

2021 中国电机工  
程学会年会

# 从“源随荷变”到“荷随源变”

---

江亿

清华大学建筑节能研究中心

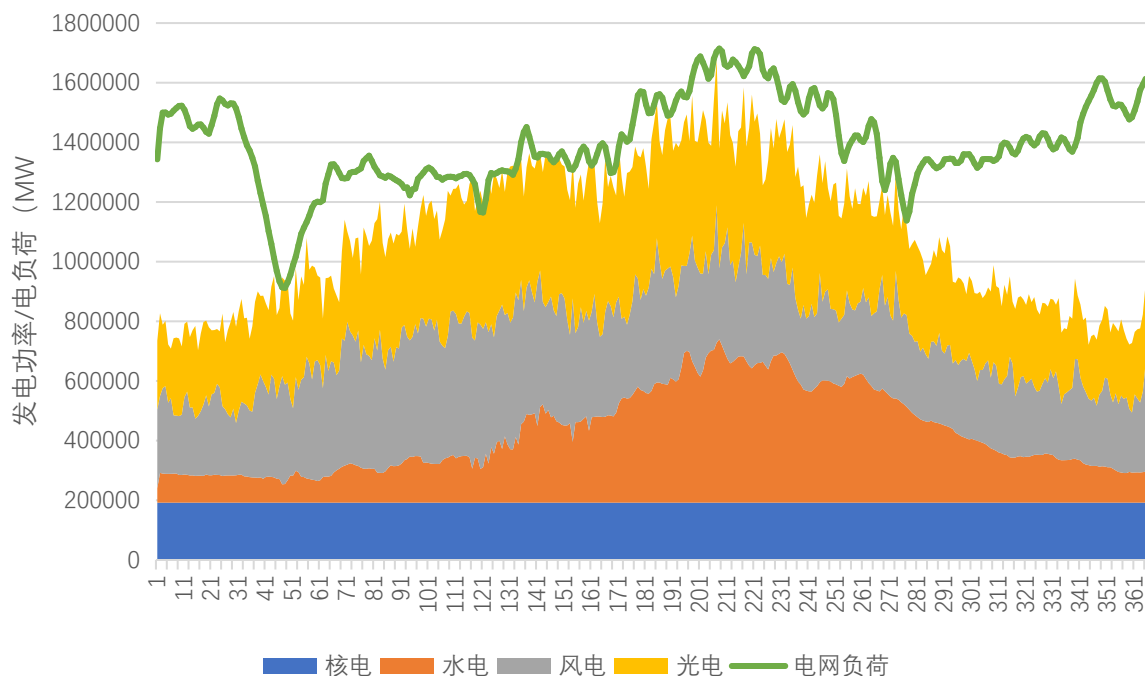
# 未来的电力需求与电力供给

- 电力需求：实现全面电气化 共13.5万亿kWh
  - 制造业：6.5万亿kWh（包括制氢为工业提供燃料）
  - 建筑运行：4万亿kWh
  - 交通运行：3万亿kWh
- 电力供给：
  - 核电：由目前的0.5亿kW，0.4万亿kWh 发展到 2亿kW，1.5万亿kWh
  - 水电：由目前的4亿kW，1.6万亿kWh 发展到 5亿kW，2.5万亿kWh
  - 以上仅 4 万亿kWh 约30%
  - 尚缺少 9.5万亿kWh，约 70% 可以完全依靠风电光电吗？

# 全年动态季节性电力供需分析模型

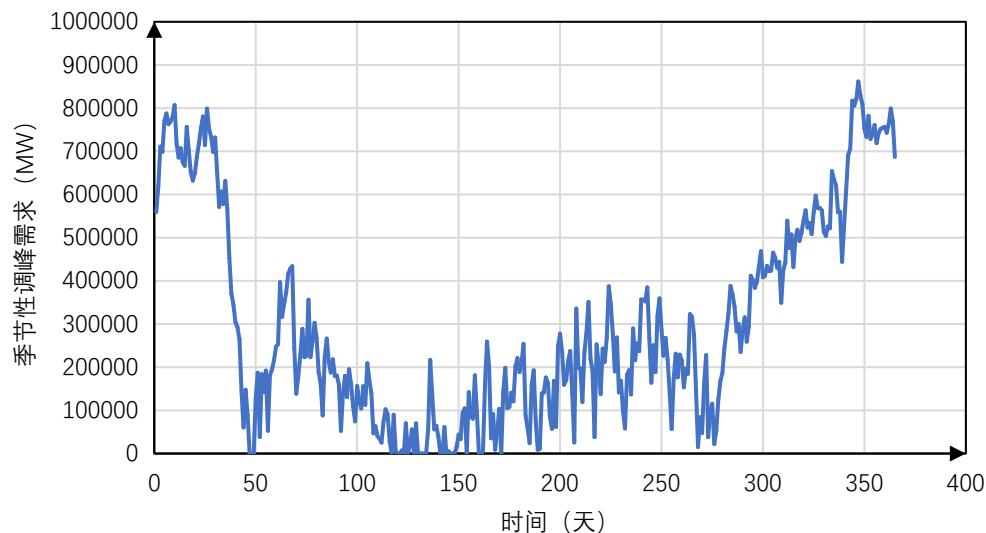
- 风电、光电配置原则：

调整风电光电总装机比例和容量，使弃电为零，电力缺口最小尽可能多发电。以此得出风电光电的装机比例与装机容量。

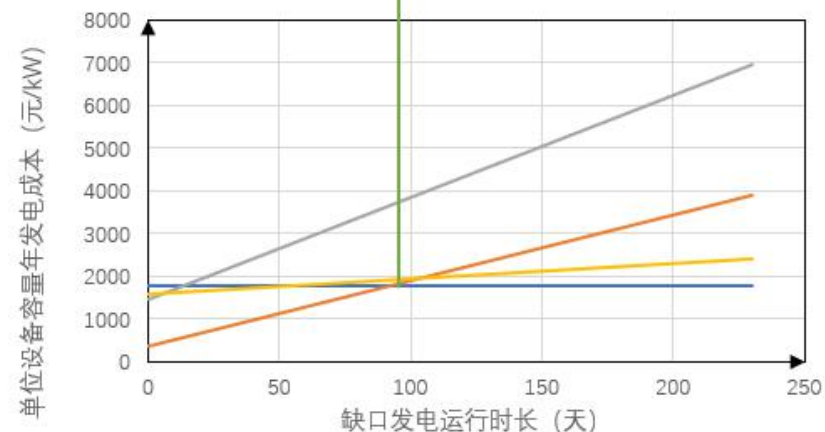
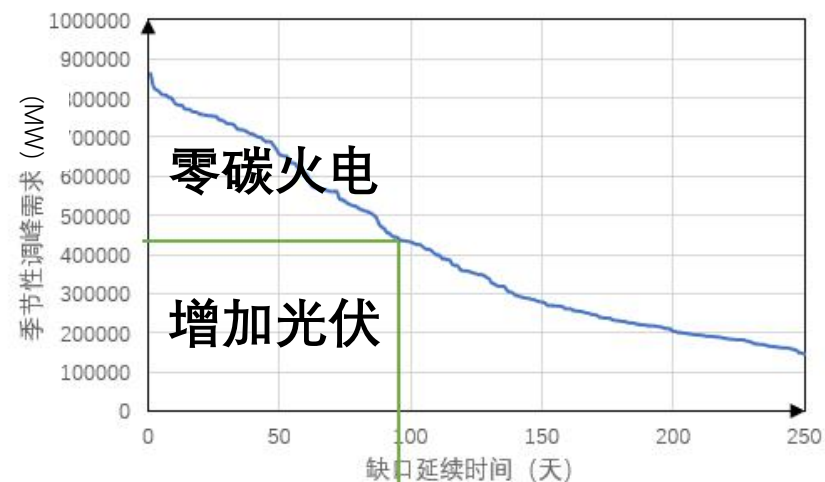


水电装机	5	亿千瓦
核电装机	2	亿千瓦
风力发电装机	18	亿千瓦
光伏发电装机	28	亿千瓦

# 余量配置: 分别考虑增加光电风电、制氢储氢、制甲醇储甲醇、调峰火电

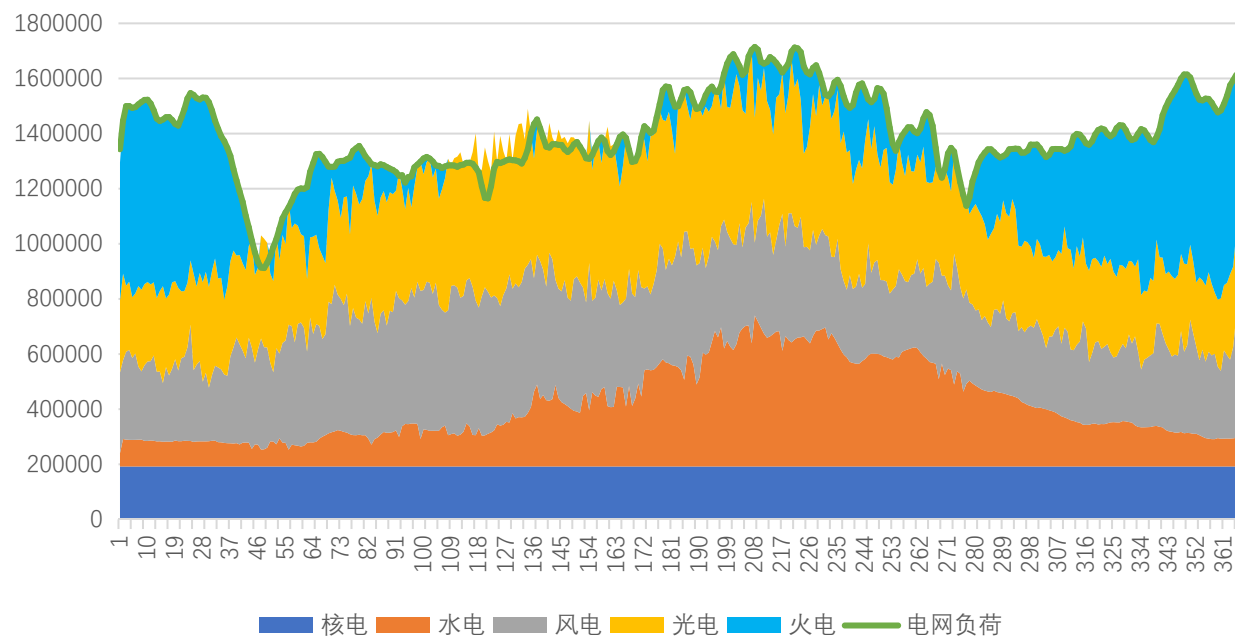


延续处理



- 根据成本曲线配置三种季节性调峰方式的容量
- 通过增加可再生装机容量来满足运行时间超过约98天的部分电力缺口，运行时间低于98天的部分电力缺口则应由零碳火电来承担

# 保留部分火电作为调峰电力，在通过CCS回收CO2



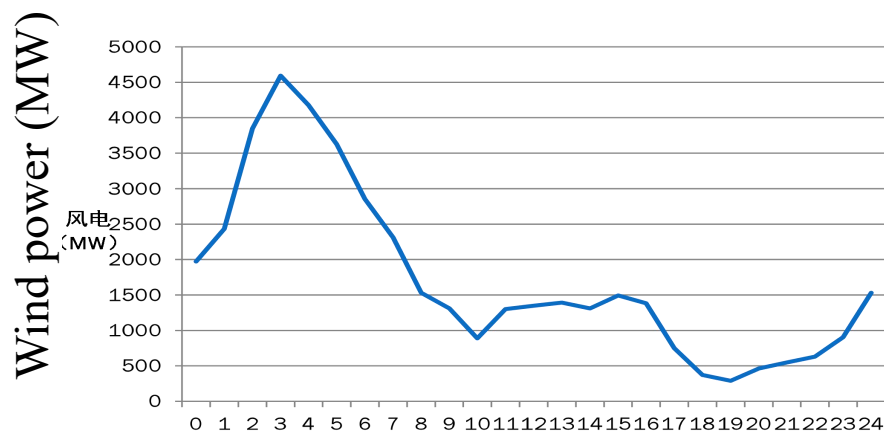
火电燃料： 生物质颗粒， 燃气， 燃煤， 折合5.5亿tce  
通过CCUS回收其排放的二氧化碳 8亿tco2

	装机容量 (亿kW)	发电量 (万亿kWh)
水电装机	5	2.0
核电装机	2	1.5
风力发电装机	24	3.6
光伏发电装机	40	4.5
火电装机	6.5	2.0

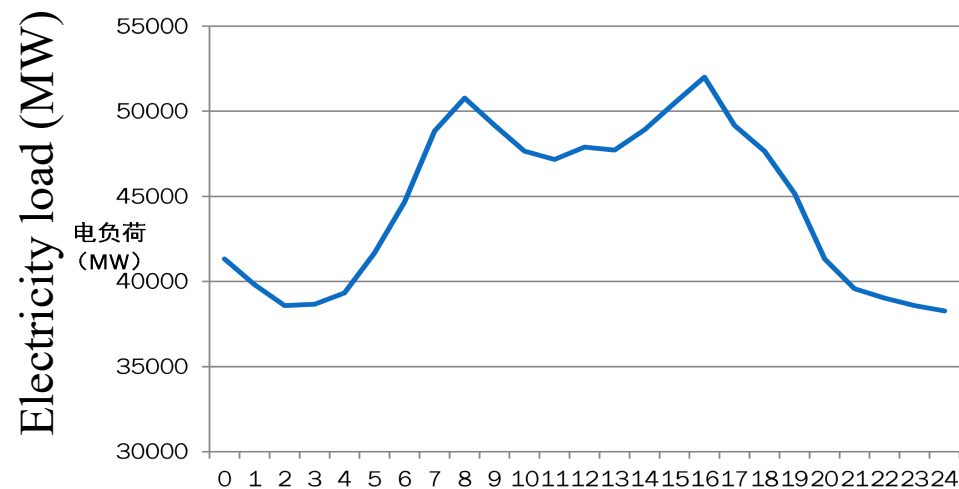
风电光电装机占总装机容量80%  
风电光电发电站总电量60%

# 发展大比例风电光电必须面对的问题

- 在哪儿安装？
- 怎样上网？
- 如何应对一天内和几天之间风电光电的变化与用电侧需求变化的不一致性？



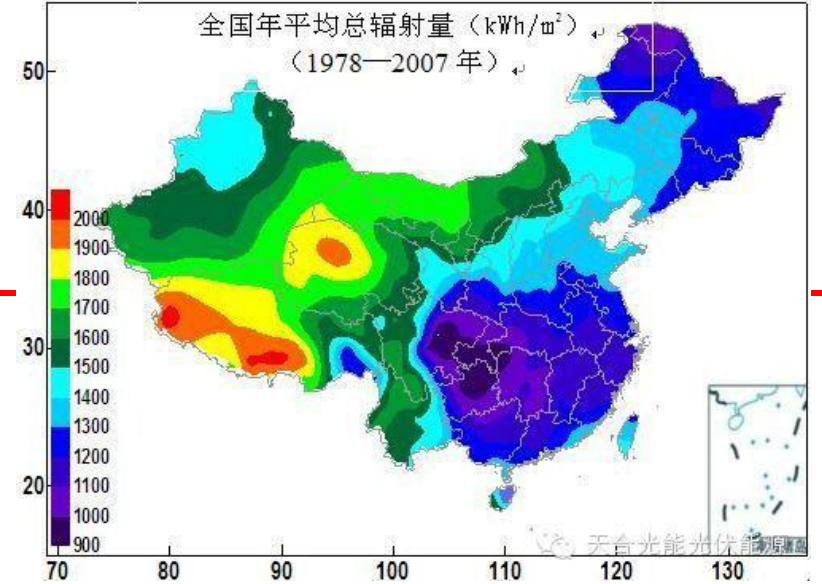
风电一天内的变化



用电负荷一天内的变化

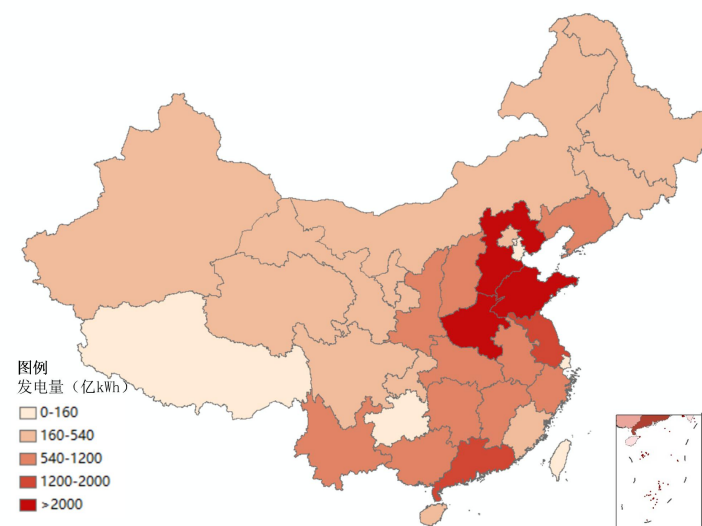
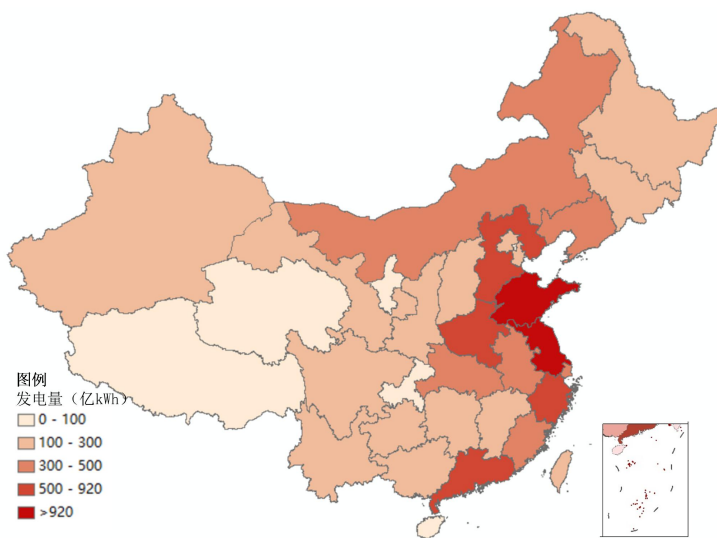
# 在哪儿发展太阳能光伏？

- 西北戈壁滩和沙漠？
  - 丰富的土地资源，太阳能资源
  - 长距离输送，投资，线路损耗
  - 为了稳定输电，需要“水光打捆”，或“火光打捆”，1:1 比例，火电成分高
  - 为了满足终端负荷变化，需要二次调峰，或二次蓄能调节
- 中东部负荷密集区发展分布式光伏
  - 太阳辐射强度是西北部的 60%~70%
  - 由于光伏器件成本占比小，所以辐射强度低对经济性影响不大
  - 避免长途输送，降低初投资和损耗
  - 太阳光伏变化与负荷需求有一定的相似性，调峰需求量减小
- 结论：
  - 30% 安装在西北，70% 安装在中东部



# 屋顶是发展太阳能光伏的重要场所

- 根据卫星高分图片和现场抽样调查结果
  - 城镇空闲屋顶可安装830GW光伏，年发电1.23万亿kWh，是城镇建筑和电动车用电的1/3
  - 农村各类空闲屋顶可安装1970GW光伏，年发电2.95万亿kWh，可满足农村各类用能还有余



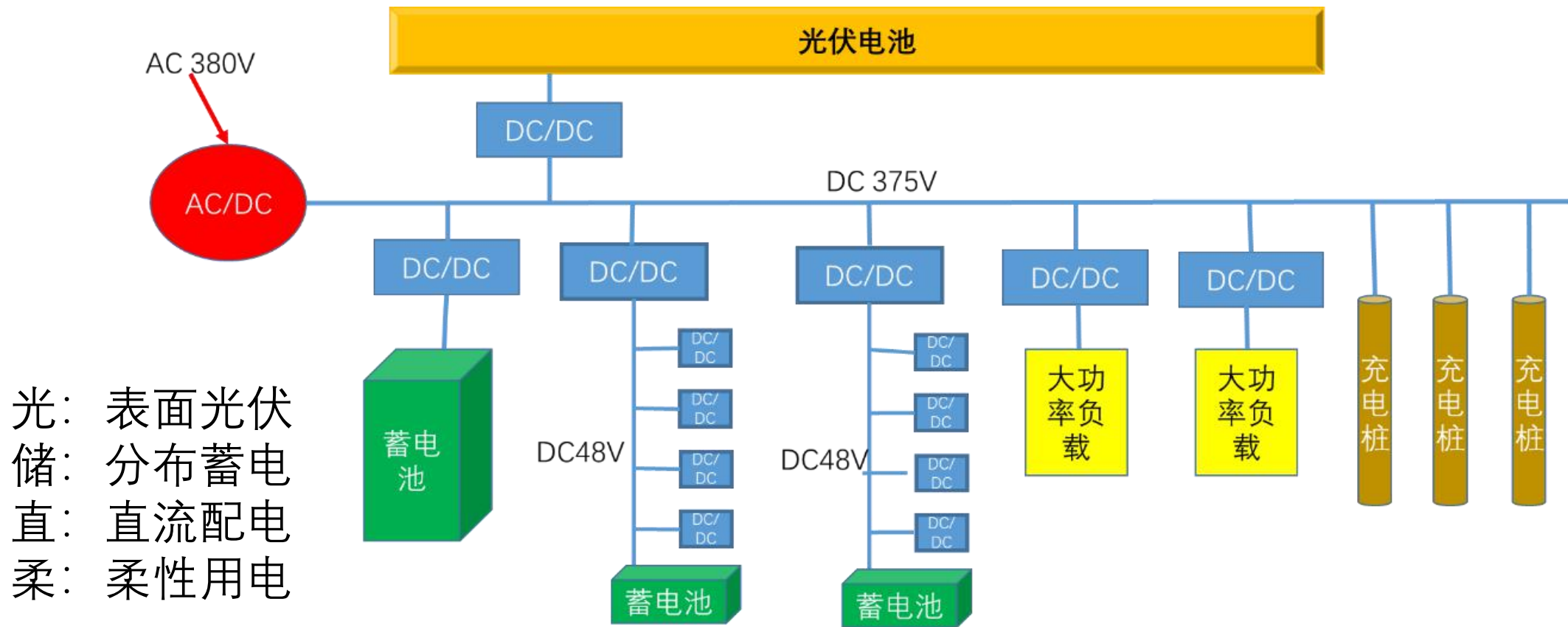


# 发展城乡建筑屋顶光伏的基本策略

---

- 城镇建筑
  - 屋顶光伏仅能满足其1/3~1/4的电力需求
  - 建筑用电可以具有较大范围的可调节性，再加上建筑邻近的停车场的电动车，通过有序充电桩可利用车载电池资源，实现柔性用电
  - 不要求发电上网
- 农村建筑
  - 屋顶光伏发电量可满足农户生活、生产、和交通全部用能，还有剩余
  - 80%的农牧区通过屋顶光伏和零散空地的风电光电可以满足其全年用能，从而成为仅上网发电，不从网上取电的电力供给者，而不再是消费者
  - 建设农村的新型能源系统

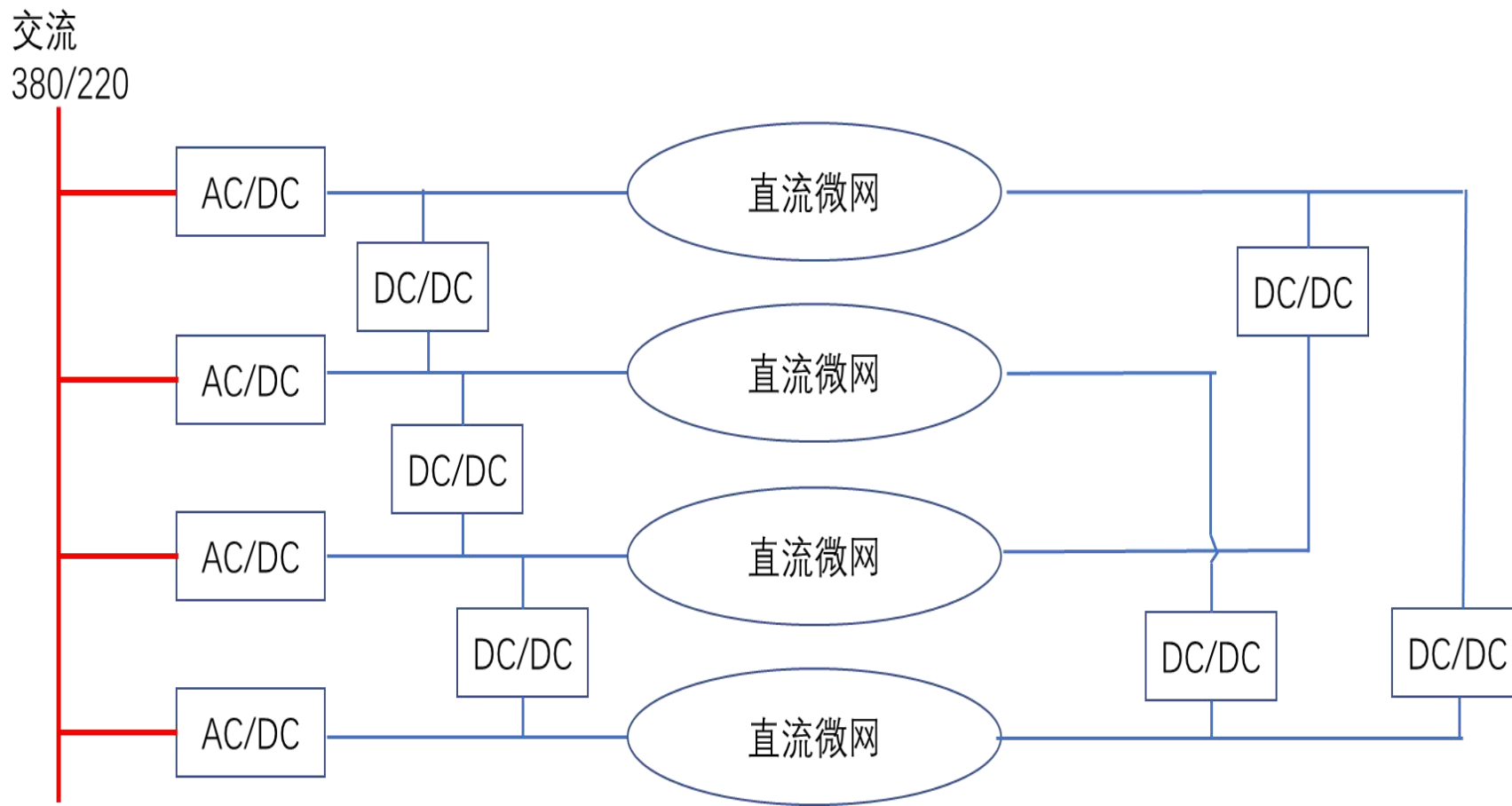
# 城镇建筑：“光储直柔”+有序充电



光：表面光伏  
储：分布蓄电  
直：直流配电  
柔：柔性用电

建筑“光储直柔”配电系统

# 多个“光储直柔”直流微网的互联互通



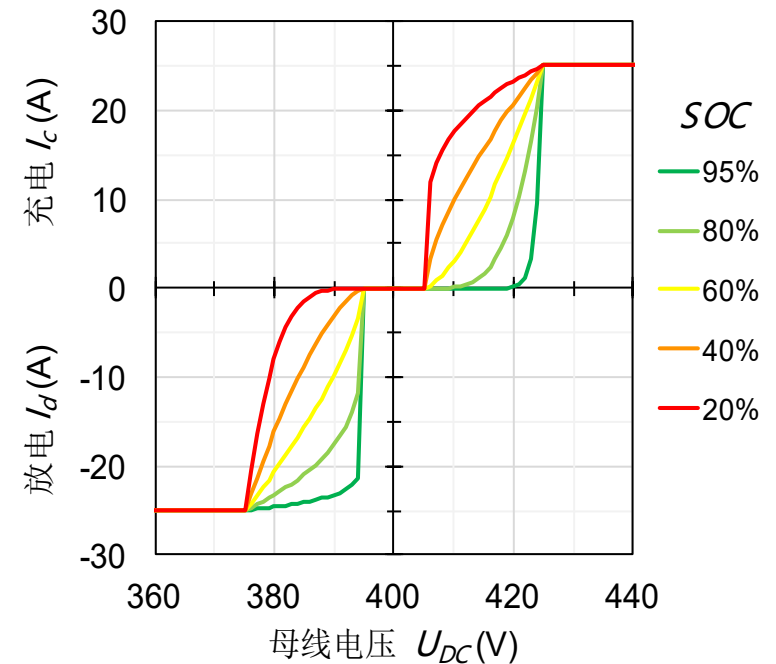
# 建筑可以实现柔性用电的潜力

---

- 附属停车场的电动小汽车：
  - 每辆小汽车的电池容量：50~100kWh
  - 每年运行公里数：1万~2万公里，用电2000~4000kWh，只需充电40~80次
  - 年利用率：1/5~1/10；应充分利用电动小汽车的电池资源
- 建筑内其它的可储能装置
  - 冰蓄冷水蓄冷
  - 生活热水器
  - 冷热源调节，利用建筑热惯性
  - 风机水泵变频调节
  - 冰箱、冰柜、洗衣机等错峰调节
  - 带有蓄电功能的可移动设备，蓄电池的充分利用

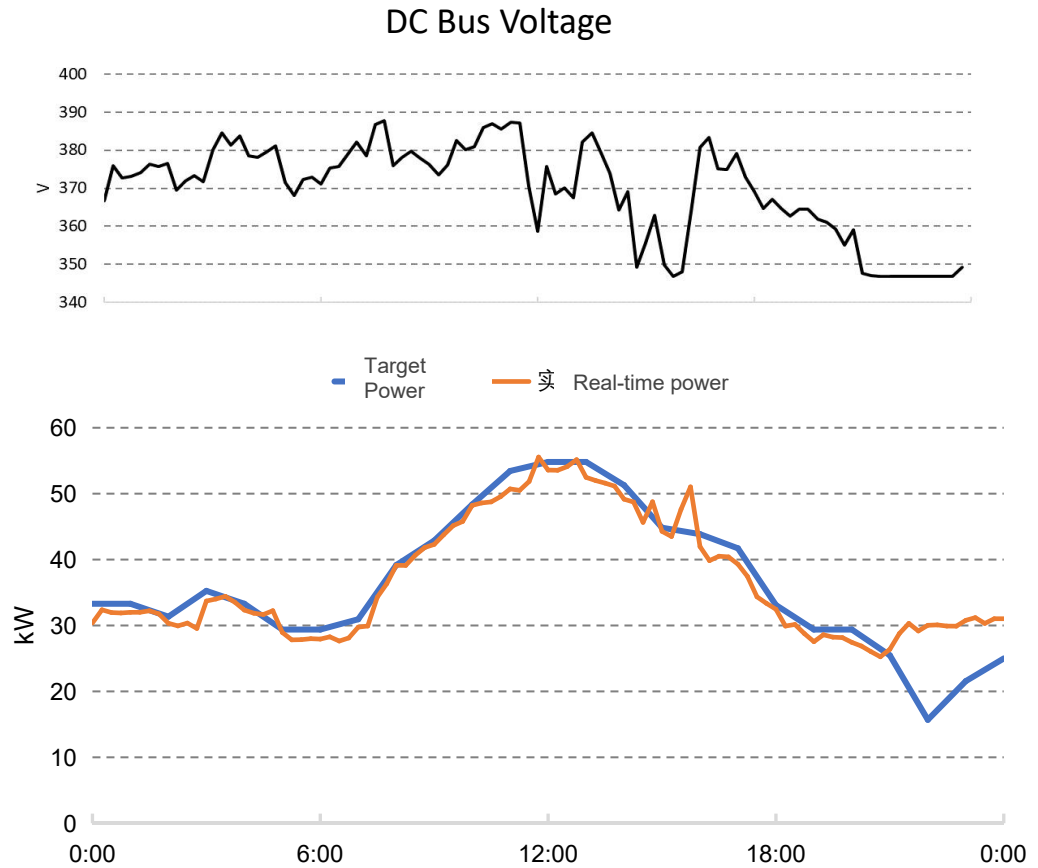
# 基于直流母线电压调控的有序充电桩

- 根据电池内电量SOC和直流母线电压决定充/放电和功率
  - 当直流母线电压高于设定值上限时，开始充电
  - 充电功率由电压偏高程度和电池电量SOC决定，电压高、电量低则充电功率大，否则充电功率小
  - 当直流母线电压低于设定值下限时，停止充电，在允许双向充放电时，电量偏高的车辆则开始向建筑放电
  - 放电功率与电池电量SOC决定，电量多则放电功率大
- 优化充放电功率，承担部分储能，但并不影响电池寿命
- 接入建筑配电网，满足建筑用电需求，并不向外网送电
- 系统与车辆相互协调，汽车电池为电力系统做出贡献，不能计量电量、按照电量进行复杂的计价收费，而应实行“会员制”，收取年费后全年免费充电，或计入停车费中



# 深圳光储直柔示范建筑的运行数据

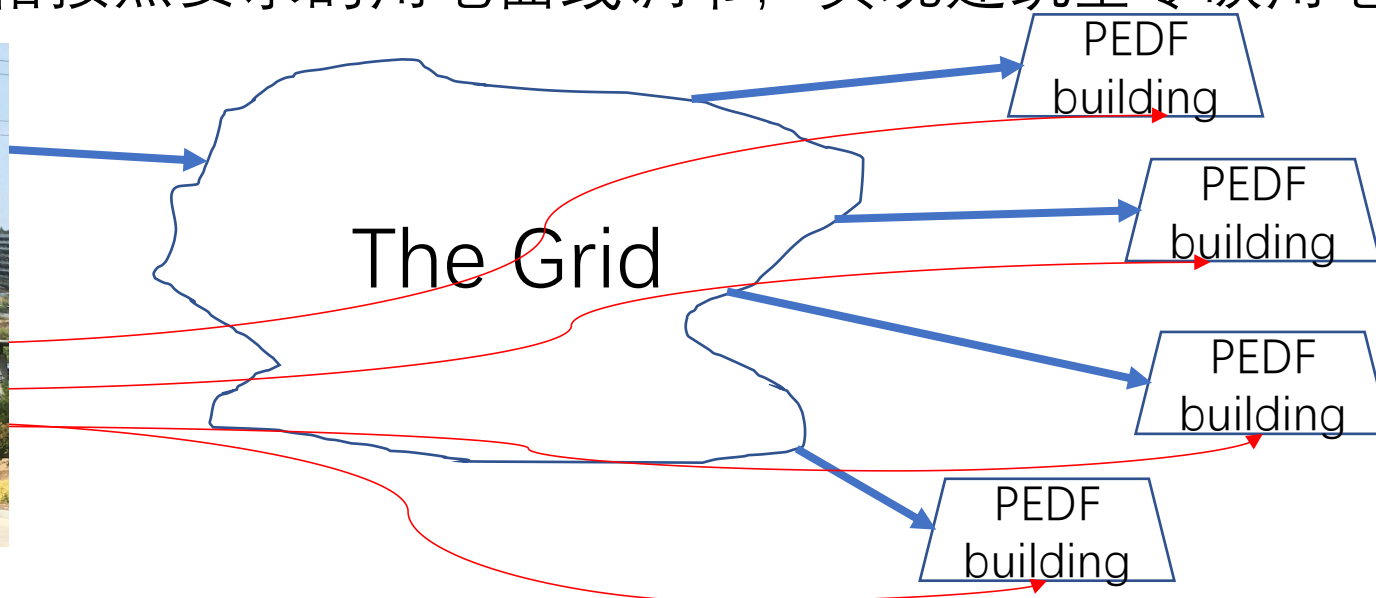
- 直流母线设计电压：375V
- 分布式电池容量：200kWh
- 充电桩：没有车辆连接



- 引自深圳建科院郝斌的PPT: PEDF – Future or Reality, 2021. 08. 31

# 光储直柔建筑可以仅依靠零碳电力运行

- 在百公里内有风电、光电基地
- 每晚向风电光电控制中心提交第二天的总用电量和负载用电曲线
- 控制中心根据气象预报得到风电光电的变化，确定各个建筑第二天用电曲线，使风电光电有效消纳，而各座建筑蓄能调节量最小
- 各座光储直柔建筑严格按照要求的用电曲线调节，实现建筑全零碳用电



# 城镇“光储直柔”配电+有序充电的作用

---

- 十四五每年新增1~1.5亿kW风电光电，新增300~500万辆电动车
- 如何有效消纳风电光电，如何为电动汽车提供充电服务？
- 如果每年新增5亿~10亿平米“光储直柔”建筑及配套的有序充电桩，每年可增加0.5~1亿kW的风电光电消纳能力，并解决500万辆电动汽车充电需要
- 十五五开始，对既有建筑改造同时完成“光储直柔”，每年10~15亿平米改造量，即可满足风电光电和电动汽车持续增长的需要
- 未来城镇300亿平米居住建筑、100亿平米办公建筑和学校，若成为光储直柔，即可消纳30亿kW风电光电，并支撑2.5亿辆私人电动汽车
- 上述“光储直柔”建筑+电动汽车用电3万亿kWh，可有效消纳自身和外部风电光电，电动汽车在用电高峰期放电仅为建筑或建筑群供电，并不进入大电网





# 农村“光储直柔”系统

- 主要功能

- 充分开发利用农村各类闲置屋顶资源，发展光伏发电，每户装机约20kW
- 每户屋顶发电量可满足农户生活（包括炊事、采暖）、农机具、交通等全部用能，尚可剩余1/3左右电力输出，村里公用和送电上网
- 整村实现全面电气化，取消燃煤、燃气、燃油、生物质燃料，恢复蓝天

- 融资模式

- 户内直流微网和光伏投资：6~8万元/户，可通过低息贷款解决，产权归房主，发挥户主的积极性，配合安装、维护，并能根据光伏变化调整用电模式
- 户内用电免费，尚可输出15MWh/户左右的电力，收入6000元/户，还本付息
- 村内公共部分可由企业投资建设和运行，每百户投资约300~400万，通过为公共设施和装备供电和利用储能和灵活用电调蓄，可解决运行维护管理费，
- 有关部门可否提供村级直流微网初投资？1000万/村，每年1万个村，1000亿

- 目前状况

- 在山西芮城准备在全县300个村庄，5万农户中推广
- 年底将完成庄上村全村的直流微网建设和全村100户农户户内改造

# 农村的“光储直柔”系统

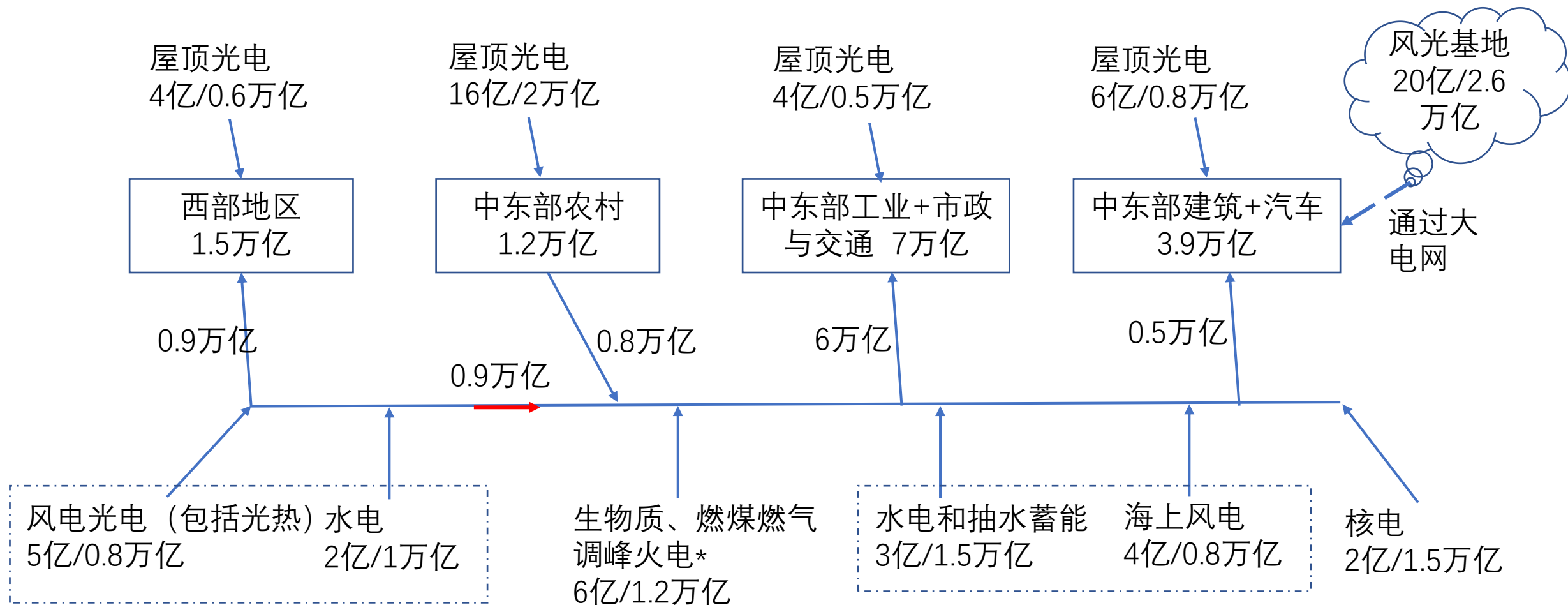
---

- 必须解决大量空置房处置问题，可否开发其屋顶资源，并研究空置房的综合利用？
- 配电网和变压器容量是目前开发农村屋顶光伏的最大障碍，采用光储直柔方式，优先当地使用，剩余电力经调整后才上网送电，可有效解决电力系统上网容量不足的问题
- 农村具有更多的可实现灵活用电和需求侧响应用电模式的负载
  - 接近40%的负载是各类车辆蓄电池
  - 多数农业生产（水泵浇灌）和农副业加工可根据光电状况调整
  - 对电力供应的可靠性要求远低于城市
- 应积极发展各类电动农机具，实现“油改电”，支持农村的能源革命

# 未来的零碳电力

功率kW/电量kWh

或 电量kWh



注\*: 采用CCUS回收生物质、燃煤和燃气调峰火电排放的CO2 8亿吨, 剩余排放量小于生物质燃料排放量

# 新型电力系统建设面对的重要技术变革

- 电力系统面对革命性变化：
  - 电力生产：由集中式 转变为 集中与分布相结合
  - 电力输送：由自上而下单向 转变为 分布电源、分层平衡、互通有无
  - 电力调节：由源随荷变 转为 荷随源变，终端蓄能和需求侧响应
  - 电网稳定：由源侧调频调压 转为 末端分布蓄电、负荷侧自调节
  - 供电可靠：由源侧全部承担 转为 源侧和终端分担
  - 供电成本：不同工况下 成本 将有巨大差别，风光电直接供应/蓄能供应
  - 用电方式和用电文化：从简单的购买电力 转为 参与和互动
  - 由此需要相关政策、机制、体制 的革命性变化
- 农村的分布式直流微网在上述技术、政策、文化各方面探索、先行
- 城市的“光储直柔”、充电桩建设和有序充电，也是电力革命的试水

# 结论

---

- 实现碳中和，新型电力系统应先行，蓄能调节是瓶颈
- “光储直柔”建筑配电+有序充电桩网络，与电动车发展配合，可有效消纳风电光电，解决70%以上的电力蓄能调节问题
- 农村可先行一步，发展以屋顶光伏为基础的新能源系统，实现全面电气化，告别燃煤燃气燃油和秸秆，并为电网提供剩余电力
- 应大力发展各类电气化农机具，全面实行“油改电”
- 新型电力系统可先在农村实行，摸索技术、政策、机制等经验
- 中国的能源革命和低碳发展路线：
  - 先电力、再其它；先农村、再城市；先建筑和交通，再工业生产

# 谢谢

---

jiangyi@tsinghua.edu.cn