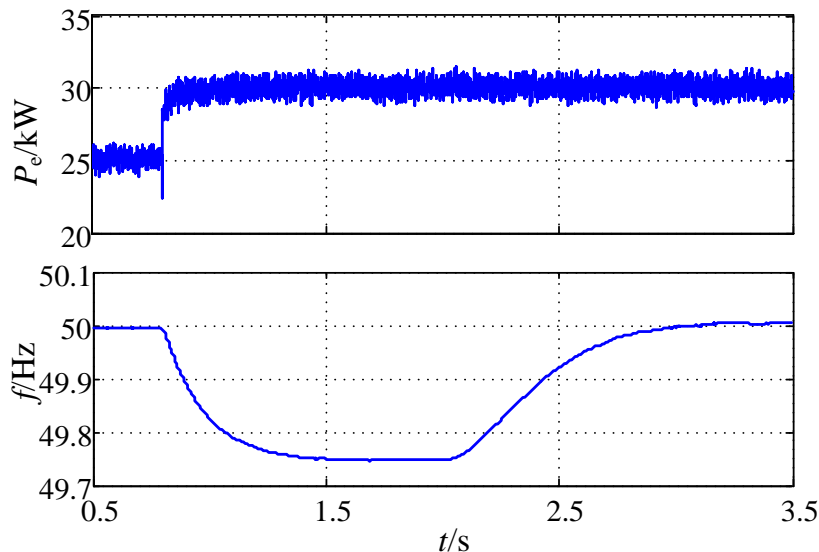
微网并网切换至孤岛过程

- 电压源控制，无需控制方式的切换---无缝
- 微网控制器及时检测孤岛状态，切换无功控制方式，切入电压、频率二次调节环节



(a) 频率的一、二次调节

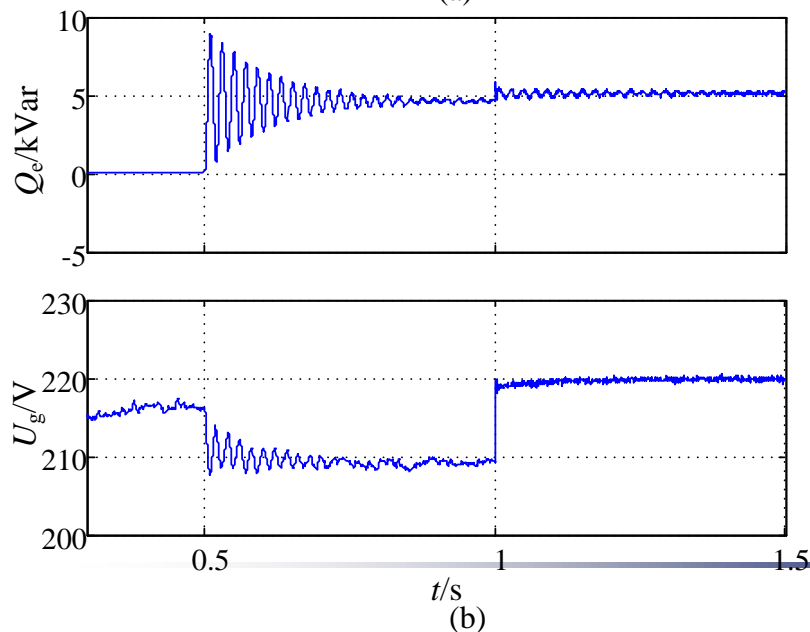
初始输出25kW有功功率，0.5s时突增5kW有功负荷，2s时开始二次调频；



(a)

(c) 电压的一、二次调节

初始输出无功功率为0，0.5s时突增5kW无功负荷，1s时开始二次调压。



(b)

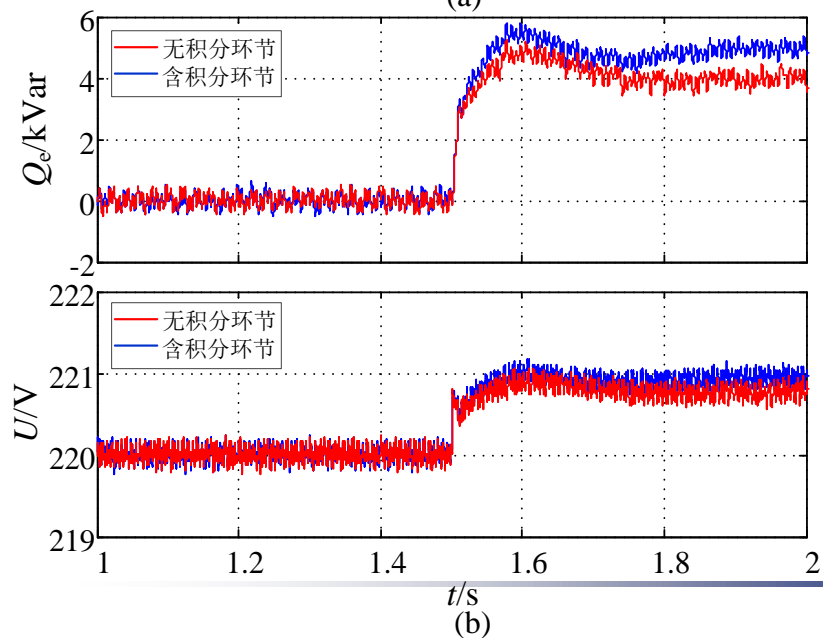
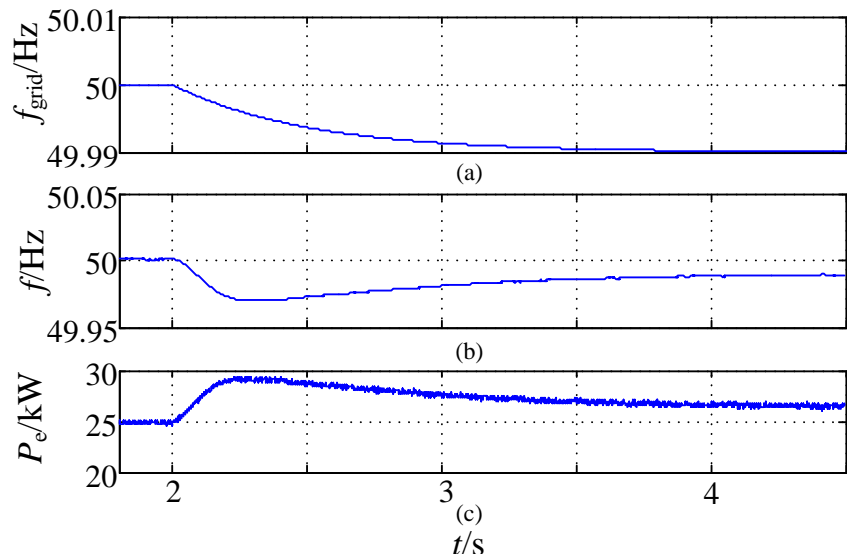
微网并网运行仿真分析

(a)VSG对电网频率波动的响应

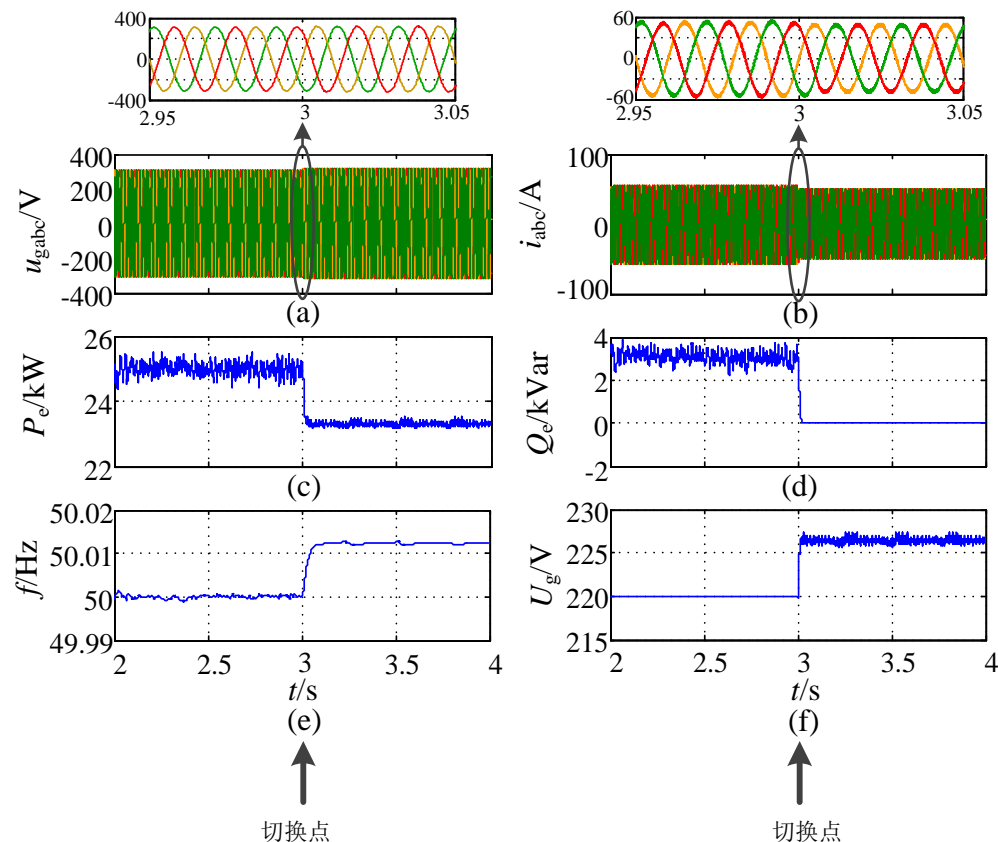
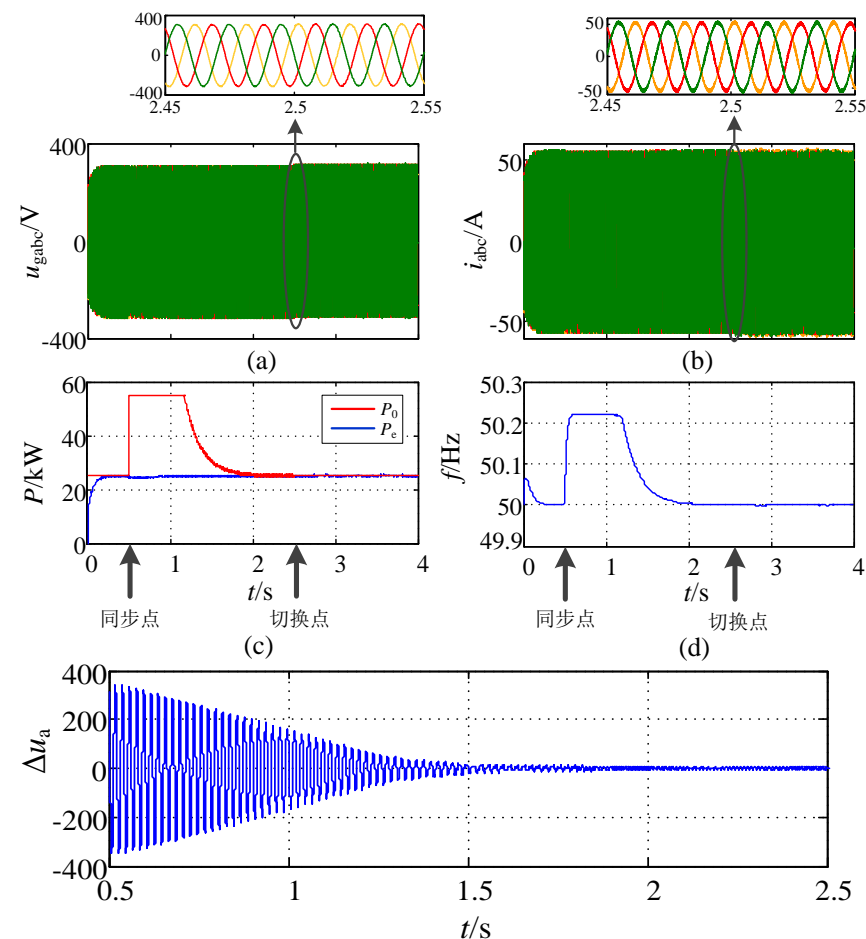
2s开始电网频率缓慢下降,
储能输出有功增加

(b)无功功率的无静差控制

1.5s给定将无功参考值从0
提高至5kVar



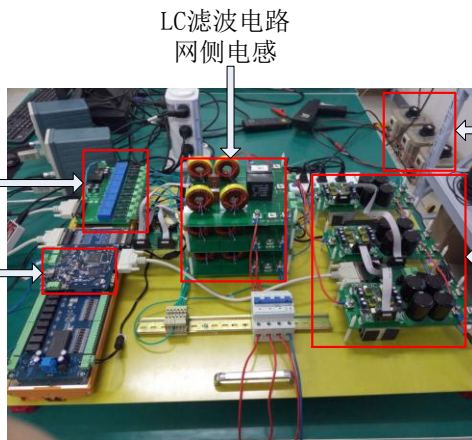
运行模式切换仿真



孤岛切换至并网：孤岛时输出有功功率为25kW，0.5s开始预同步，2.5s时接入电网

并网切换至孤岛：并网功率输出25kW/3kVar，给22kW阻性负载供电，其余能量流向电网；3s时孤岛

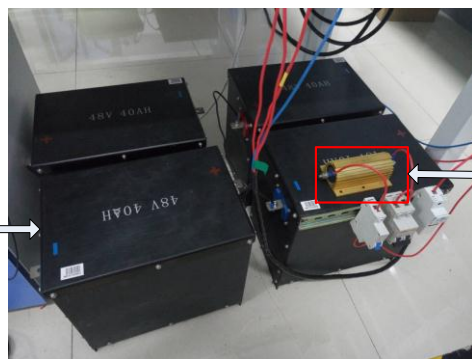
实验研究



LC滤波电路
网侧电感

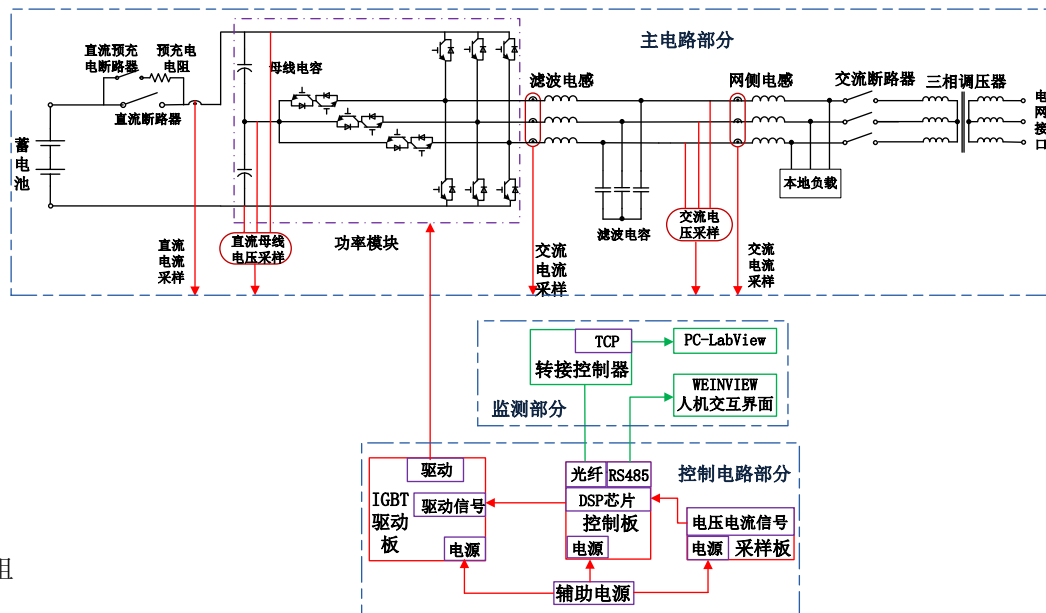
调压器

直流电容
IGBT模块
驱动电路



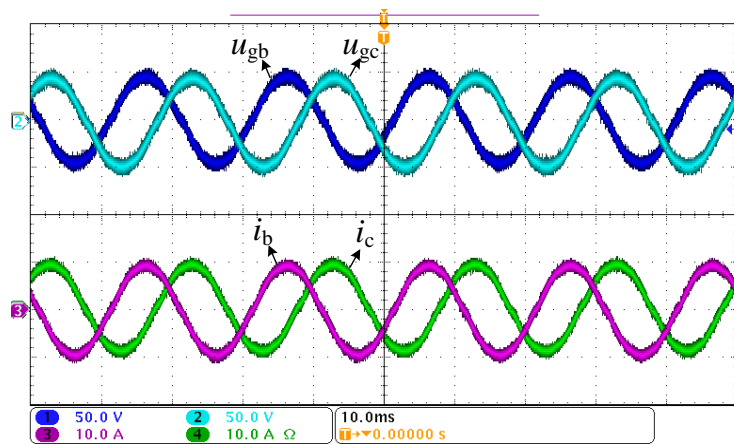
电池模块

预充电电阻



直流母线电压 U_{dc} (V)	96
交流母线相电压 U_g (V)	33
额定功率 S_n (VA)	500
直流母线上下电容 C_{dc} (μF)	1980
滤波电感 L_f (mH)	1.65
滤波电容 C_f (μF)	56
网侧电感 L_g (mH)	0.4
总等效感抗 X (Ω/pu)	1.3/0.2

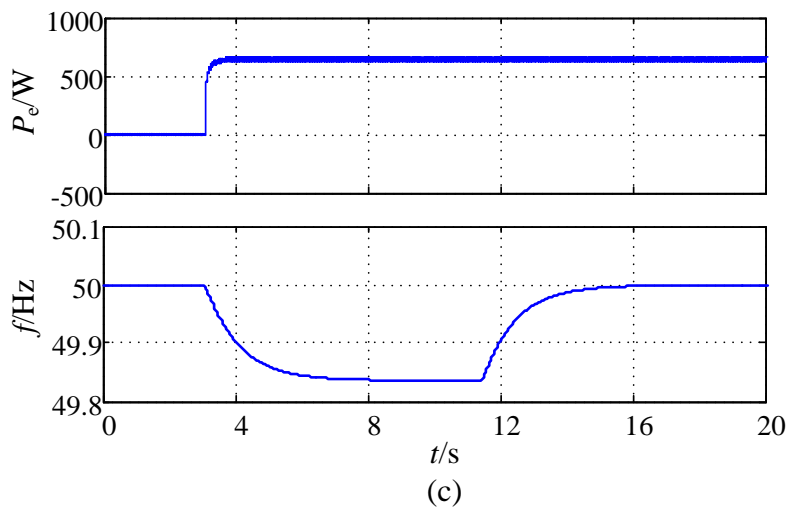
孤岛实验



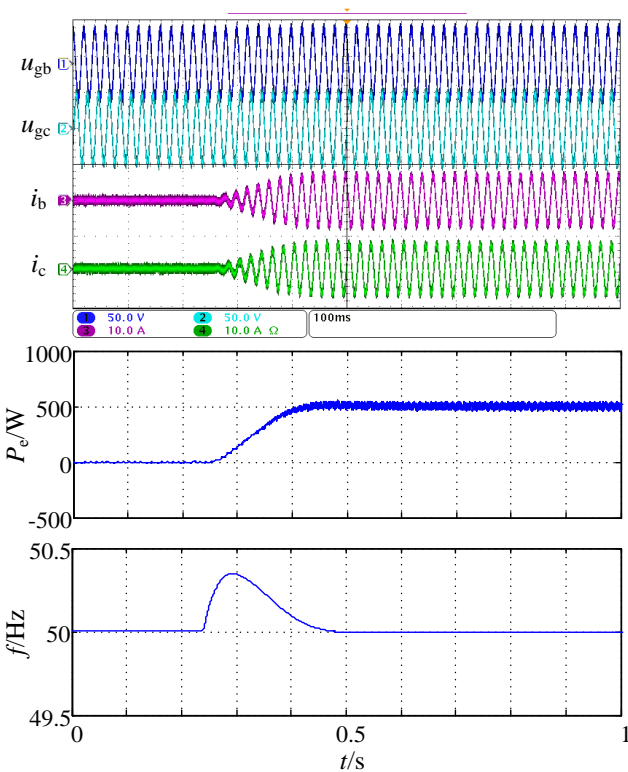
(a)

(a)恒压恒频控制：
带三相星型连接的
653W阻性负载

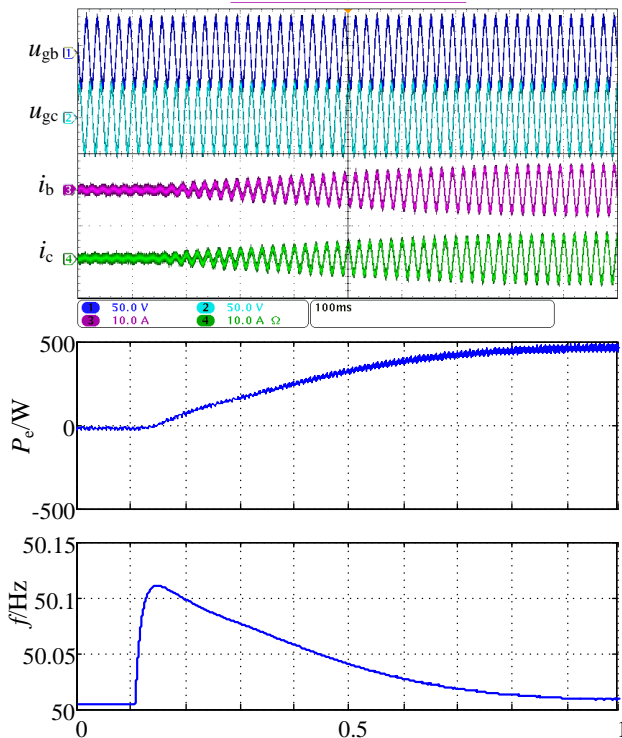
(b)一、二次调频：
初始状态空载，3s时投入
653W负载，11s时开始
二次调频。



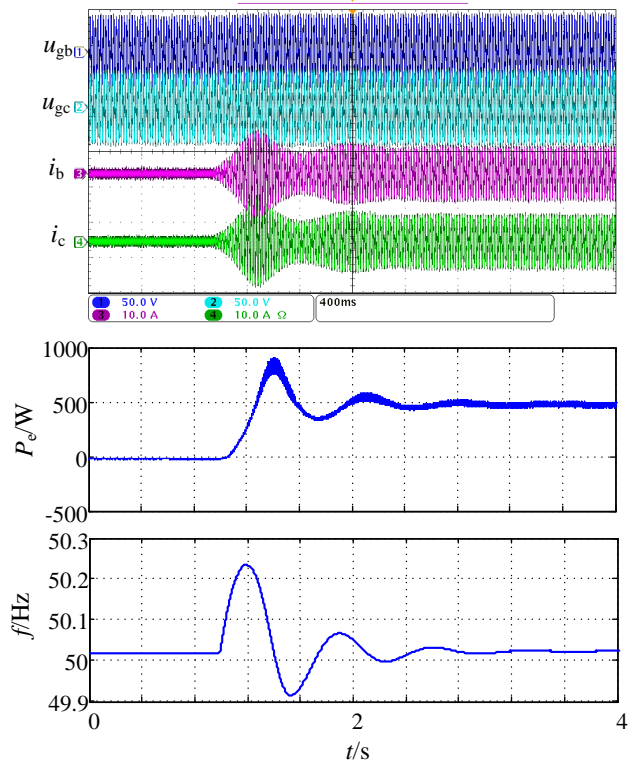
(c)



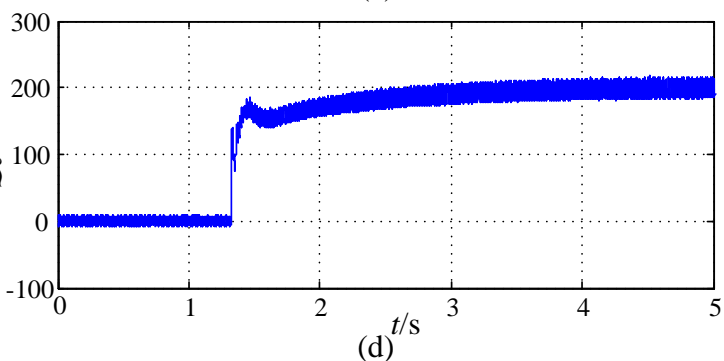
(a)



(b)



(c)



(d)

并网对有功功率参考值500W的响应过程：

(a) 最优阻尼比： $J=0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $D'=0.71(H=6\text{s } D_p=140)$ ；

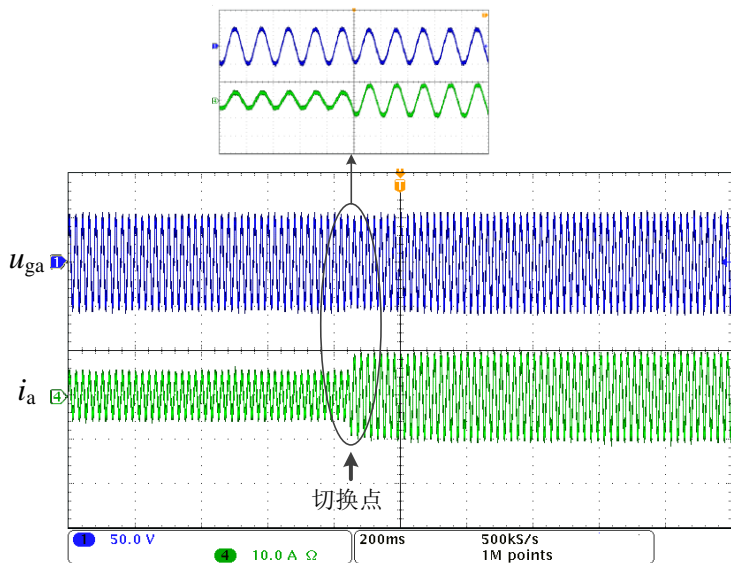
(b) 过阻尼： $J=0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ， $D'=2.84$ ；

(c) 欠阻尼： $J=0.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $D'=0.71$ 。

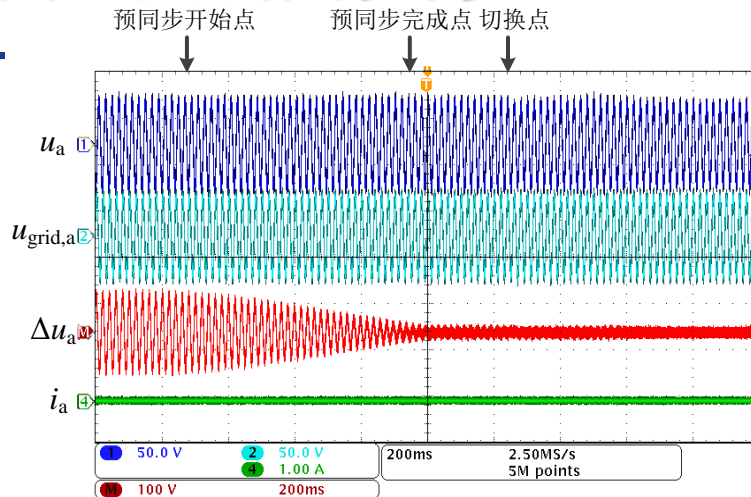
并网无功功率参考的无静差控制：

(d) 无功功率参考值由0Var提高至200Var。

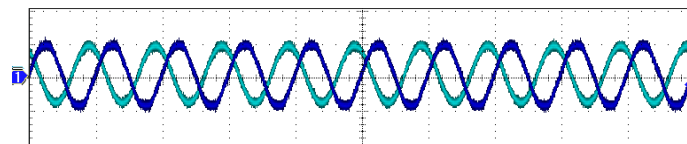
运行模式切换实验



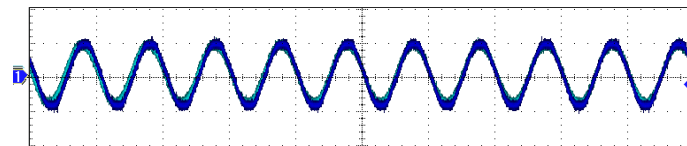
并网运行切换至孤岛运行
并网运行时输出有功功率
300W/30Var，与电网共
同给653W阻性负载供电
无功流向电网。



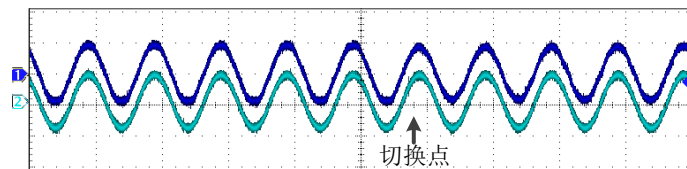
(a) 离网切换至并网整体运行情况



(b) 预同步前A相电压



(c) 预同步完成点A相电压



(d) 切换点A相电压

孤岛运行切换至并网运行：孤
岛时空载，初始相位差为 $2/3\pi$ 。

随着新能源高比例接入、智能电网技术、柔性电力技术等的发展，未来微电网将具备如下新特征：

- 微网将满足多种能源综合利用需求并面临更多新问题
- 微源的电力变换将向提高自主性的方向发展
- 微电网将从单一电能形式（直流微网、交流微网）向多电能形式（交直流混合微网）发展
- 微电网将与配电网实现更高层次的互动
- 微电网将承载信息和能源双重功能



谢谢！

