



紫金论电专题论坛

新型电力系统装备关键技术与系统安全稳定运行控制

新型配电系统灵活性提升技术研究

报告人：董旭柱、尚磊

单位：武汉大学、湖北省交直流工程研究中心

2024年7月14日 吉林

国家自然科学基金：基于电力电子变换器装置的交直流配电网规划与灵活组网方法 (U22B20107)

目录

01

背景与意义

02

配电系统的灵活性

03

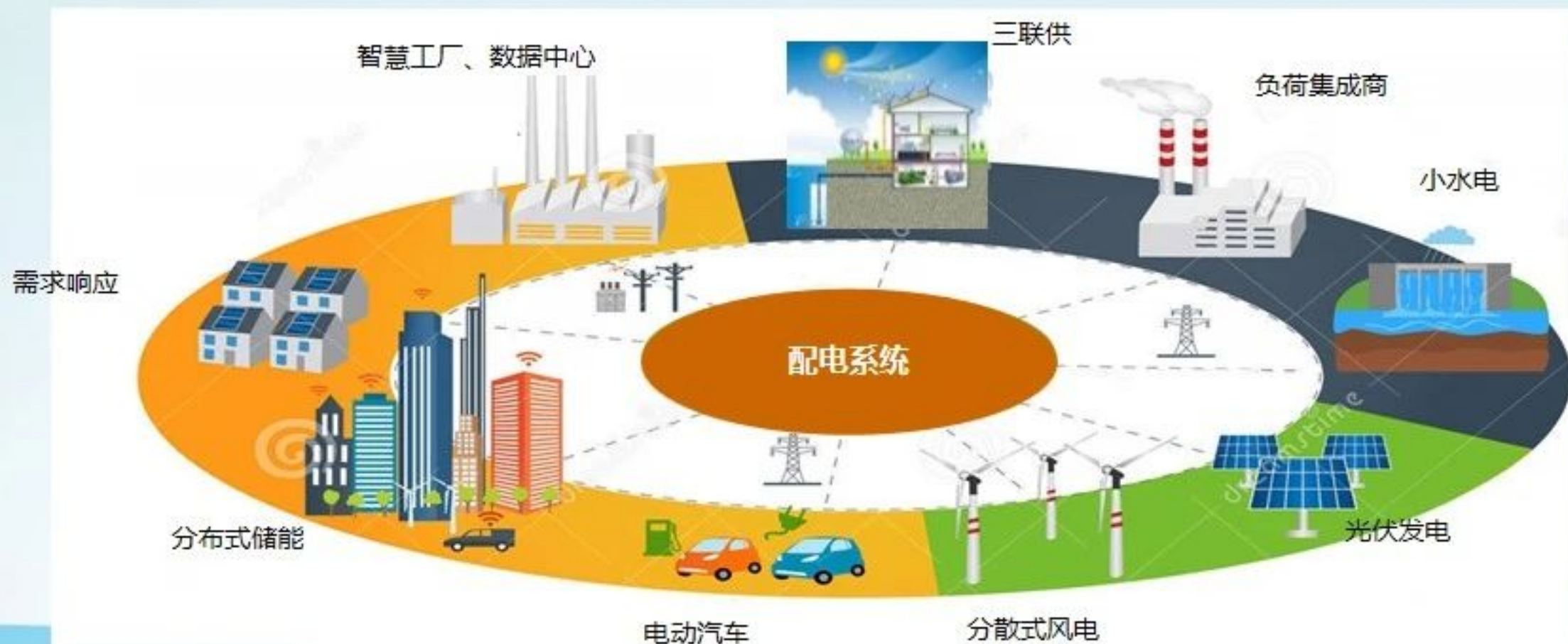
配电系统灵活性提升技术

04

总结与展望

配电系统是构建新型电力系统的关键领域

- 配电系统承上启下，具备区域能源协同和供需深度互动的能力，支撑大规模分布式能源接入，满足多样化负荷的供电需求。



- 高压: 35、66、110kV
- 中压: 20、10、±10kV
- 低压: 380、220、±750V

配电系统正在演变为区域资源优化配置平台，对我国能源供给与消费的低碳化转型起到关键支撑作用。



高渗透率分布式发电、电动汽车：不确定性增加

- 高比例分布式能源接入、产消者和虚拟电厂快速增加、电动汽车规模化增长，造成源荷不确定性增大
- 随着分布式可再生能源发电技术的发展和生产成本的降低，中国分布式光伏和风电的总装机容量大幅增加。

关键指标	2021	2025	2030	2060
分布式电源装机 (35kV及以下)	109 GW	300 GW	390 GW	1095 GW
电动汽车(万辆)	500	2500	8500	53000
全社会用电量(kWh)	8.3万亿	9.5万亿	12万亿	16万亿
最高负荷 (GW)	1040	1570	1770	2430
终端电能占比	27%	35%	43%	70%

2021-2024年中国分布式光伏装机总量发展 (GW)

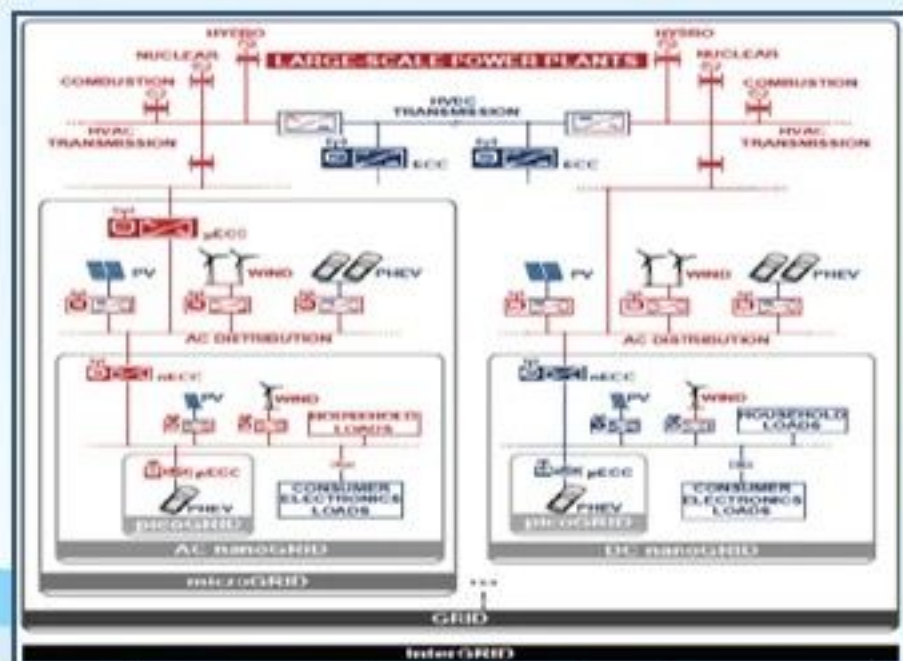


2019-2022年中国分散式风机装机总量发展 (GW)



电力电子变换器：新型拓扑和柔性互联

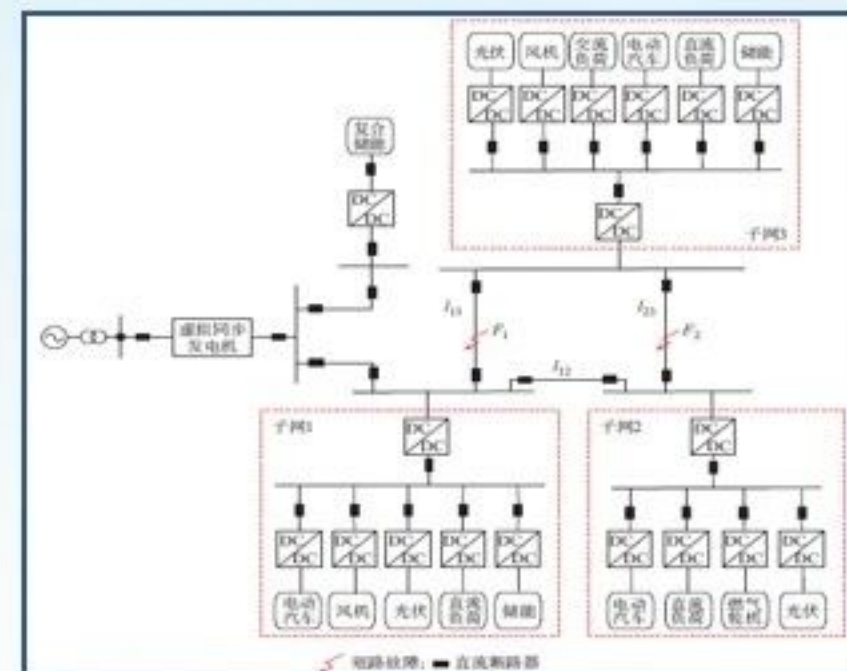
- 高比例电力电子装备和直流配电技术逐渐成熟，可实现功率互济、潮流灵活调控，交直流混联配电成为一种新模式
- 传统“合环设计、开环运行”逐步转变为“合环设计、柔性合环运行”
- 分层互联分区自治成为一种新网架形态



美国CPES中心的交直流混合配电系统



天津雪花网配电系统



环形微电网群

*参考文献：张伟亮,张辉,支娜,王韩伟,石海涛.环形直流微电网故障分析与保护[J].电力系统自动化

新型配电系统源网荷储形态演变



挑战1：系统平衡难度加大，运行安全风险增加

- 新能源大规模接入对电网的调频、调峰能力带来了挑战，负荷波动加剧、峰谷差加大，渗透率较高地区将遇到“鸭子曲线”难题，系统有功平衡难度加大，电力调节灵活性资源不足，电力平衡难度增加。
- 山东省在2023年五一假期间新能源发电大于负荷需求，出现了持续22小时的负电价。

2023年12月31日南澳大利亚最小运行负荷曲线

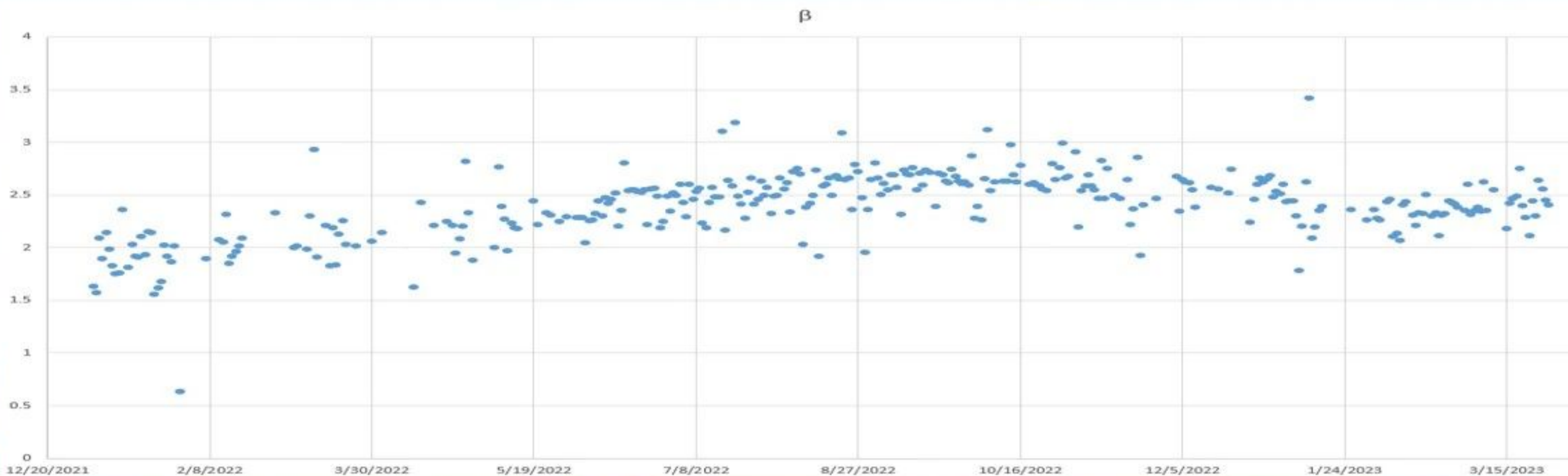


山东现货市场出现负电价



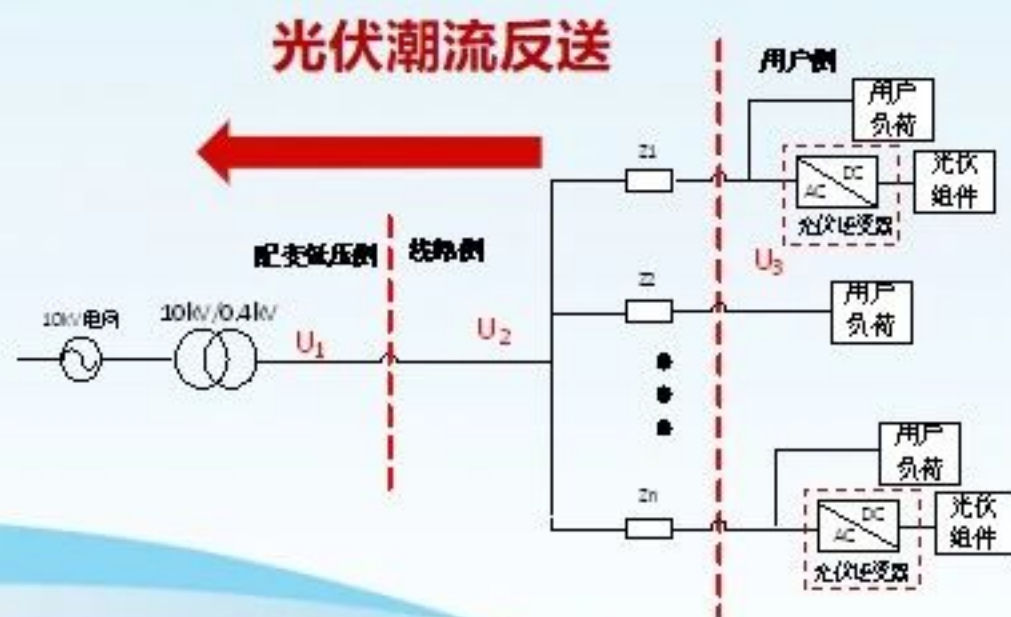
挑战1：系统平衡难度加大，运行安全风险增加

- **误差引入点：**分布式光伏一般采用依托集中式光伏预测结果折算的方式，引入偏差过大
- **存在问题：**分布式光伏场站多、分布广、采集信息少，无法针对所有场站单独建模



挑战2：可观可测可控能力不足导致反向重过载、台区过电压

- 分布式光伏并网仅在客户侧安装开断和电能计量设备，电气信息、状态信息无法实时监测并上传。
- 低压分布式光伏盲目并网与不合理规划，严重超出电网承载能力是造成反向重过载主要原因



分布式光伏配电台区拓扑结构示意图



台区内，某低压分布式光伏用户，建设屋顶光伏30千瓦。白天随着光伏出力增加，台区低压侧电压明显抬升，最高电压约251V（114% U_n ，超过国标107% U_n 要求）

挑战3：配电设备资产管理复杂，设备利用水平偏低

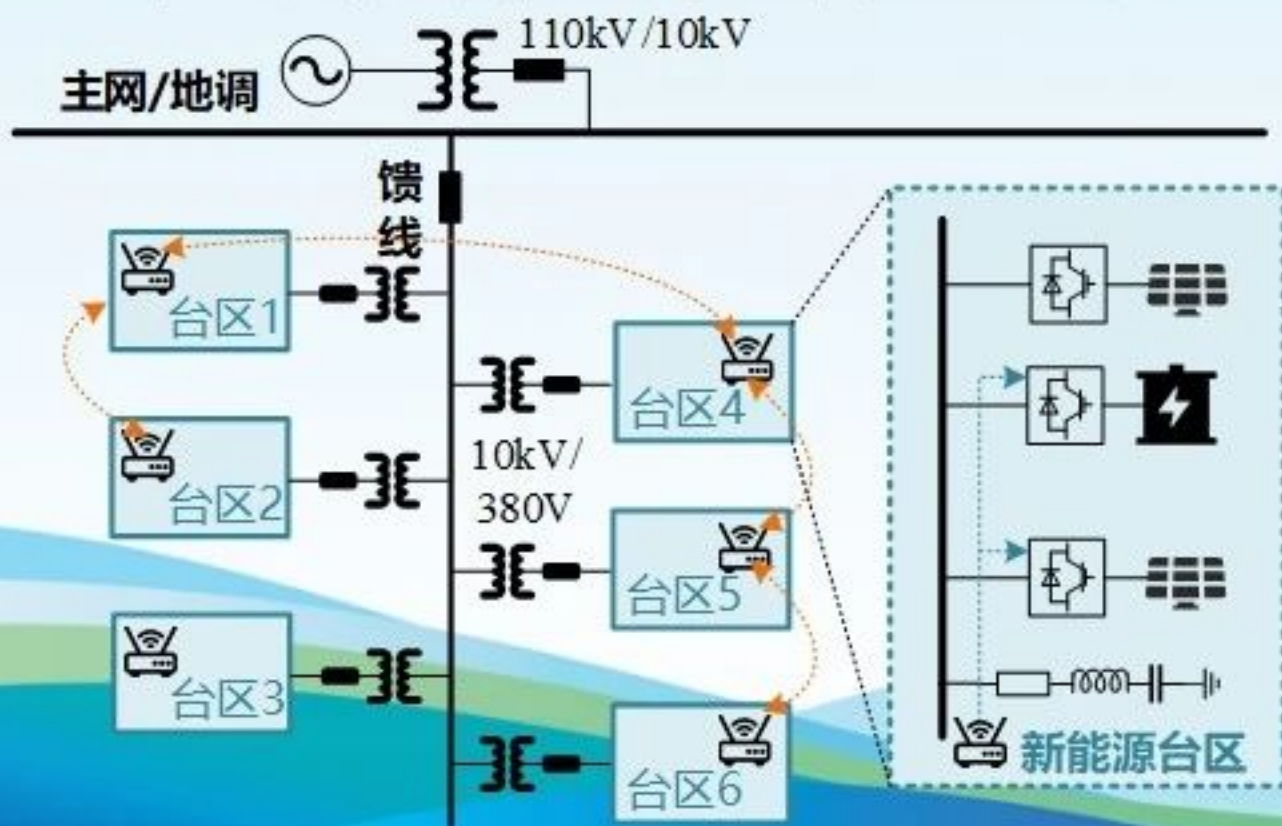
- 配电设备主体众多，点多面广，运维水平低，利用率低

	国家电网公司	南方电网公司
10kV公变	450万台	100万台
10kV专变	450万台	120万台
10kV馈线	28万条	10万条
城网可靠性	99.970%	99.898%
农网可靠性	99.843%	
线损率	5.87%	5.0%
年售电量	45783亿千瓦时	12626亿千瓦时

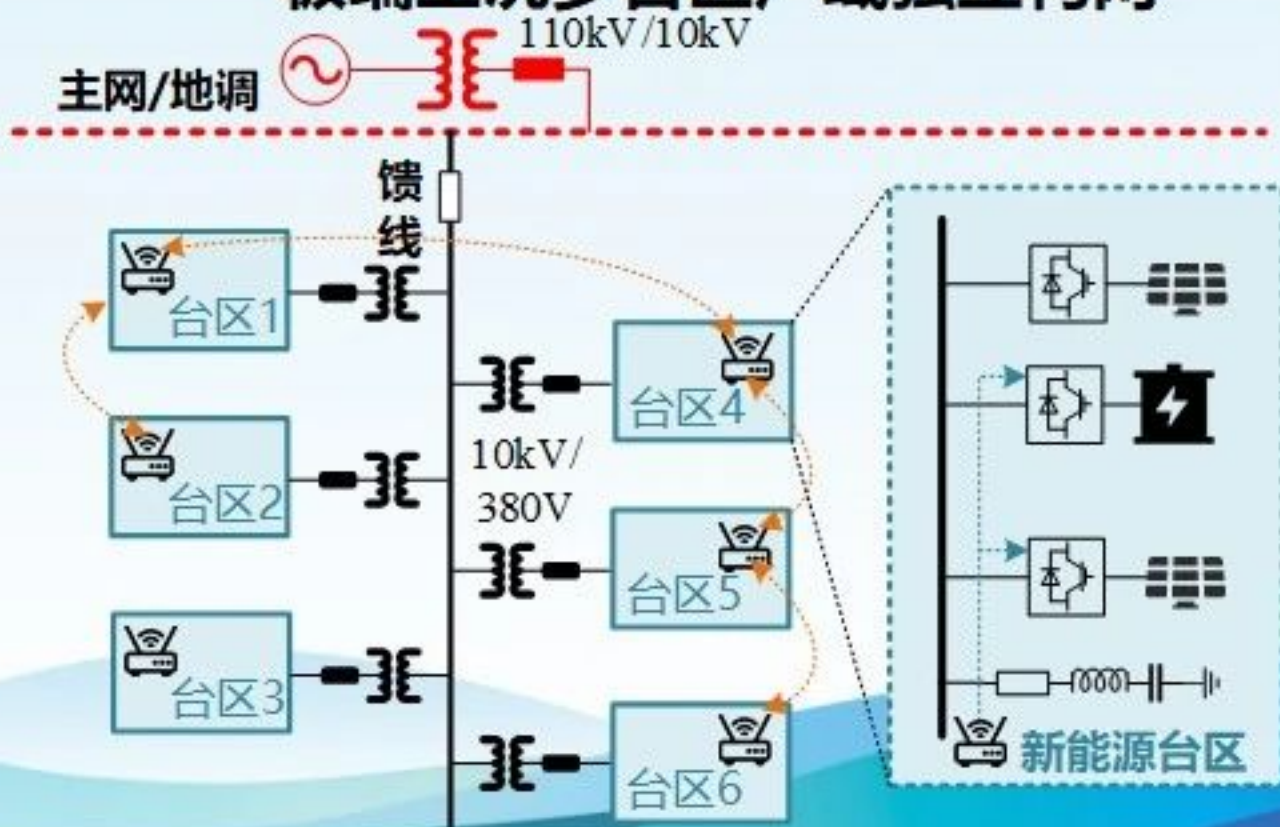
机遇1: 分布式新能源接入、新型电力电子装备提供了新手段

- 分布式电源具备调控潜力及作为韧性提升和备用电源的潜能，可作为应急电源，提高系统灵活性；
- 新能源经电力电子装备并网，电力电子控制能力极强，为改善电能质量提供了新手段

正常工况馈线潮流调节改善电压水平

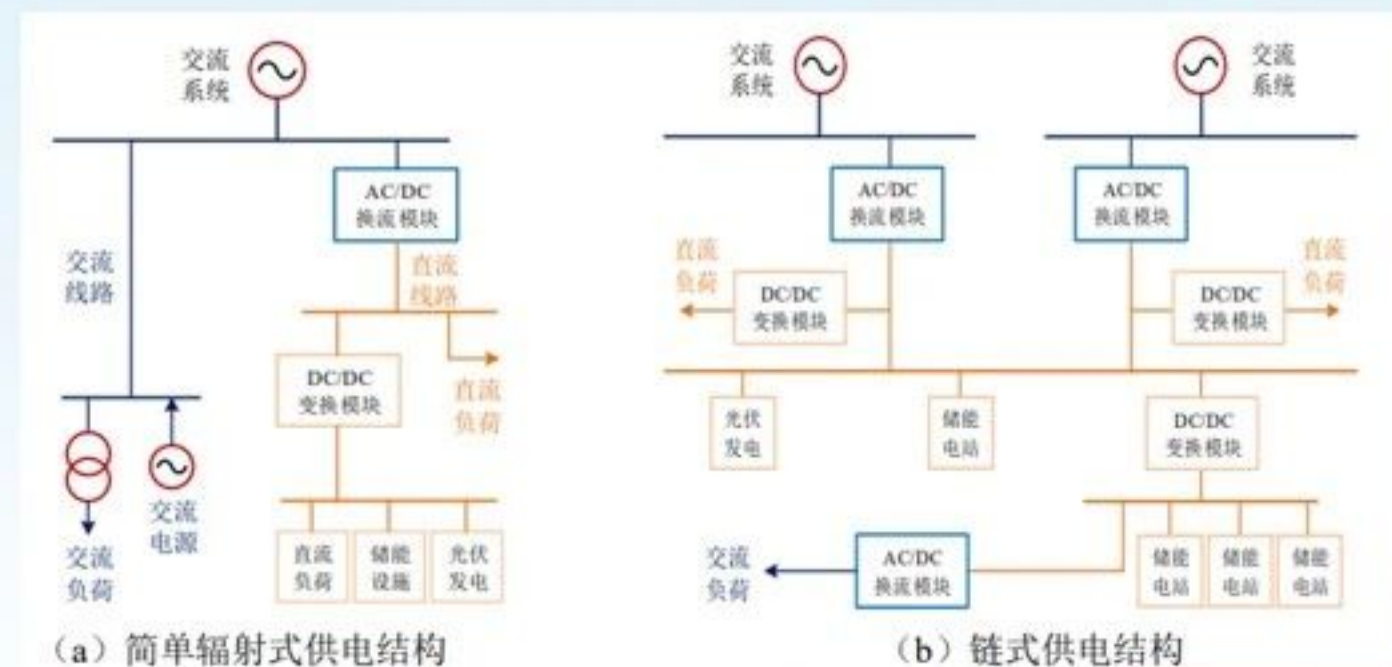
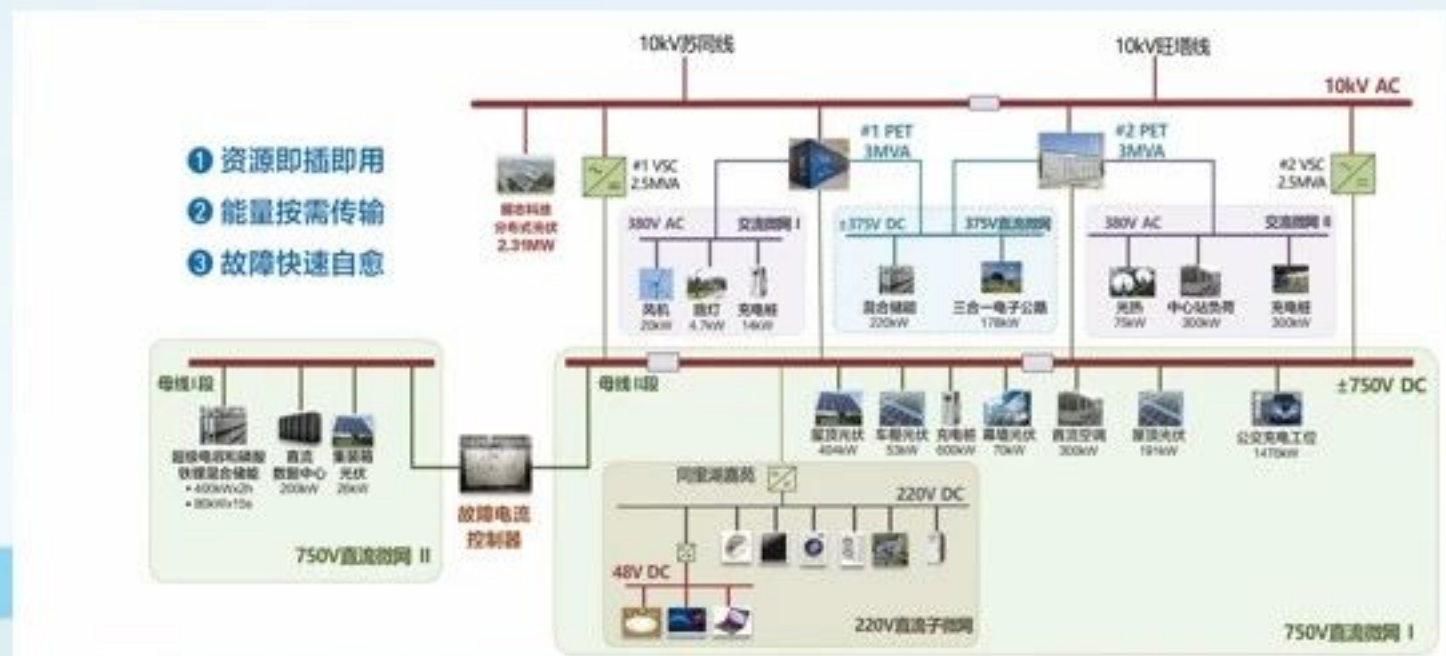


极端工况多台区广域独立构网



机遇2：交直流柔性互联为系统灵活组网、潮流灵活调控提供了新机遇

- 交流配电网潮流自然分布、可控性受限
- 电力电子装备和直流配电灵活性强、建设成本高
- 交直流混联配电系统潮流柔性可控、经济灵活



机遇3: 信息化与智能化为系统安全稳定运行提供了新的技术手段

- 人工智能与大数据等方法, 挖掘样本数据输入输出的内在联系, 更准确地量化系统响应、制定控制策略
- 通过源网荷储协调互动、信息物理融合, 实现配电域、用电域和用户环境的协同互动



新型配电系统数字化架构



配电系统智能运维架构

挑战	机遇
系统平衡难度加大，运行安全风险增加	分布式新能源、新型电力电子装备
反向重过载，台区过电压	交直流柔性互联
配电设备资产管理复杂，设备利用水平偏低	大数据分析、人工智能技术

趋势

配电系统灵活性提升应对不确定性源荷的高比例并网

目录

01

背景与意义

02

配电系统的灵活性

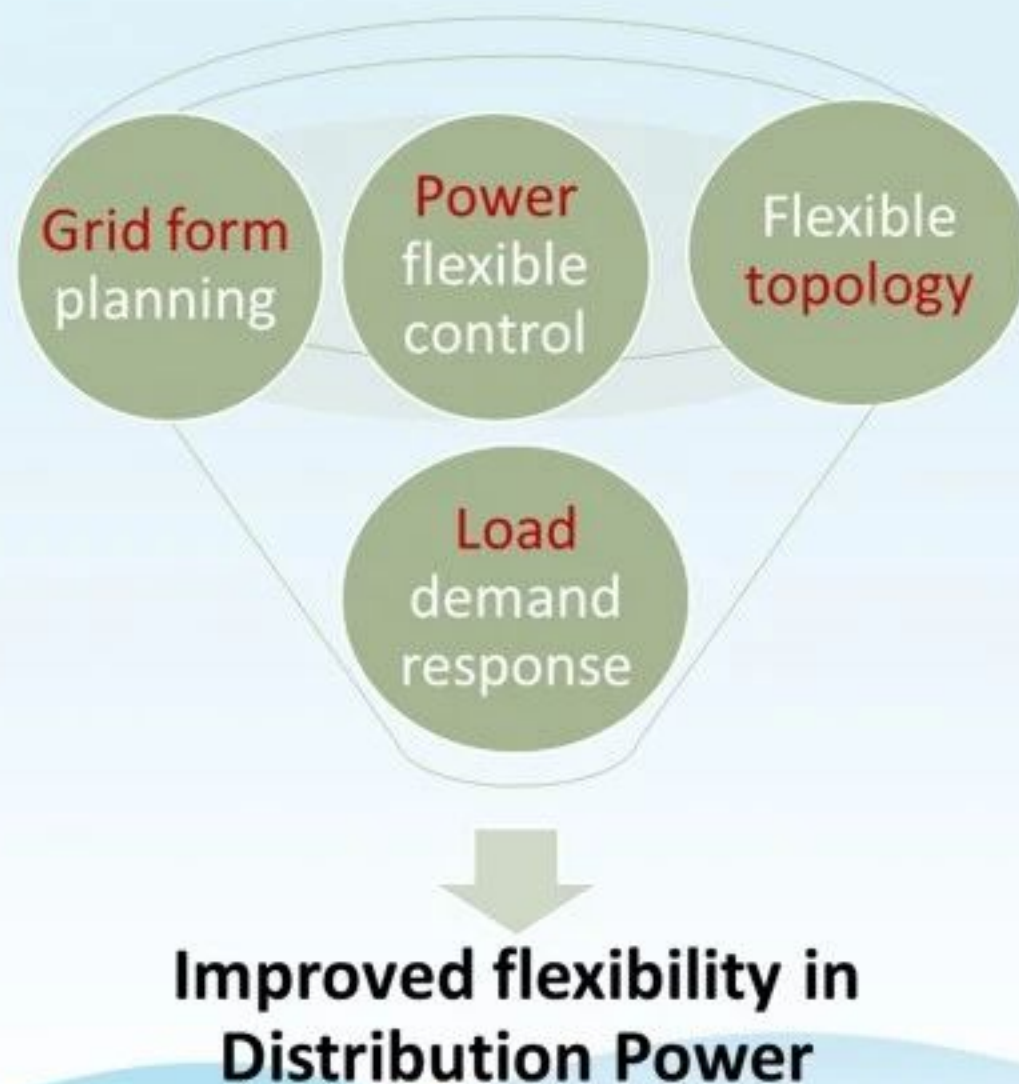
03

配电系统灵活性提升技术

04

总结与展望

配电系统灵活性：在一定时间尺度下，配电系统通过柔性控制和拓扑灵活切换，以经济可靠的方式快速响应分布式电源及负荷不确定性变化的能力。



新型配电系统的灵活性资源



提升配电系统灵活性的主要手段



主要手段

灵活性资源规划

多种灵活性资源协同规划

承载力评估

柔性互联装置选址定容技术

灵活性资源运行与控制

分布式电源短期预测技术

光伏、储能和需求响应的协同运行

交直流混合系统运行控制

软件定义组网技术

配电设备动态载流能力评估

设备灵活控制

软件定义设备技术

具有GFM+GFL功能的灵活逆变器

目录

01

背景与意义

02

配电系统的灵活性

03

配电系统灵活性提升技术

04

总结与展望



灵活性资源规划技术





配电系统灵活性提升技术/灵活性资源规划

1.1 多元灵活性资源协同规划



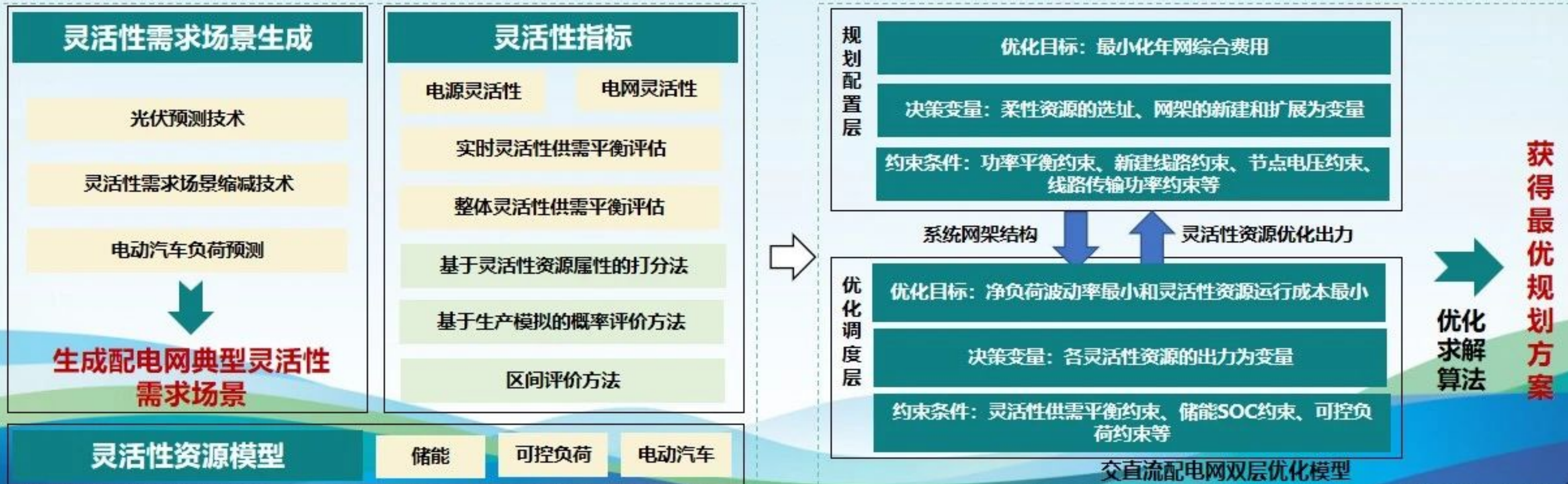
目标:

优化系统中的多元柔性资源布置, 平抑系统中源荷不确定性, 实现配电系统安全、稳定、经济运行



实施路径:

分析配电网灵活性需求, 生成灵活性需求场景, 构建灵活性评价指标, 针对各类柔性资源特点, 建立双层规划模型, 即规划配置层和优化调度层, 实现对柔性资源的规划。



配电系统灵活性提升技术/灵活性资源规划

1.2 新型配电系统不确定性源荷承载力分析

- 承载力评估需综合考虑安全运行、供电质量、运维检修、规划建设等诸多因素，本质上是随机时序潮流问题。



承载力分析

分布式源荷承载力评估
评估配电系统承载分布式电源和接入EV负荷的能力

量化层面

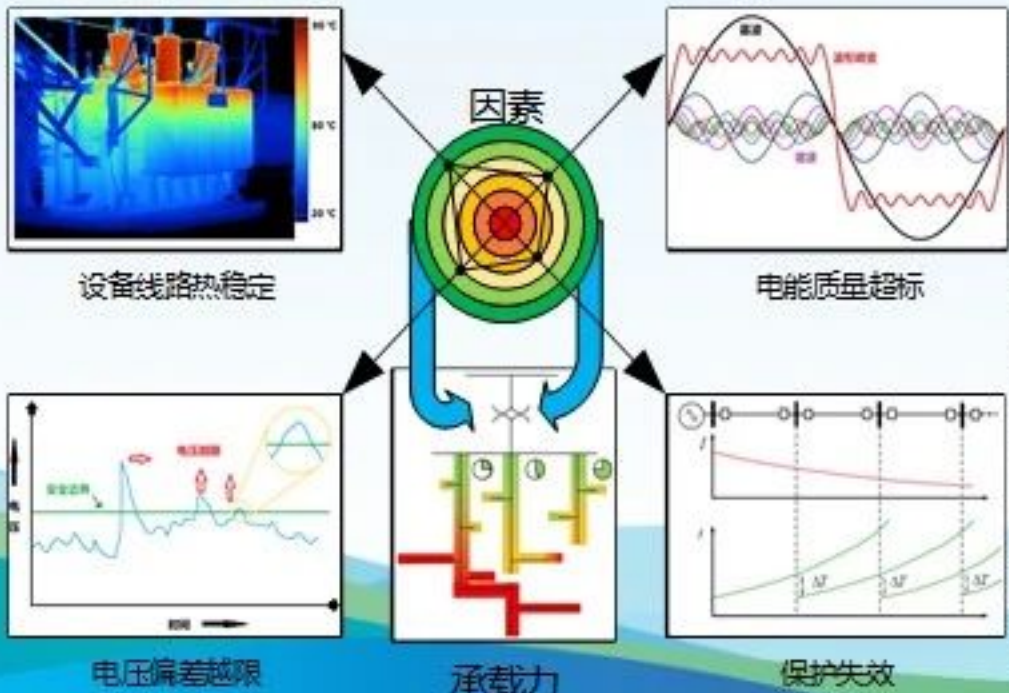
承载力提升

多元灵活性资源协同规划
通过对灵活性资源的优化配置提升配电系统承载力

规划层面

电力设备动态载流能力提升
通过提升设备自身承载能力提升配电系统承载力

设备层面



配电系统灵活性提升技术/灵活性资源规划

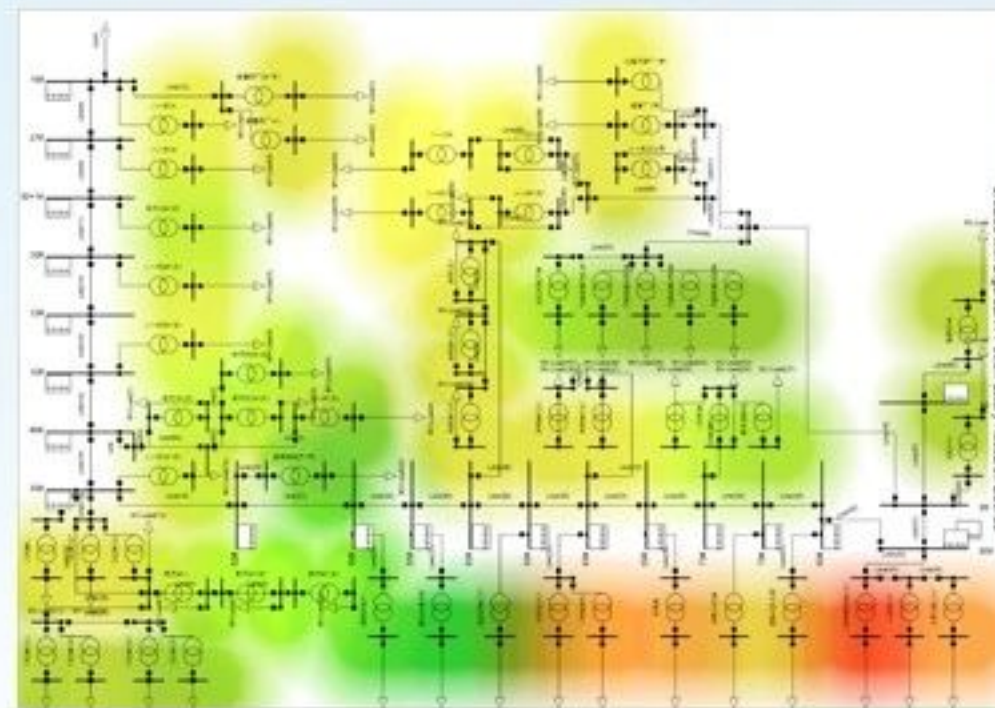
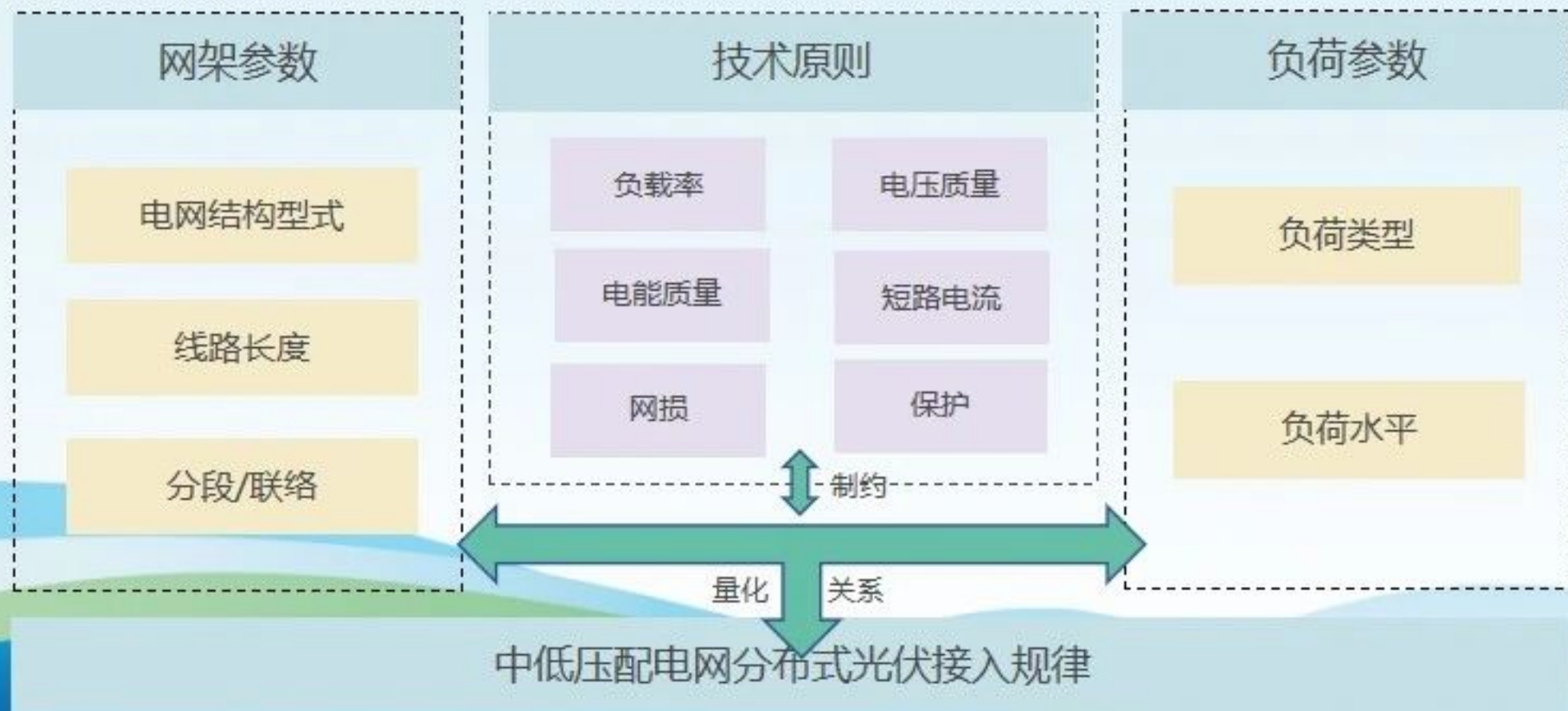
1.2 新型配电系统不确定性源荷承载力分析

问题:

配电系统承载分布式电源/电动汽车充电等源荷接入的能力不明

解决思路:

通过不同场景随机/时序潮流计算, 计及多时间尺度、灵活性资源及不确定性等特征, 定量关系描述分布式光伏接入规律, 为实际配电系统分布式光伏规划提供参考



- 元件热极限与电压问题为主要约束因素
- 负荷特征与光伏承载力密切相关

1.2 分布式光伏承载力评估及选址定容优化软件

■ 研究了分布式光伏承载力评估及选址定容优化软件

数据导入板块:

导入网架基本数据与对应光伏数据



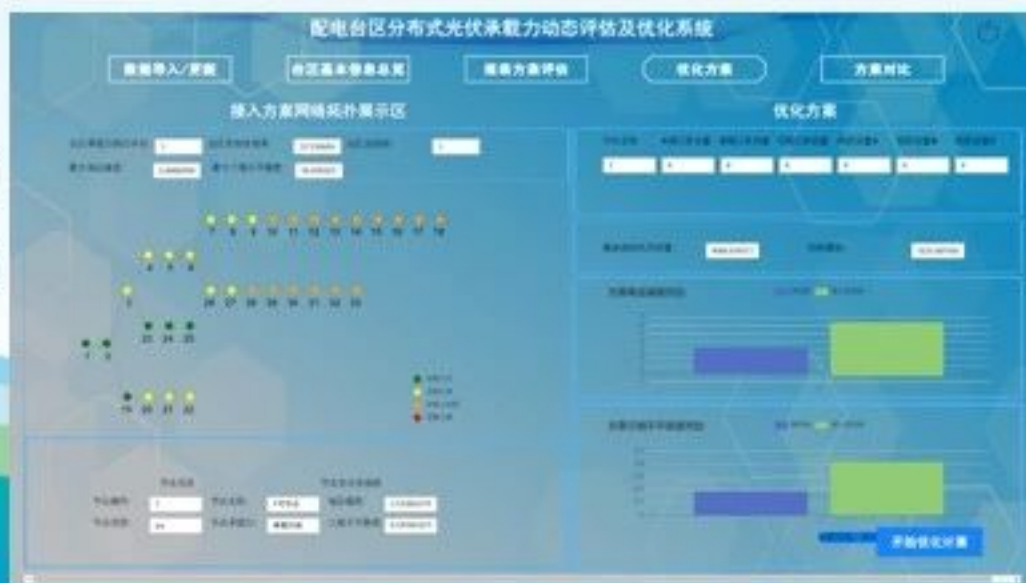
报装方案评估:

评估报装方案对网络的影响, 与原始网络开展指标对比



优化方案计算:

计算光伏优化接入方案, 并分析对网络的影响



方案对比板块:

对比报装方案与优化方案的相关指标, 并得出对应结论





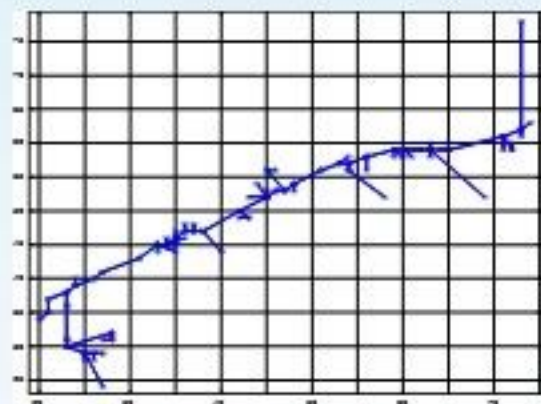
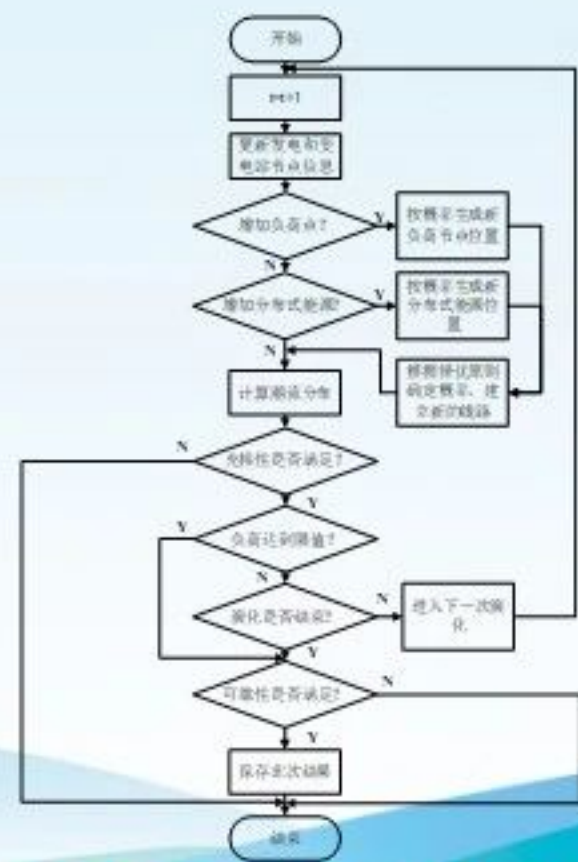
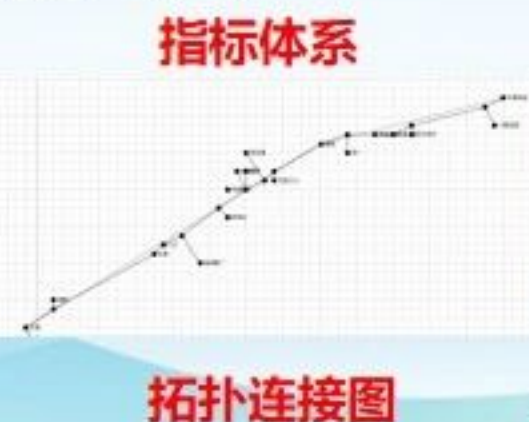
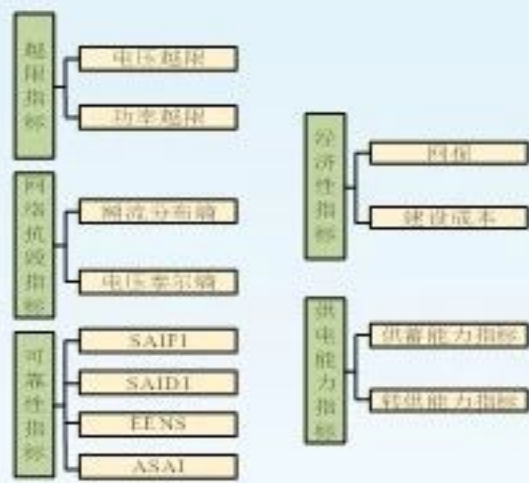
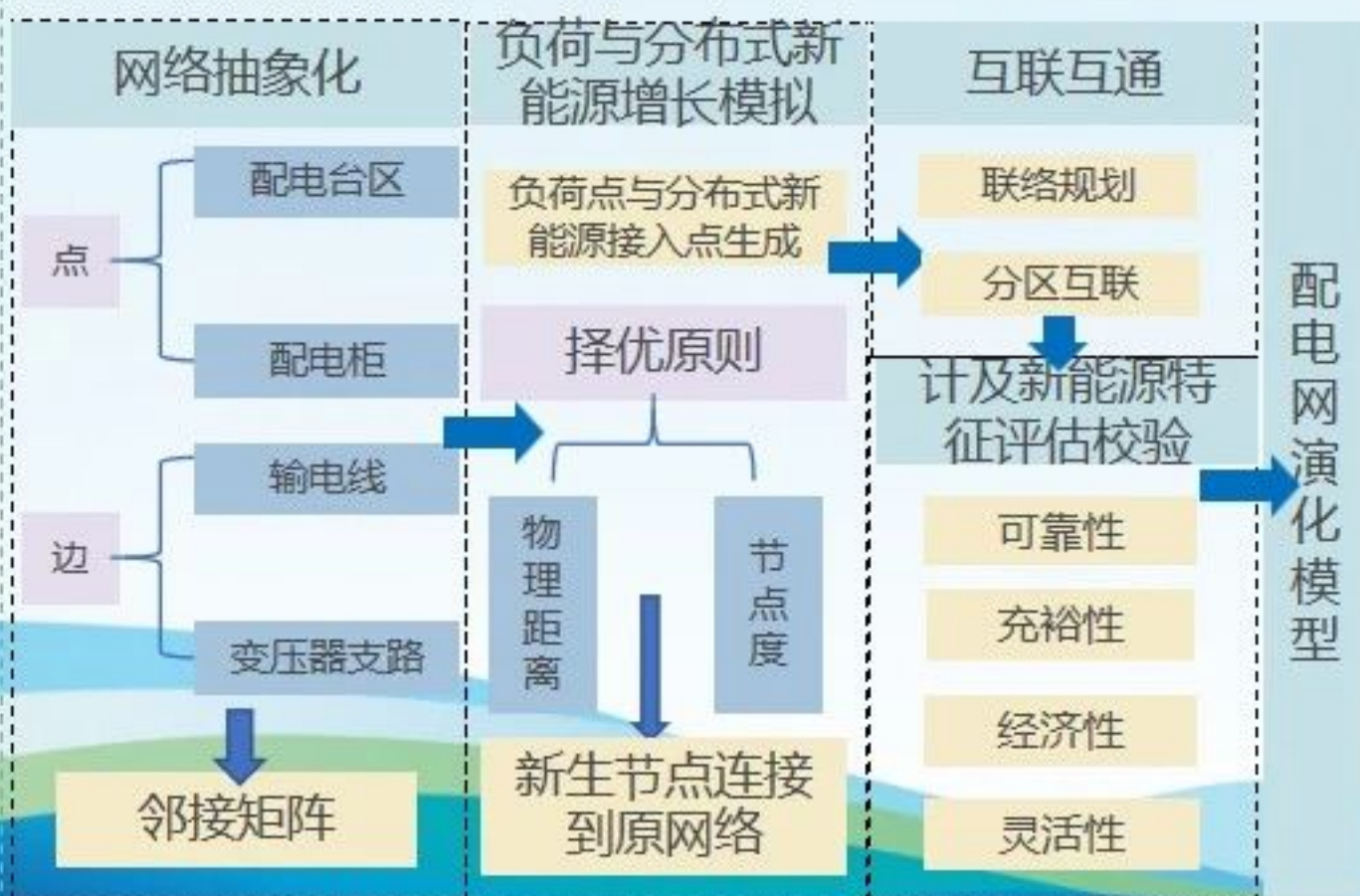
1.2 承载力评估——配电网结构演化研究

目标:

研究中低压电网形态演变多维驱动因素，揭示中低压电网的多时空尺度的演变机理，建立中低压电网结构演化模型

实施路径:

建立网络演化关键指标体系，基于图论对网络进行抽象化，模拟负荷/分布式新能源增长及网络生长演化，获取形态转变的关键时间，设定互联互通方案，并基于网络技术经济指标影响对演化模型进行评估校验。



阶段优化结果

- 不同场景形态转变关键时间不同，与负荷水平与光伏渗透率相关

负荷与分布式新能源增长模拟



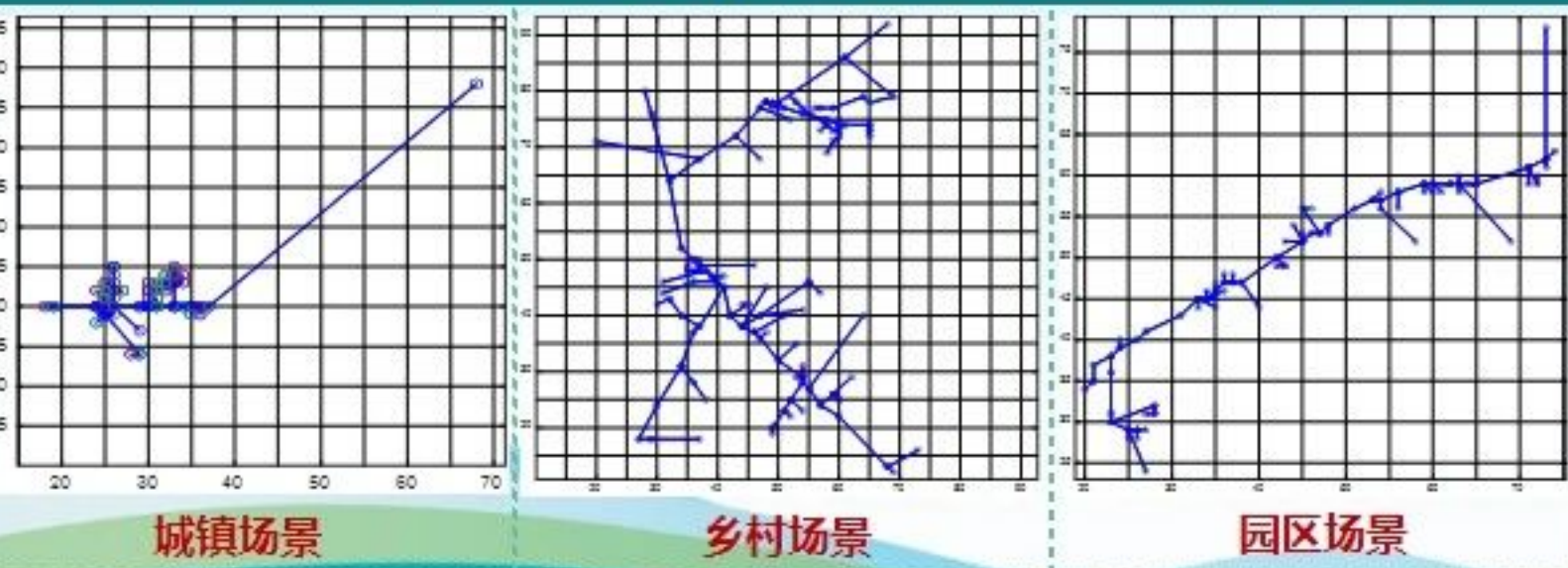
配电系统灵活性提升技术/灵活性资源规划

1.2 承载力评估——配电网结构演化研究

广水县域电网作为县域级100%新能源新型电力系统运行场景与试验基地，从中选取典型场景进行研究。

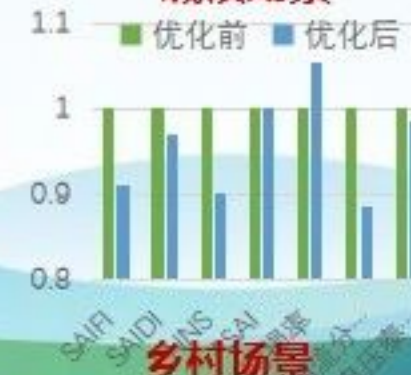
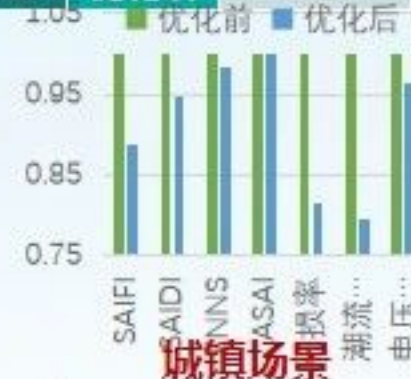
- 城镇场景：有着较高的负荷密度与较高的可靠性
- 乡村场景：配电网一般选用最简单的单辐射结构，供电区域较为广阔但负荷较为分散
- 园区场景：含有大量工厂和企业，用电量很大，负荷密度高

广水县域电网城镇、乡村、园区三类典型场景优化结果



- 不同场景形态转变关键时间不同。城镇场景为光伏渗透率达到40%时，乡村为20%，园区为30%。

指标	SAIFI 次/(年·户)	SAIDI 小时/(年·户)	ENNS MW/(年·户)	ASAI %	网损率 %	潮流分布 熵	电压泰尔 熵
城镇	优化前	0.52	3.99	24.34	99.95	5.20	0.64
	优化后	0.46	3.78	23.95	99.96	4.23	0.51
乡村	优化前	0.56	4.60	15.26	99.95	4.92	0.97
	优化后	0.51	4.46	13.78	99.96	5.19	0.47
园区	优化前	0.17	3.72	16.84	99.96	6.49	0.14
	优化后	0.13	3.45	14.19	99.97	6.34	0.14



除了乡村场景下的网损率与园区场景的电压泰尔熵，其他指标在优化后都有了显著改善

潮流分布熵计算

$$\beta_i(m) = \frac{P_i^0(m)}{P_i^{\max}(m)}$$

$$H(m) = -\sum_{i=1}^n \delta \beta_i(m) \varphi_i(m) \ln \varphi_i(m)$$

$$\varphi_i(m) = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

$$\beta_i(m) = \frac{1}{l_i} \sum_{i=1}^n \beta_i(m)$$

电压泰尔熵计算

$$T_{i \rightarrow j} = (T_i + T_j) Y_{ij} = \left(\sum_{m=1}^M \frac{Y_m}{Y_i} T_m + \sum_{m=1}^M \left(\frac{Y_m}{Y_j} \right) \ln \left(\frac{Y_m / Y_i}{Y_m / Y_j} \right) \right) Y_{ij}$$

$$U_i = \sum_{j=1}^N |U_{i \rightarrow j} - U_j| \quad \begin{cases} Y_{i(k \in m)} = U_{i(k \in m)} \\ Y_m = U_m \\ Y_i = U_i \\ T_{i \rightarrow j} = T_{j \rightarrow i} \end{cases}$$

1.3 柔性互联装置选址定容

目标:

研究满足大规模分布式资源接入需求的配电装备优化布局方法

实施路径:

考虑多优化目标, 计及源、荷等影响因素, 对含柔性配电装备的配电系统建立关键设备模型、系统运行模型, 对柔性装备进行优化配置



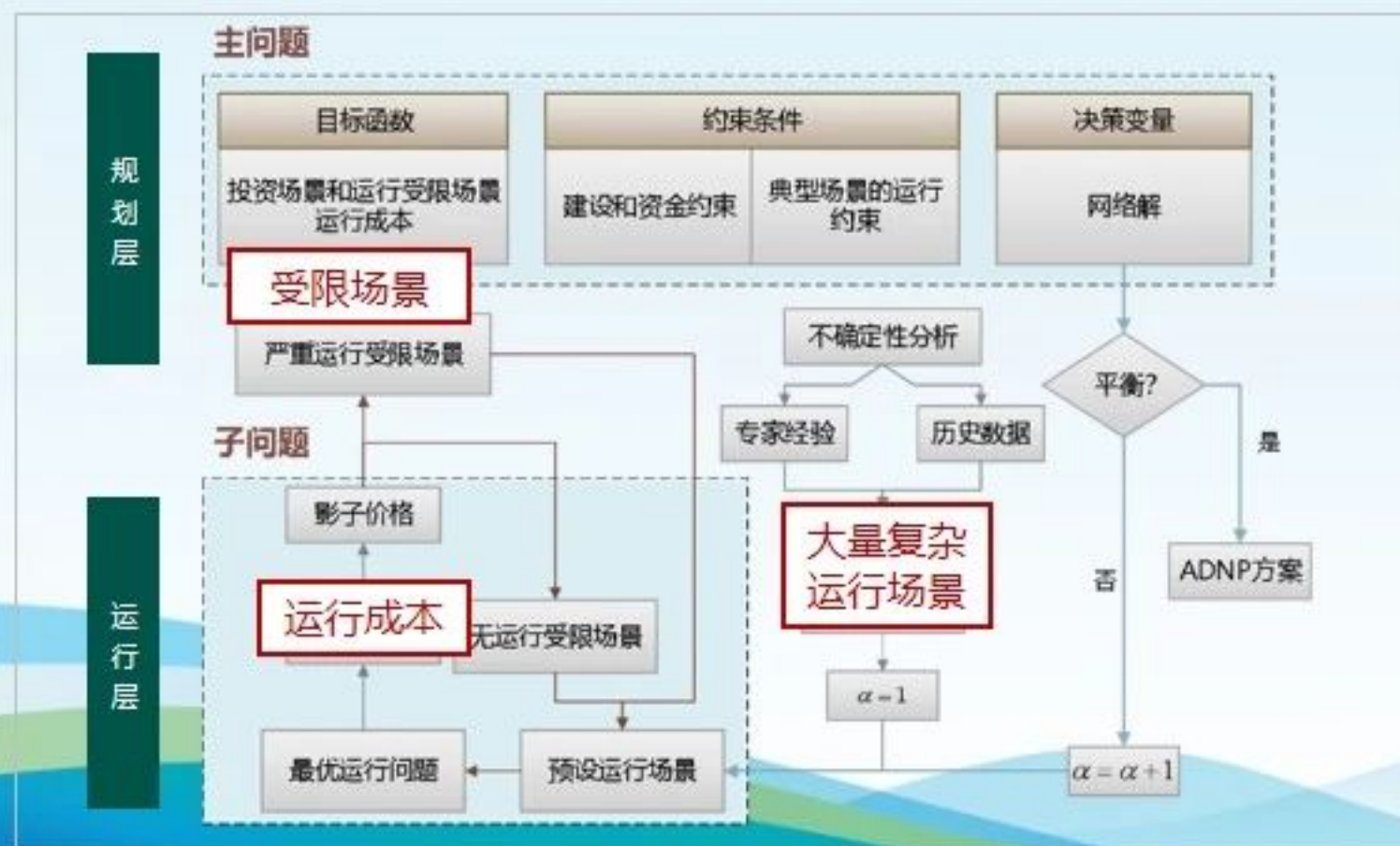
1.3 选址—含SNOP的交直流配电系统双层规划

问题1:

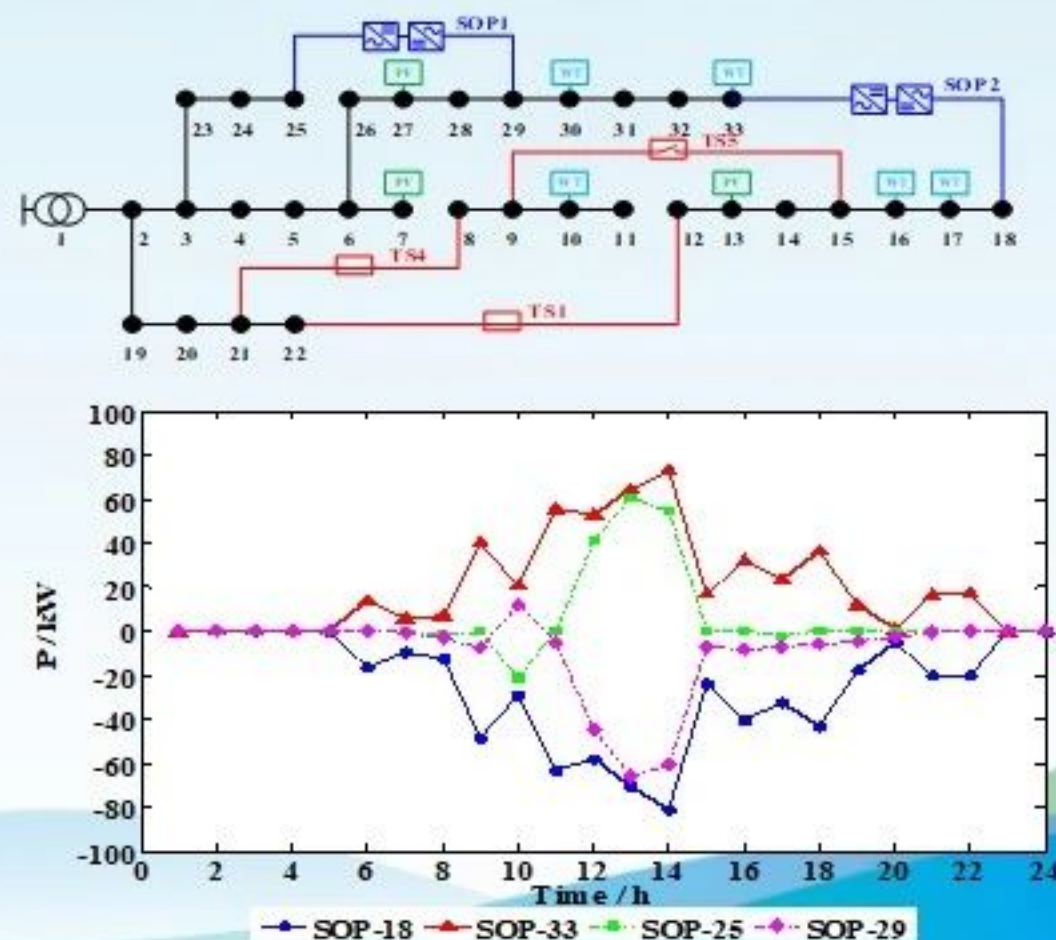
面向多场景多工况的柔性多状态开关配置方法?

解决思路:

建立了含柔性多状态开关的交直流配电系统安装位置及容量优化模型，结合受限程度排序实现场景筛选，为复杂运行场景下的交直流配电系统规划和关键装备配置提供支撑。



交直流配电系统双层规划模型框架



交直流配电系统双层规划模型算例

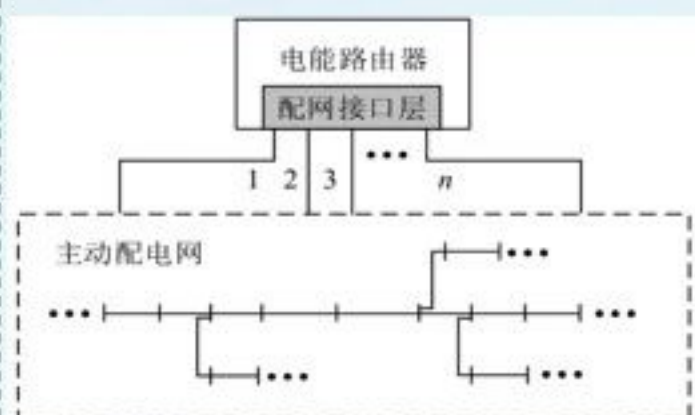
1.3 定容——电能路由器配置

问题2:

面向多场景多工况的电能路由器配置方法?

解决思路:

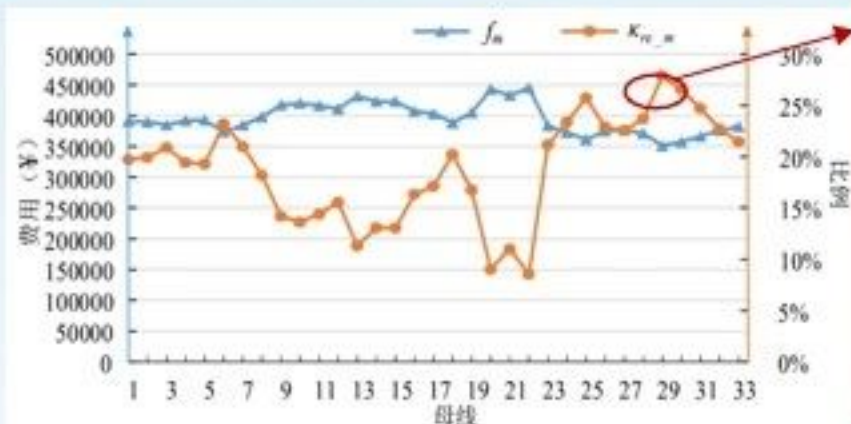
提出电能路由器配置策略, 构建“聚散”运行场景架构, 分析柔性资源接入对消纳需求影响, 建立配网综合适应性评估体系, 求解单个电能路由器配置方案, 降低配网电压偏差、运行成本。



电能路由器模型



电能路由器配置策略



电能路由器本体在不同母线的成本及收益

- 电能路由器安装于节点29时年综合成本最小, 对应的收益率最大
- 此时, 标么值计算下的松弛间隙 \$k_{gap}\$ 为 \$1.91e^{-4}\$, 即最大相对误差远小于实际值, 优化结果有效。



“聚散”运行场景架构

消纳指标

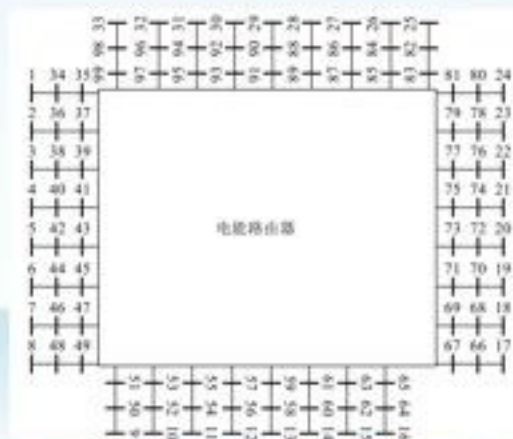
$$K_{DG,m} = \frac{I_y \sum_{g,s} P_{g,s}}{I_y \sum_{d,l,s} P_{d,l,s}} \times 100\% , j \in N_{ac}^{DG}, k \in N_{ac}^{busm}$$

建模复杂度

$$K_{inv,m} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^m \sum_{l=1}^N (U_{l,s} - 1)^2}{N_{bus}^m N_s}} , K_{var,m} = \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^m \left(P_{s,s} - \sum_{s=1}^{m-1} \frac{P_{s,s}}{N_s} \right)^2$$

$$K_{gapdc} = \max_{i \rightarrow j, s} \left\{ \hat{U}_{j,s} + \hat{I}_{j,s} \hat{U}_{j,s} - \hat{I}_{j,s} \right\}_2$$

配网综合适应性多维度评估体系



电能路由器端口配置情况

配置端口	端口容量(kVA)	$P_{s,s}^{DG}$ (kW)	$Q_{s,s}^{DG}$ (kvar)
35	700	599.73	361
91	300	-296	-46
93	300	-299.89	-8
$L_{1,34}$	1 → 2 → 3 → 23 → 24 → 25 → 29		
$L_{2,90}$	29 → 29		
$L_{3,92}$	30 → 29		
建设线路	$Len_{1,34}$ (km)	$Len_{2,90}$ (km)	$Len_{3,92}$ (km)
长度	11.10	0	1.69
类别	损耗(MW)	K_{var}	K_{loss}
原始配网	0.203	0.1171	-
文献	0.137	0.0706	32.51%
本文	0.1063	0.0465	47.63%

电压偏差、成本均降低



灵活性资源运行控制



配电系统灵活性提升技术/灵活性资源运行控制



2.1 分布式电源短期预测



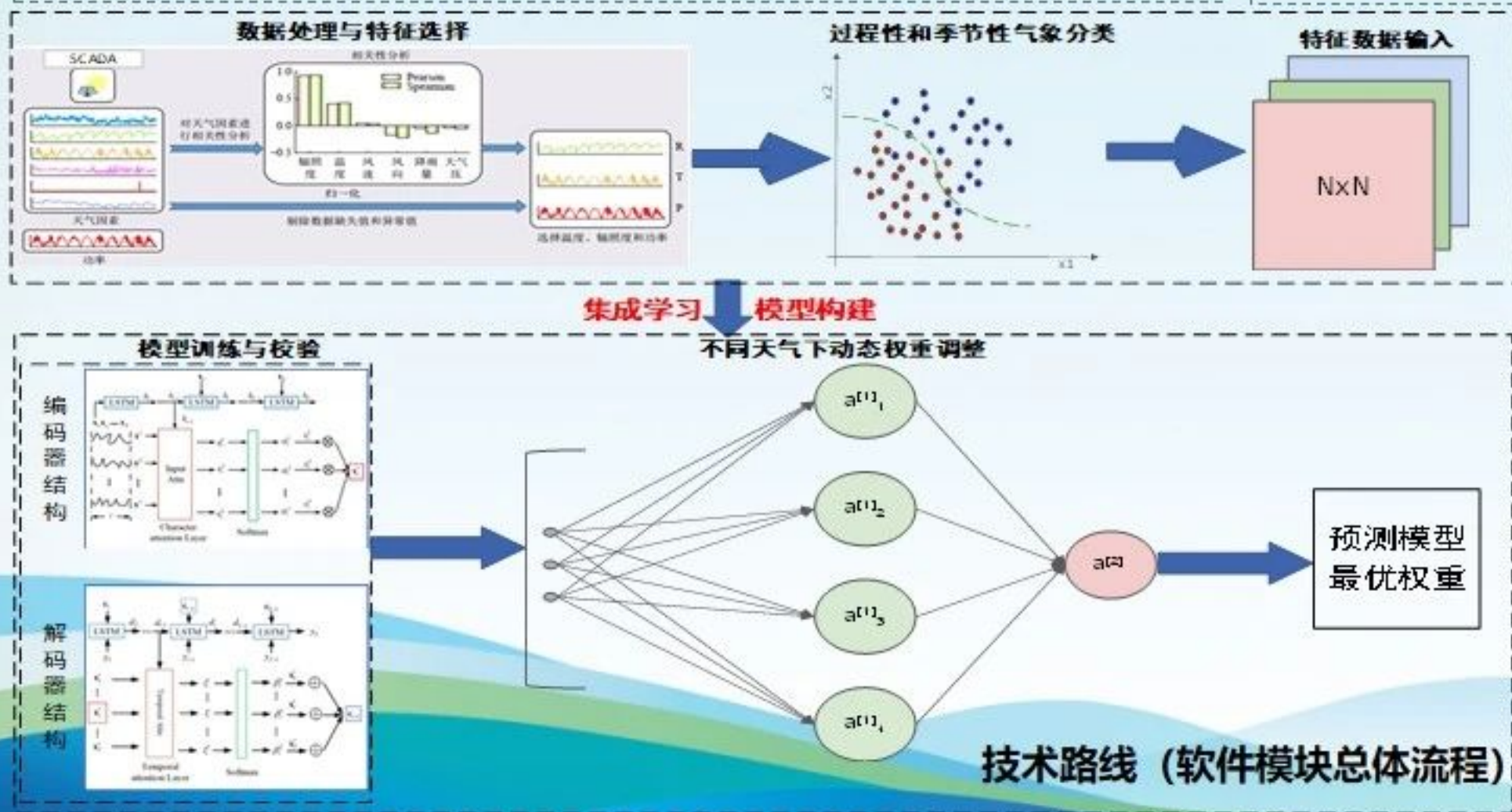
问题:

针对YX岛光伏/风力短期功率预测精度较低问题, 研究变分模态分解和梯度提升树融合集成算法

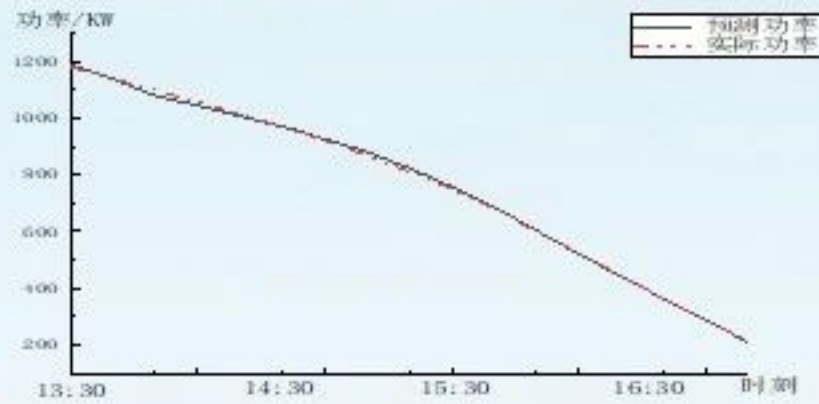


解决思路:

在日常预测中针对气象因素的季节性差异, 动态调整算法内部各个模型权重。超短期功率预测第4小时月平均绝对误差分别为5.69%, 5.91%, 5.71%, 其三个月的总体月平均误差为5.77%



预测结果
分析与比较



超短期功率
预测结果

不同算法光伏超短期功率预测误差比较

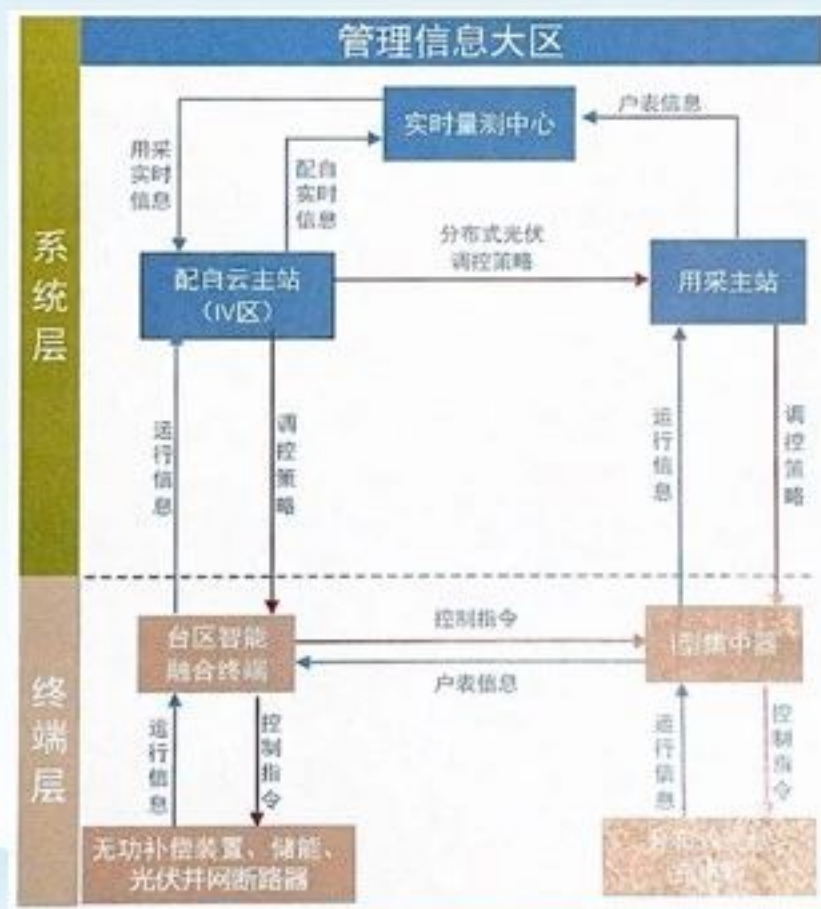
预测模型	XGBoost集成学习	RNN	RESNET
3月	5.69%	6.83%	9.26%
4月	5.91%	7.64%	8.39%
5月	5.71%	7.28%	8.51%
月平均误差	5.77%	7.25%	8.72%

所提算法

2.2 考虑光伏、储能、需求响应协同的优化控制

• 直接接入10kV馈线的分布式光伏（山东电力公司）：

- **调峰**：按照“先控后调”的顺序，省级控制中心生成10kV分布式光伏的总调峰需求，区域控制中心执行分钟级AGC控制并完成实时调节。
- **电压调节**：区域控制中心的AVC可直接控制10kV分布式光伏输出，以进行无功电压调节。



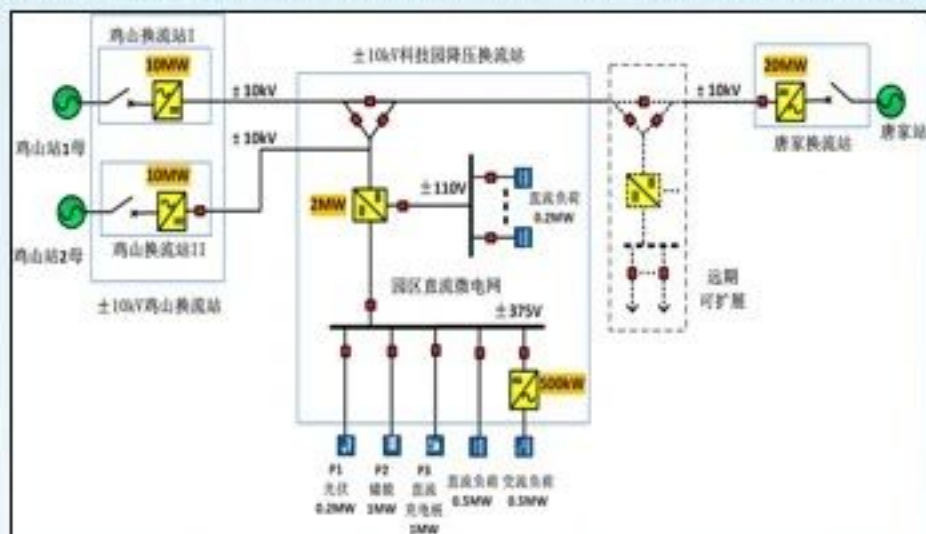
2.3 交直流混合系统优化调度技术

问题:

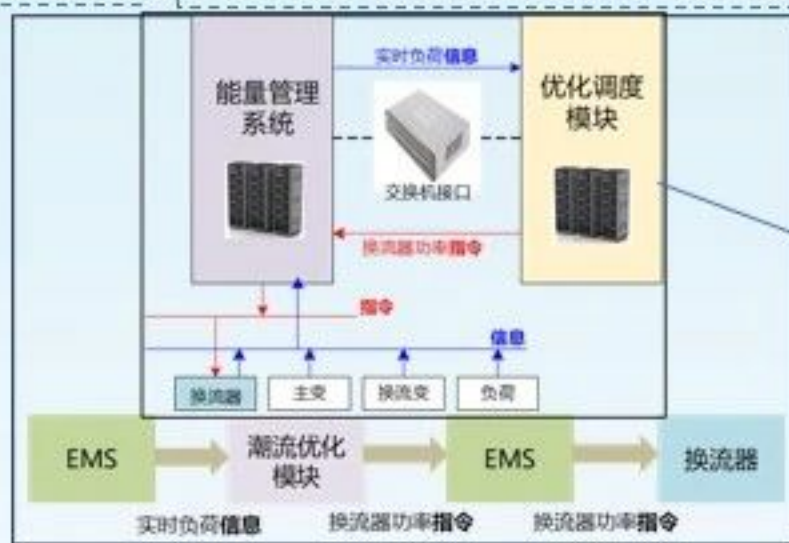
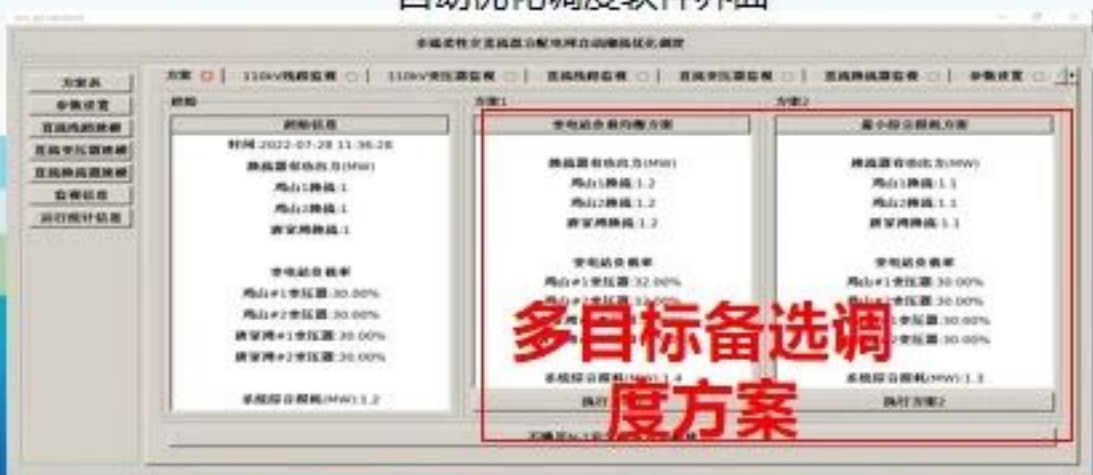
交直流配电系统潮流灵活调控潜力大, 调控目标多样, 如何协同调节交流和直流配电线路的潮流, 实现交直流系统级优化运行目标?

解决思路:

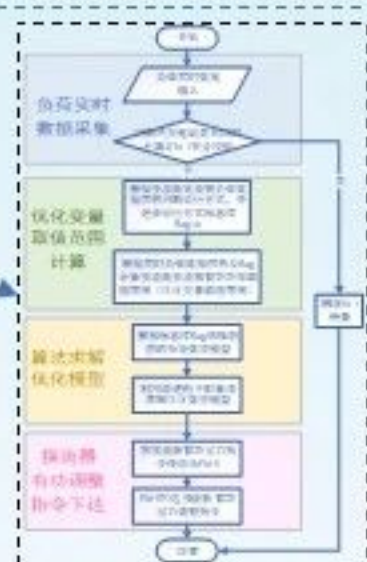
利用直流配电线路灵活潮流可调技术优势, 在线生成面向运行经济性与安全性的多目标调度方案, 开发自动闭环多目标潮流优化调度软件, 避免传统人工调度方式的时滞性问题。



珠海三端柔直配网拓扑
自动优化调度软件界面



自动优化调度模块与EMS配合方式
多目标优化调度结果



闭环调度流程

优化前			优化后			成效
鸡山站 负载	唐家站 负载	损耗	鸡山站 负载	唐家站 负载	损耗	
17%	70%	0.14	23%	65%	0.21	保证重载配电站N-1
17%	27%	0.04	14%	31%	0.024	降低损耗40%
77%	27%	0.23	65%	40%	0.26	保证重载配电站N-1



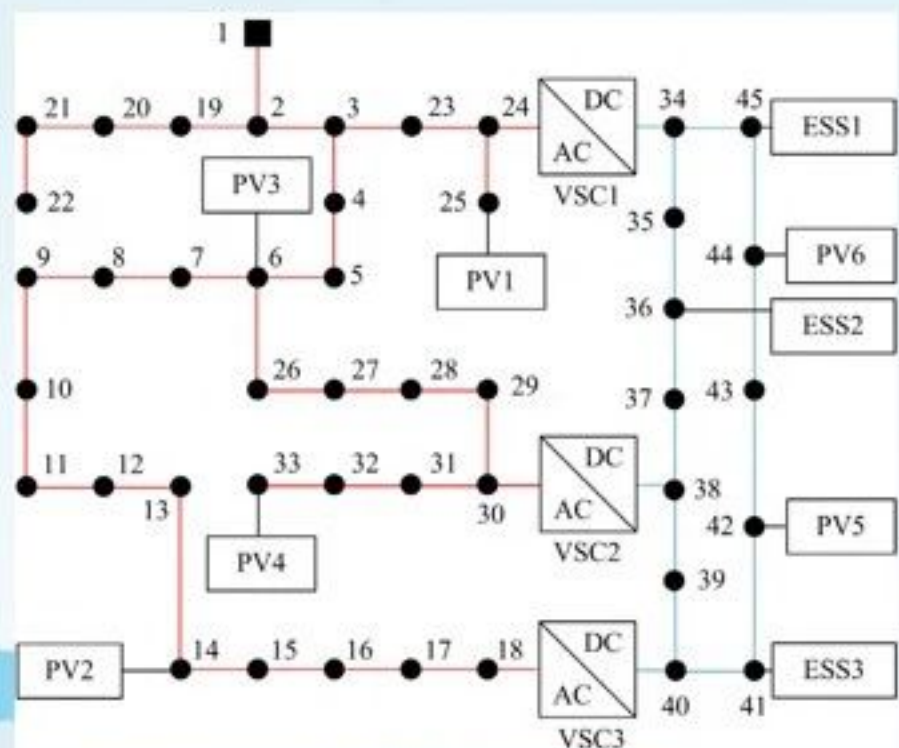
2.4 软件定义组网技术

目标:

综合考虑网损和电压偏差寻求连续时段配电系统最优运行方式和网架结构

实施路径:

考虑分布式资源接入运行影响因素, 建立交直流配电系统拓扑优化模型, 通过软件定义实现源网荷储的灵活调节和拓扑灵活切换。



45节点测试系统网架

典型交直流配电系统网架

用拓扑图抽象描述

动态拓扑分析

支路的移除 支路的并入

拓扑相似度度量

快速获得实时拓扑下网络参数, 与求解算法有机结合

分布式电源出力单调性

负荷出力单调性

聚类分析

初步划分拓扑切换时刻点

拓扑层
优化目标: 适应高比例分布式电源接入的配电系统综合适应性评估指标
决策变量: 拓扑切换方案 (切换拓扑+切换时刻)

拓扑切换方案

源荷运行策略

源荷互动层
优化目标: 适应高比例分布式电源接入的配电系统综合适应性评估指标
决策变量: 分布式电源出力、负荷需求响应

优化求解算法

获得最终源荷调节方案、拓扑切换方案

交直流配电系统拓扑双层优化模型

2.5 电力设备动态载流能力评估



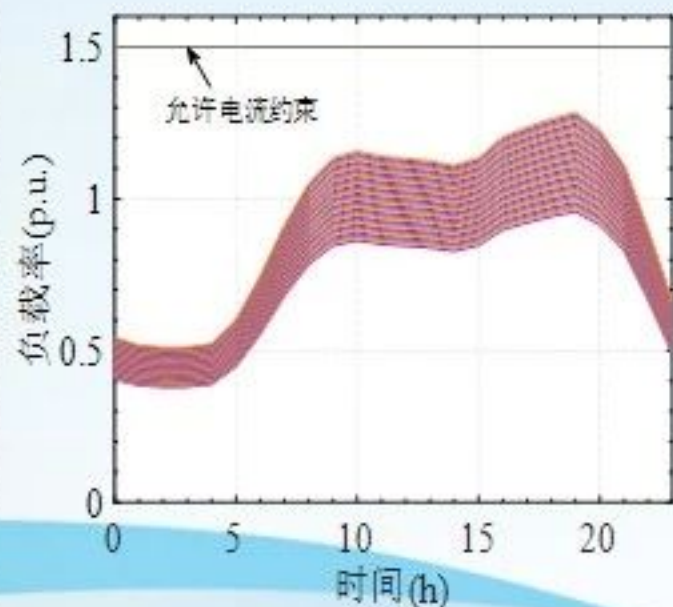
目标:

结合配电设备热点温度在线辨识数据, 考虑设备热容量和运行工况, 分析多工况下配电设备的动态载流能力滚动预测。

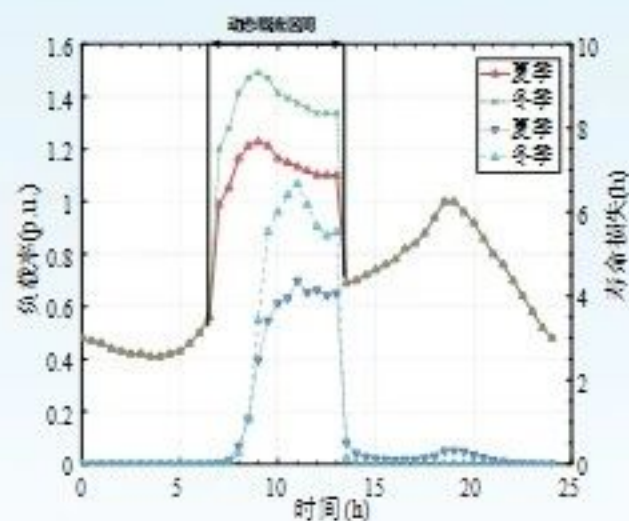


实施路径:

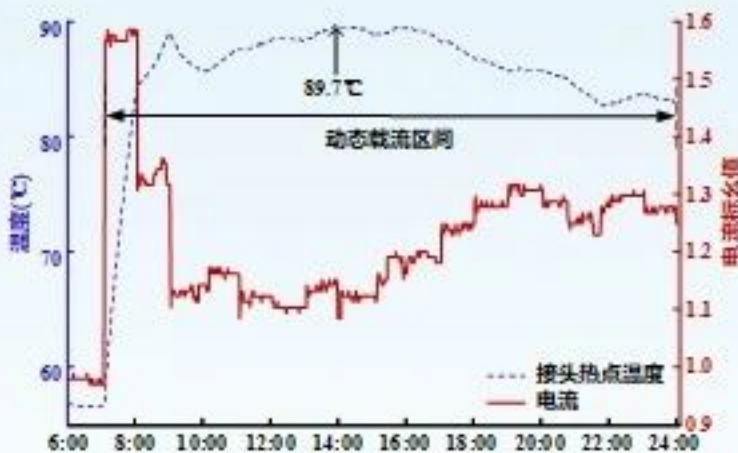
开展不同工况下的分布式光伏出力和负荷需求预测, 确定源荷波动和散热环境影响下的设备热点温度数字推演, 提出设备动态载流能力, 建立考虑设备动态载流安全校正控制优化模型。



周期性动态载流能力评估



热老化健康状态评估



允许温度约束下动态载流曲线预测

关键点:

结合热点温度实时辨识结果对设备动态载流能力滚动预测, 并结合设备热老化健康状态进行实时修正



设备灵活控制



软件定义设备技术

逆变器灵活控制技术

配电系统灵活性提升技术/设备灵活控制

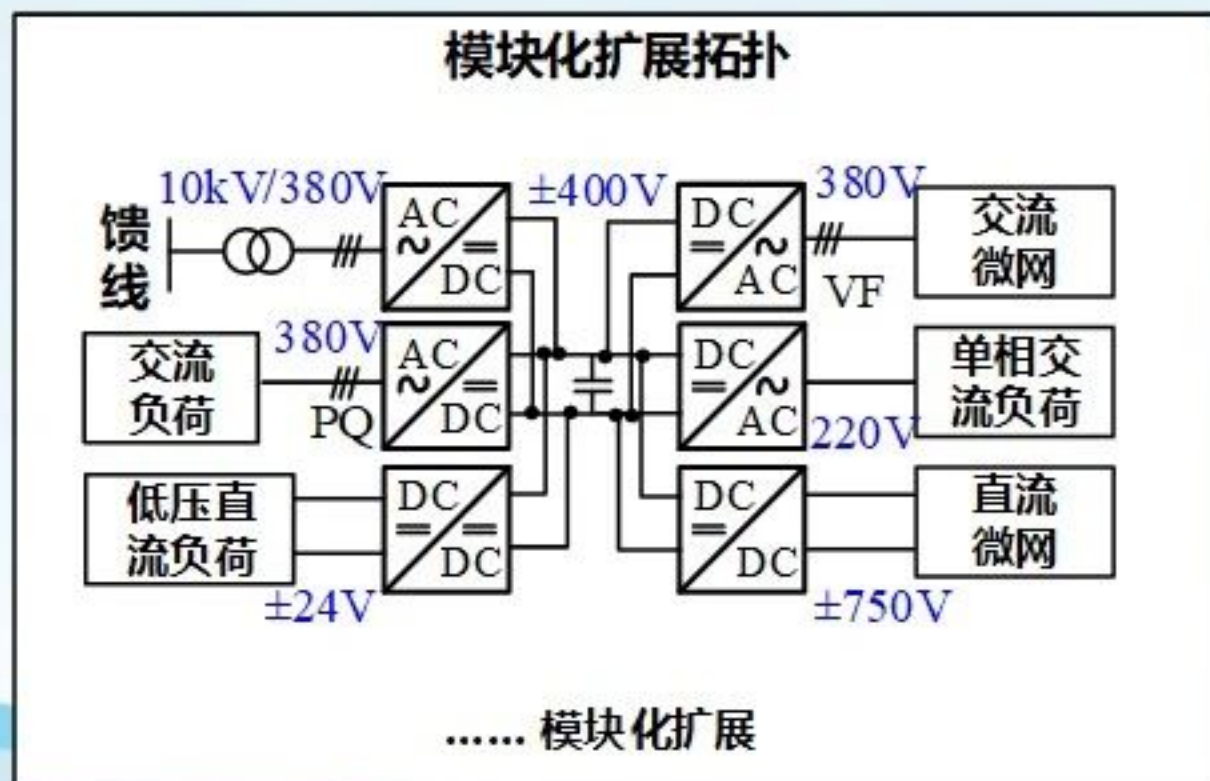
3.1 软件定义设备：多端口多功能配电装置

目标：

通过硬件结构与软件功能解耦，实现不同设备功能的灵活切换，满足灵活组网运行对变换器功能多样化需求。

实施路径：

梳理配电主要场景、工况及对统一配电装备的功能需求，研制模块化多端口统一配电装备，具备变压分流、潮流控制、构网控制、电能质量治理、故障隔离与恢复等功能。



➤ 软件定义技术与交直流混联配电系统结合

➤ 运行目标与数据解耦

➤ 控制策略与拓扑解耦

➤ 业务功能与硬件解耦

配电系统灵活性提升技术/设备灵活控制

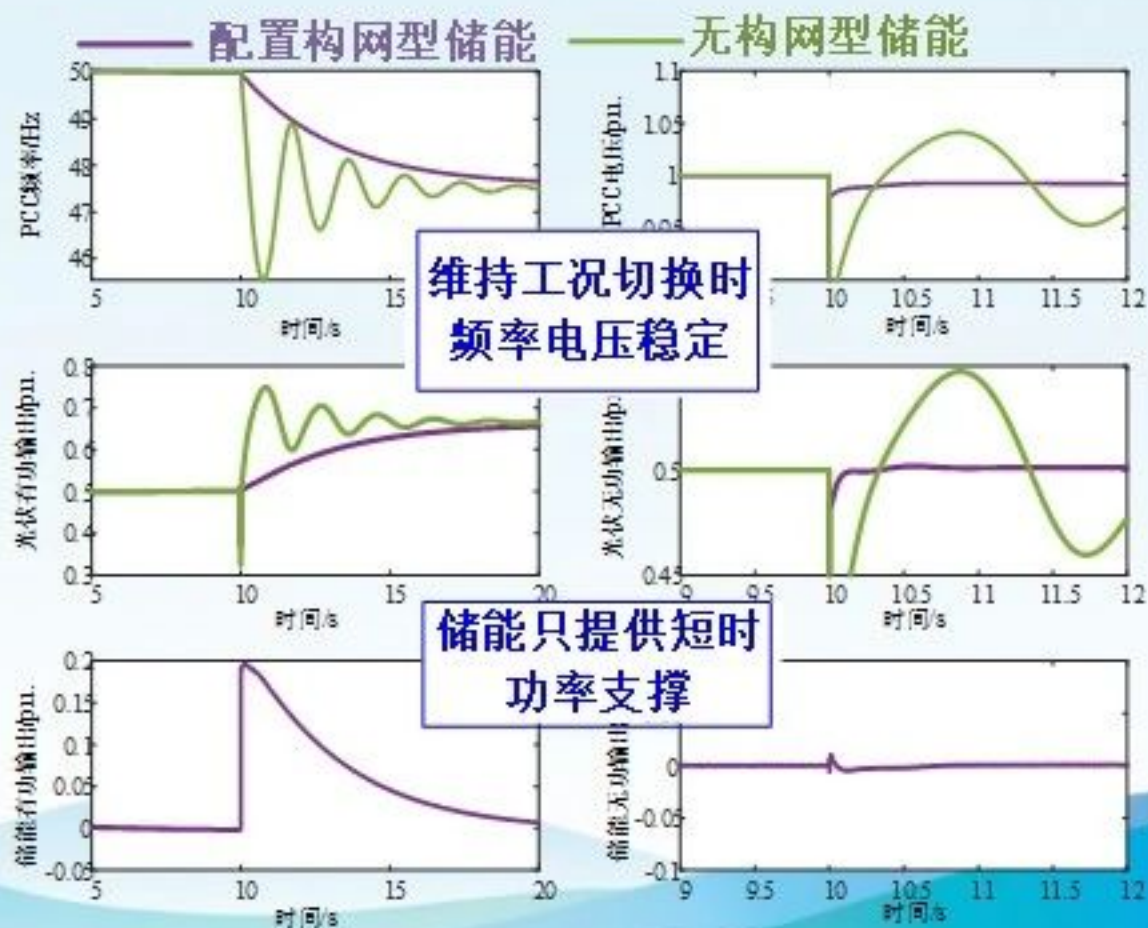
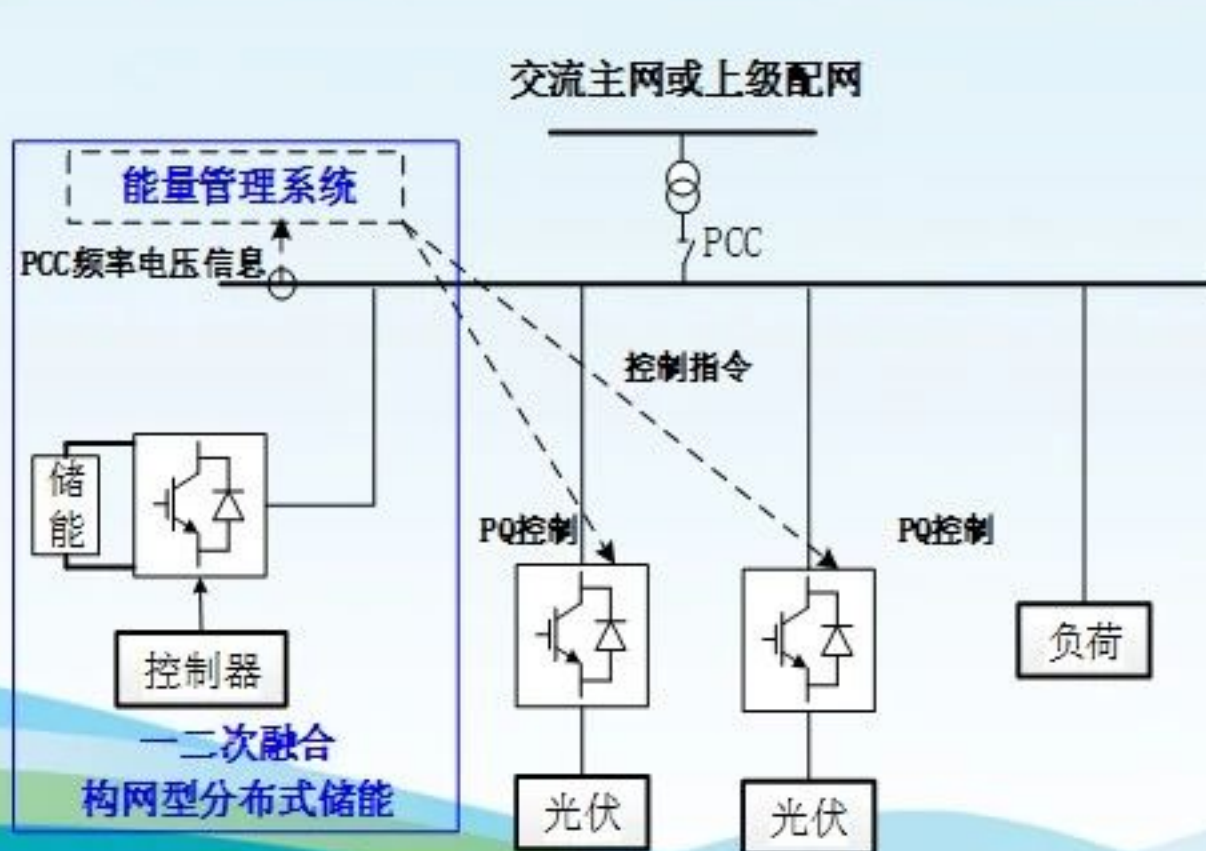
3.2 逆变器灵活控制技术：“GFM+GFL” 主动支撑/独立组网

问题1:

传统跟网型变流器稳定运行需要电网提供的频率电压基准，运行方式受限、稳定性差，难以支撑独立组网？

解决思路:

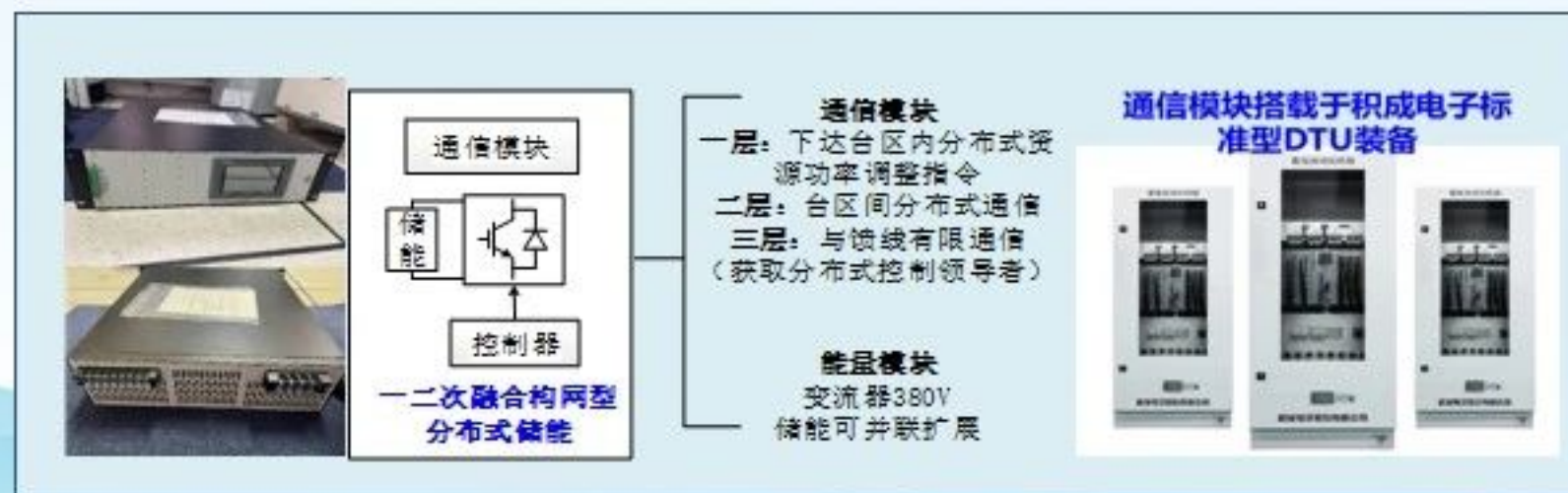
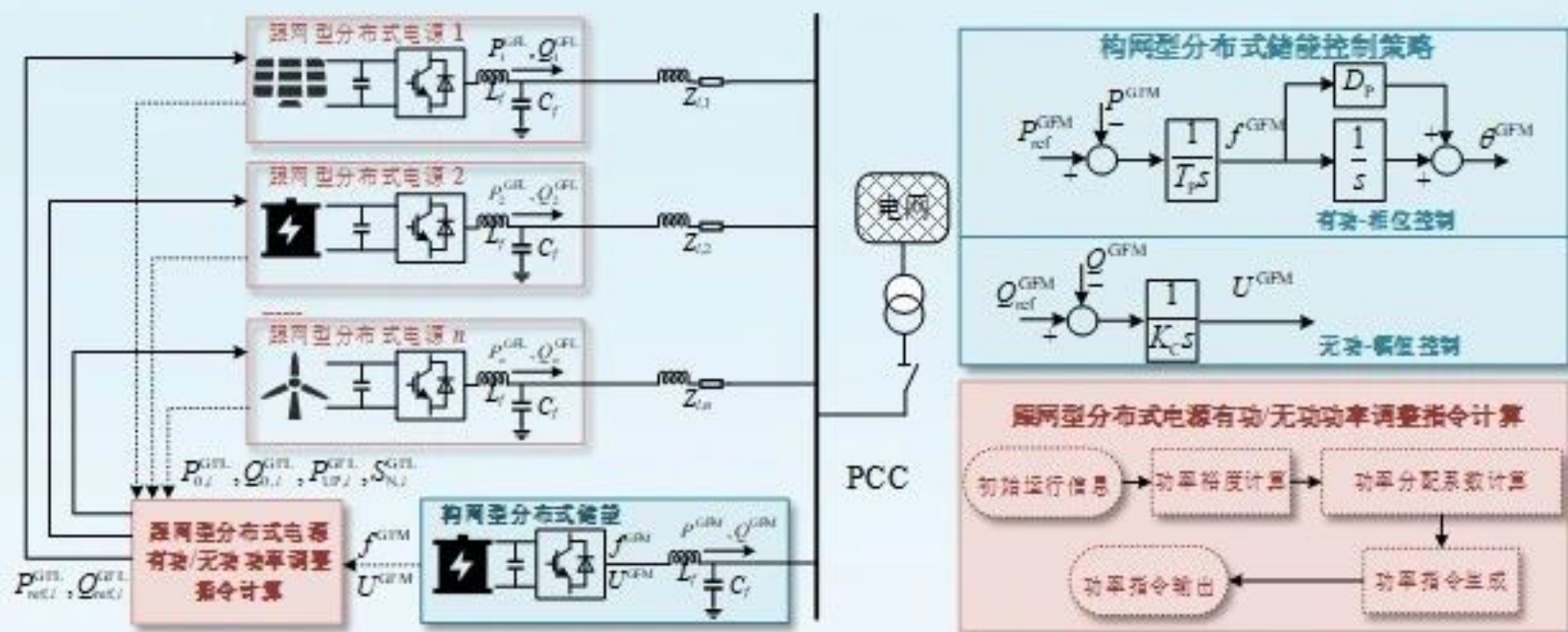
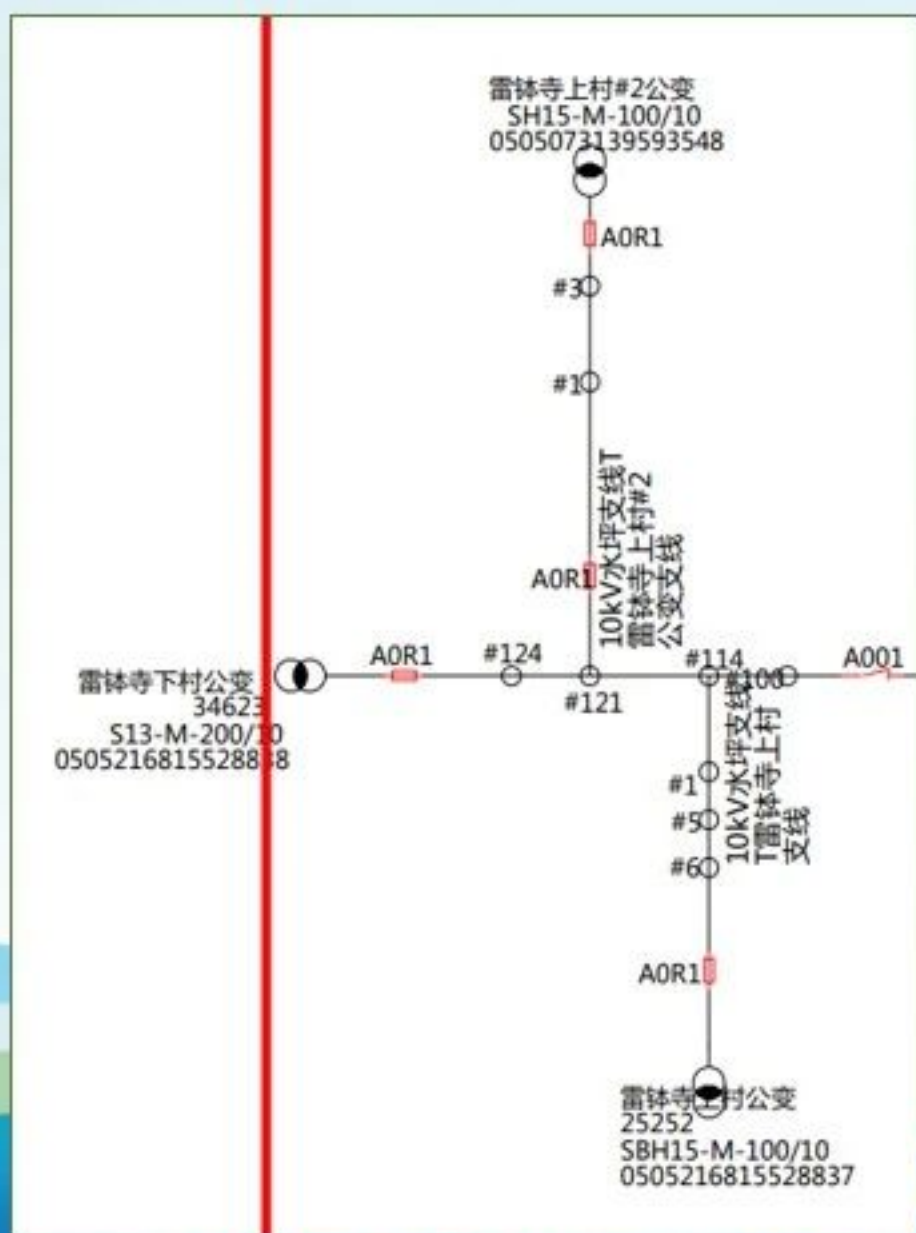
研究构网型储能技术，构网型储能负责提供动态频率和电压基准，与台区管控单元协同，可以支撑分布式配电系统灵活组网运行。



配电系统灵活性提升技术/设备灵活控制

案例应用——灵活性资源先进控制

云南鹤庆县网架结构分散且薄弱，保供电难度大。充分利用分布式光伏资源禀赋，在上级配网失电或者馈线故障时，以多台区独立组网运行的方式实现连续供电，降低非计划停电时长30%以上。



目录

01

背景与意义

02

配电系统的灵活性

03

配电系统灵活性提升技术

04

总结与展望

- 以灵活性提升应对高度源荷不确定性，为新型配电系统构建提供了新路径
- 软件定义、柔性多状态开关、储能、分布式电源、可控负荷等是配电系统重要的灵活性资源
- 需从系统规划、运行及装备控制等多维度协同提升配电系统灵活性

谢谢

感谢赵洁、路晓庆、刘承锡、李怡雪、华祝虎、韩春伊、
杨隽雯等团队老师和学生的贡献！

董旭柱, dongxz@whu.edu.cn

尚磊, shanglei@whu.edu.cn