中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

电力系统发展趋势和科研案例

汇报人：袁亮

中南大学 电气工程系 / 电力电子与可再生能源研究所

2025年7月

研究所简介

中南大学电力电子与可再生能源研究所成立于2004年，依托于**电力电子装备与电力电子化电力网络湖南省重点实验室**，从事电力电子与电力系统的基础理论和应用技术研究，实现产-学-研-用的紧密结合，为**装备企业、电网公司、政策机构**提供高科技产品和技术服务。

基金项目

近五年，主持国家重点研发计划、国家自然科学基金项目、湖南省揭榜挂帅重大科技项目以及横向项目等合计**90余**项，总经费超过**1亿**

学术成果

学术论文：国际知名 SCI 期刊论文**280余篇**，其中在**IEEE Transactions**汇刊上发表**180余篇**(10篇1% ESI高被引)

专　　利：申请发明专利**270余件**，已授权发明专利**167件**，专利转化**超千万**

工程应用

权威部门测试：矩阵变换器，光伏微逆变器，并离网双模式高端逆变器等

多款产业化产品：中频电源、二合一老化测试电源，化成分容设备、板级电源等

学术奖励

湖南省人民政府**自然科学一等奖**1项

中国有色金属工业科学技术一等奖1项

教育部高等学校科学研究优秀成果奖-自然科学二等奖1项

研究所简介

人员情况

- **教师16人**：教授5人，副教授6人，讲师5人；博导9人，硕导4人；7人海外经历
- 研究生100余人，其中博士研究生20余人

负责人

粟梅 教授、博导

自动化学院副院长

国务院政府特殊津贴专家

IEEE Transactions on Power Electronics 副编辑

IEEE Transactions on Sustainable Energy 副编辑

国家863计划总体项目组首席专家

国家基金委信息科学部会评专家

中国自动化学会能源互联网专委会常务理事

湖南省电机工程学会副理事长

孙尧 教授、博导

电气系主任

国家杰出青年科学基金获得者

国家优秀青年科学基金获得者

湖南省科技创新领军人才

湖南省杰出青年基金获得者

袁亮个人简介

中南大学讲师、硕士生导师

澳大利亚新南威尔士大学博士

（导师：董朝阳教授）

电力电子装备与电力电子化电力网络湖南省重点实验室副主任

主要研究方向

- 新能源并网稳定性分析与致稳技术
- 负荷/新能源预测
- 综合能源系统优化调度

学术兼职与社会服务

- Energy Storage and Applications 期刊青年编委
- Energy Conversion and Economics 期刊青年专家委员
- Frontier in Electronics客座编辑
- 多个国际会议Special Session Chair

科研基础与荣誉

- **主持国家自然科学基金**青年项目、湖南省自然科学基金青年项目
- 参与国家自然科学基金、国家重点研发计划等纵向项目6项
- 发表/录用高水平学术论文30余篇（**第一/通讯作者12篇**）
- 授权中国/海外发明**专利6项**
- 多个国际**会议最佳论文奖**(2019 IEEE EI2/ 2024 CFEEE/ 2024 ICSCGE)
- 《上海交通大学学报》有突出贡献审稿专家

致谢

中南大学研究生宋啸宇、赵舒妍、谭才兴等准备了本报告的部分内容，特此致谢！

Contents·

目录

01 背景介绍

02 发展趋势

03 案例展示

04 结语展望

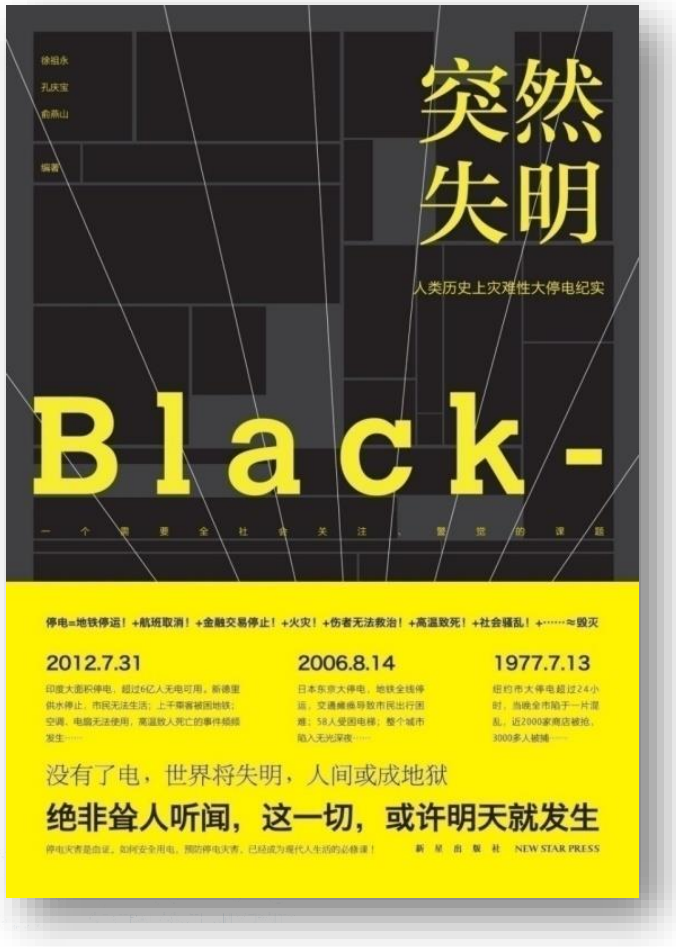
1.背景介绍 – 电力系统简史

Q：能源的形式有多种，为何电能得到偏爱？

- **1、洁净：** 保护环境（从使用的角度看
- **2、方便：** 输送、分配、使用（能量形式转化容易）
- **3、基础：** 电气化是实现机械化、自动化的基础，提高产品质量和效率
- **4、节能：** 能耗小，不同形式的能量间转换效率高

资料

1.背景介绍 – 电力系统简史



Q：现代社会，停电会怎样？？

- 医院、矿山、商业、金融、照明、交通、通讯、……、**社会混乱**！
- 美国8.14大停电使北美超过5000万人受到影响，美国政府将其**与911事件并提**。
- 没有了电，世界将失明、人间或成地狱！

突然失明:人类历史上灾难性大停电纪实.新星出版社，2013.

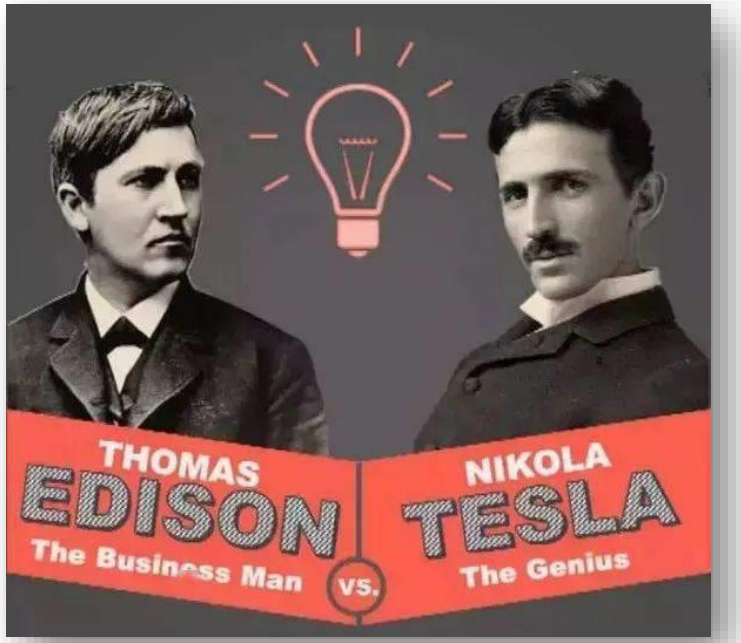
1.背景介绍 – 电力系统简史

Q：电力系统的发展历程?

◆1831年，法拉第发现了**电磁感应定律**

◆1882年，爱迪生在美国纽约构建了**第一座直流配电系统**

◆1886年，西屋公司发展**交流电力系统**



《电力之战》
2018年上映

◆1896年，尼亚加拉大瀑布水电站发电输送到20英里之外的布法罗，至此以威斯汀豪斯和**特斯拉为代表的交流派完胜了以爱迪生为代表的直流派**，第一轮交直流之争落下帷幕。

◆21世纪，与100多年前电力系统的雏形相比，现代电力系统不仅在输电电压、输送距离、输送功率等方面有了千百倍的增长，而且在电源构成、负荷成分等方面也有了很大变化。

1.背景介绍 – 我国电力系统的发展

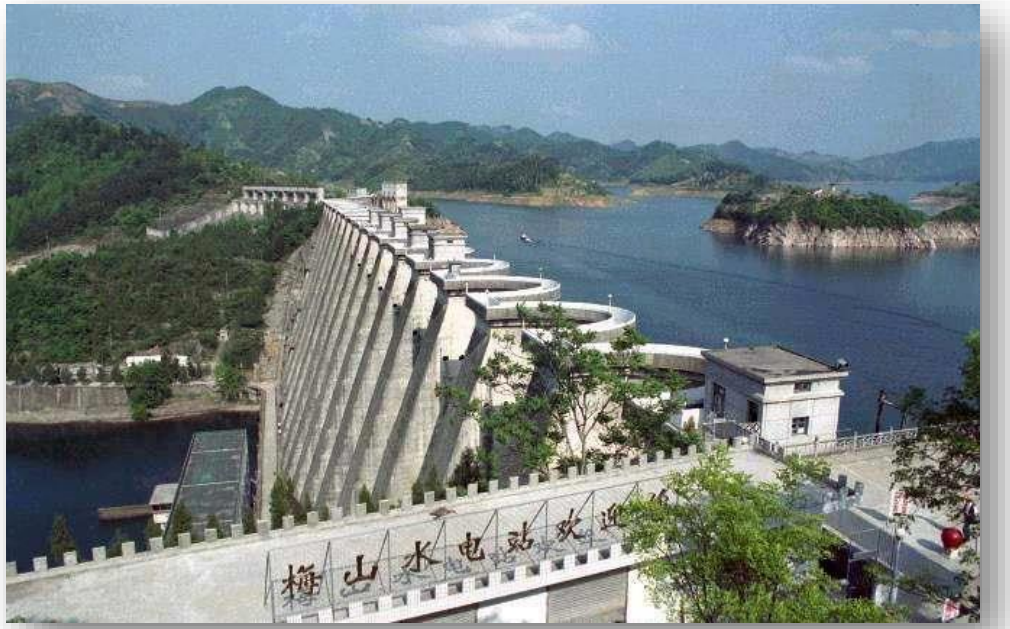
1.背景介绍 – 我国电力系统的发展

- 六大区域电网：东北、华北、华中、华东、西北、南方
- 西电东送、全国联网
- 华北–华中特高压交流同步电网
- 华北–华中–华东“三华”同步电网

1.背景介绍 – 电力系统的组成

◆火力发电厂

◆水利发电厂



1.背景介绍 – 电力系统的组成

◆风力发电厂

◆光伏发电厂

1.背景介绍 – 电力系统的组成

◆输电线路

◆变电站

1.背景介绍 – 电力系统的组成

发电

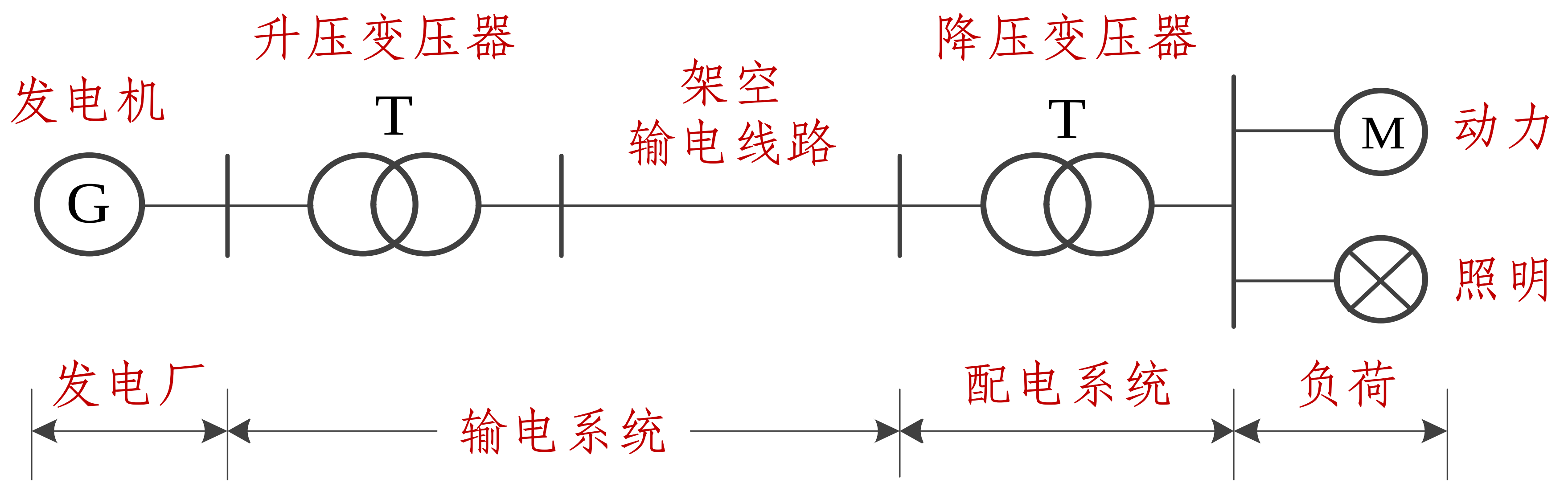
输电

配电

用电

Q： 如何准确、科学的给出电力系统的定义？

- 系统一词创成于英文system的音译。
- 钱学森给出的定义：系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的，具有特定功能的有机整体，而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。
- 发电机、变压器、输电线路及用电设备等组成的生产、输送、分配和消费电能的整体称为电力系统。



Contents.

目录

01 背景介绍

02 发展趋势

03 案例展示

04 结语展望

2. 发展趋势 – 什么是新型电力系统?

电气工业的时代背景：能源结构转型，构建新型电力系统

- 把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，如期实现“2060”双碳目标
- 推进能源系统电气化和电力系统低碳化，构建**以新能源为主体的新型电力系统**

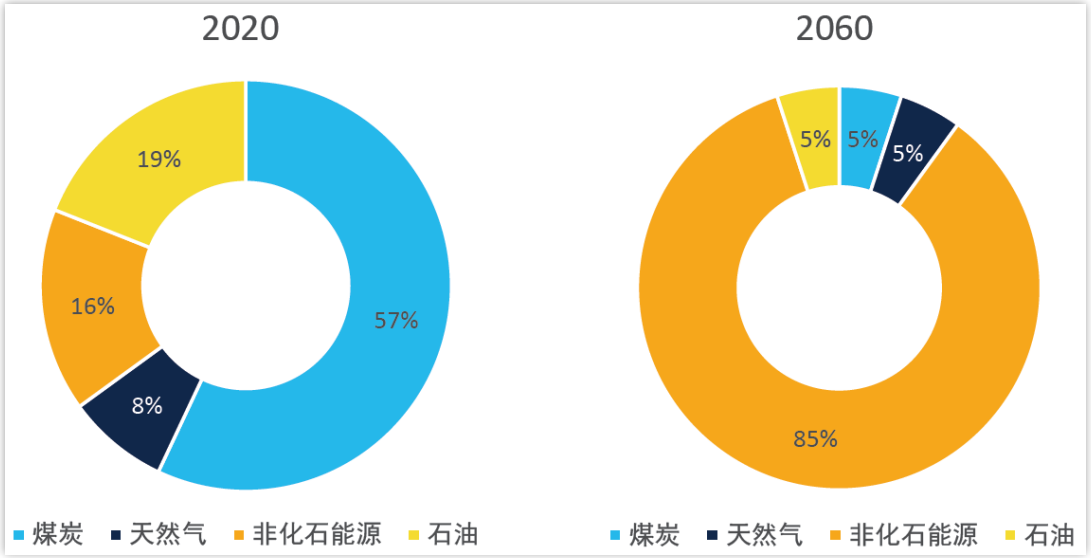


图 1 2020-2060 年能源消费结构变化

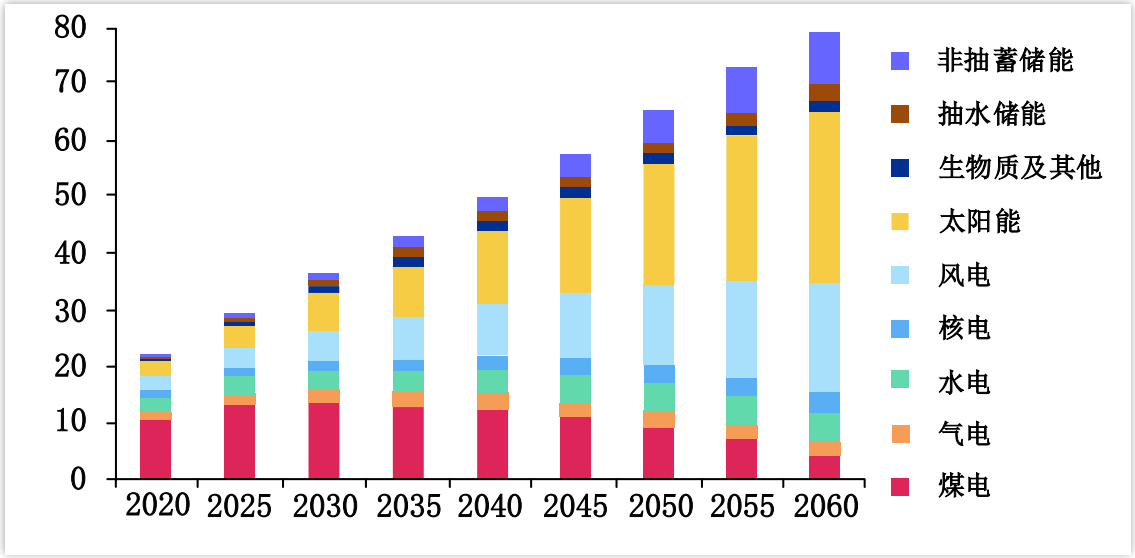
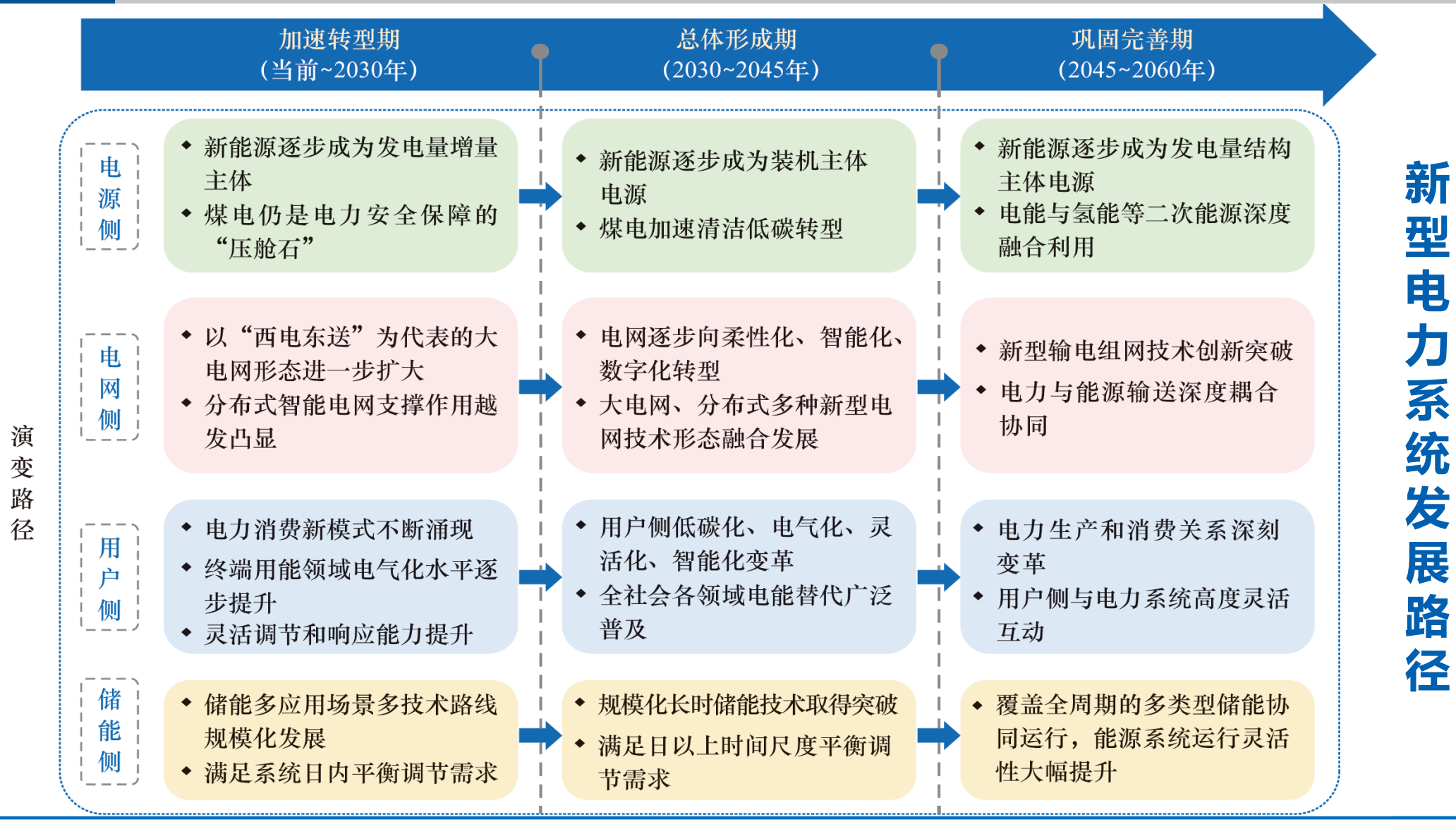


图 2 我国各类电源装机发展展望（单位：亿千瓦）

2. 发展趋势 – 新型电力系统发展路径



2. 发展趋势 – 新型电力系统形态特征转变

（1）从确定性系统转向不确定性系统。

- 随着波动性和间歇性的新能源在电源结构中占比持续增长，电力系统正加速从传统的**“源随荷动”**向**“源荷互动”**转变，以提升应对不确定性的能力。

火电
水电
核电

发电
（稳定、可控）

输电、变电、配电

用电
（随机、不可控、可预测）

调度

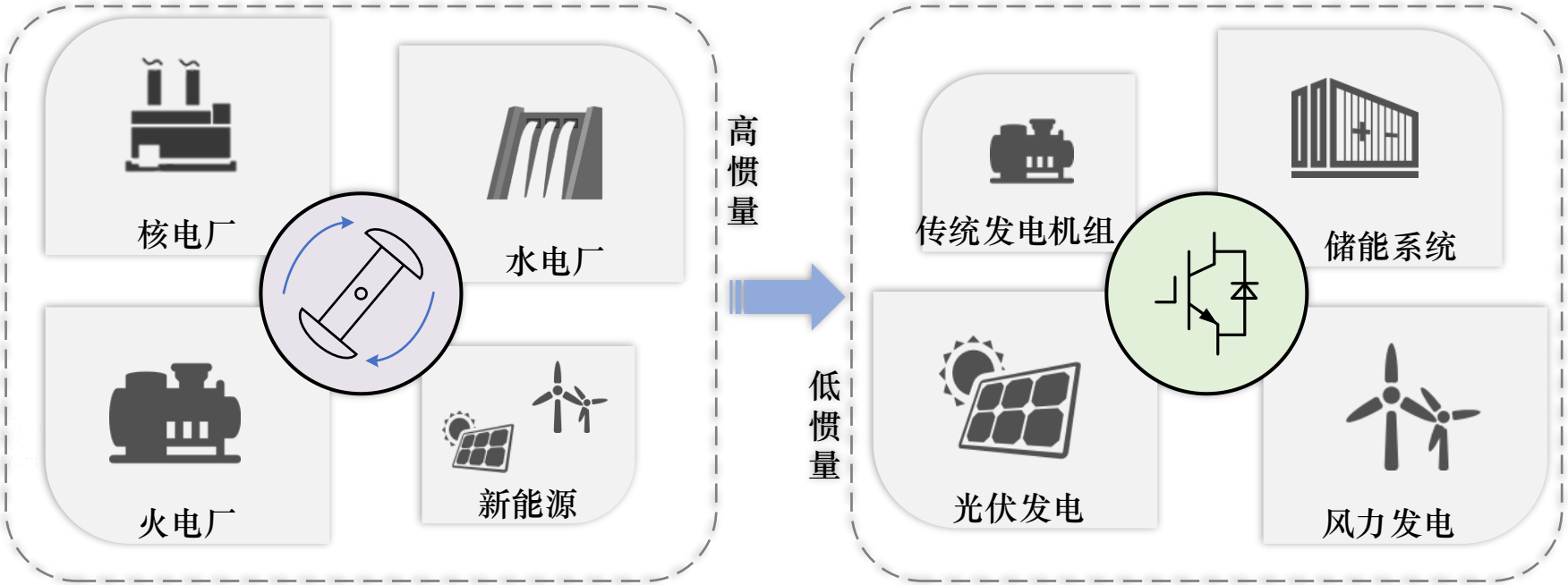
大型新能源基地并网

大规模风电、太阳能
（波动性和间歇性）

2. 发展趋势 – 新型电力系统形态特征转变

（2）从同步发电机主导转向换流器主导

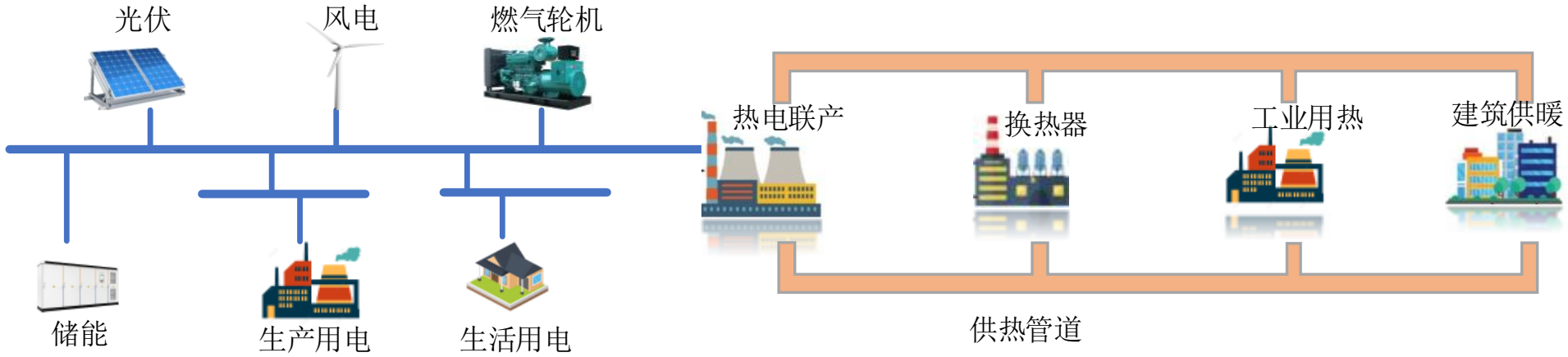
- 电力电子换流器是新型电力系统柔性电力变换的关键装备，广泛应用在发输配用各个环节。系统**同步运行机制**由**物理特性**主导转向**人为控制算法主导**。

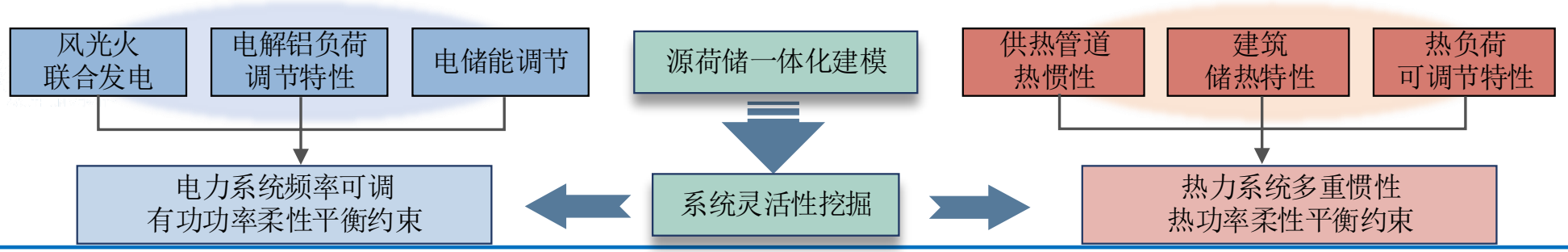


2. 发展趋势 – 新型电力系统形态特征转变

（3）从传统电力系统转向能源互联网

- 伴随电力系统的数字化与智能化转型，新型电力系统将转向以智能电网为核心、可再生能源为基础、互联网为纽带，实现**能源高效清洁利用的能源互联网**形态。





Contents.

目录

01 背景介绍

02 发展趋势

03 案例展示

04 结语展望

Contents.

目录

3.1 案例一:电力系统源荷预测

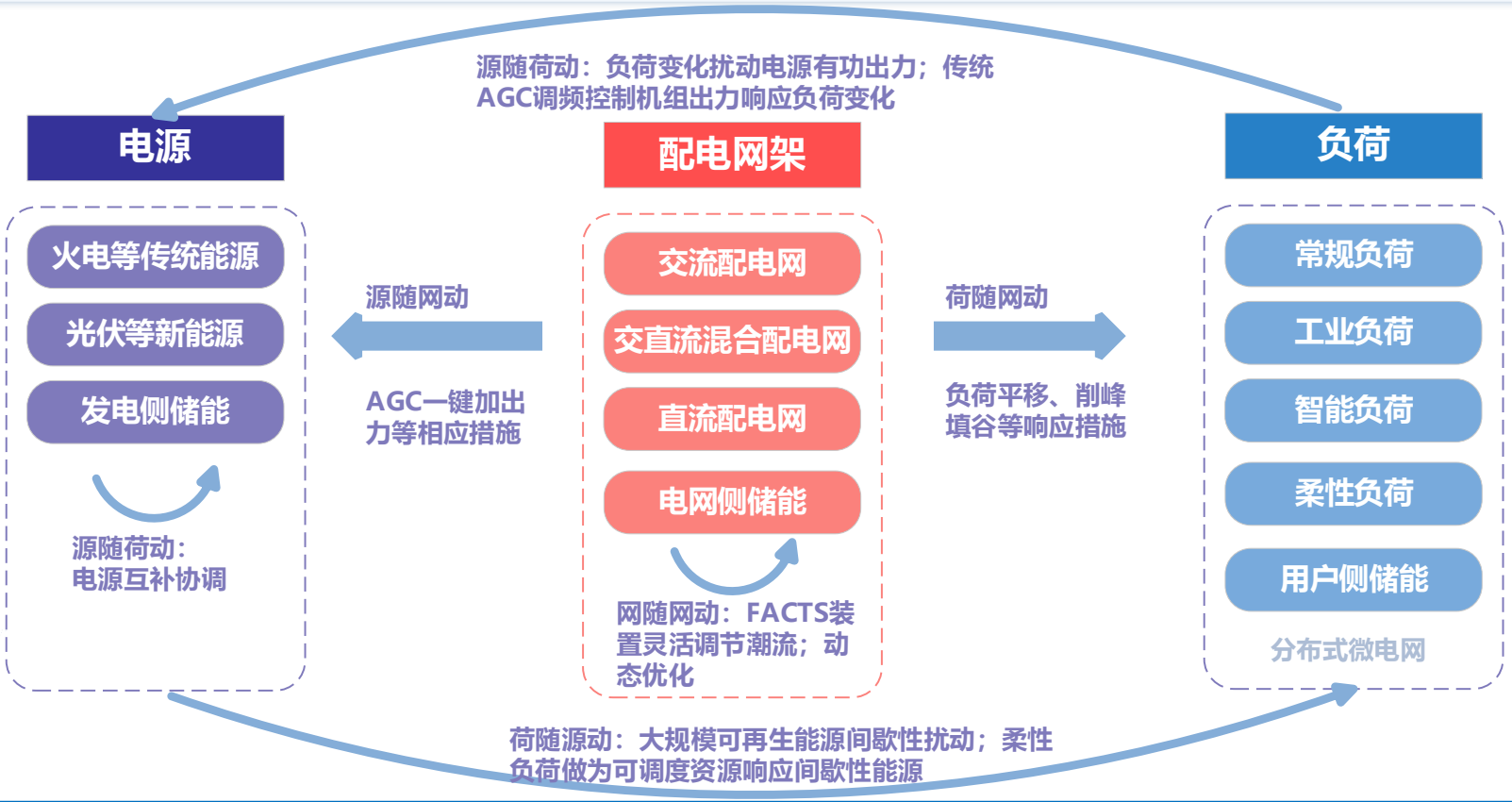
3.2 案例二:电力系统规划

3.3 案例三:电力系统调度

3.4 案例四:电力系统稳定分析

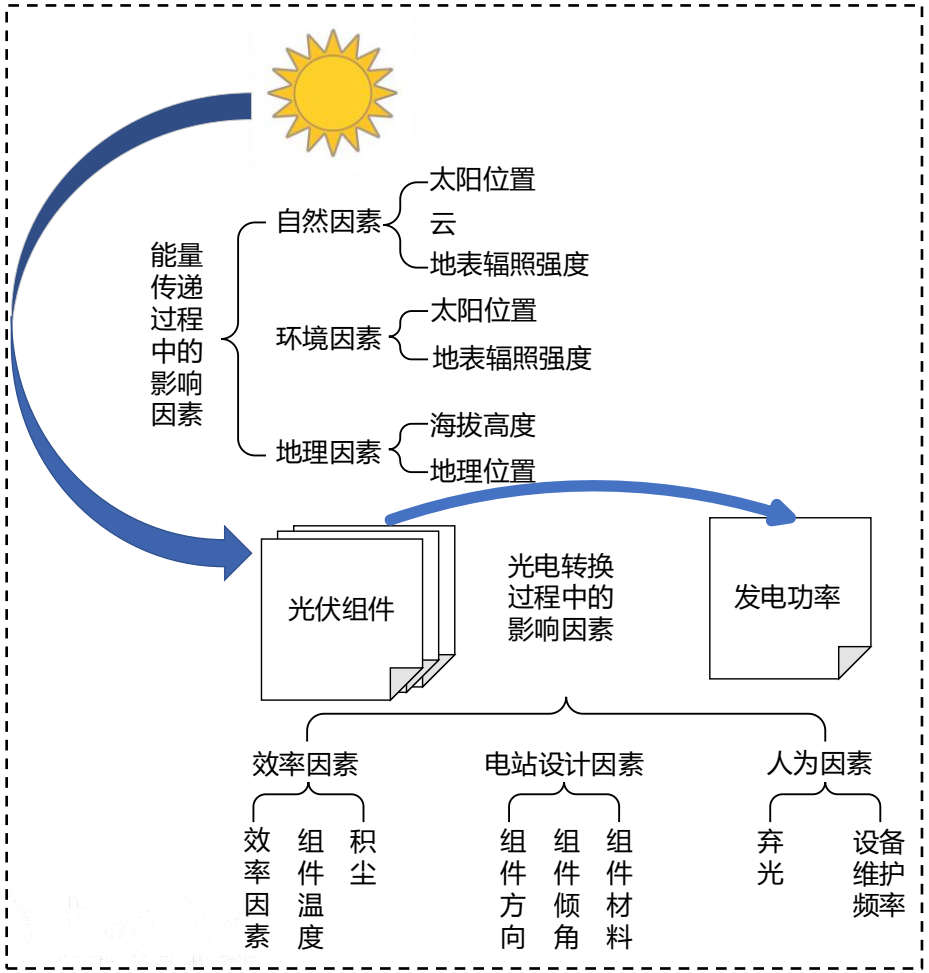
电力系统源荷预测 -- 研究背景

- 由“**源随荷动**”转变为“**源荷互动**”是新型电力系统的主要特征之一。
- 提高源荷预测精度，能提升资源利用率，适应大规模新能源消纳需求。

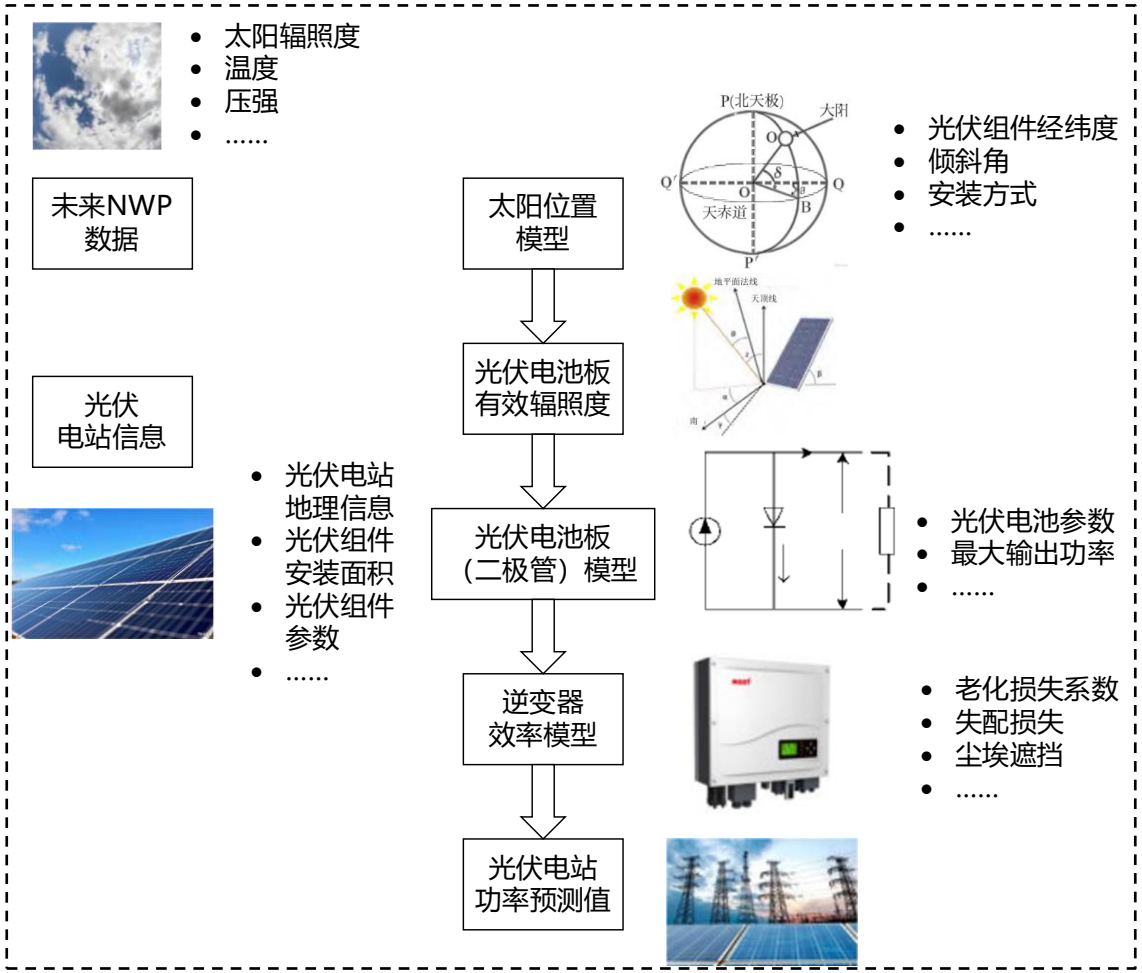


- 新能源功率预测指基于**历史数据**、**实时监测信息**及**气象预报**等多源数据，通过数学建模或机器学习算法，对未来一定时间内**风电、光伏等新能源**发电功率进行预测的过程。

- 预测框架涵盖数据层，模型层，场景层和应用层**四大层级**，支撑功率预测在实际场景中的多样化应用。

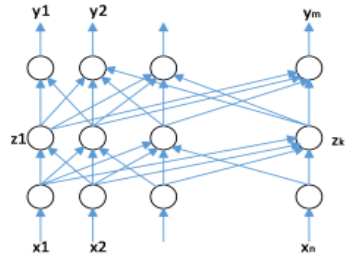


光伏功率影响因素



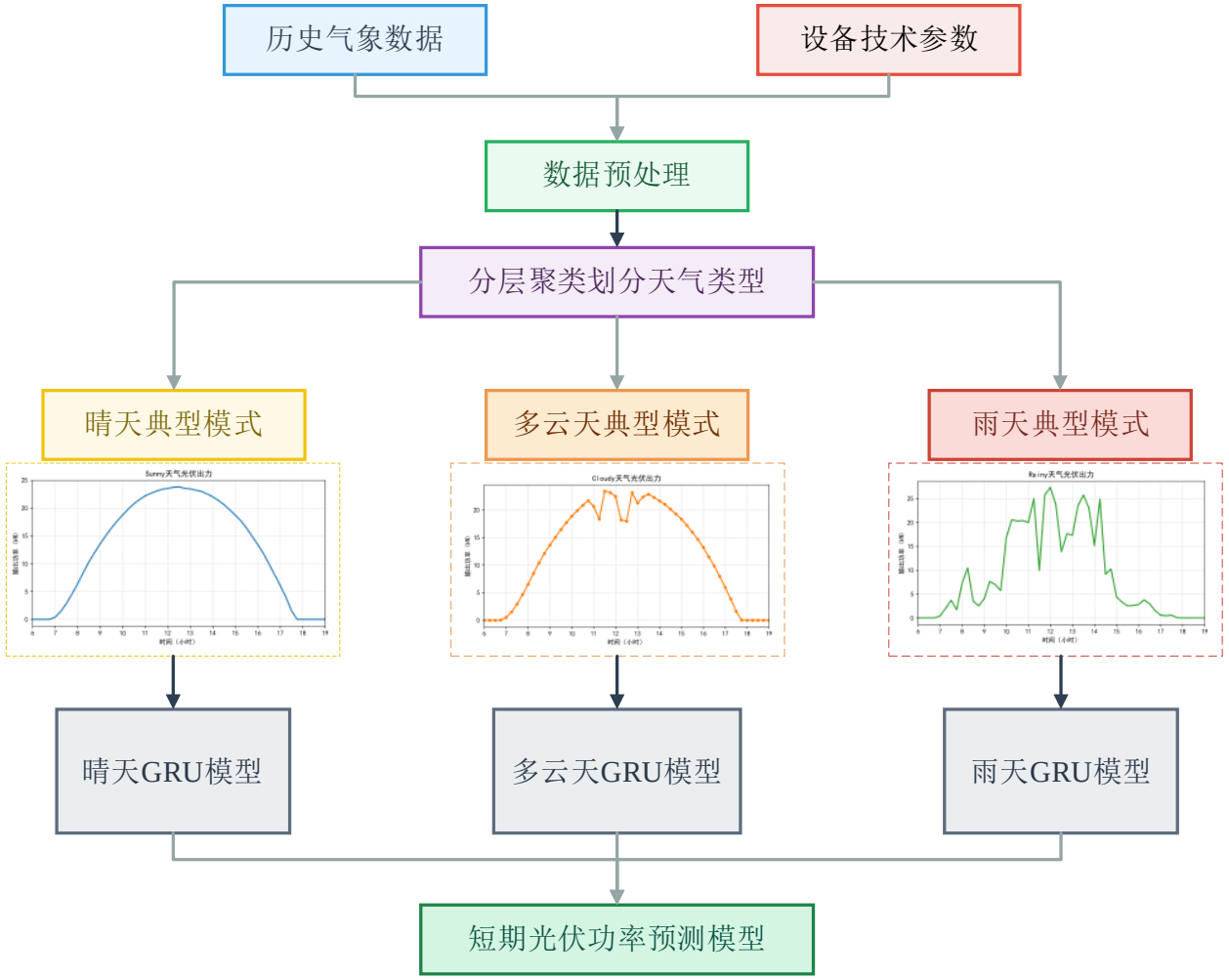
物理方法技术路线

光伏功率预测研究集中于短期预测和超短期预测，分别支撑日前与日内调度

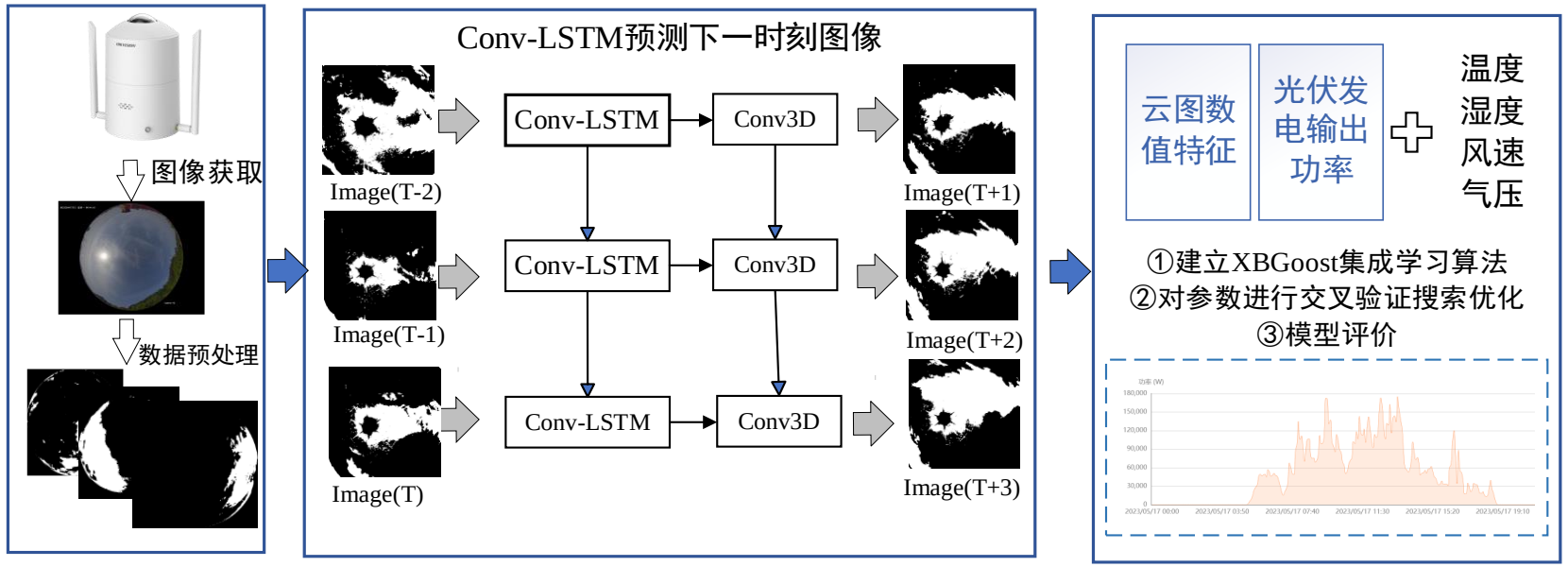
不同时间尺度	应用场景	技术路线
多时间尺度的光伏功率预测技术		
短期光伏功率预测 预测时长72h 颗粒度15min	日前调度 用于提前制定日前调度计划，提高系统经济性	深度学习模型 
超短期光伏功率预测 预测时长4h 颗粒度5min	日内调度 用于滚动制定日内调度计划，提高系统稳定性	地基云图

短期光伏功率预测

- 短期光伏功率预测的关键在于捕获一定时间范围内**光伏功率特性**和气象因素的**动态时空相关性**。
- 现有模型在特征选择、泛化能力、样本复杂度等方面存在一定局限性，如何**兼顾模型自适应性和高精度预测水平**，建立有效的短期光伏预测技术，是一个值得深入研究的课题。



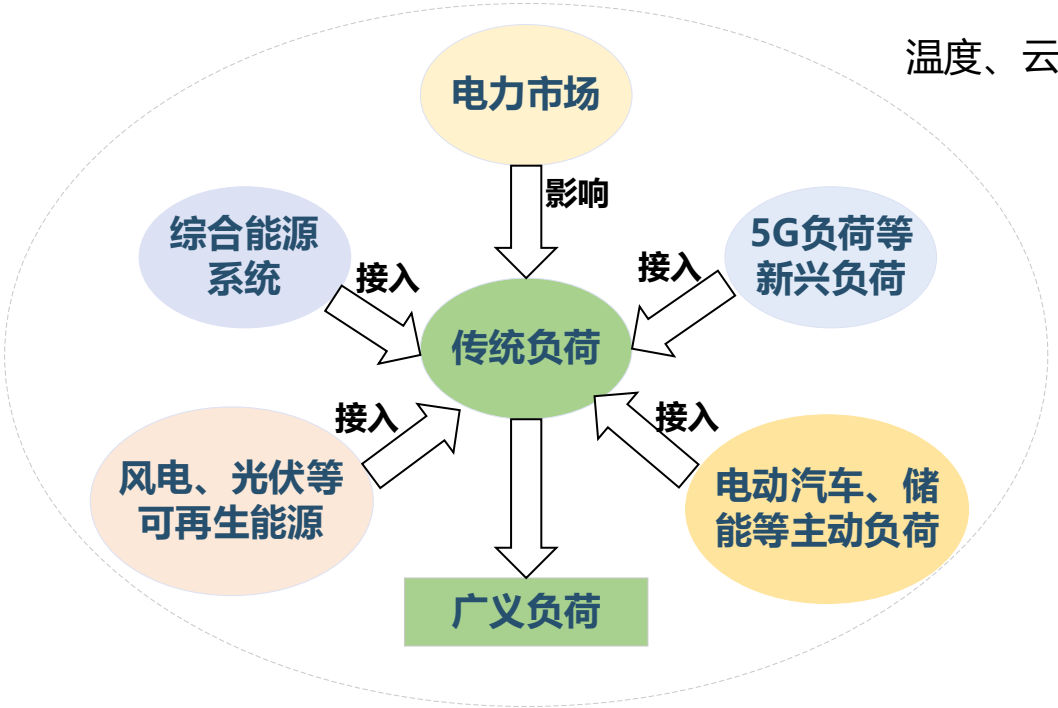
基于地基云图的光伏功率超短期预测整体框架

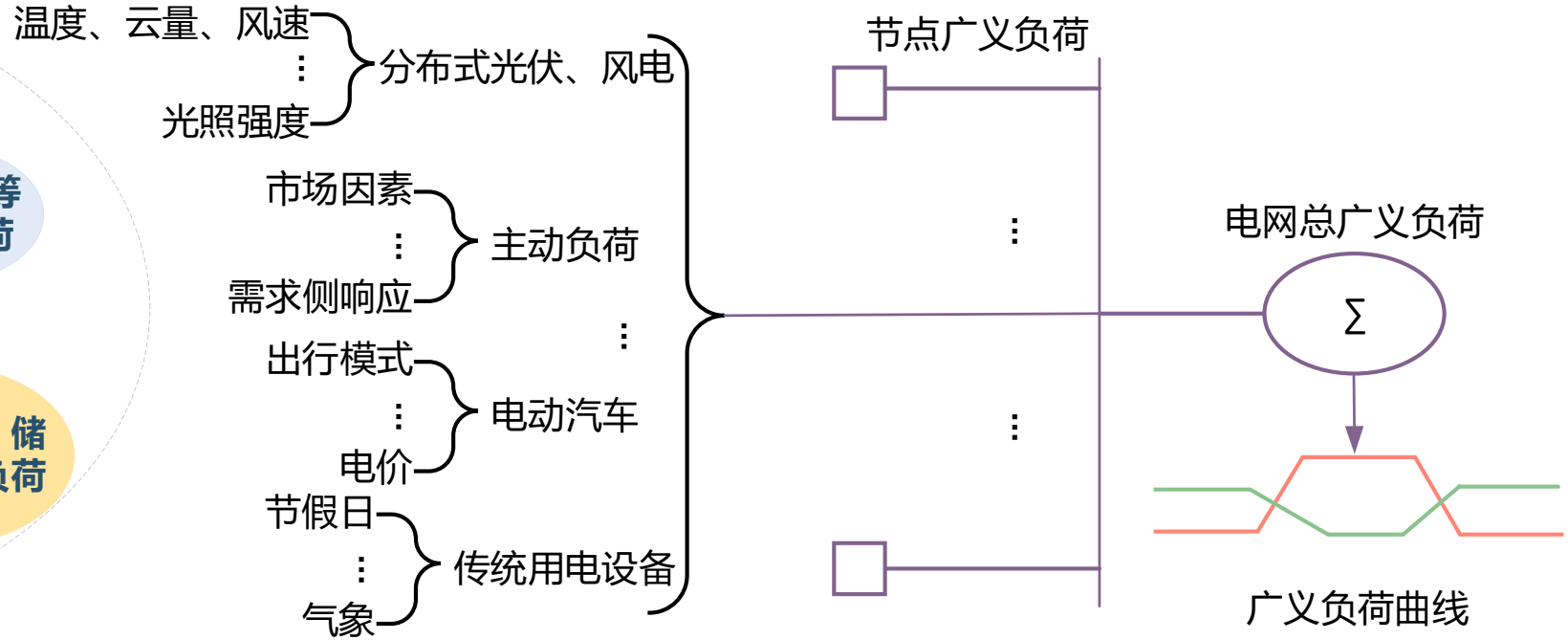


基于地基云图和ConvLSTM的云图预测网络 ✚ 基于XGBoost的超短期预测模型

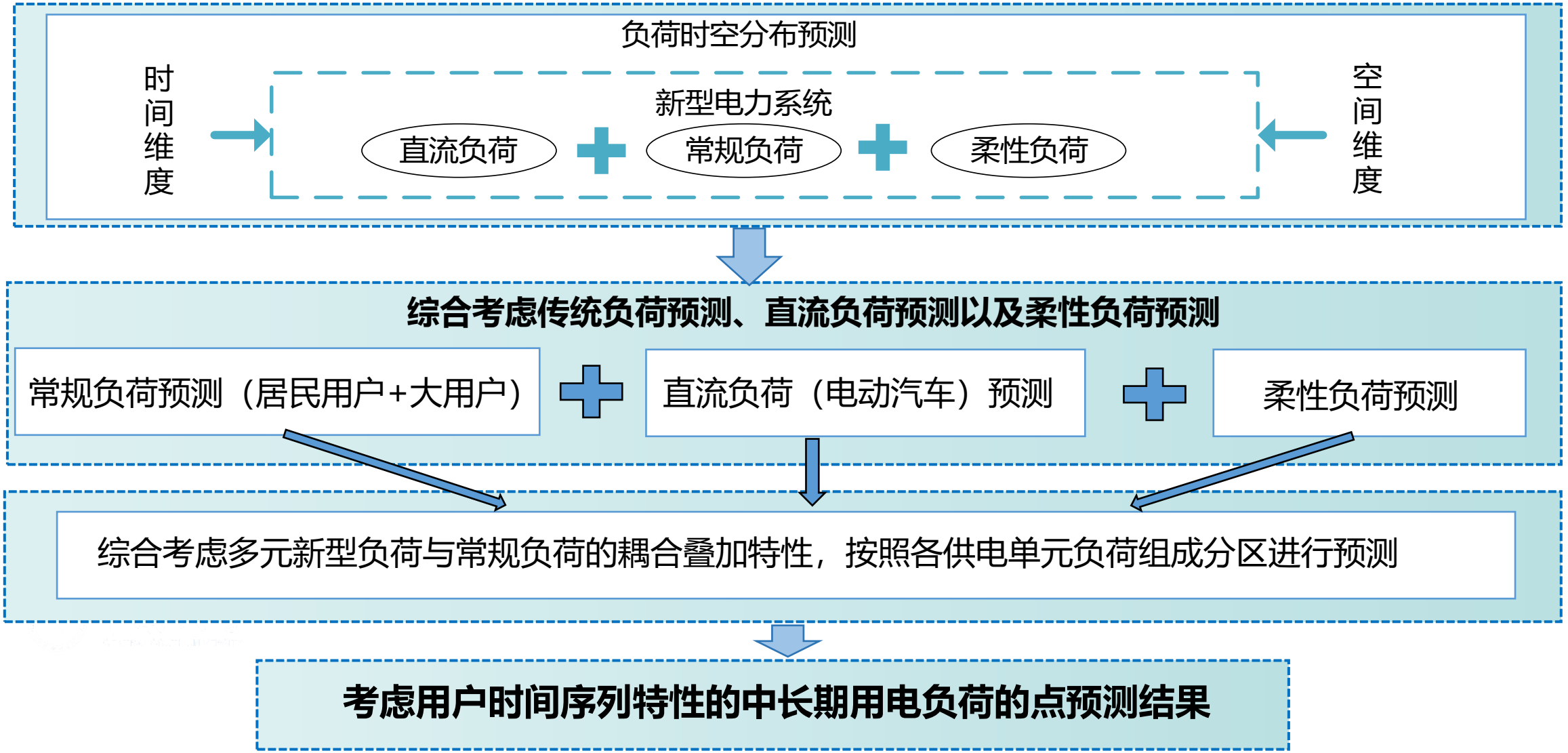
- 在极小的时间尺度内，**云层快速变化**是引起光伏功率剧烈波动的主要原因。
- 现有超短期光伏预测聚焦于**基于云图和实时数据法**，从专用设备上获得云图像信息，结合深度学习模型分析云团分布对未来辐照度的影响。

- 随着智能电网的发展，电力系统的节点既连接用电设备，又连接了主动负荷、分布式电源等设备，使节点负荷既有“负荷”特性，又有“电源”特性，称为**广义负荷**

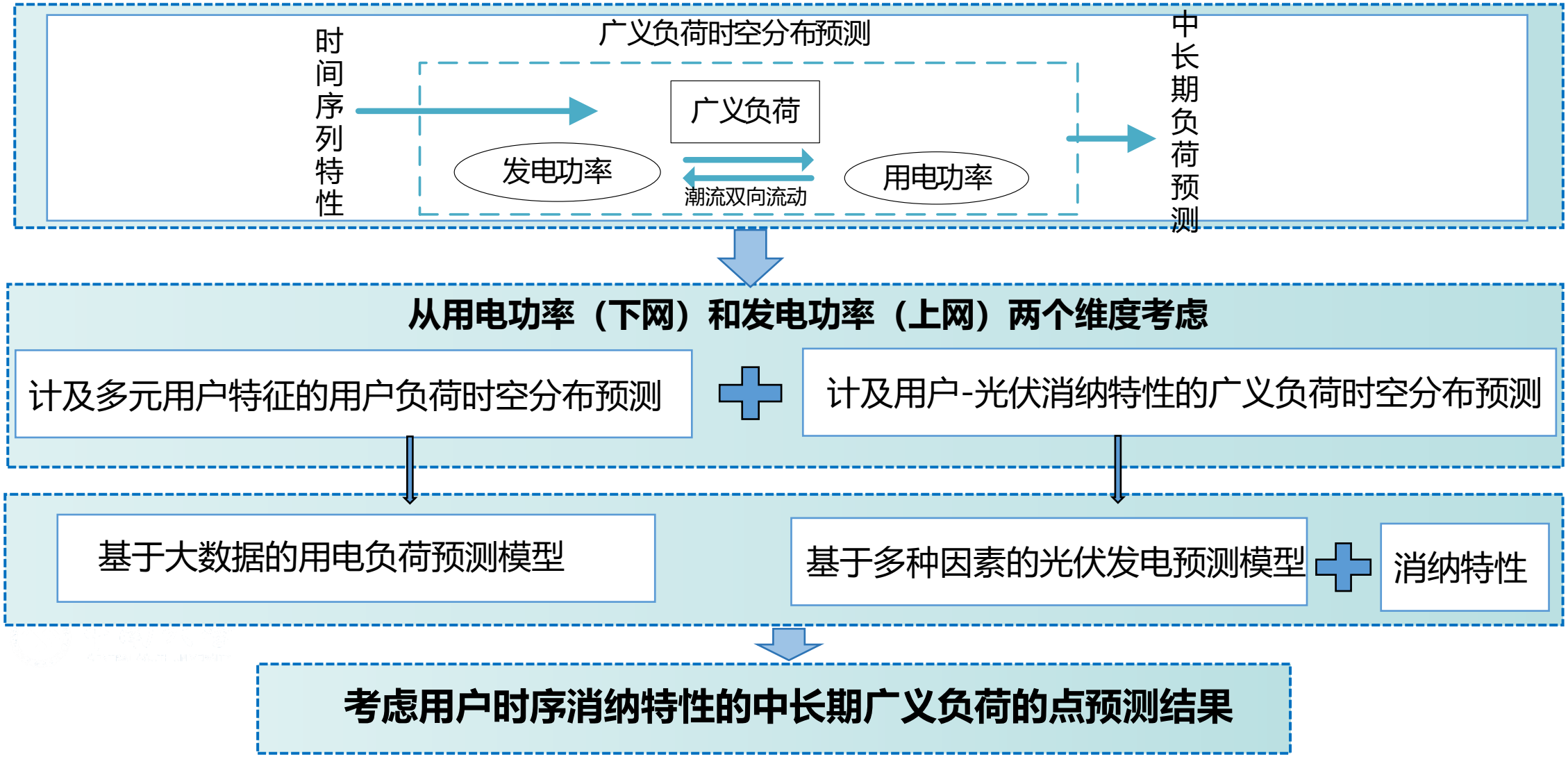




计及多元负荷特征的用户负荷时空分布预测



考虑用户时序消纳特性的中长期广义负荷预测



Contents.

目录

3.1 案例一:电力系统源荷预测

3.2 案例二:电力系统规划

3.3 案例三:电力系统调度

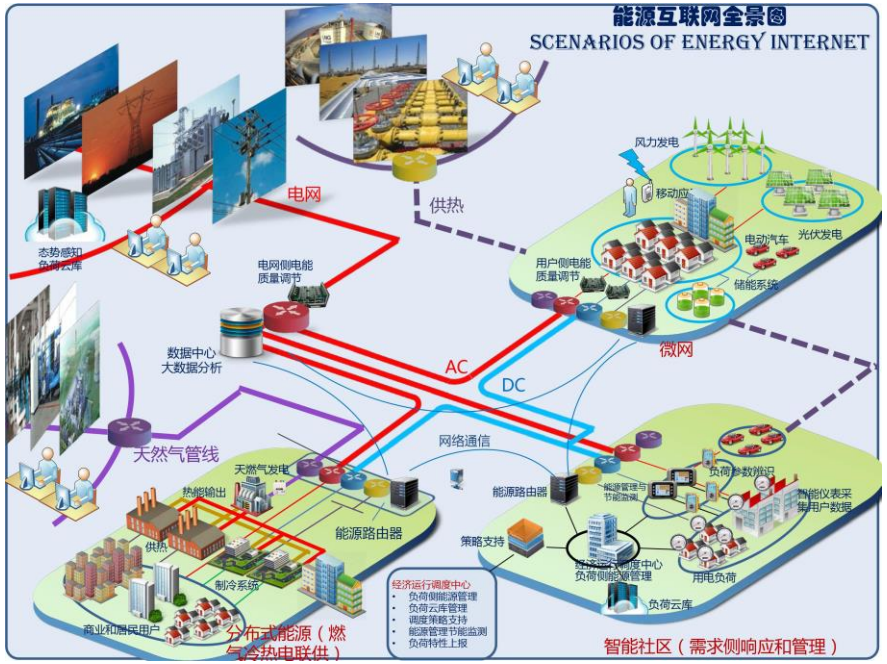
3.4 案例四:电力系统稳定分析

什么是电力系统规划?

- 基于长期负荷预测、能源政策及技术约束，对电力系统未来的**电源选址定容、网络构建及扩展、运行策略**等进行优化设计

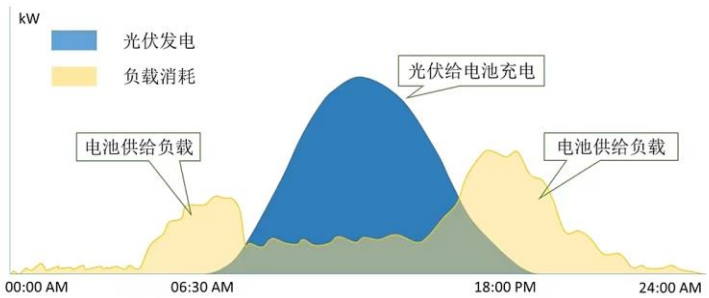
规划类型	时间尺度	实际应用案例
长期规划	10-30年	电源选址、主网架结构设计
中期规划	5-10年	变电站扩容、区域网络扩展
短期规划	1-5年	分布式电源接入方案

目标



电力系统规划：源网荷储协同规划

- 基于新型电力系统源-荷互动的特点，需要综合考虑安全-经济-绿色目标，构建源-网-荷-储协同的电力规划模型



源

多源互补
低碳电源组合优化

网

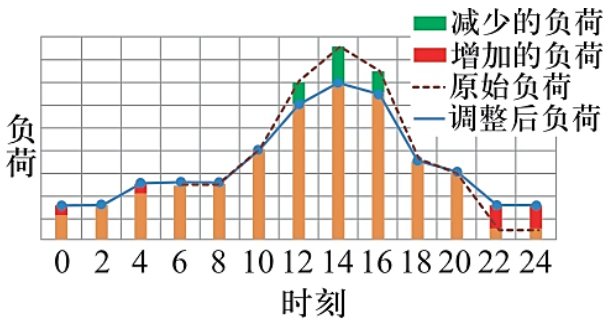
复杂电网约束
区域电力交互

储

长/短时间储能
源/网/荷侧储能

荷

需求响应
源荷互动



电力系统规划：双层优化模型

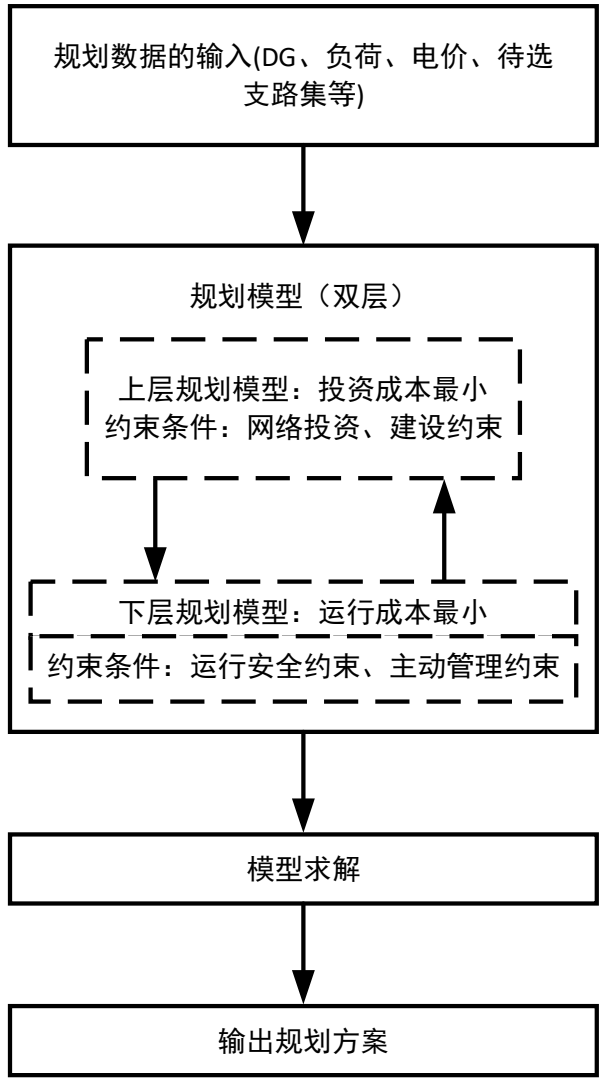
通过双层优化模型分别进行长期投资决策和短期运行模拟，从而协调投资成本与运行成本的全生命周期最优。

上层模型：规划层

确定电网/电源建设方案（*决策变量*：线路投运、机组类型/容量），追求投资成本最小。

下层模型：运行层

在给定规划方案下优化运行（*决策变量*：机组出力、潮流分布），追求运行成本最小，并将运行情况（如阻塞、弃风）反馈至上层



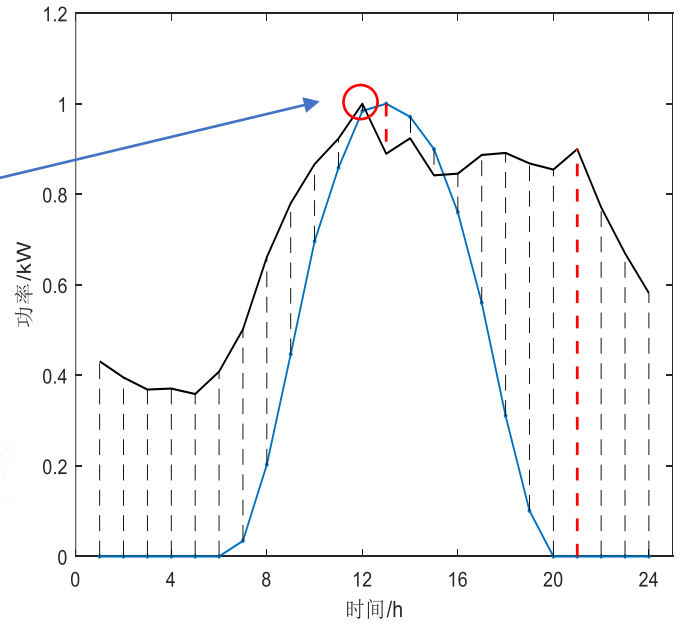
研究案例：考虑多状态的源网荷储协同配网规划

研究背景

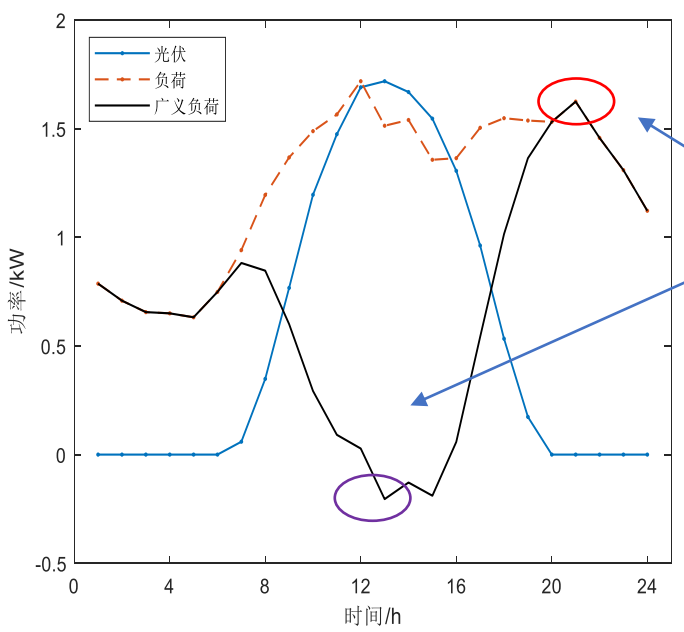
- 随着高比例分布式光伏的接入，配电网产生双向潮流。所以新型供配电网与传统配电网相比，需要**同时考虑分布式光伏、储能与负荷特性**，提取**典型场景**，以节点注入的**双向最大功率**来作为新型供配电网规划、运维的新型指标。

传统配电网：

以**中长期最大负荷预测**作为配电网规划、运维的一项重要指标



负荷与光伏的叠加



新型供配电网：

潮流方向由传统的单向流动变为了双向流动，由此提出**叠加分布式光伏**的配电网广义负荷场景

研究案例：考虑多状态的源网荷储协同配网规划

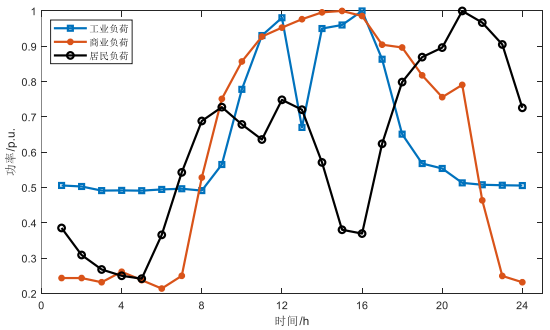
3.2 案例二

研究背景

- 新型配电网在源、网、荷、储均具备灵活多变的主动管理策略，需要从**协同优化**的角度考虑配电网规划问题，并兼顾配电网的**正常-紧急-保底**运行状态，以实现不同状态下配电网资源的最优化利用

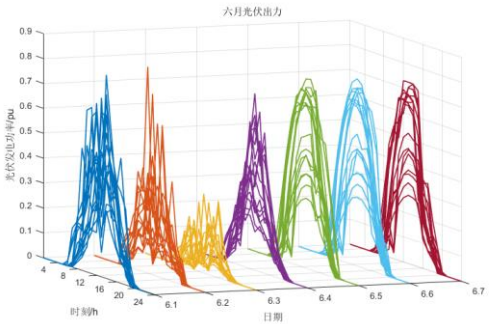
不同的用户类型

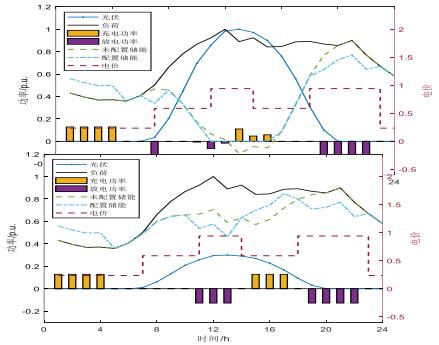
不同用户类型的差异化用能

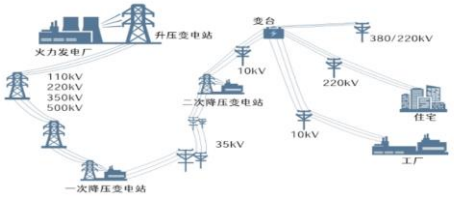


不同的源荷储配置比例

受气象、峰谷时段影响的差异化出力特性

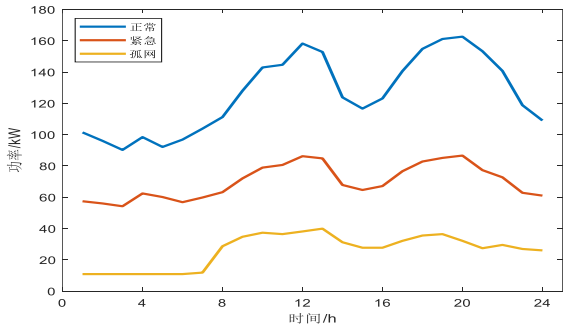






不同的运行状态

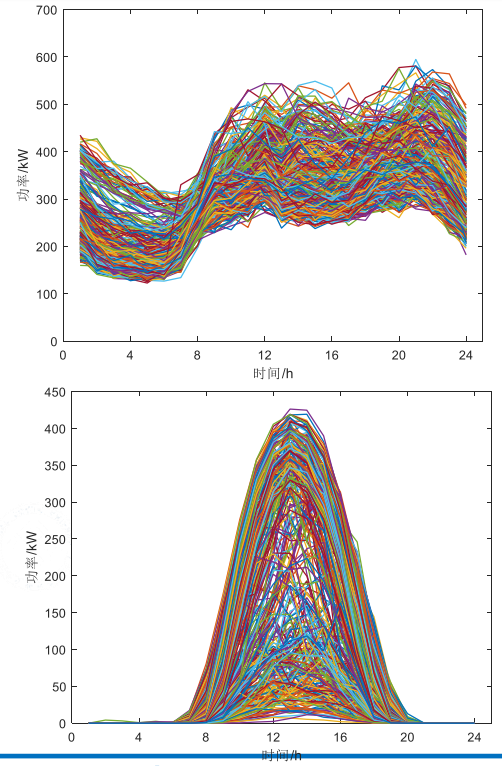
保供电负荷的改变



（1）配电网典型场景——负荷光伏数据

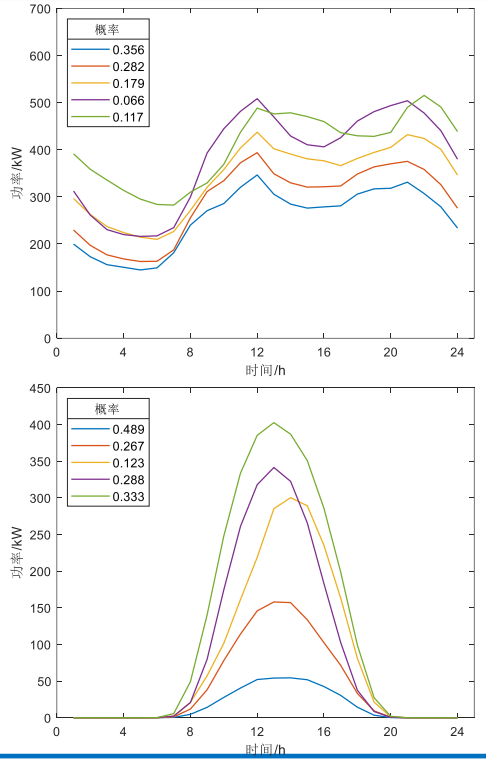
- 以宁乡某地区收集的数据为例，统计全年365天的负荷数据和光伏出力数据，通过K均值聚类的方法分别得到5类典型负荷曲线与光伏出力曲线，以及各曲线的概率，再对不同水平的负荷曲线与光伏出力曲线依次在时间序列下各采样点进行功率叠加，以此来得到筛选后的典型场景。

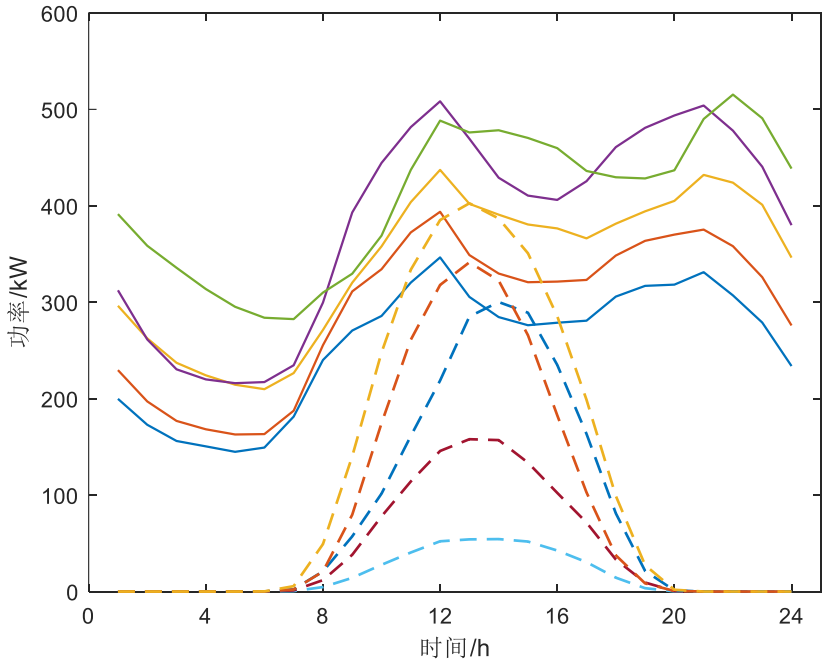
全年365天负荷及光伏数据



K-means聚类

聚类结果及概率





不同负荷水平及光伏出力水平叠加

（1）配电网典型场景——正常状态

- 由于当前配电网中分布式电储能的接入尚处于起步阶段，为预测受储能影响后典型场景的变化，综合考虑用户用电成本与储能充放电行为，建立配电网正常状态分布式储能充放电策略预测模型，由预测结果对**配置分布式电储能后的典型场景**进行分析。

目标函数

$$\min F=\sum_{t=1}^{24}(\max(P_{t,\text{load\_pure}},0)\cdot Ce_t+\min(P_{t,\text{load\_pure}},0)\cdot C_{up})+\omega\cdot\sum_{t=1}^{24}(Sgn(P_{t,\text{ch}})+Sgn(P_{t,\text{dis}}))$$

功率平衡约束

$$P_{t,\text{load\_pure}}=P_{t,\text{load}}+P_{t,\text{ch}}-P_{\text{PV}}-P_{t,\text{dis}}$$

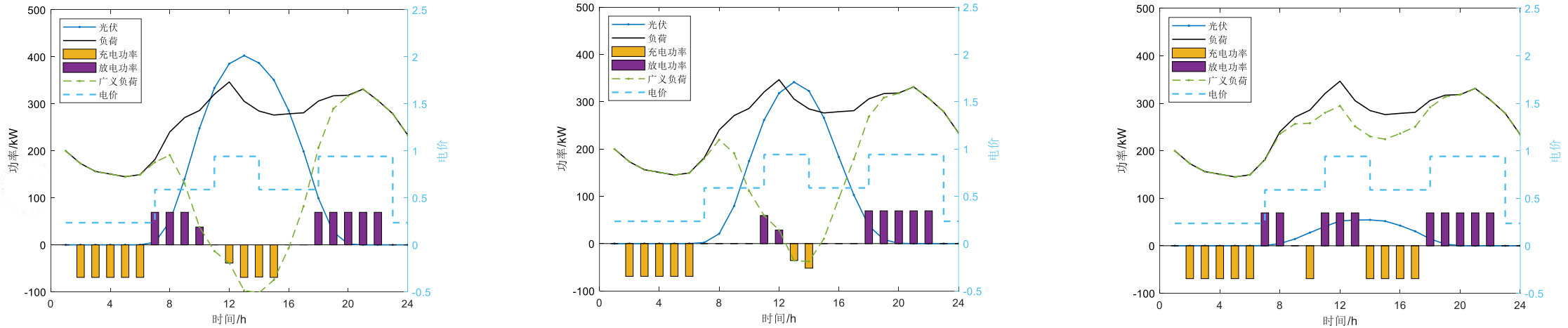
容量约束

$$E_{\min}\le E_t\le E_{\max}$$

储能充放电约束

$$\begin{cases}0\le P_{t,\text{ch}}\le P_{\max,\text{ch}}\\0\le P_{t,\text{dis}}\le P_{\max,\text{dis}}\\Sgn(P_{t,\text{ch}})+Sgn(P_{t,\text{dis}})\le 1\end{cases}$$

…

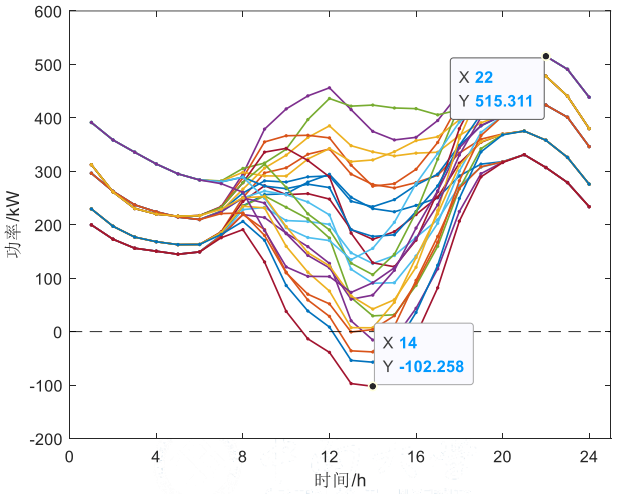


不同负荷和光伏类型下储能充放电策略对比

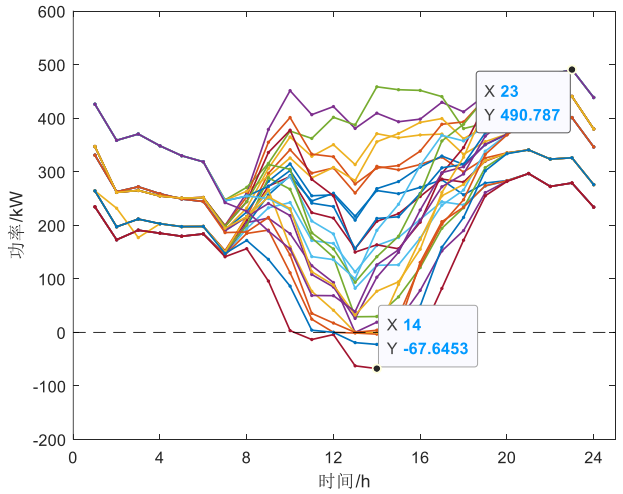
研究案例：考虑多状态的源网荷储协同配网规划

（1）配电网典型场景——正常状态

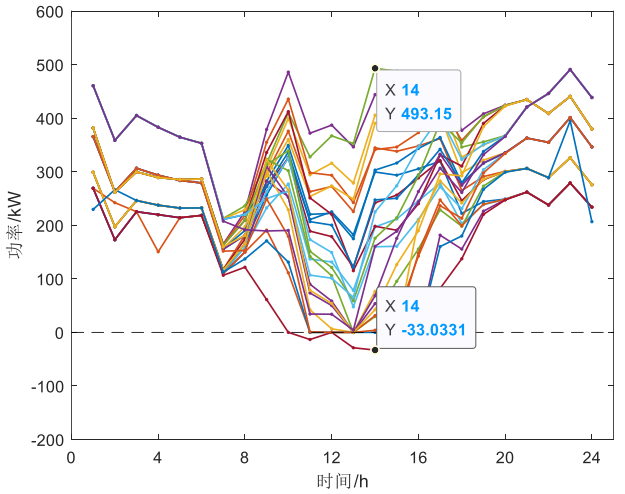
- 在正常状态下，叠加5类负荷曲线与光伏出力曲线，形成25类时间序列下的广义负荷曲线，并考虑配置传统负荷峰谷差10%、20%、30%比例的储能，提取不同配置比例下的最大下网功率与上网功率



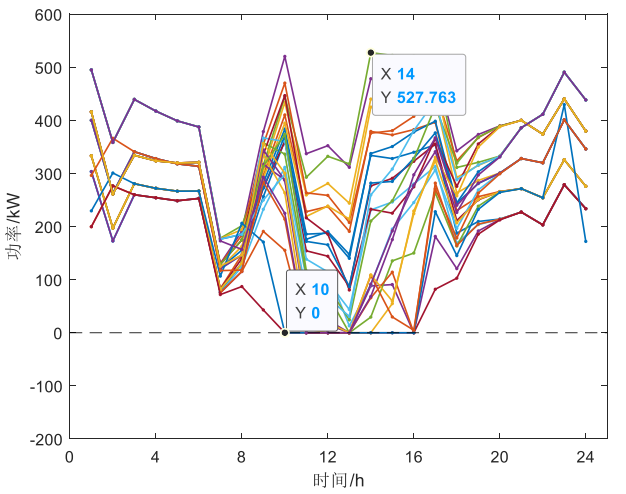
未配置储能



配置10%储能



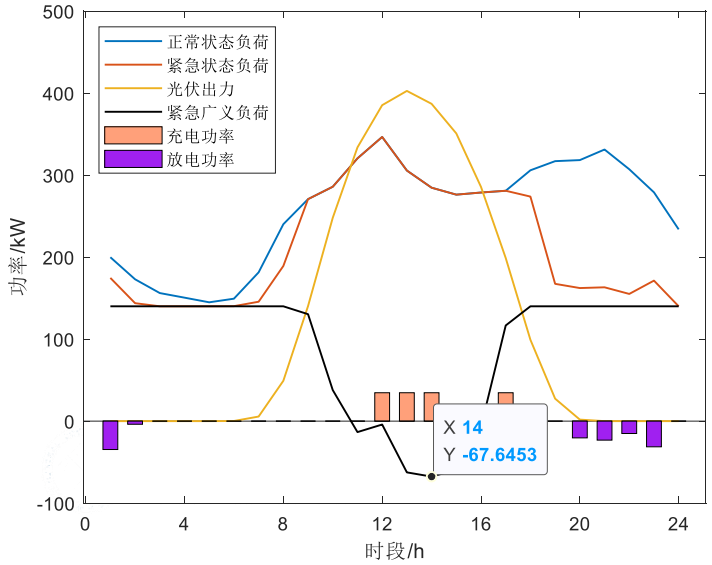
配置20%储能



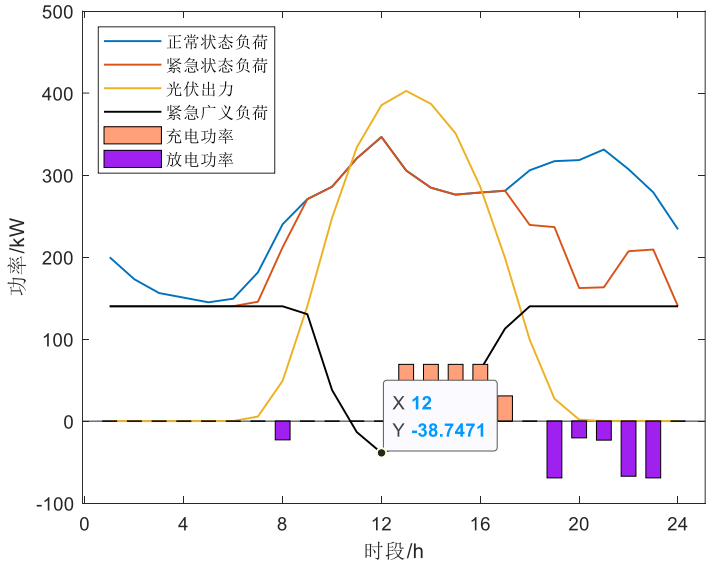
配置30%储能

（1）配电网典型场景——紧急-孤网状态

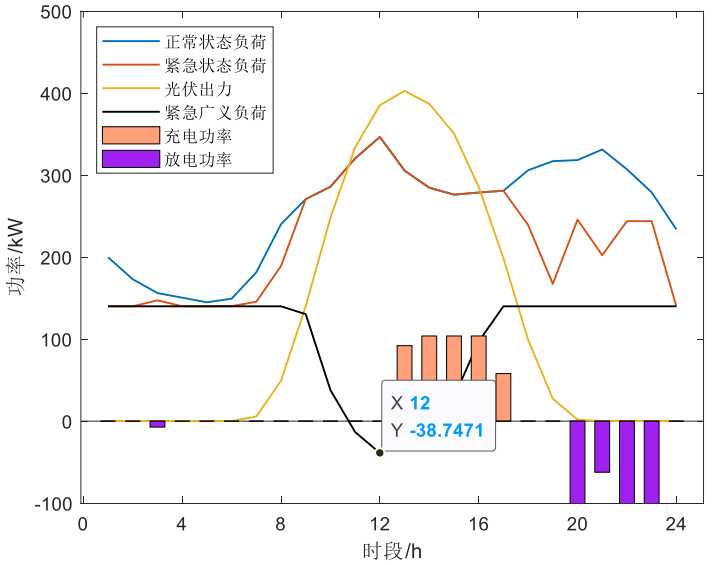
- 在紧急状态下，主网向配网供电功率受限，为满足紧急状态下的要求，需对典型场景进行分析。紧急状态主网下网功率与正常状态相比会有一定削减，所以只需考虑最大上网功率。孤网状态保供电负荷与正常状态相比会有一定程度的削减，且由于形成孤网，所以不需考虑最大下网功率与光伏上网。



配置10%储能



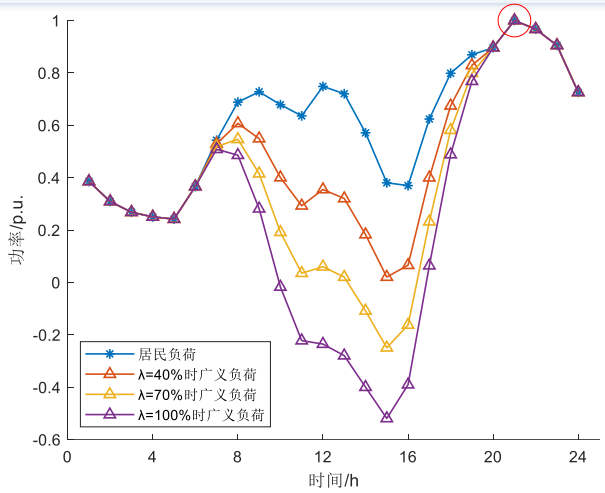
配置20%储能



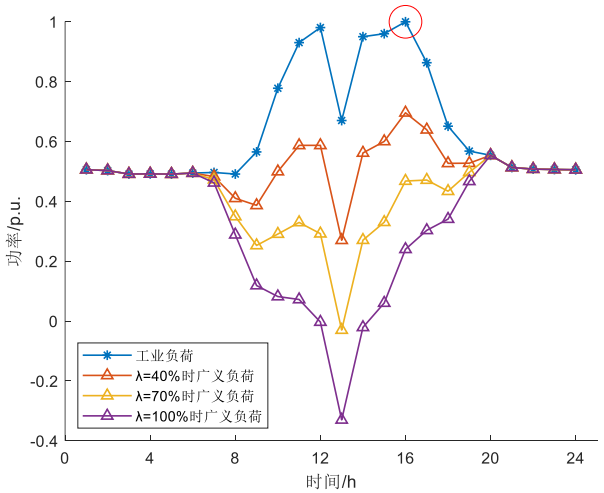
配置30%储能

（1）配电网典型场景——广义负荷接入特性

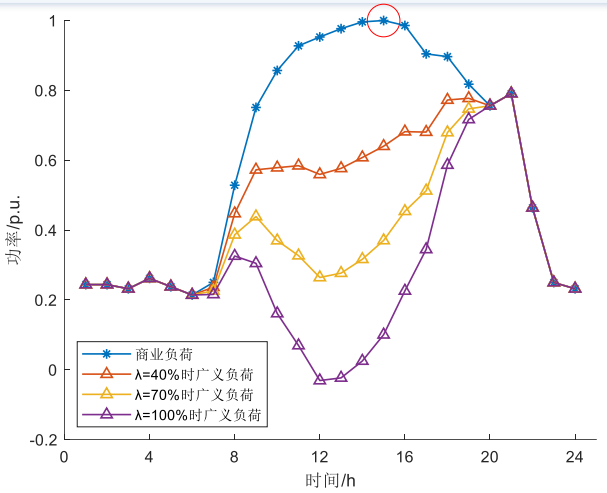
- 在电力系统中，由于稳定的要求或导线自身传输电能的能力有限，智能供配电网的建设需要基于典型场景的支路功率约束以及考虑不同用户类型的广义负荷接入特性（不同光伏渗透率下）



居民



工业



商业

光伏的接入对改变了工业和商业负荷的最大负荷及时刻，对居民负荷没有影响。基于典型场景的运行约束及特性，考虑不同运行状态，形成多状态差异化的高融合智能供配电网建设方案。

（2）源网荷储协同的主动配电网规划模型

优化变量：新建线路编号、新建DG节点集合、新建储能节点集合……

规划成本：线路建设成本、DG安装成本、储能安装成本

上层模型

目标函数：规划成本最小

$$F = C_{line} + C_{DG} + C_{bess}$$

约束条件

DG安装容量约束

$$\begin{cases} S_{\Sigma PV} + S_{\Sigma WG} \le \sigma P_{\Sigma L\max} \\ 0 \le S_{PV,j} \le S_{PV,j,\max}, j \in B_{PV} \\ 0 \le S_{WG,k} \le P_{WG,k,\max}, k \in B_{WG} \end{cases}$$

DG渗透率约束 $\sum_{i\in B_{DG}} S_{DG,i} \le k \cdot \sum_{j\in\Omega_{load}} L_j$

储能安装容量约束 $0 \le S_{BESS,i} \le S_{BESS,i,\max}$

下层模型

目标函数1：主动配电网运行成本最小

$$f_1 = f_{line} + f_{DG} + f_{loss} + f_{bess} + f_{grid}$$

目标函数2：三种状态下运行控制效果最优

$$f_2 = \omega_{21} \cdot f_{21} + \omega_{22} \cdot f_{22} + \omega_{23} \cdot f_{23}$$

系统功率平衡约束

$$P_{grid,t} + \sum_{k\in\Omega_{DG}} P_{DG,k,t} + \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,t}^{discharge} = \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,t}^{charge} + \sum_{i\in\Omega_{load}} P_{L,i,t} + P_{\Sigma loss}$$

储能运行约束

$$x_{i,t}^{charge} P_{i,\min}^{charge} \le P_{i,t}^{charge} \le x_{i,t}^{charge} P_{i,\max}^{charge}, \forall i, \forall t$$

$$x_{i,t}^{discharge} P_{i,\min}^{discharge} \le P_{i,t}^{discharge} \le x_{i,t}^{discharge} P_{i,\max}^{discharge}, \forall i, \forall t$$

$$0 \le x_{i,t}^{charge} + x_{i,t}^{discharge} \le 1$$

$$E_i^{bess,\min} \le E_{i,t}^{bess} \le E_i^{bess,\max}$$

系统备用容量约束

$$P_{grid,\max} + \sum_{k\in\Omega_{DG}} P_{DG,k,t} + \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,\max}^{discharge} \ge (1+L\%) \sum_{i\in\Omega_{load}} P_{L,i,t}$$

$$\begin{cases} P_{grid,t} + \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,t}^{discharge} - \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,t}^{charge} - P_{\Sigma loss} \le \\ \{P_{grid,\max} + \sum_{n\in\Omega_{bess}} P_{n,\max}^{discharge} - L\%[\sum_{k\in\Omega_{DG}} \bar{P}_{DG,k,t} + (\lambda_{1t} + \lambda_{2t}) \sum_{k\in\Omega_{DG}} \hat{P}_{DG,k,t}]\} \\ \lambda_{1t} \ge 0, \lambda_{2t} \ge 0 \end{cases}$$

DG运行约束

$$0 \le P_{PV,j} \le P_{PV,j,\max}$$

$$0 \le P_{WG,k} \le P_{WG,k,\max}$$

优化变量：储能充放电功率、负荷功率……

运行成本：包括线路运行维护费用、DG运行维护费用、网络损耗费用、向上级电网的购电成本

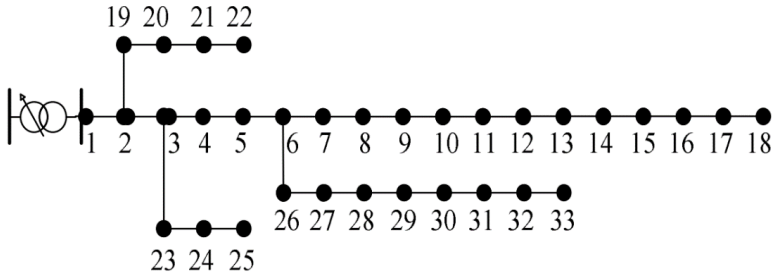
f21、f22、f23分别为正常状态、紧急状态和孤网状态运行优化模型的目标函数，ω_{21}、ω_{22}、ω_{23}对应**权重**

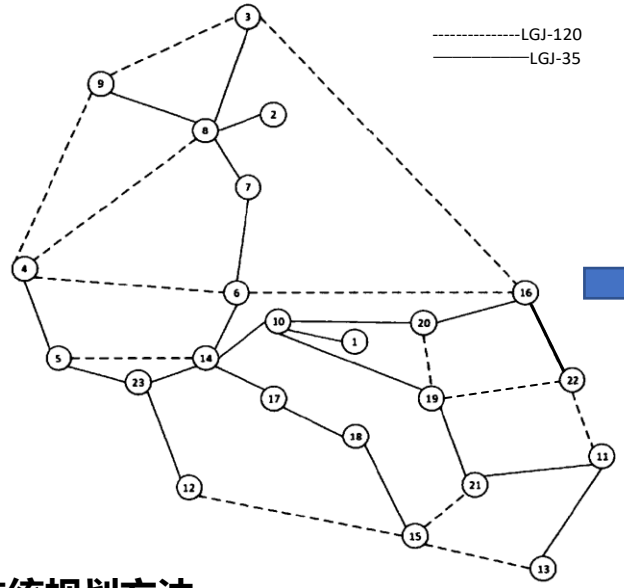
考虑DG出力的不确定性，采用鲁棒优化方法，通过拉格朗日对偶变换将上式转换为下式

研究案例：考虑多状态的源网荷储协同配网规划

（3）网架规划结果

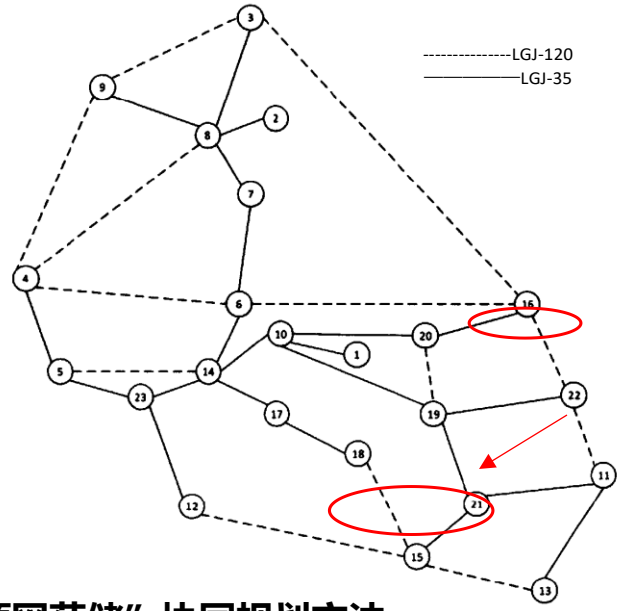
33节点配电网
算例系统





传统规划方法

不考虑分布式电源和储能，只考虑单一运行状态的规划



考虑了分布式电源和储能接入后，网架发生改变

源网荷储”协同规划方法

源网荷储协同的主动配电网规划方法，考虑分布式电源和储能接入，考虑多状态运行的规划

结果对比

参数	传统规划方法	协同规划方法
规划成本	55198	59331
约束条件违反的概率	80.58%	12.8%

- 只考虑单一运行状态的传统规划方法投资成本较低，但在紧急、孤网状态下运行稳定性较差；
- 考虑多状态的“源网荷储“协同配电网规划方法在安全性、长期收益等方面具有更大优势。

Contents.

目录

3.1 案例一:电力系统源荷预测

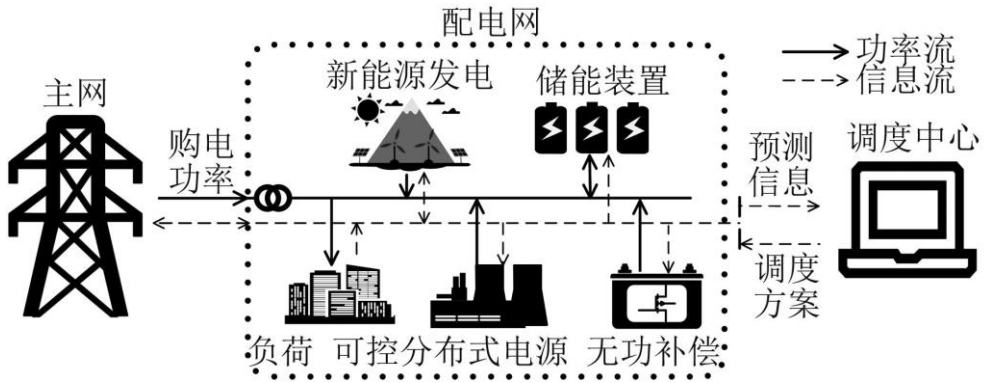
3.2 案例二:电力系统规划

3.3 案例三:电力系统调度

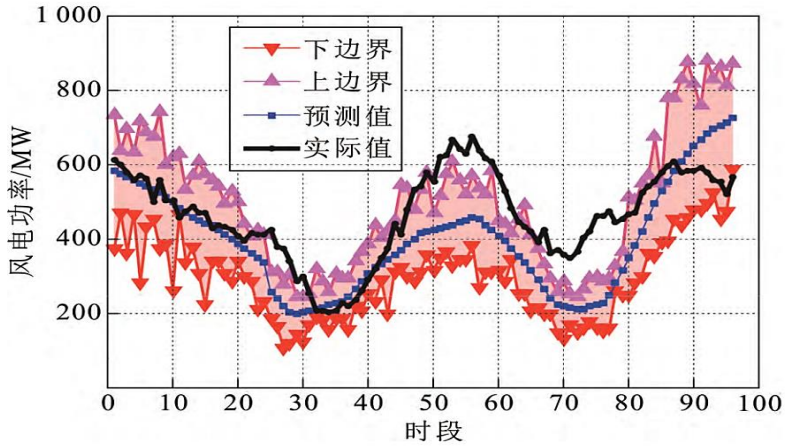
3.4 案例四:电力系统稳定分析

什么是电力系统调度?

在满足系统安全约束的前提下，通过优化机组出力，实现分钟级至小时级的电力供需平衡



手段	生活比喻	实际应用案例
调发电机出力	让电厂“油门”踩深/踩浅	命令火电厂2分钟内增减出力
切负荷	临时关闭非关键用电	空调轮停15分钟保医院供电
调用储能	用“充电宝”填谷削峰	负荷低谷充电，高峰放电



新能源时代的调度挑战——风电/光伏发电“看天吃饭”的不确定性

- **跨省互救**：将西部富余风电送到东部（特高压电网）
- **人工智能**：用智能算法提升风光出力预测精度（误差 < 10%）
- **调用储能**：利用储能充放电实现电能在时间上的平移，快速平抑波动
- **需求响应**：聚集电动车/空调等负荷侧资源，参与主动调节

电力系统调度：优化问题

□ 电力系统的调度：本质上是一个合理利用系统可调节资源的优化问题

步骤	核心操作
数据采集	收集负荷预测、新能源预测、网络拓扑、机组参数
模型建立	定义决策变量（机组出力、启停状态、负荷调整...）
目标函数设定	最小化总运行成本、最小碳排...
设置运行约束	等式约束（功率平衡）、不等式约束（机组出力范围、爬坡速率）
数学求解	采用混合整数规划（MIP）或线性规划（LP）求解
安全校核	对N-1故障场景进行潮流计算
指令输出	生成机组组合表、出力计划曲线

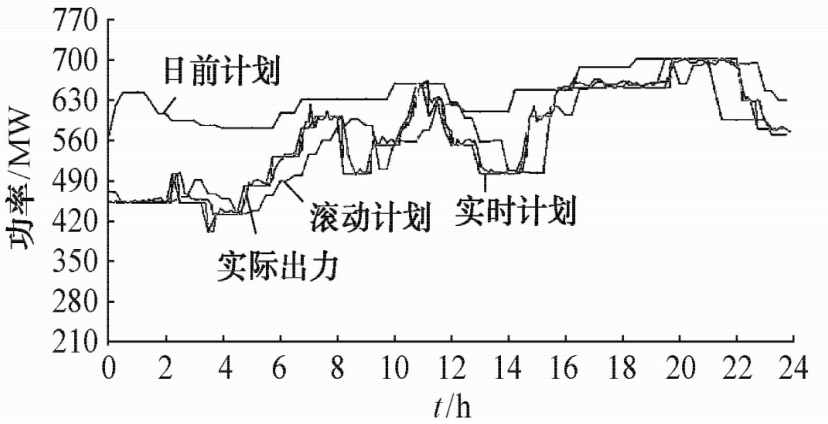
电力系统调度：多时间尺度

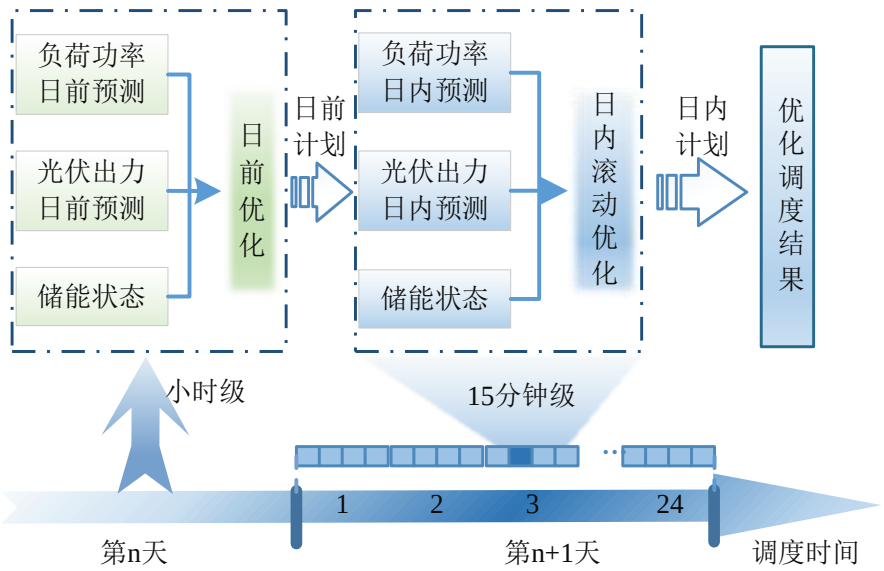
□ 为了应对源荷的不确定性，通常采用多时间尺度策略进行“多级协调、逐级精细”的调度

➢ 调度的核心目标

- ⚡ **可靠供电**：满足负荷需求，满足系统安全约束
- 💰 **经济高效**：降低运行成本，减少网络损耗
- 🌱 **绿色低碳**：消纳清洁能源，减少污染和碳排放

时间尺度	核心任务	决策变量
日前调度	制定24小时发电计划	机组启停状态、预调度出力
日内调度	滚动修正计划 (15min~1h)	机组调节指令、备用容量分配
实时调度	秒级控制 (AGC/SCADA)	自动发电控制信号、切负荷





□ 配网在不同运行状态下的调度目标不同，因此需要进行考虑多状态的优化调度

配电网不同状态的特性

正常状态
配电网供用功率平衡、供电功率不受限

紧急状态
配电网供电功率受限、电力供不应求（从主网获取功率受限）

孤网状态
配电网脱离主网独立运行（主网向配电网供电功率为0）

运行控制目标
以用户的电能成本最小为目标，通过调控用电行为保证配电网设备利用率提高、削峰填谷，提高供电用电经济性。

运行控制目标
以紧急状态重要负荷供电功率最大为目标，保障重要负荷的安全可靠运行，从而降低由紧急状态给配电网带来的损失。

运行控制目标
以孤网状态重要负荷供电量最大和负荷曲线平稳度最优为目标，在电能匮乏的情况下保障核心负荷的安全可靠运行。

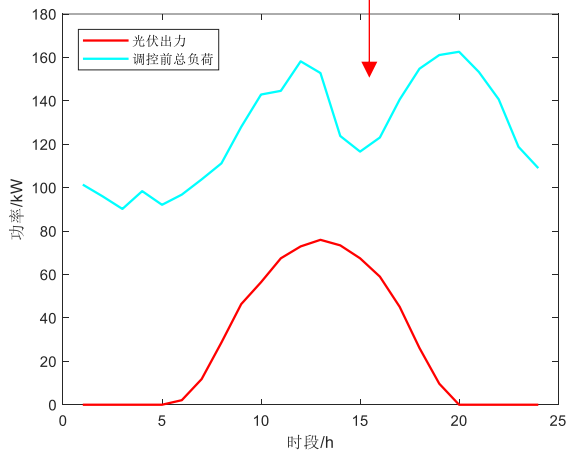
配电网不同状态下的运行控制目标

研究案例：考虑多状态的配网优化调度

- 通过**需求响应**增大负荷在夜间的出力，减小负荷在白天的出力，从而减小负荷的峰谷差，提高用电的经济性。
- 在电价谷时段**储能**进行充电操作，电价峰时段储能进行放电操作，来达到低储高放的目的。

优化前

不考虑储能、分时电价和需求响应，负荷曲线波动较大。



正常状态运行优化模型

目标函数：用户电能成本最小

$$\min C = \sum_{t=1}^{24} C_t$$

$$C_t = \begin{cases} P_{ex,t} \cdot C_{toload,t}, P_{ex,t} \geq 0 \\ P_{ex,t} \cdot C_{togrid,t}, P_{ex,t} < 0 \end{cases}$$

C_t：每小时的购电成本

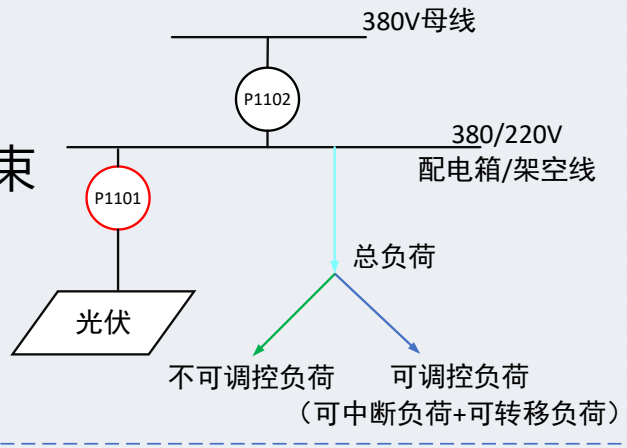
$P_{ex,t}$：配电网与主网的联络功率

$C_{toload,t}$：主网的售电电价

$C_{togrid,t}$：配电网向主网的售电电价

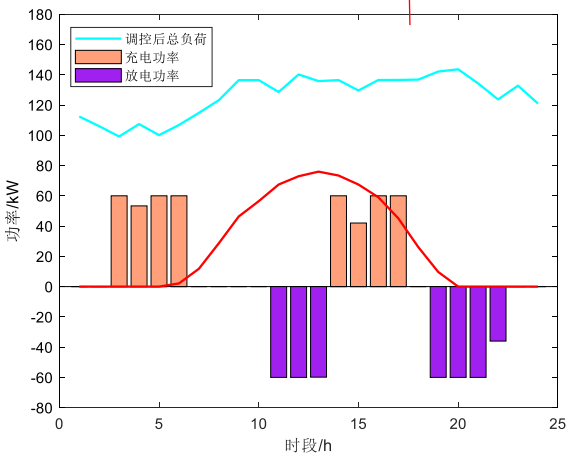
约束条件

- 功率平衡约束
- 柔性负荷响应约束
- 储能约束
- 系统频率约束
- ……



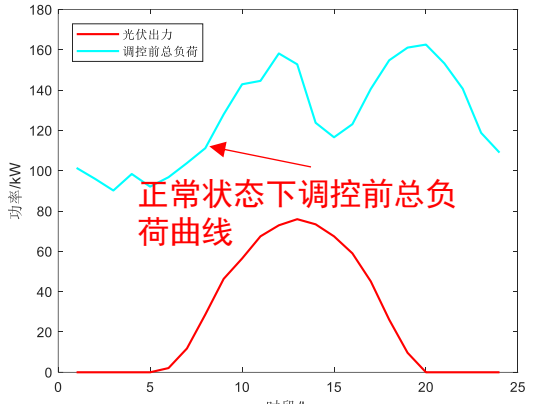
优化后

采用正常状态运行控制策略，通过降低负荷在白天的出力，提高负荷夜间出力以及储能在高电价放电和低电价充电，提高了负荷曲线的平稳性和供用电的经济性。

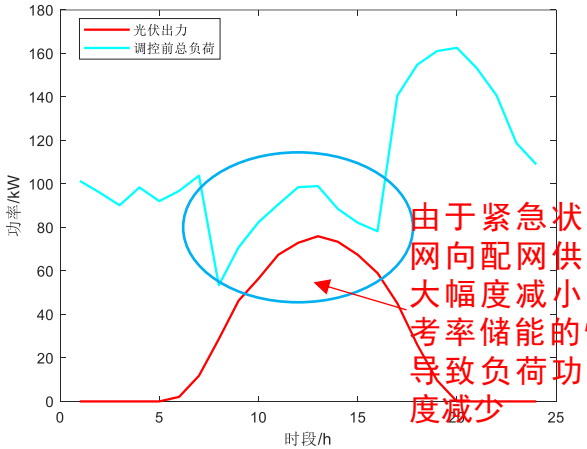


研究案例：考虑多状态的配网优化调度

- 在紧急状态下通过**削减部分重要程度较低的负荷**，减小紧急状态下的供电压力。
- **储能**在紧急状态下进行**放电**，起到对系统的支撑作用。



正常状态优化前



紧急状态优化前

紧急状态运行优化模型

目标函数：紧急状态重要负荷供电功率最大

$$\max F = \sum_{i \in N_L} P_{L,i} \cdot \omega_{L,i} + \sum_{j \in N_{RL}} P_{RL,j} \cdot \omega_{RL,j} + \sum_{k \in N_{RL}} P_{IL,k} \cdot \omega_{IL,k}$$

$P_{L,i,t}$：第i个不可调控负荷的大小

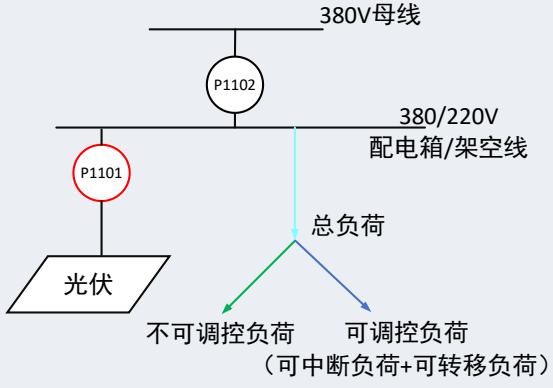
$P_{RL,j,t}$：第j个可转移负荷的大小

$P_{IL,k,t}$：第k个可中断负荷的大小

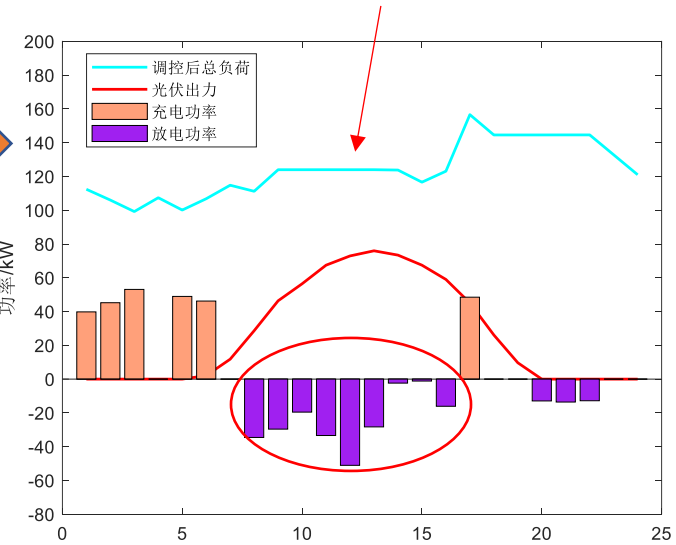
$\omega_{L,i}$、$\omega_{RL,j}$、$\omega_{IL,k}$：对应三种负荷权重

约束条件

- 功率平衡约束
- 柔性负荷响应约束
- 储能约束
- 系统频率约束
- ……



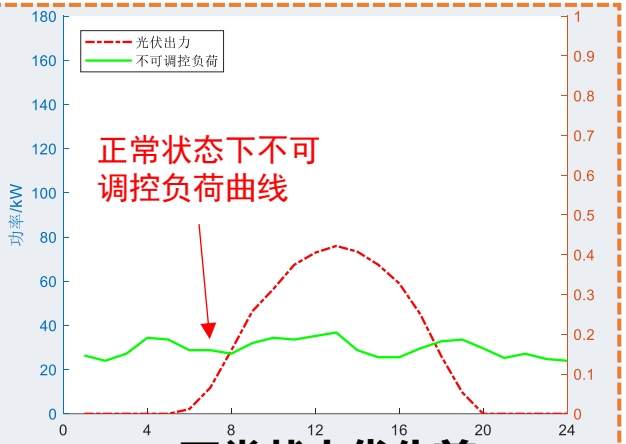
由于储能在紧急状态下为配电系统提供电源支撑，因此负荷削减量在紧急状态下大大减少，且负荷曲线更加平稳，保证重要程度较高的负荷的可靠供电



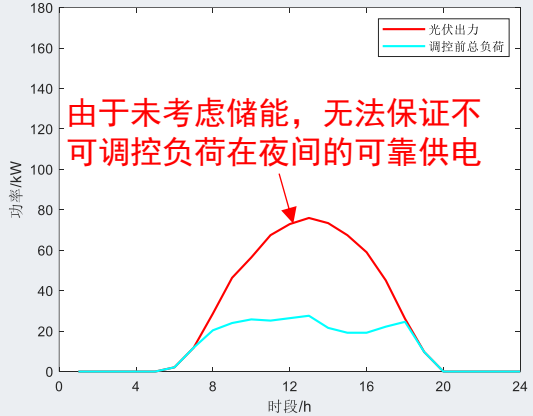
紧急状态优化后

研究案例：考虑多状态的配网优化调度

- 由于电能匮乏，只考虑**重要程度较高的不可调控负荷**的供电。
- 储能在白天光伏出力较大时进行充电，在夜间无光伏时进行放电，从而保证孤网状态下不可调控负荷的**连续可靠供电**。



正常状态优化前



孤网状态优化前

孤网状态运行优化模型

目标函数：孤网状态重要负荷供电量最大、负荷曲线平稳度最优

$$\max G_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in N_L} P_{L,i,t} \cdot \omega_{L,i,t}$$

$$\min G_2 = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i \in N_L} (P_{L,i,t} - \bar{P}_{L,i})^2$$

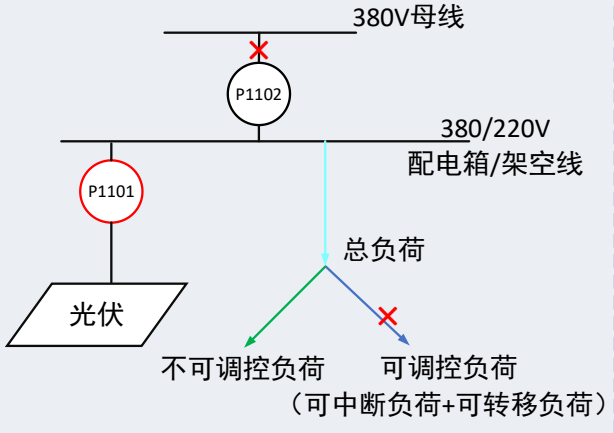
$P_{L,i,t}$：第i个不可调控负荷的大小

$\omega_{L,i}$：第i个不可调控负荷的权重

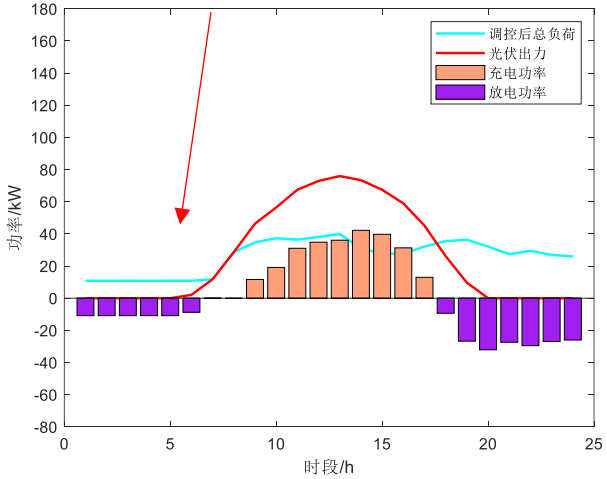
$\bar{P}_{L,i}$：第i个不可调控负荷的平均值

约束条件

- 功率平衡约束
- 储能约束
- 系统频率约束
- ……



采用孤网状态运行控制策略，通过储能在白天光伏较大时充电和夜间无光伏时放电，保证了在孤网状态下不可调控负荷的持续供电



孤网状态优化后

Contents.

目录

3.1 案例一:电力系统源荷预测

3.2 案例二:电力系统规划

3.3 案例三:电力系统调度

3.4 案例四:电力系统稳定分析

研究背景：新型电力系统潜在危机

如何实现新型电力系统高效安全稳定运行?

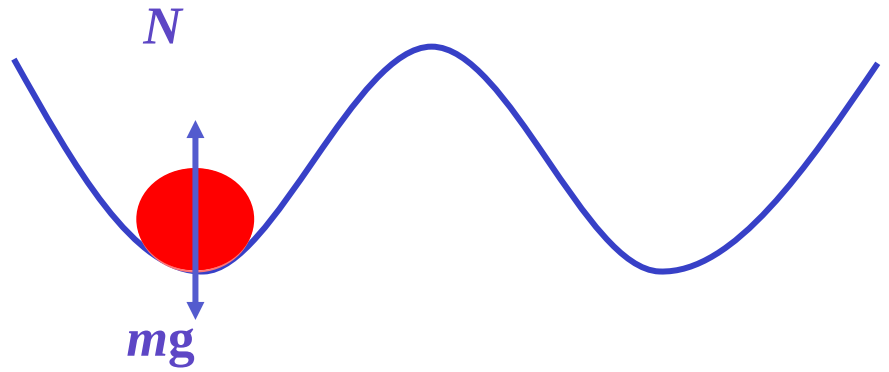
- 新型电力系统背景下，电力系统呈现**高比例可再生能源**和**高比例电力电子设备**的双高特性，系统惯量小、支撑强度不断减小，电力系统**安全稳定问题**日益突出。

序号	时间	事件
1	2011年4月	甘肃干河口西第二风电场脱网事故，702台风机脱网
2	2016年9月	澳大利亚南澳发生大停电，全州无电超50小时
3	2019年8月	英国英格兰与威尔士发生停电，约100万人受影响
4	2020年8月	美国南加州发生大停电，约40万人受影响
5	2023年8月	巴西东北部电力系统与主网解列，约25个州受影响
6	2024年2月	美国加州、缅因州等地发生大停电，约140万人受影响

亟需深入研究新能源发电系统在新型电力系统背景下的稳定性与致稳技术!

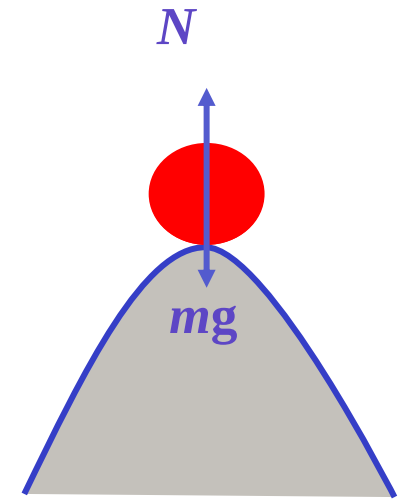
电力系统稳定性定义

对微分方程描述的动力学系统 $$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = f\left[x(t)\right]$$



□ P.Kundur《电力系统稳定与控制》关于稳定性的定义

- Power system stability may be broadly defined as that property of a power system that enables it to remain in a state of operating equilibrium under normal operating conditions and to gain an acceptable state of equilibrium after being subjected to a disturbance.

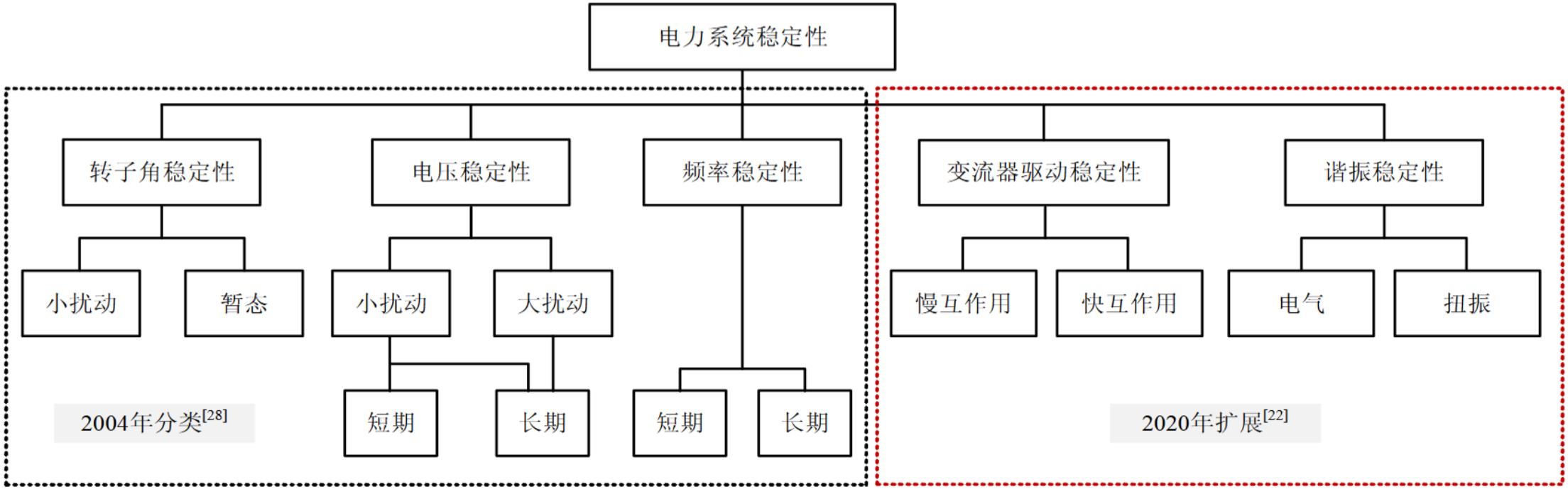


□电力系统安全稳定导则GB 38755-2019

- 电力系统受到扰动后保持稳定运行的能力

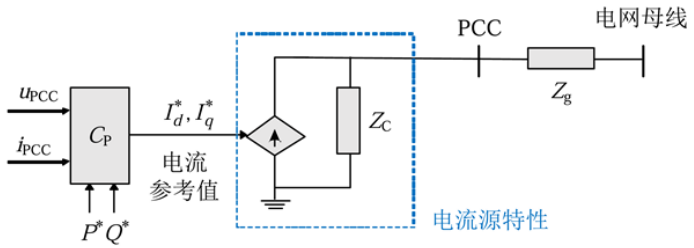
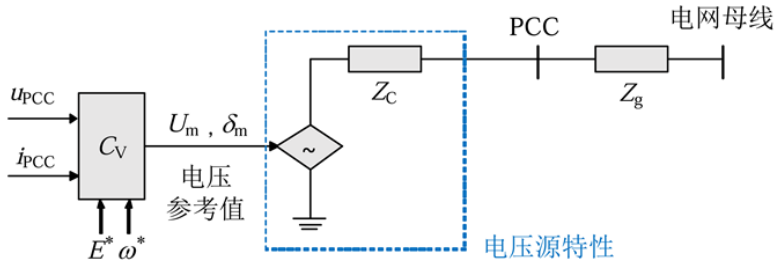
电力系统稳定性分类

- 2004年，IEEE工作组的“电力系统稳定性定义与分类”报告从三个视角将稳定性按照系统变量分为3个主要分支：**转子角/功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性**，每个主要分支再按照扰动大小和时间跨度再进行细分。



跟/构网控制对比

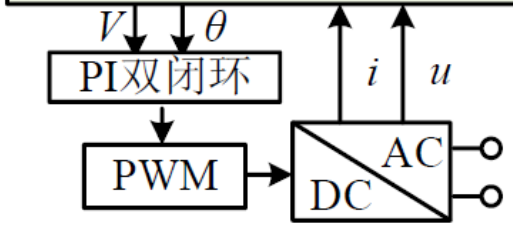
□ 并网变流器控制分为**跟网型（电流源外特性）**和**构网型（电压源外特性）**

	跟网型控制	构网型控制
	 受控电流源特性	 受控电压源特性
同步方式	基于锁相环检测电压同步	基于功率同步控制
故障响应	自身稳定性依赖接入电网的强度，易出现宽频振荡	提供虚拟惯性支撑、电压支撑，具备振荡抑制、黑启动能力，但电流控制能力不足，具有更高的过流风险。
支撑能力	可做“间接”支撑，反应较慢	快速的“直接”支撑
适用场景	强电网，不能孤岛运行	弱电网、具备孤岛运行能力

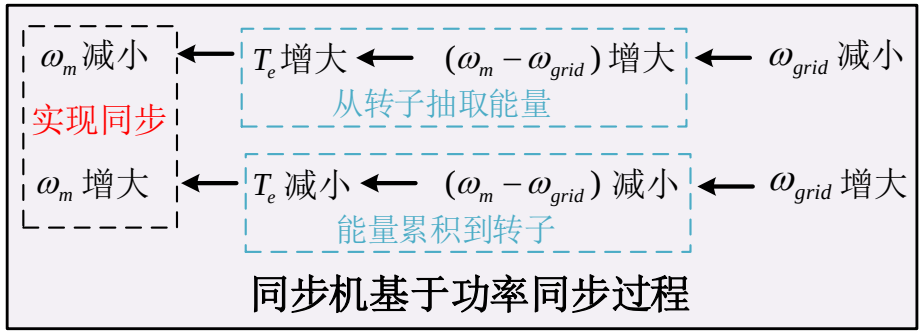
新型电力系统中构网型变流器提供惯量支撑

- 变流器被控制成**受控电压源**；通过**自身输出功率**而非采样电网电压来实现同步。
- 以虚拟同步发电机控制为例，构网型变流器模拟同步机的同步机制实现变流器与电网同步。

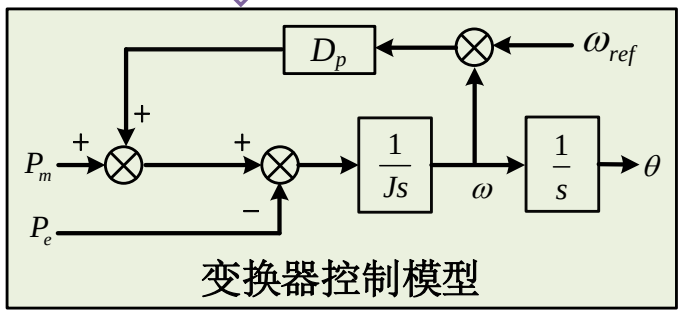
$$\begin{cases} 2H\omega^* \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = P^* - P_e - D_p\omega^*(\omega-\omega^*) \\ V = V^* - n_q(Q_e - Q^*) \end{cases}$$

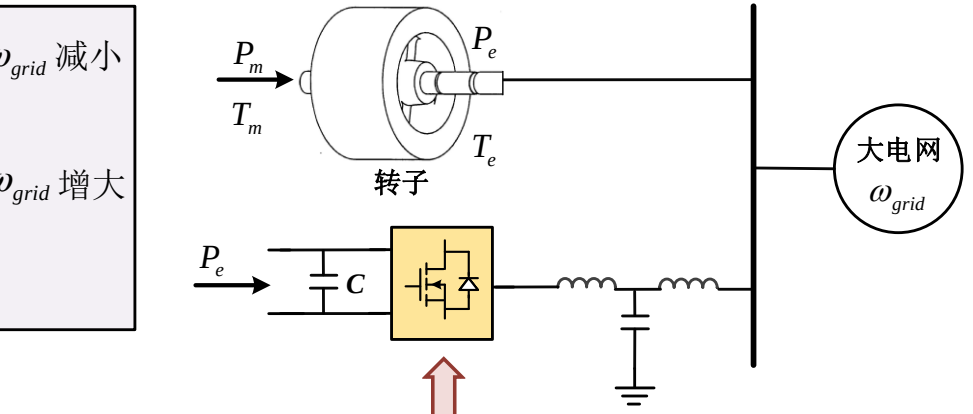


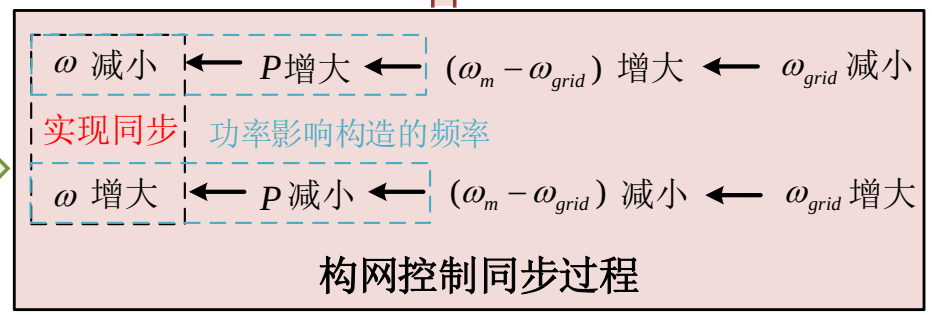
❖虚拟同步发电机控制



物理本质 $J\dfrac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e$

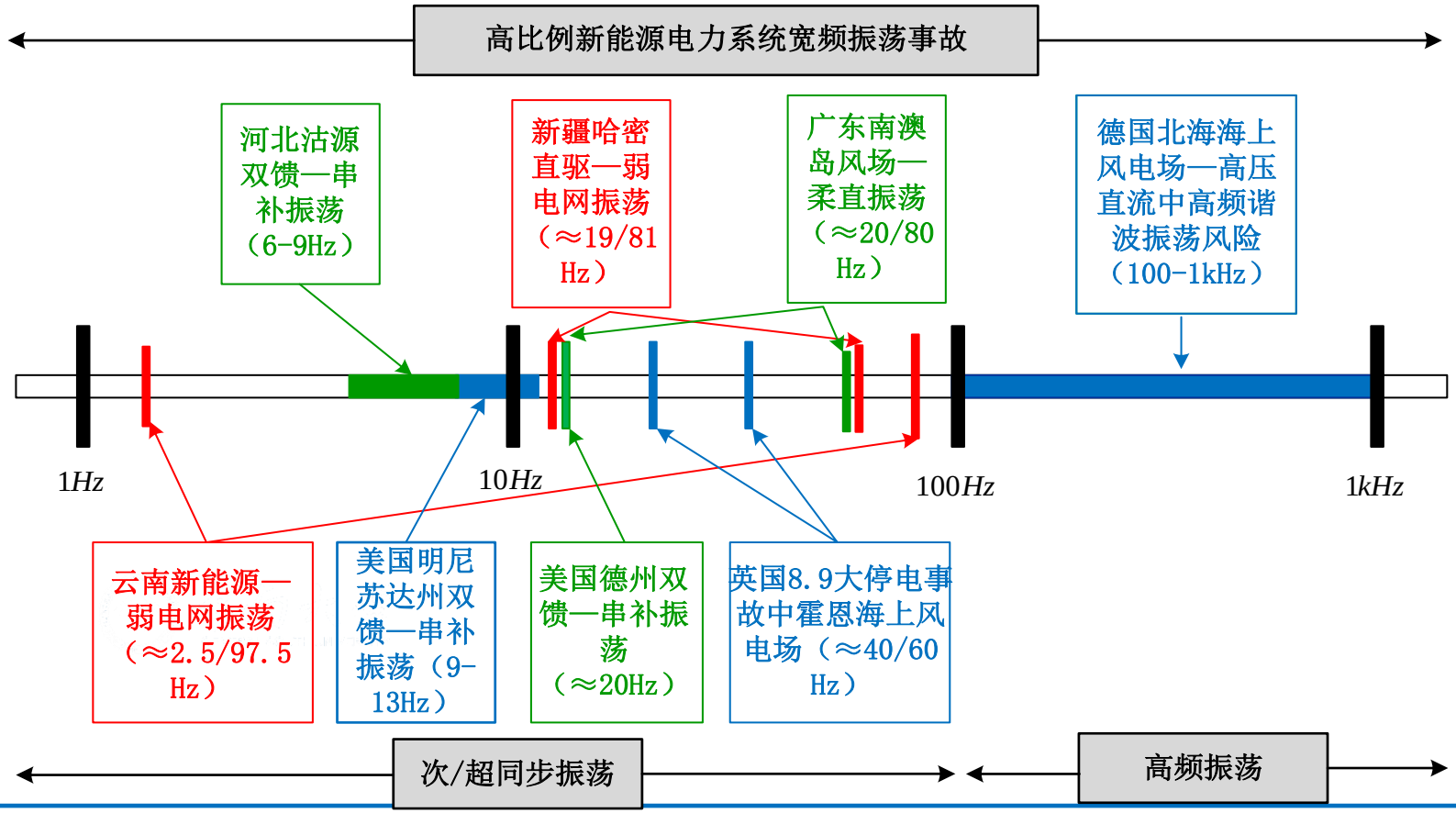


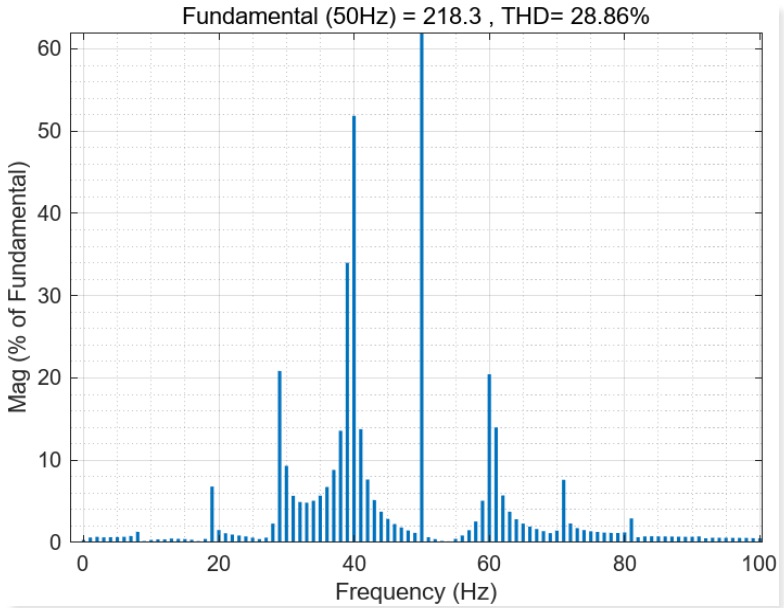




宽频振荡问题 -- 小信号稳定性

- 宽频振荡：振荡频率覆盖2~1kHz，相较于传统电力系统振荡频段范围更广。
- 宽频振荡问题本质上是**小信号稳定性问题**。

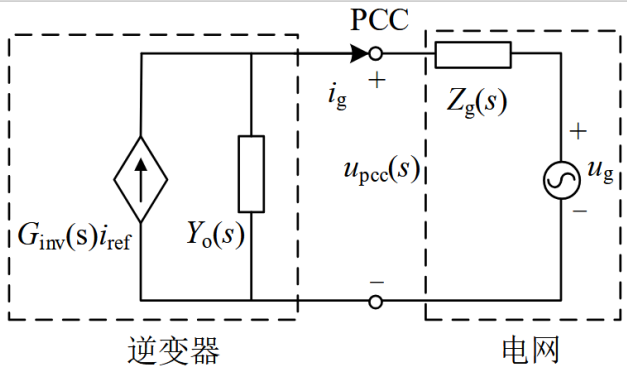




构网型变流器在弱电网下并网电压存在振荡

- 将并网系统划分为**源/荷子系统**，利用戴维南/诺顿定理简化，利用联级系统的稳定性判据判定系统稳定性。
- 负阻尼源/荷阻尼幅值交点对应相位若落入负阻尼区域，系统存在振荡风险。

源/荷级联系统

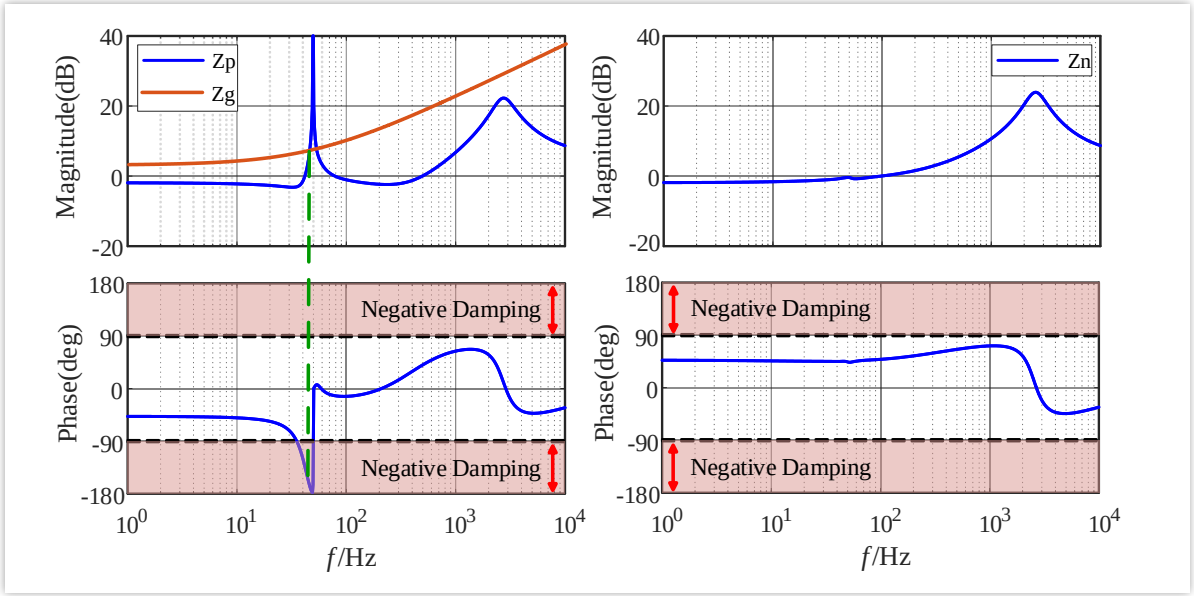


$$i_g(s)=\frac{Z_o(s)}{Z_g(s)+Z_o(s)}G_{inv}(s)i_{ref}(s)-\frac{1}{Z_g(s)+Z_o(s)}u_g(s)$$

$$=\left[G_{inv}(s)i_{ref}(s)-\frac{u_g(s)}{Z_o(s)}\right]\frac{1}{1+Z_g(s)/Z_o(s)}$$

子系统自身稳定

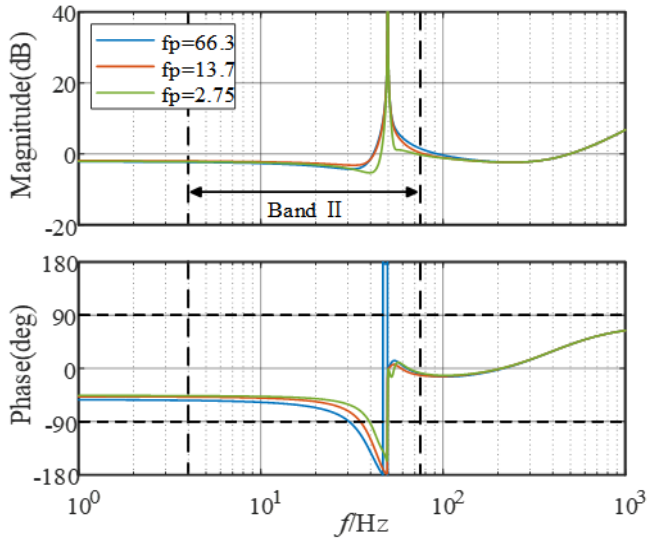
负阻尼范围下的失稳可能性



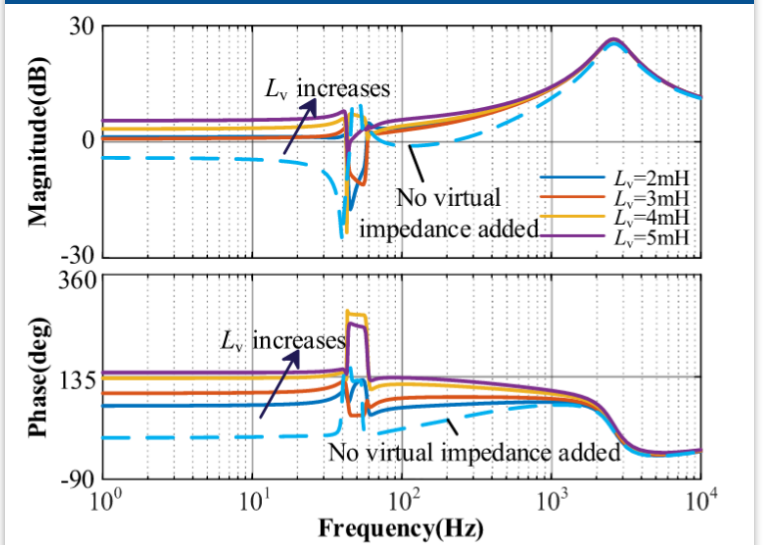
阻抗重塑的稳定性增强

- 将阻抗相位全段限制在正阻尼范围，保证系统小信号稳定。
- 实现阻抗幅值/相位重塑：调节控制参数、改变控制结构等。

调节系统/控制参数



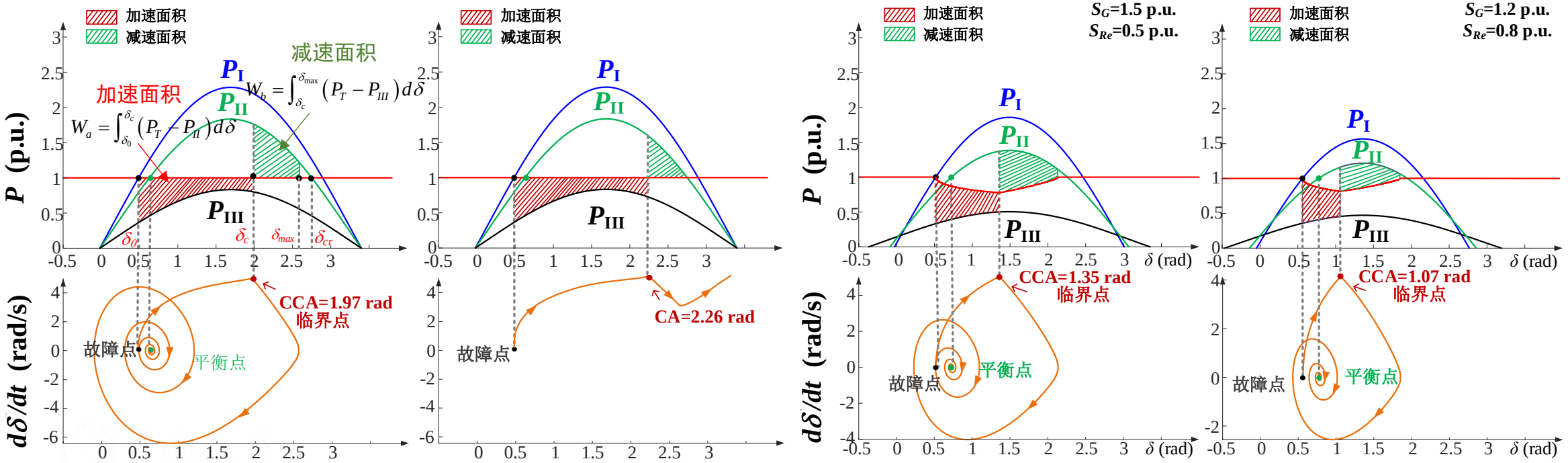
加入虚拟阻抗



合理配置参数及控制结构重塑阻抗，实现宽频段小信号稳定

3.4 案例四

- 加速面积W_a为转子在加速中的动能增量；故障切除后的减速面积W_b为减速中的动能增量。
- 当切除角一定时，存在最大可能减速面积。若其数值比加速面积小，则发电机将失去同步。



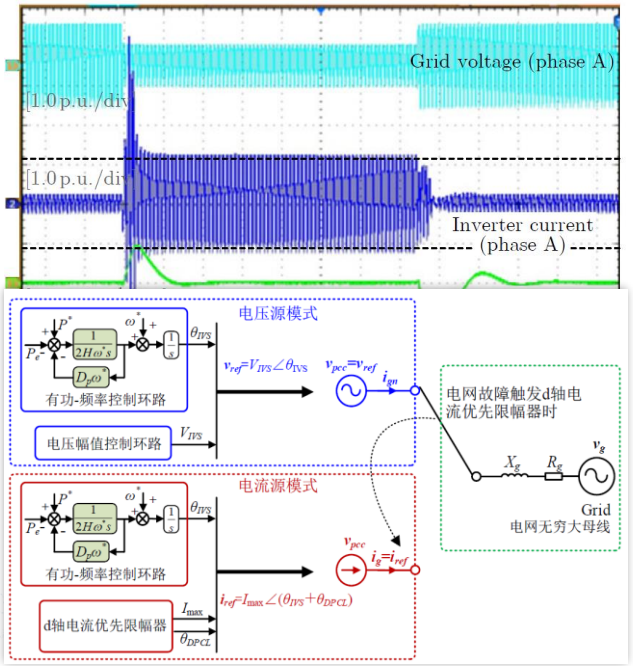
相较于传统电力系统，新型电力系统故障极限切除角更小，极限切除时间更短。

限幅引入的矛盾

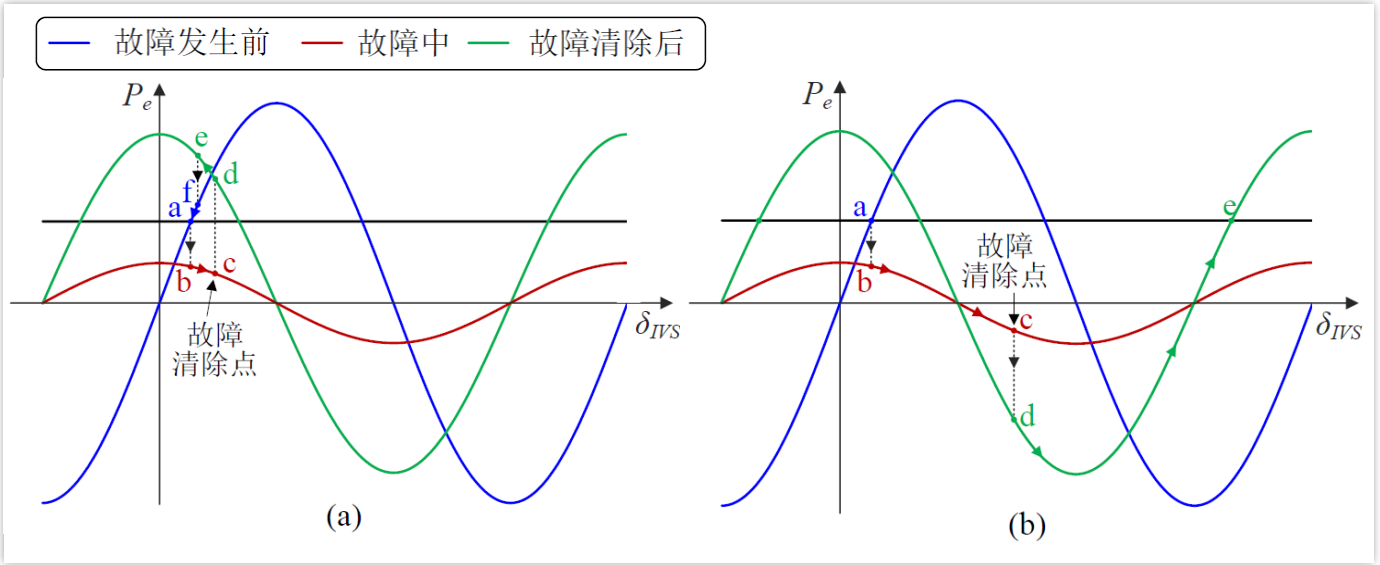
- 输出电流**高度依赖外部系统**，大扰动下易产生半导体器件难以承受的过电流。
- 电流限幅器触发，构网型变流器外特性**退化为受控电流源**，失去构网能力。
- 电流限幅器可能导致额外的**闩锁问题**，即变流器故障后无法退出电流限幅模式。

输出电流骤增

失去构网能力

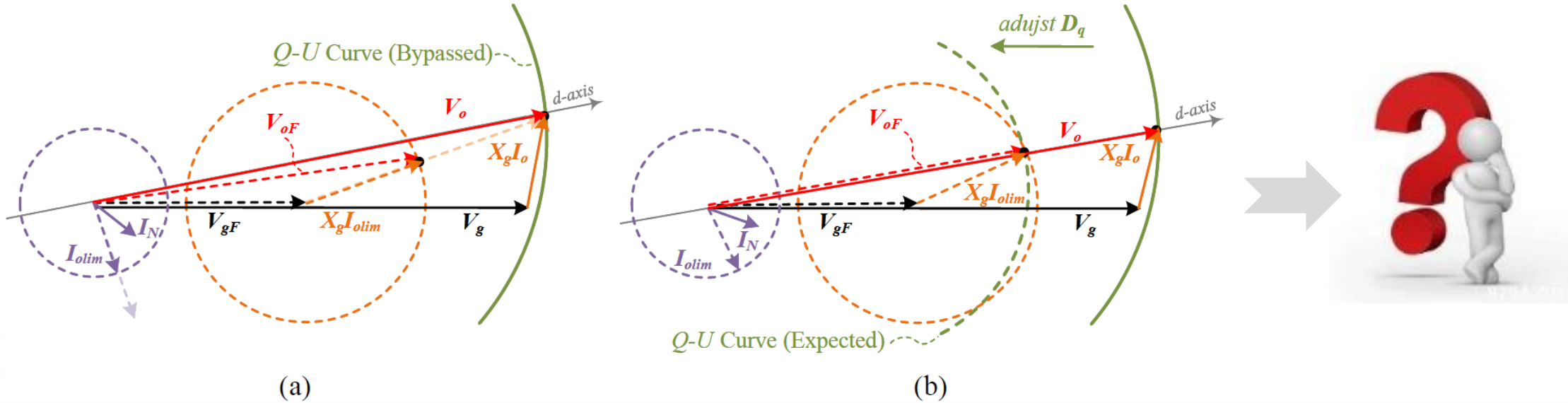


无法退出电流限幅



亟需设计合理有效的计及故障限幅的构网型变流器稳定化控制方案!

- 根据同伦理论，可以得到在矢量视角下的**Q-U 下垂曲线。**
- 当Q-U 曲线与电流限幅圆**不存在交点**时，Q-U 下垂控制被旁路。如图a所示。
- 当Q-U 曲线与电流限幅圆**存在交点**时，Q-U 下垂依然发挥作用。此时的输出电压幅值和相角受变流器控制，变流器**依然呈现受控电压源特性**，如图b所示



通过移动Q-U曲线满足（1）维持电压源特性（2）实现电流限幅 （3）满足无功支撑

Contents.

目录

01 背景介绍

02 发展趋势

03 案例展示

04 结语展望

4. 结语展望

01 **源荷预测**
- 新能源预测
- 负荷预测

02 **系统规划**
- 考虑多状态
- 配电网规划

03 **系统调度**
- 多时间尺度
- 优化调度

04 **稳定分析**
- 稳定性概念
- 稳定性分类

希望你们学会的不仅仅是**电力专业知识**，更是

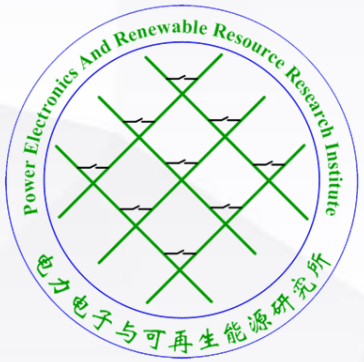
系统性思维在复杂世界中拨云见日的能力！

资料

中南大學 CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

谢谢！欢迎沟通交流！

liang.yuan@csu.edu.cn QQ:407438048



中南大学电力电子与可再生能源研究所
https://pe.csu.edu.cn