

新能源并网技术发展现状及展望

李庆

中国电力科学研究院

2024年2月

目录

CONTENTS

一

新能源并网特性

二

新能源并网技术发展现状

三

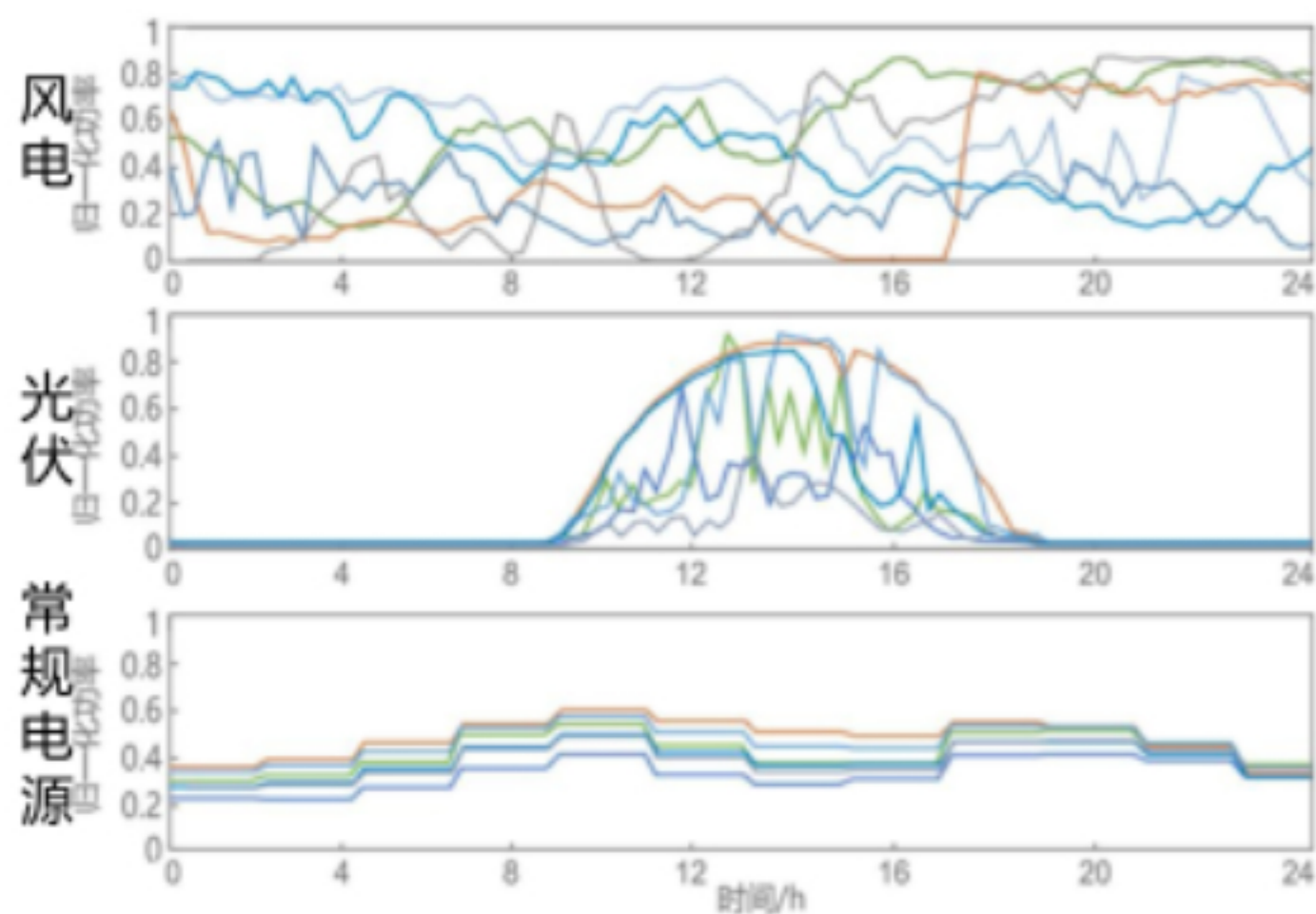
展望

一、新能源并网特性

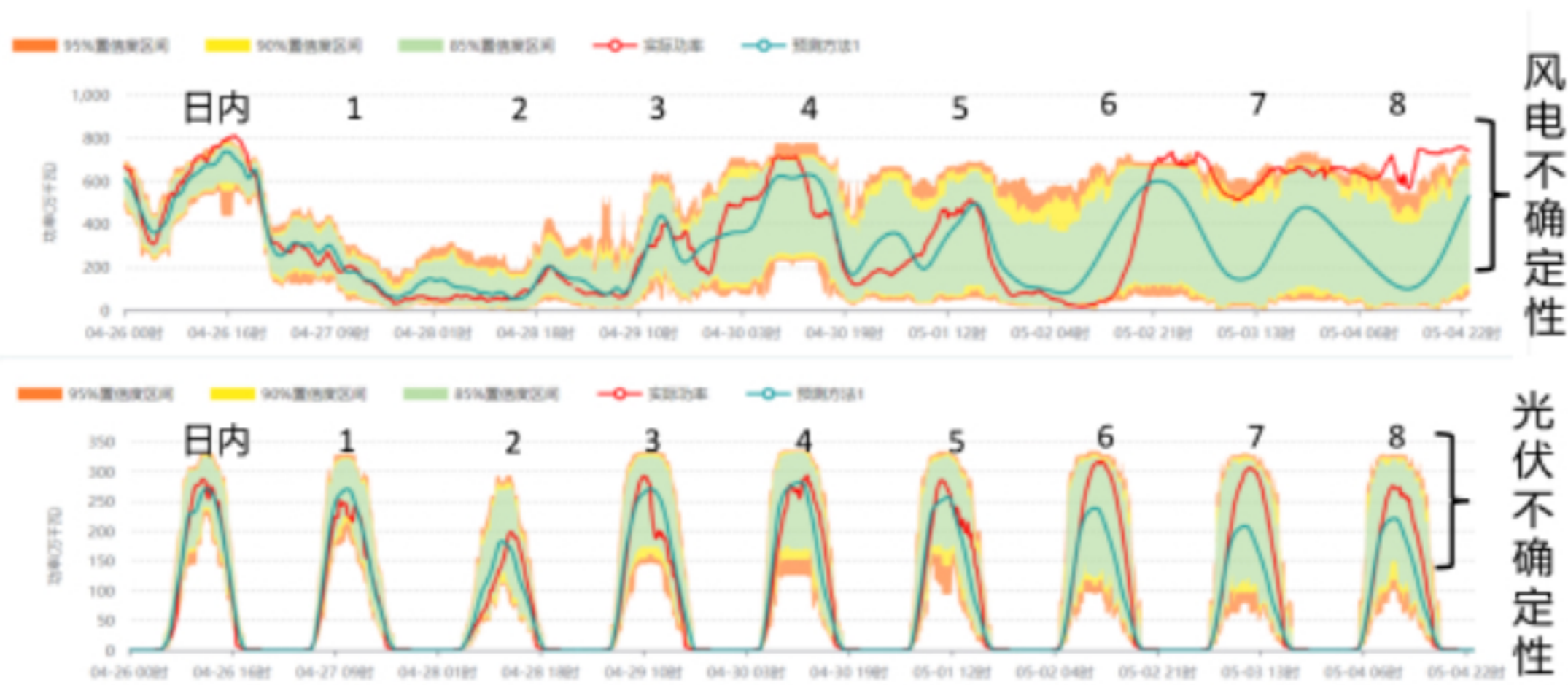
1.1 资源特性

□ 新能源资源具有随机性与波动性

- 风、光等新能源资源不可运输与存储（不能突破资源上限而向上调节）、能量密度低、随机波动性强、且空间分布差异大。
- 新能源发电出力不确定度大，难以准确预测与调度。



不同电源连续7日出力曲线对比



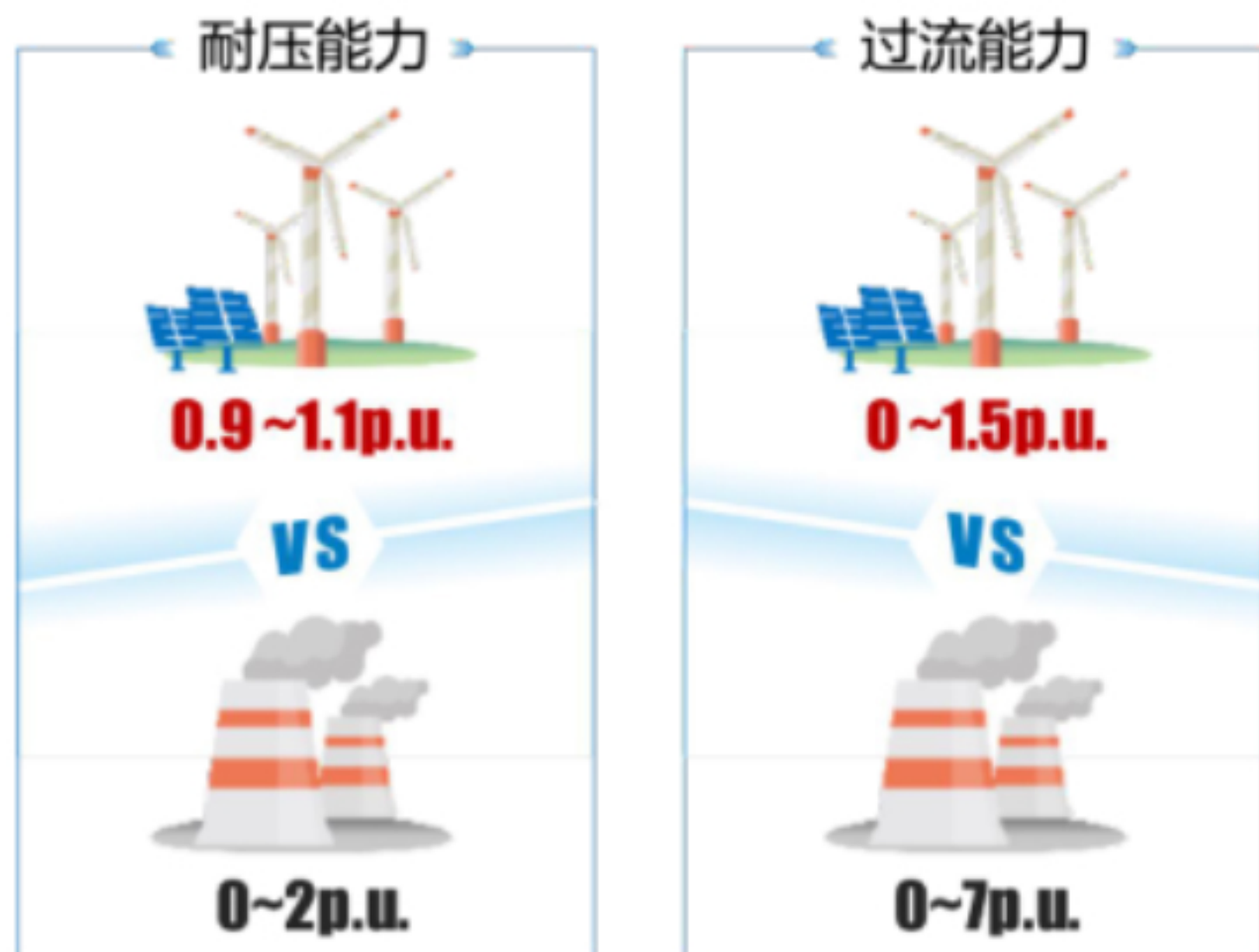
风电/光伏在不同时间尺度下的预测不确定性（区间越宽不确定性越大）

一、新能源并网特性

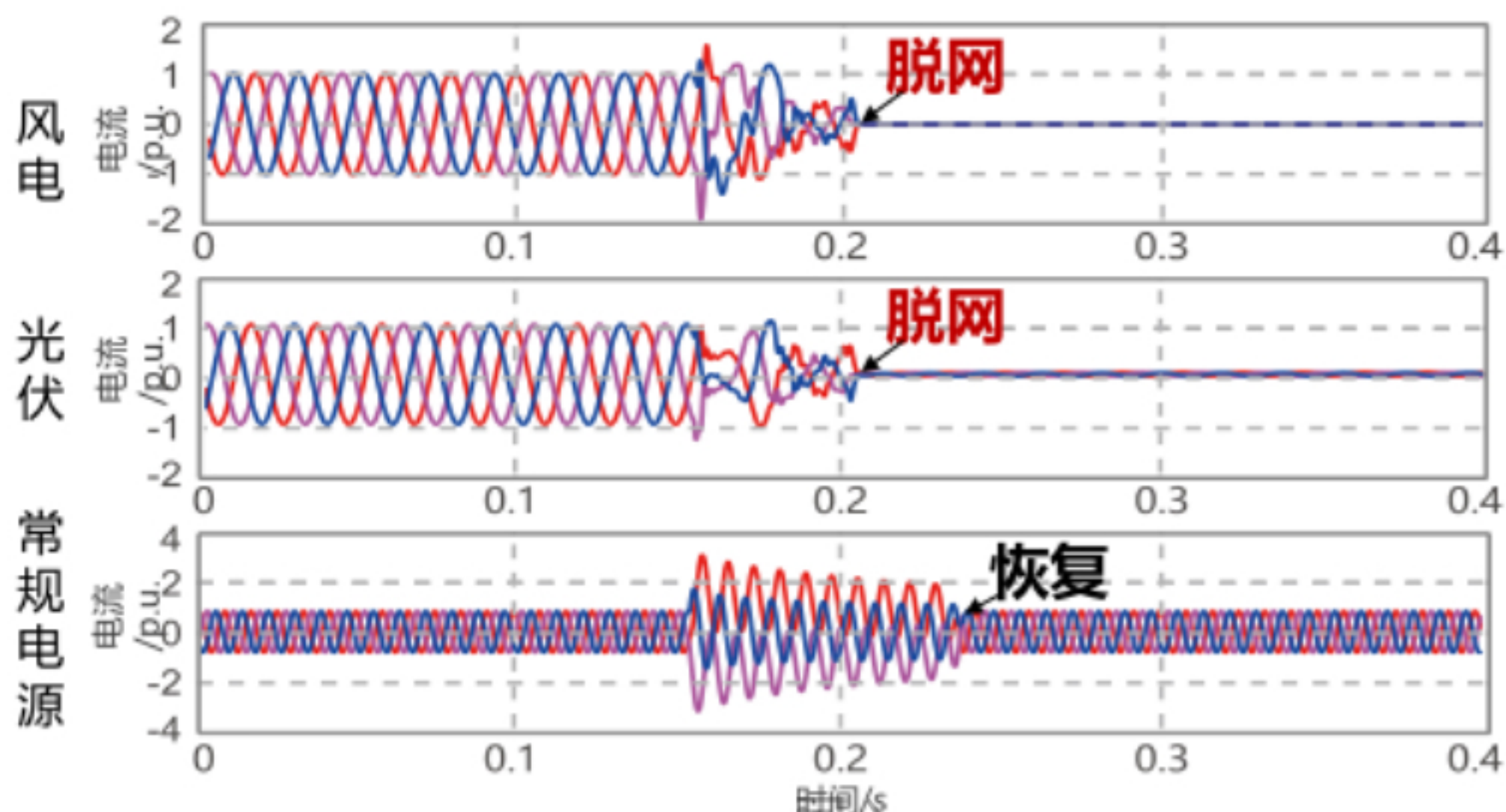
1.2 设备特性

□ 新能源设备具有低抗扰与弱支撑性

- 新能源发电设备抗扰性低，耐压、过流能力弱，受扰后易脱网，主动支撑能力弱。
- 发电单元数量多、类型多，不同类型、型号的新能源故障穿越特性、宽频带动态特性差异巨大。



不同发电设备耐压、过流能力对比



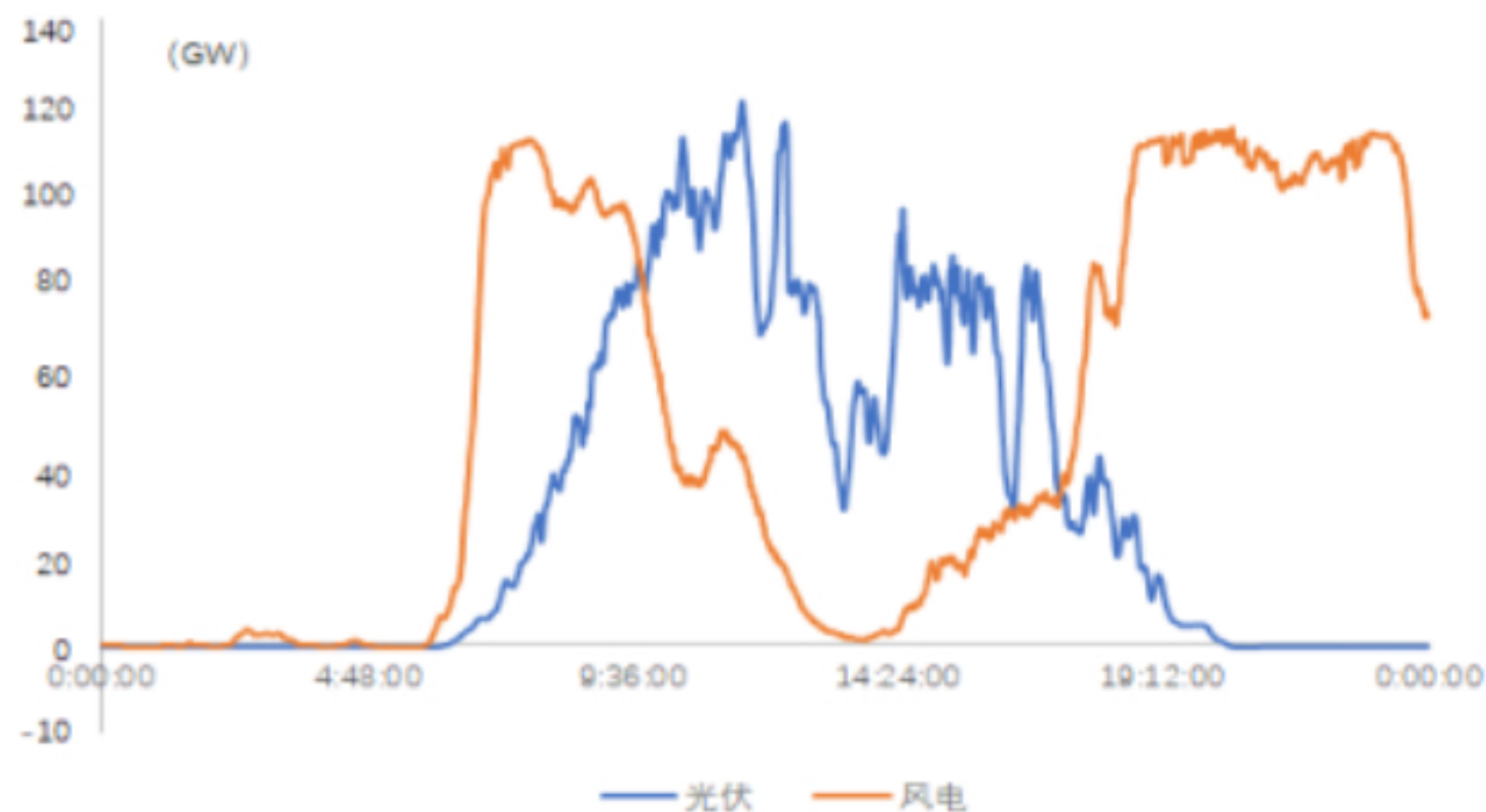
新能源受扰后易脱网

一、新能源并网特性

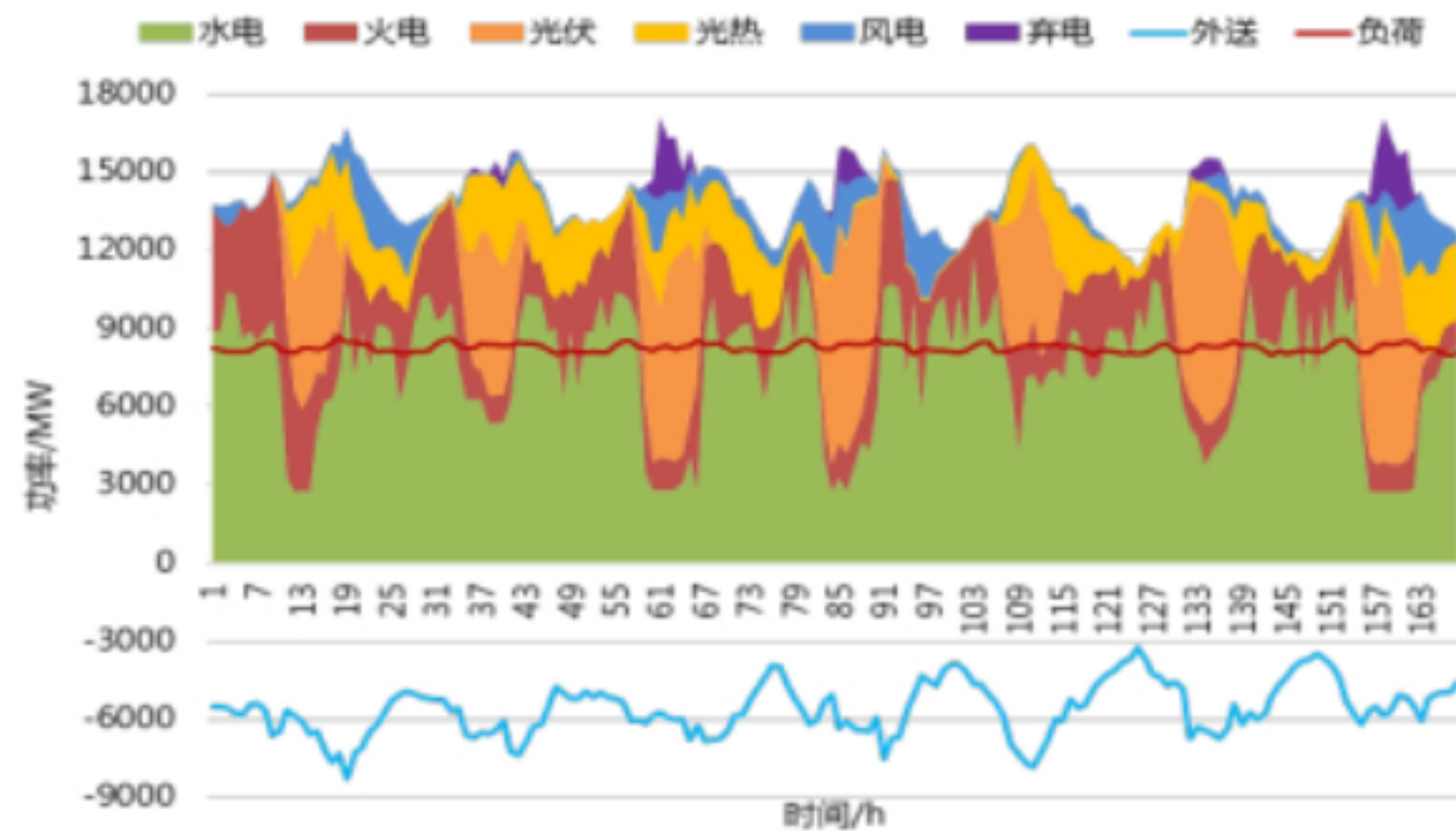
1.3 带来的挑战

□ 高效消纳

- 新能源发电随机性强、预测偏差较大，集中式与分布式新能源的大规模接入并替代常规电源装机，使得系统调节能力不足，功率平衡难度增大；此外，“三北”地区大规模新能源基地以特高压直流外送为主要消纳形式，受灵活调节资源不足等因素影响，高效消纳面临很大挑战。



2025年新能源日内最大功率波动预计达到2亿千瓦



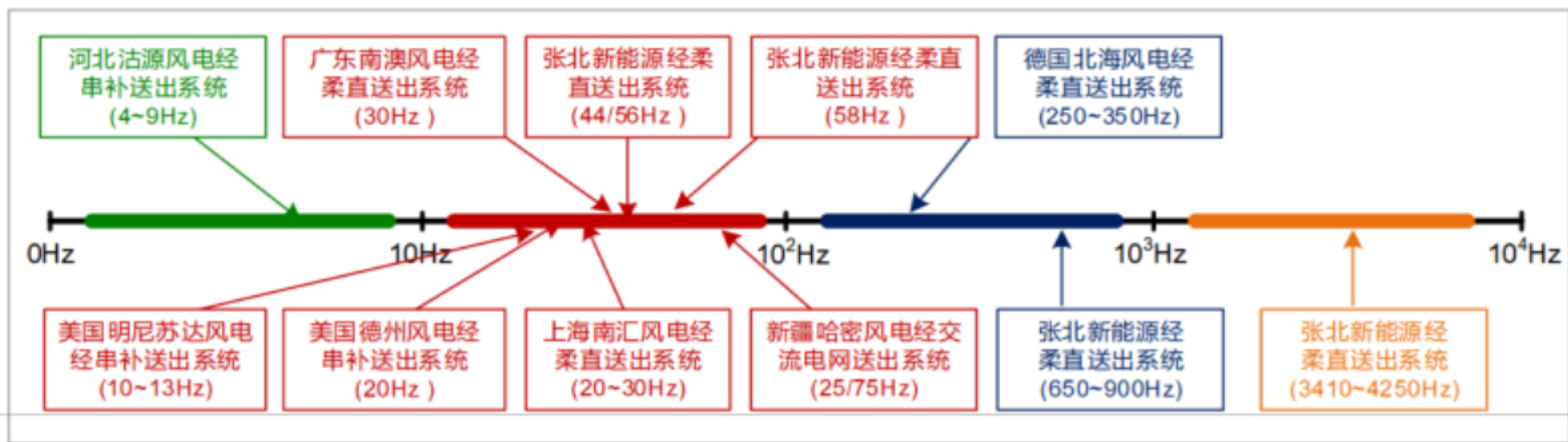
高比例新能源电力系统电力平衡图

一、新能源并网特性

1.3 带来的挑战

□ 稳定运行

- 自2009年起，国内外频繁发生**新能源宽频振荡事故**，导致**新能源脱网、设备损坏**等严重后果。
- 2009年起，美国得州风电经串补送出系统发生20Hz振荡数次。
- 2015年-2017年，新疆哈密风电基地频繁发生**次/超同步振荡**问题，因振荡切除风电100余次。



各国新能源振荡事故统计

CONTENTS

目录

一

新能源并网特性

二

新能源并网技术发展现状

三

展望

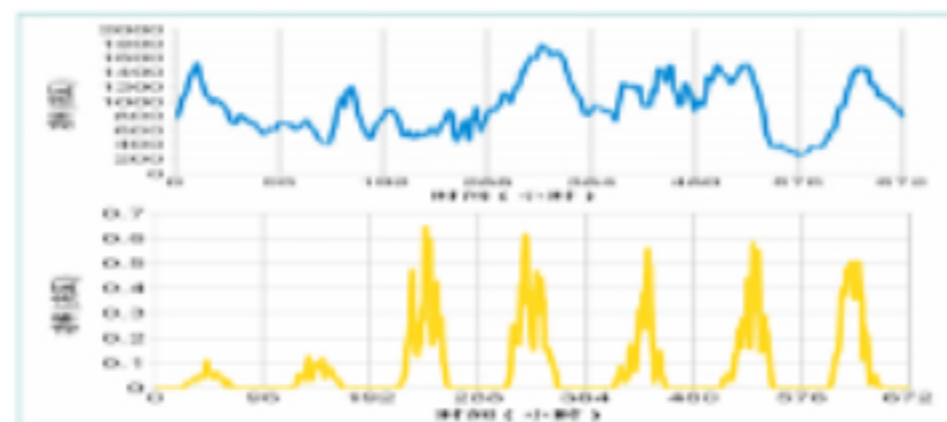


高效消纳技术

二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术—国外发展情况

国外新能源功率预测起步较早，在上世纪90年代就开始了大范围的研究，其研究的重点主要集中在单场站层面，主要关注短期和超短期两个时间尺度，预测主要应用于电力市场交易。



新能源功率预测

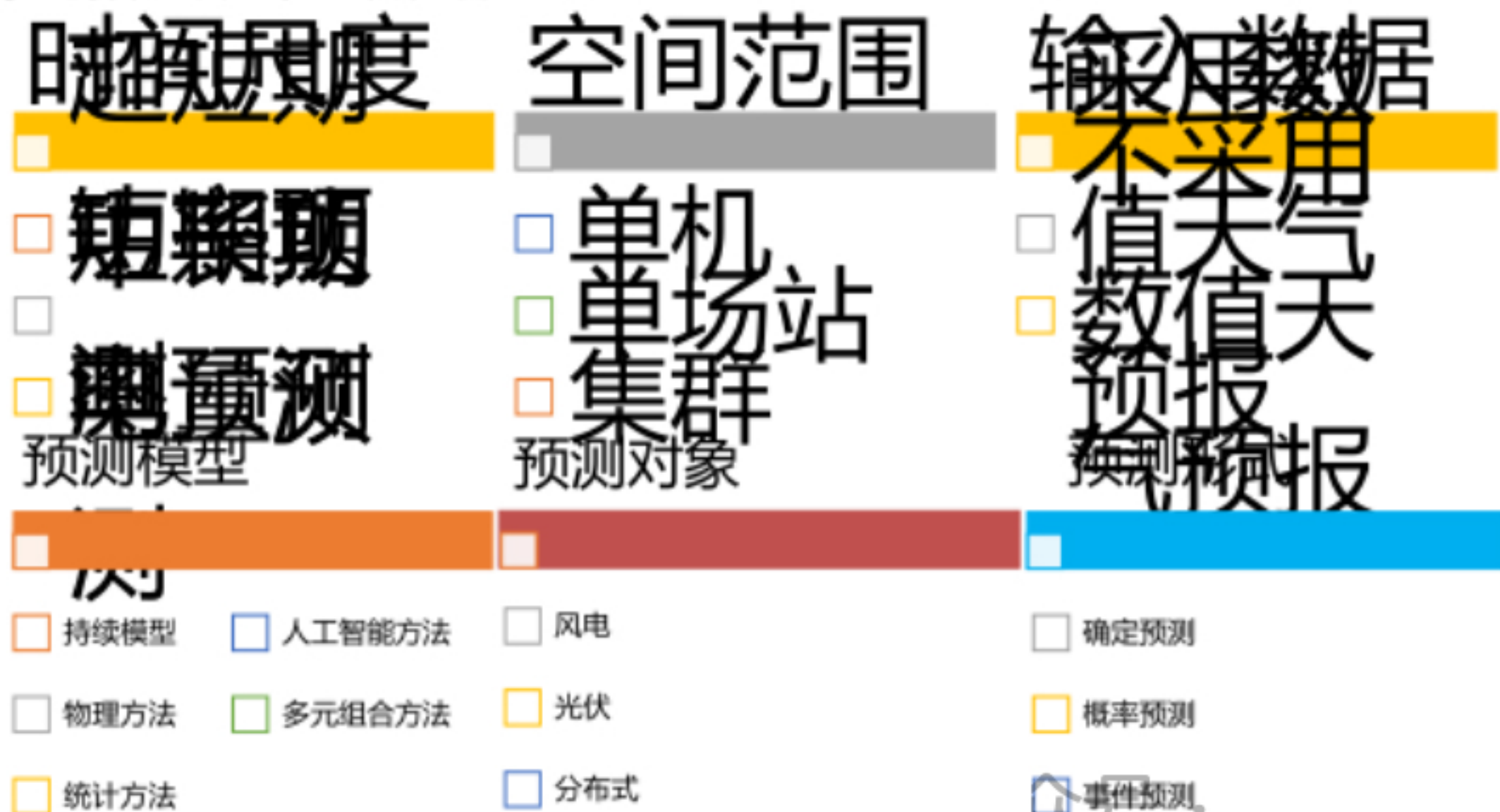


电力市场

二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术—国内发展情况

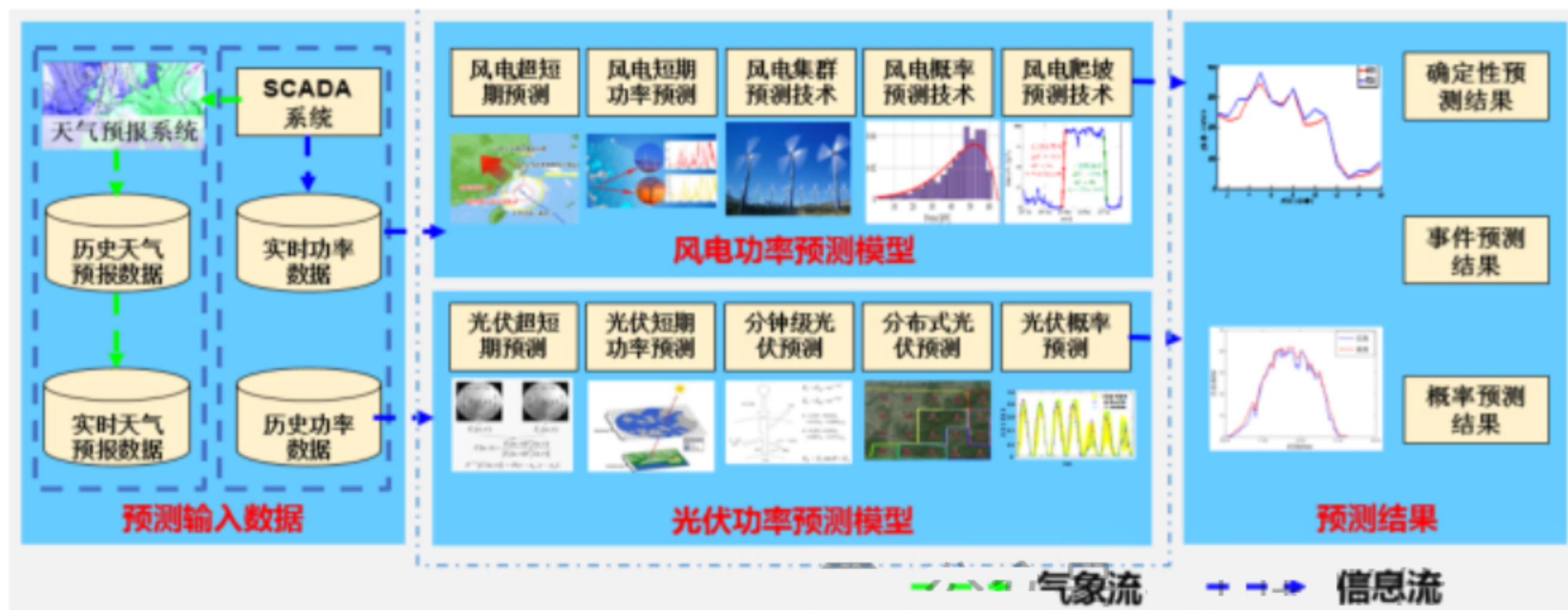
我国新能源功率预测研究虽然起步较晚，但发展迅速。2008年，我国首套风电功率预测系统在吉林省电力公司投运，我国根据应用需求对新能源功率预测的内涵进行了拓展，形成了多时间尺度，多空间范围，多预报对象，不同预测形式的预测体系。



二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术—技术路线

新能源功率预测包含气象预报、预测模型、结果处理三个环节。气象输入数据通过数值天气预报获得，对功率预测精度影响较大；预测模型用于计算预测结果，其核心是以误差最小化为目标，建立气象要素与功率之间的非线性映射模型，将预报风速、辐照强度等气象参量转化为功率序列；结果处理主要完成预测结果优化、偏差区间评估等，支撑功率预测的应用。



二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术——电力数值天气预报

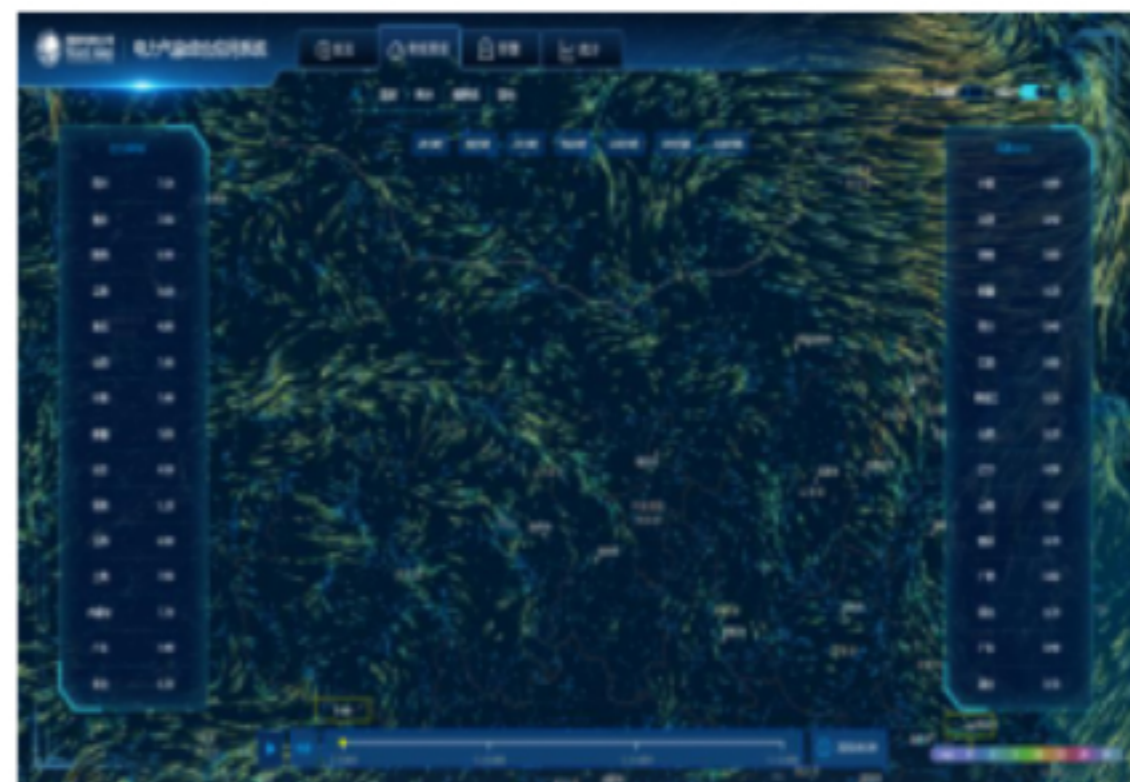
面向新能源预测应用需求，中国电科院目前已建成**电力数值天气预报中心**。中心以GFS、EC、GEM、GSM等主流背景场数据为输入，发挥电力与气象机构资源监测网络的互补优势，基于实时**四维资料同化**、**快速循环更新**、**集合预报**、**模式统计后处理**等技术实现了电力数值天气预报业务化，每天生产覆盖全国、空间分辨率**3km×3km**的未来**10天**网格化数值天气预报。



电力数值天气预报生产流程



电力数值天气预报中心高性能计算系统

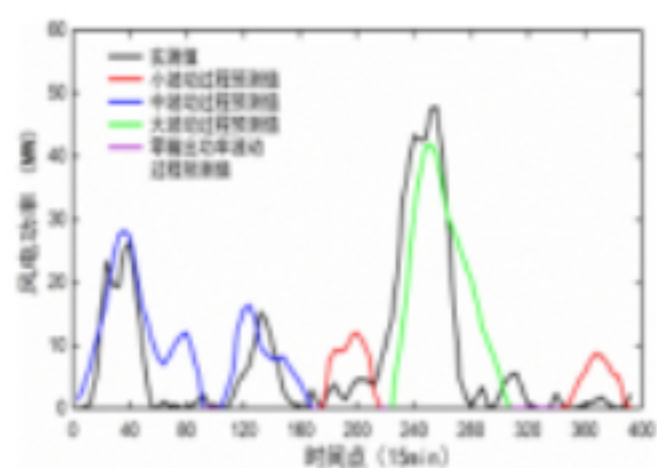
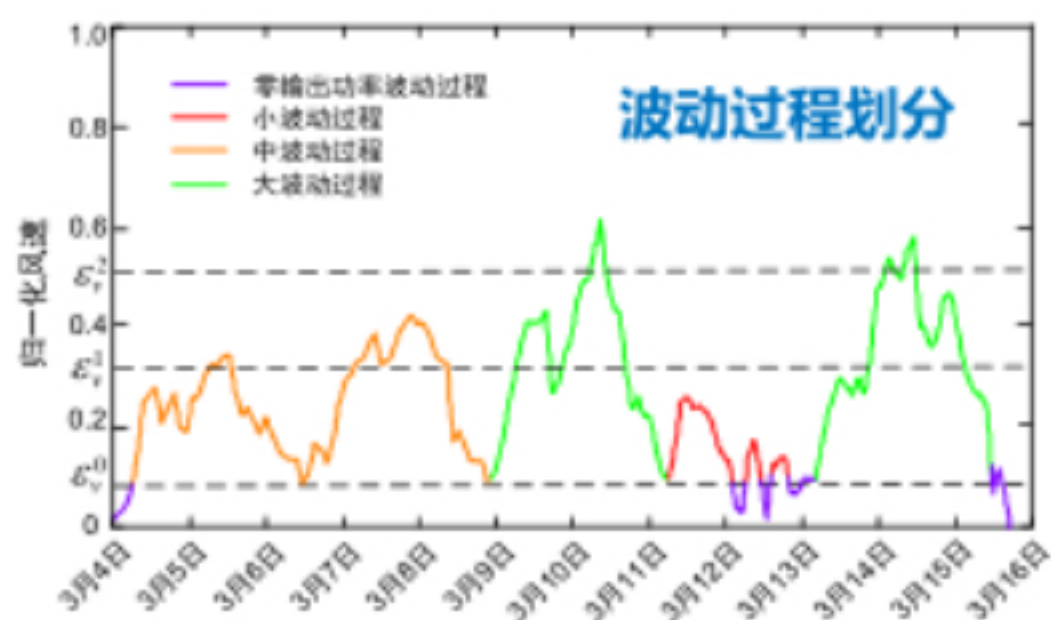


业务化生产的网格化数值天气预报产品

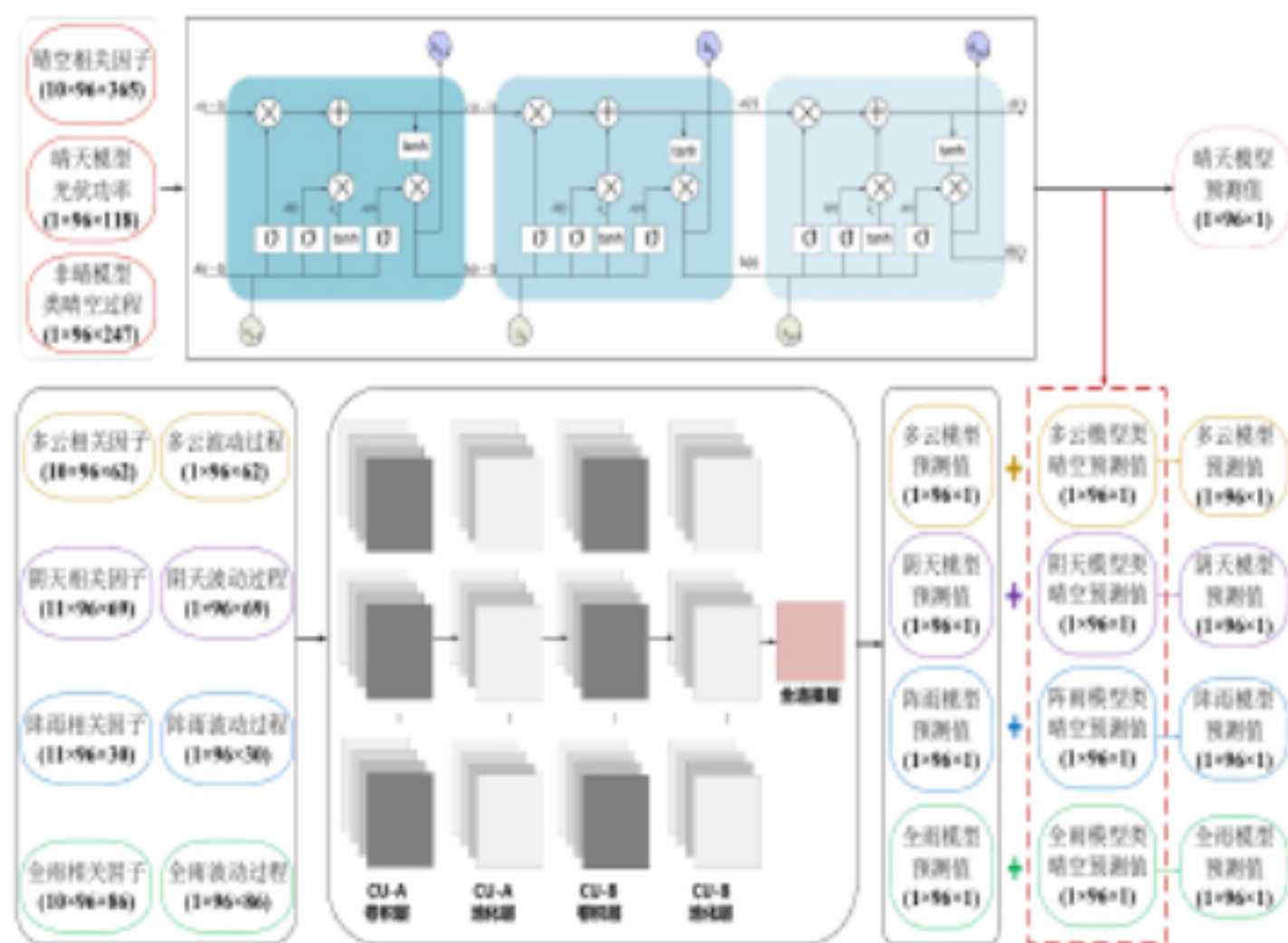
二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术—单站功率预测

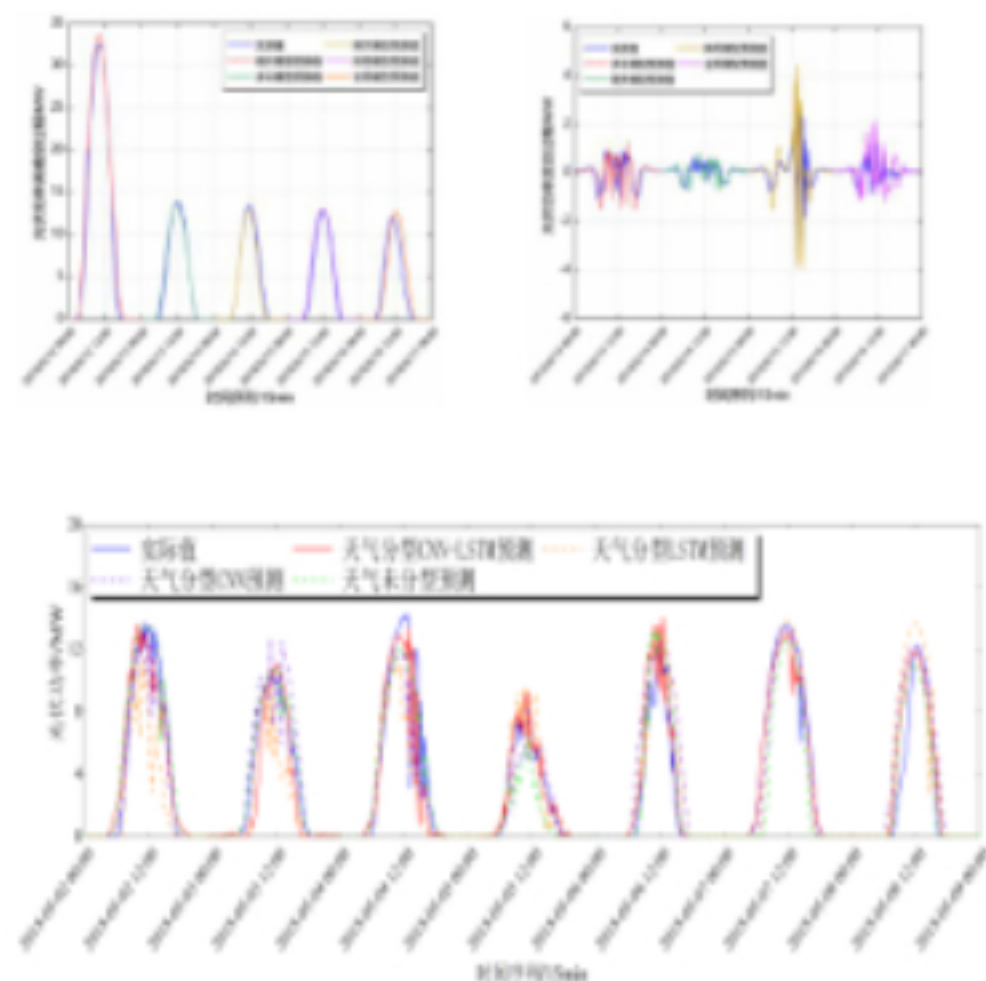
新能源单站功率预测以NWP为输入，通过建立NWP与实际功率的映射模型进行预测，近年来综合利用波动过程及天气类型划分等方法，实现了更精细化的预测建模。



面向波动过程的风电功率预测结果



预测模型框架

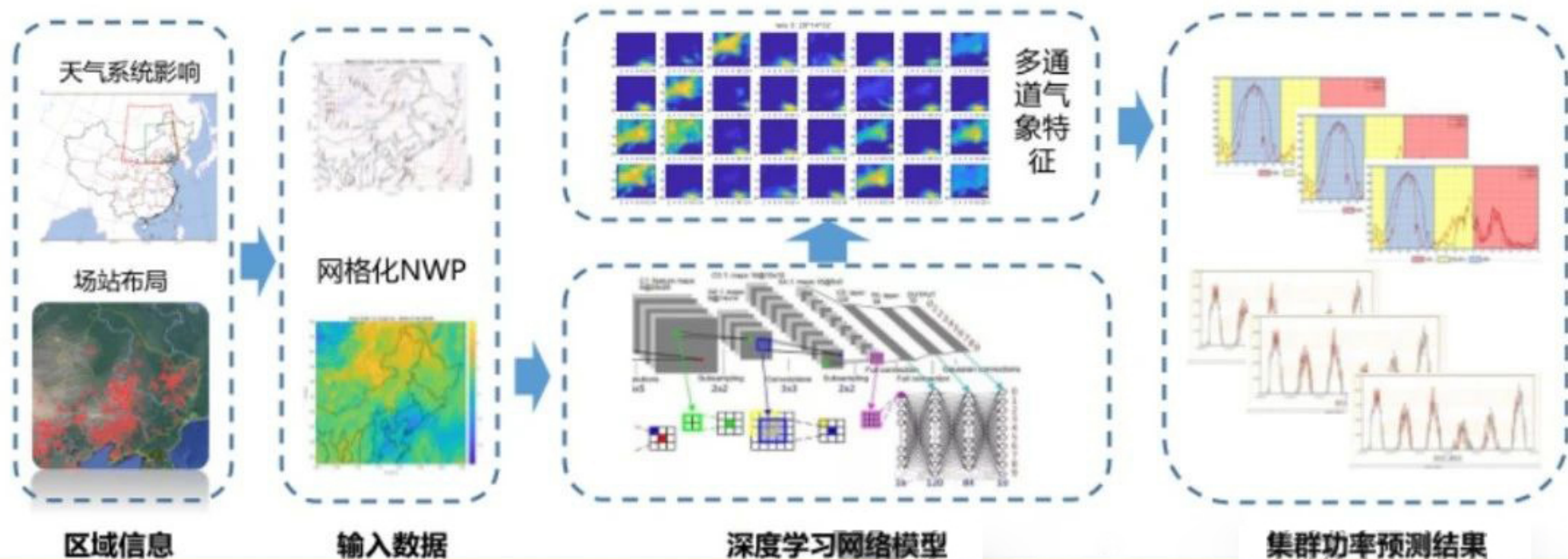


基于天气分型的光伏功率预测结果

二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术——集群功率预测

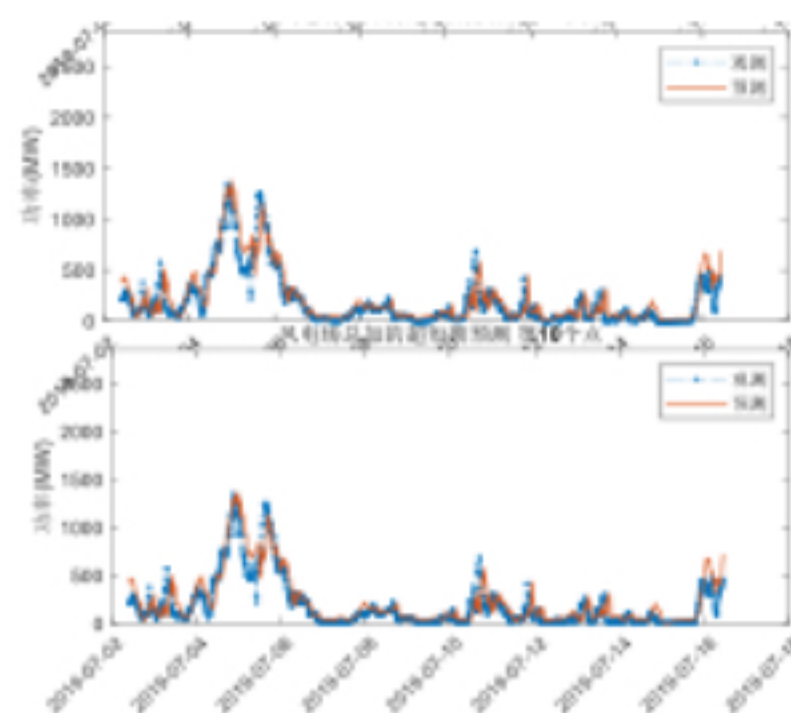
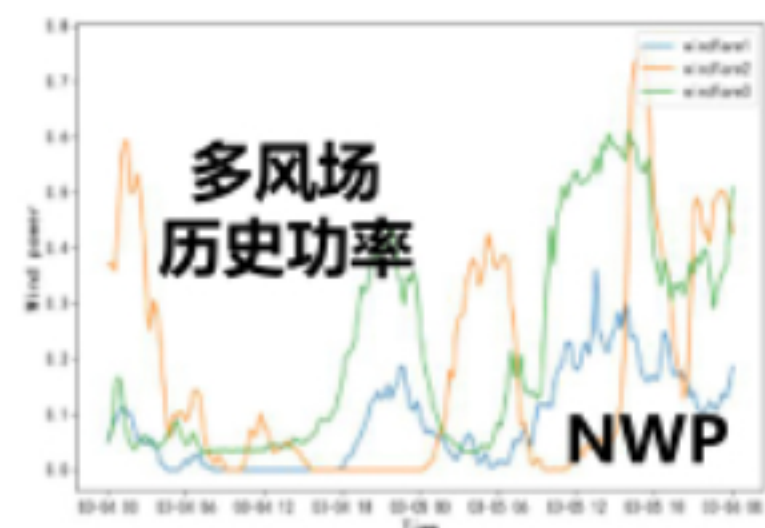
新能源集群功率预测综合考虑区域新能源出力间的交互影响及区域天气系统的全局信息，以**网格化NWP数据**为输入，以集群功率为输出，构建**深度学习网络模型**，可实现对区域新能源集群功率的总体预测，具有较高的复杂信息融合能力和预测建模效率。



二、新能源并网技术发展现状

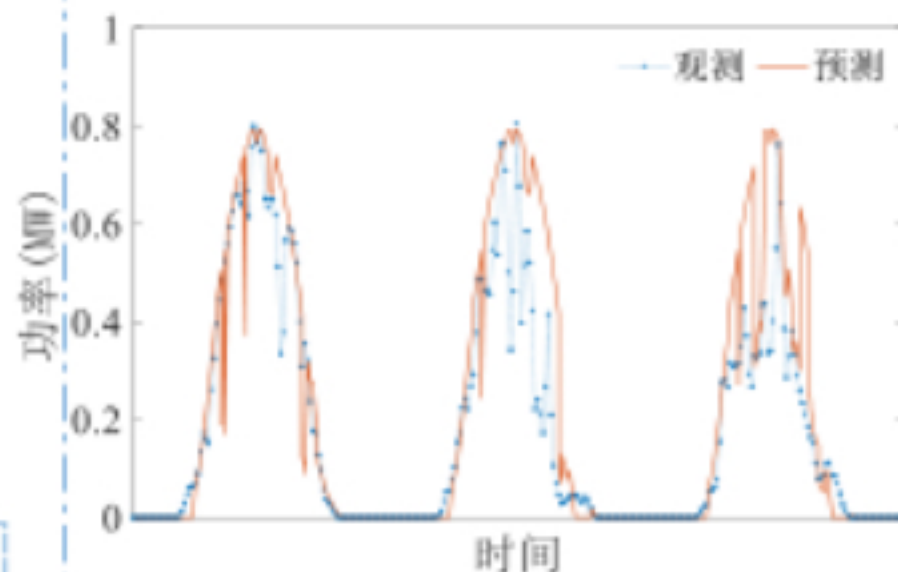
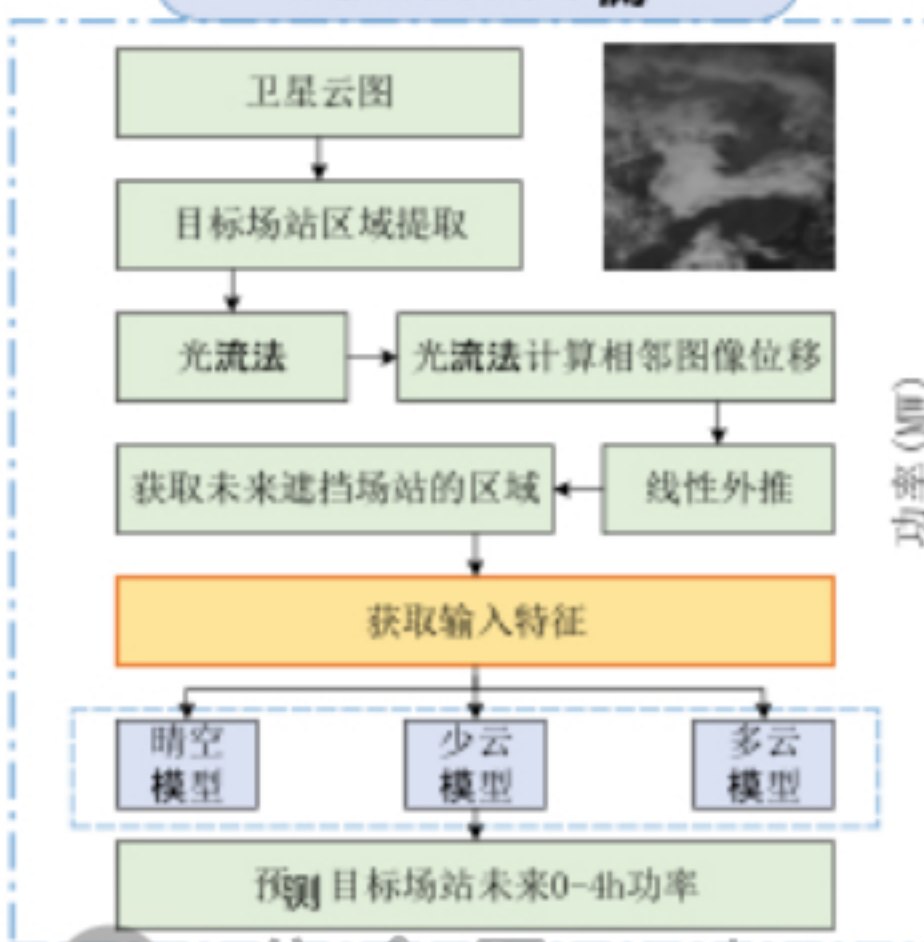
2.1 新能源功率预测技术——超短期功率预测

超短期功率预测以邻近时刻的实际功率，测风/测光数据，NWP数据，云观测数据为输入，充分挖掘4小时时间尺度内风电/光伏功率序列在时序上的强相关性，可**每15分钟一次滚动预测未来4小时的功率**，取得比短期尺度更高的预测精度。



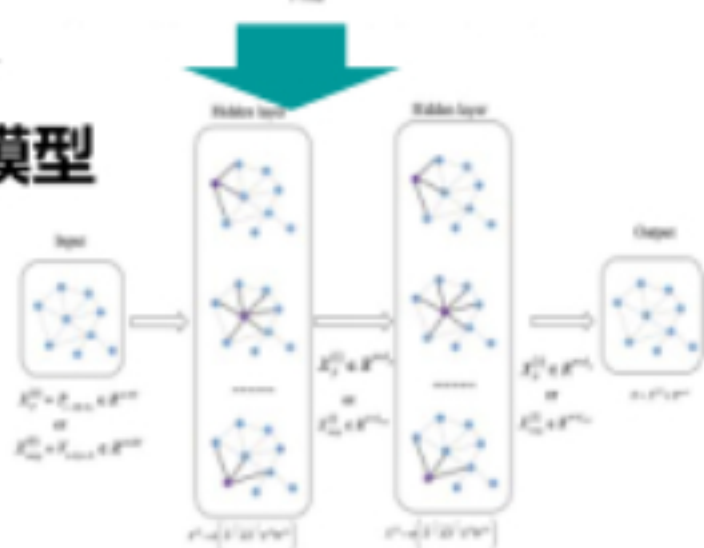
风电超短期功率预测

超短期功率预测



光伏超短期功率预测

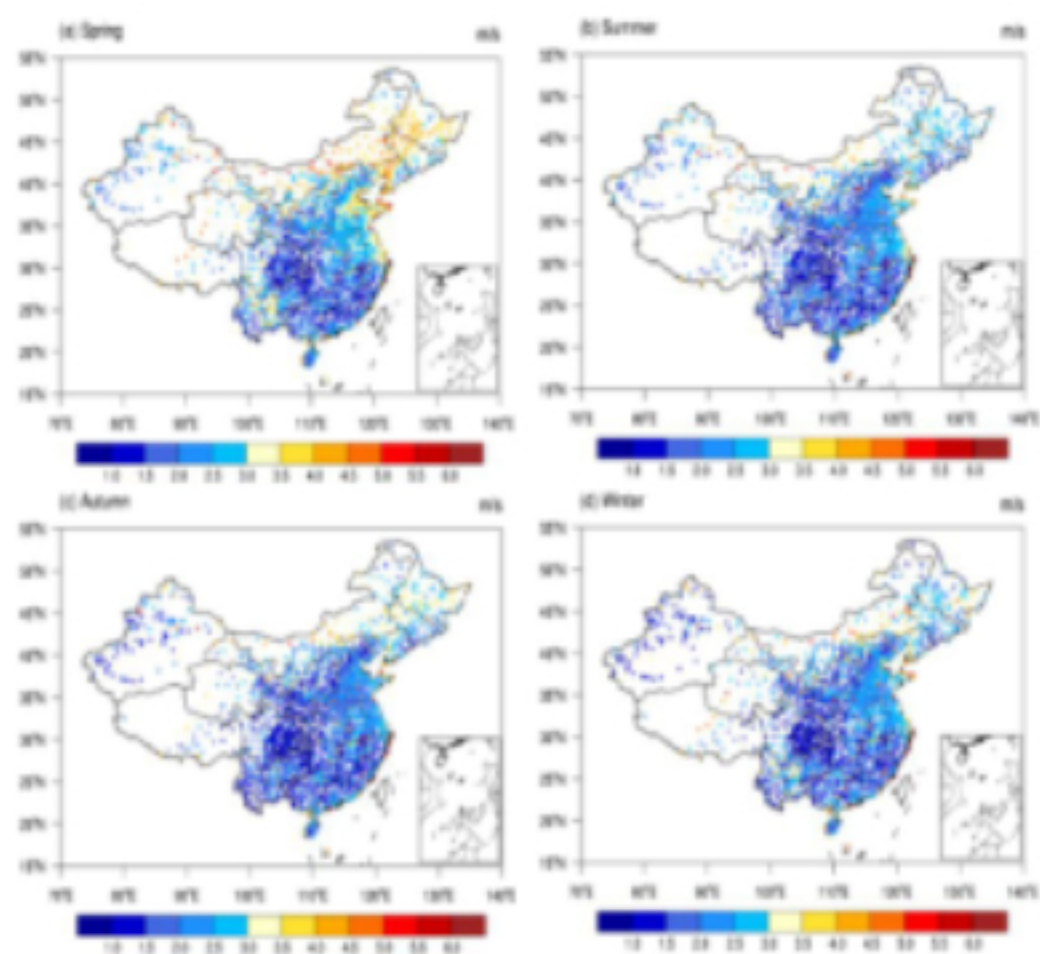
预测模型



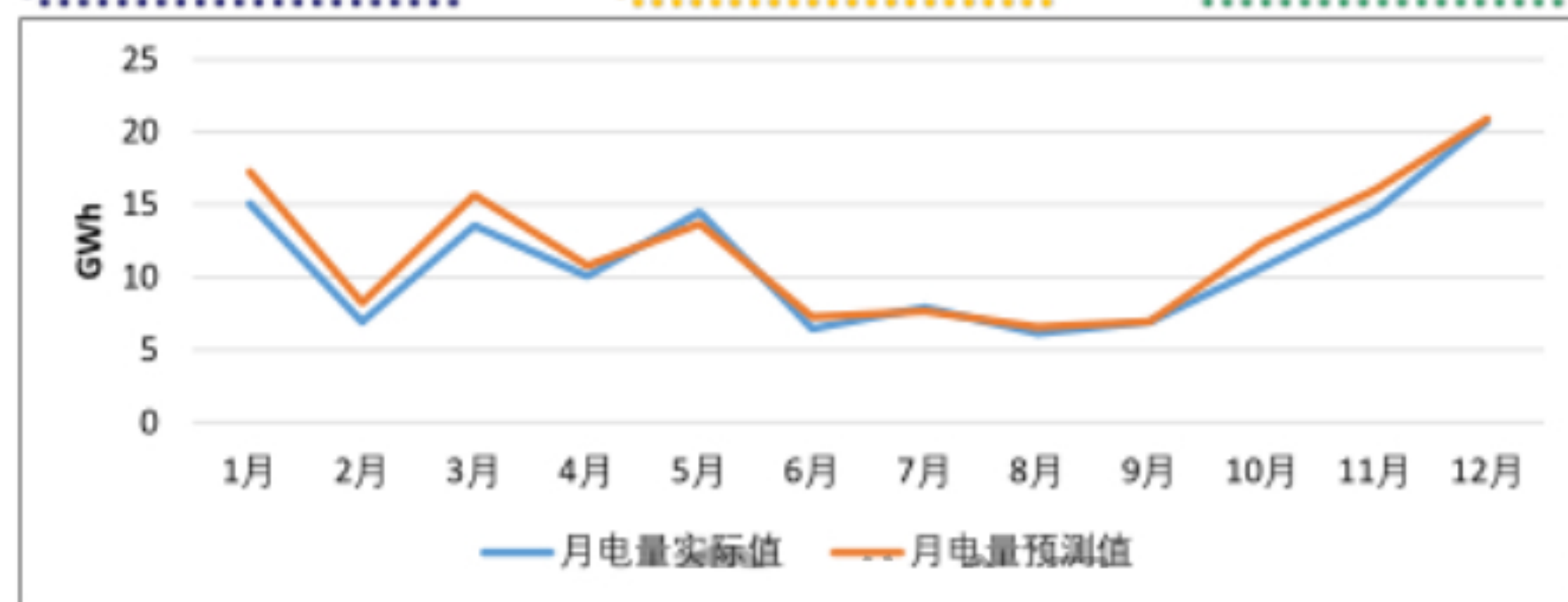
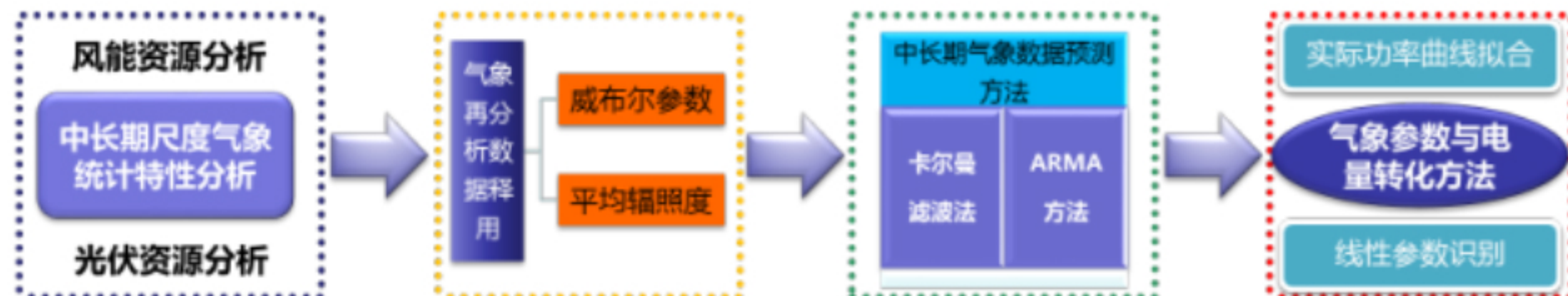
二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术——中长期电量预测

以新能源历史电量数据和气候预报数据为基础，在关键气象参数探索与构建的基础上，采用统计分析及人工智能方法，构建风/光电量的月度、年度预测模型，实现对新能源场站未来1年逐月电量的滚动预测。



1971-2017年中国区域季节平均风速分布

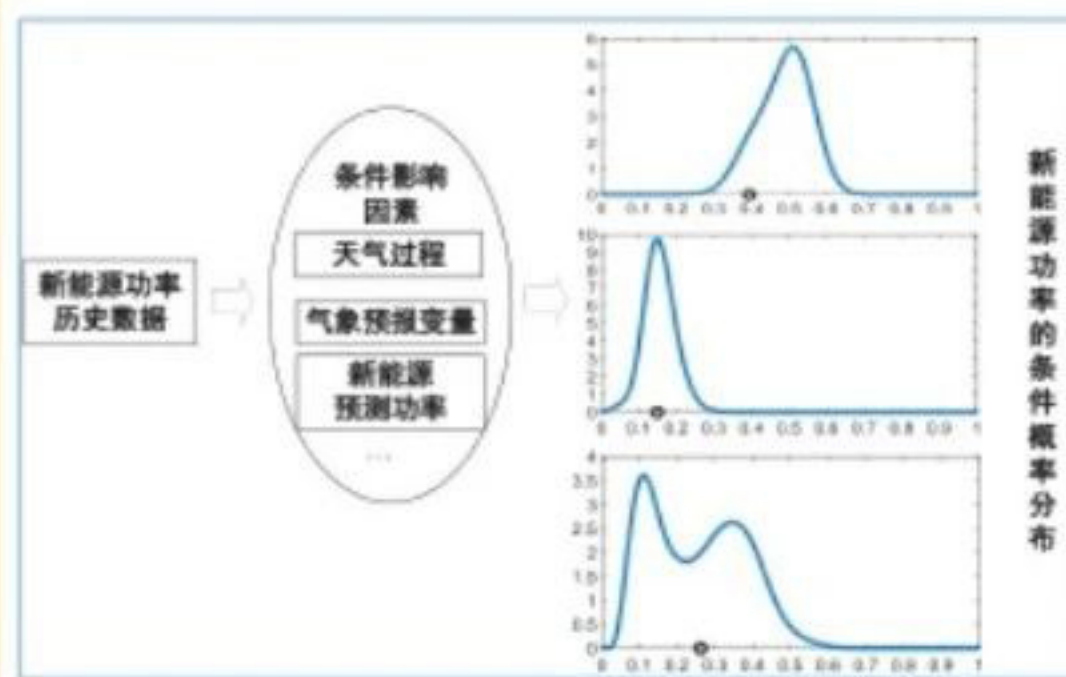


月度均方根误差%	11.01
季度均方根误差%	9.81
年度均方根误差%	7.41

二、新能源并网技术发展现状

2.1 新能源功率预测技术——概率预测

在分析预测误差特性的基础上，建立可表征预测不确定性的概率预测模型，生成**不同置信度下的预测区间**，通过提供预测风险概率信息，辅助**新能源纳入平衡的决策制定**。



条件样本集划分



建立概率预测模型

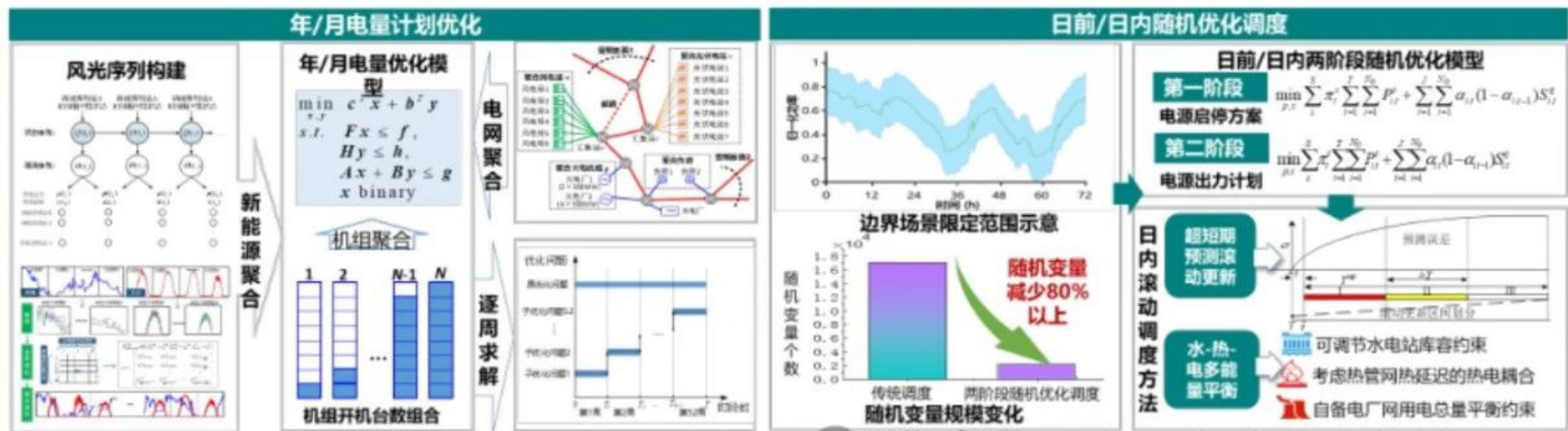


东北风电、光伏的概率预测结果

二、新能源并网技术发展现状

2.2 优化调度技术——新能源年-月-日前-日内随机优化调度

基于预测多场景的随机优化调度技术能够充分考虑新能源场站的预测不确定性，通过新能源与各类调节资源在年-月-日前-日内不同时间尺度的互补协调调度，挖掘风光水气火储等资源的多能互补作用，实现新能源的最大化消纳。



二、新能源并网技术发展现状

2.2 优化调度技术——新能源年-月-日前-日内随机优化调度

依托D5000平台研发的新能源年/月/日前/日内随机优化调度系统在青海、新疆电网开展示范应用，并推广至西北、东北、甘肃等8个省级和区域电网；基于新一代调控平台的新能源调度应用实现了对新能源实时调度、生产运行管理等全过程多环节的服务支撑，在西北、青海等省份部署应用。



新能源电力系统年-月-日前-日内随机优化调度系统

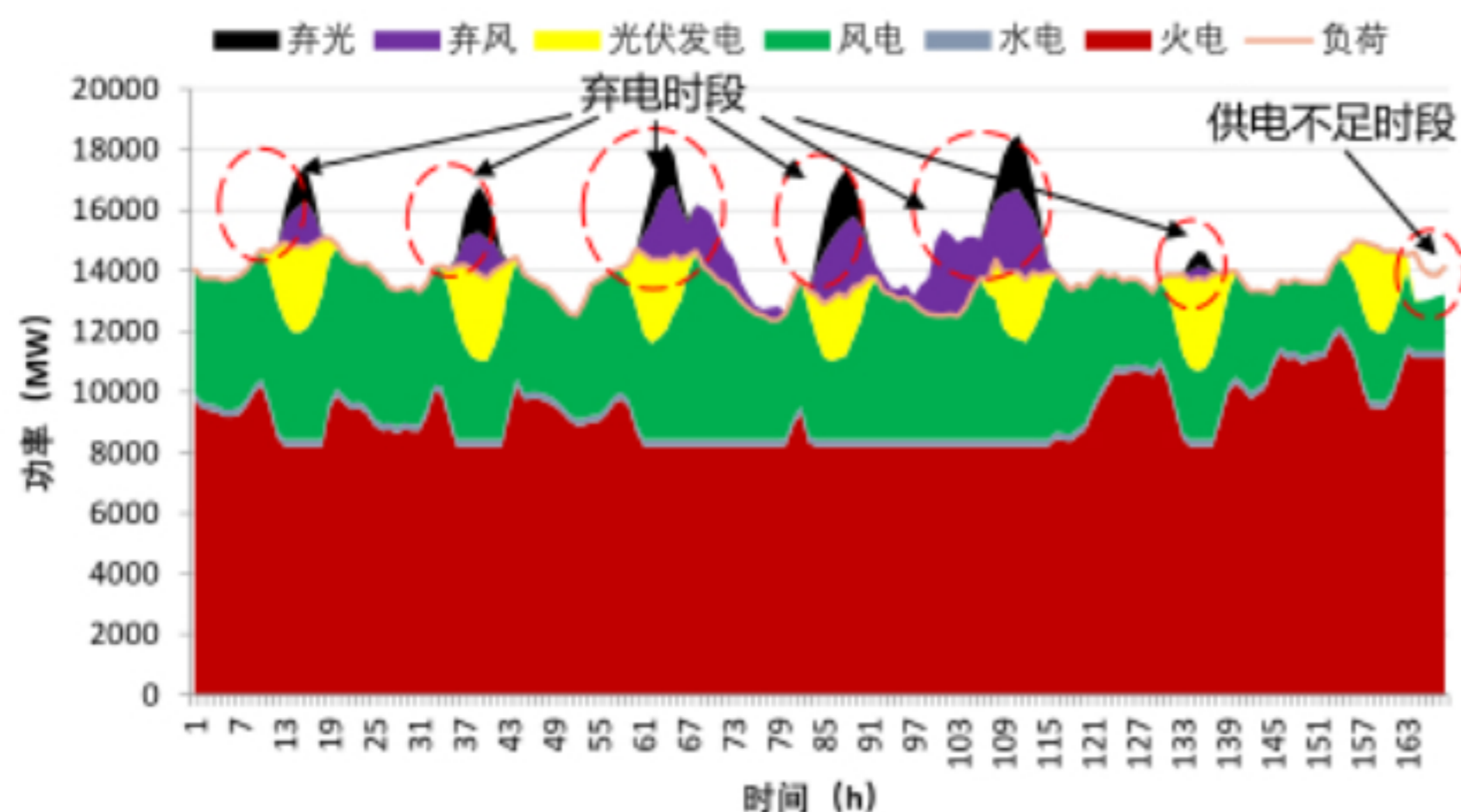


新一代调控平台新能源调度应用

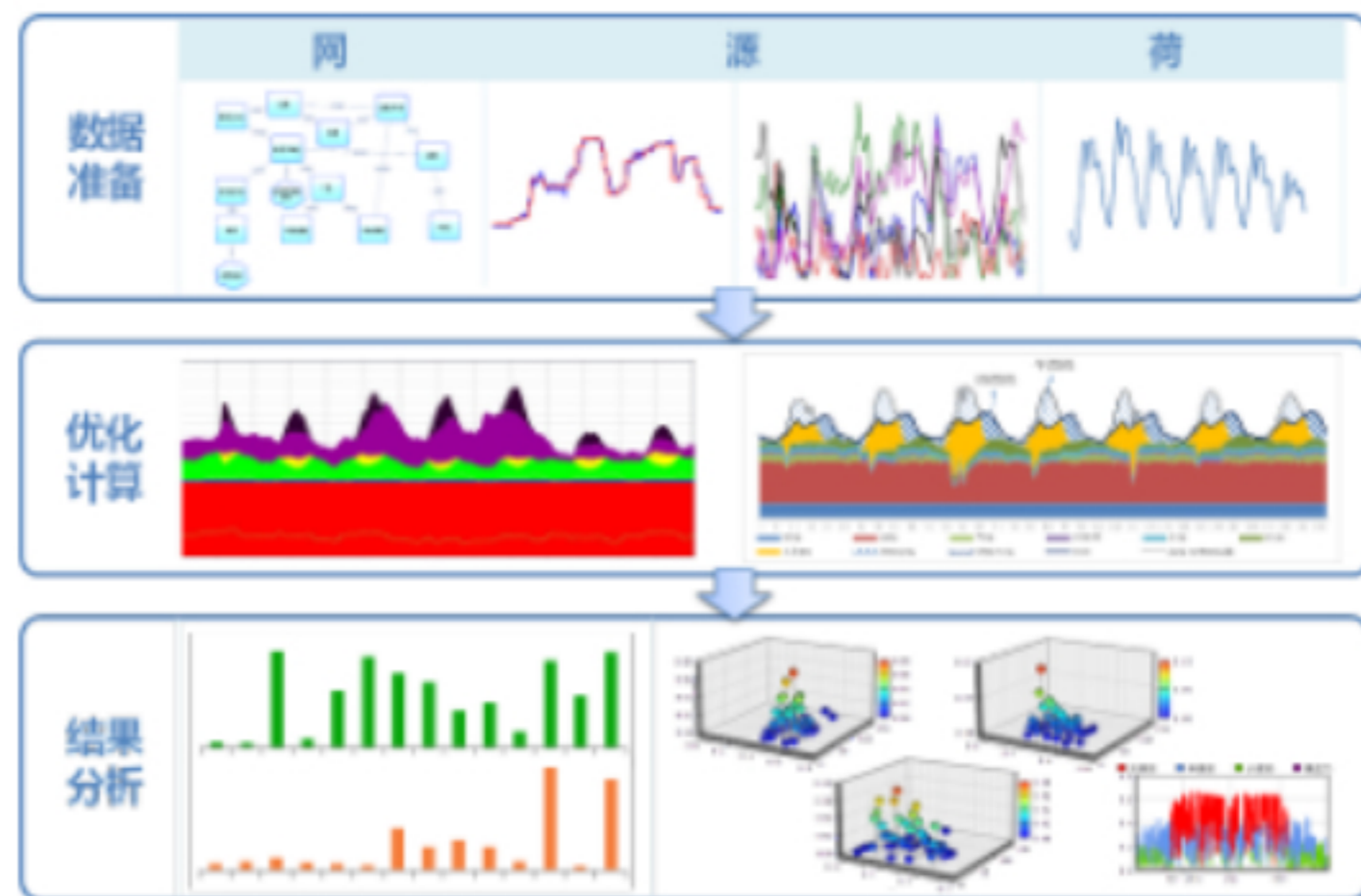
二、新能源并网技术发展现状

2.3 生产模拟技术——新能源电力系统时序生产模拟

基于**全年8760h电力电量平衡**的时序生产模拟技术可以充分考虑新能源的随机波动性，准确刻画电力系统复杂的源-网-荷-储运行方式，能够科学量化评估系统的**新能源消纳能力**、**系统供电不足风险**等，为新能源装机时序和布局优化提供决策支撑。



新能源电力系统电力平衡图



新能源电力系统时序生产模拟流程图

二、新能源并网技术发展现状

2.3 生产模拟技术——新能源电力系统时序生产模拟软件

新能源电力系统生产模拟软件（REPSs）能够满足新能源接入能力评估、并网时序优化、年/月电量计划优化等应用需求，是新能源消纳能力分析及年/月运行方式优化的标准工具，已应用于国调中心、南网总调、西北、甘肃等24个省级及以上电网。



新能源电力系统生产模拟软件与协同计算平台

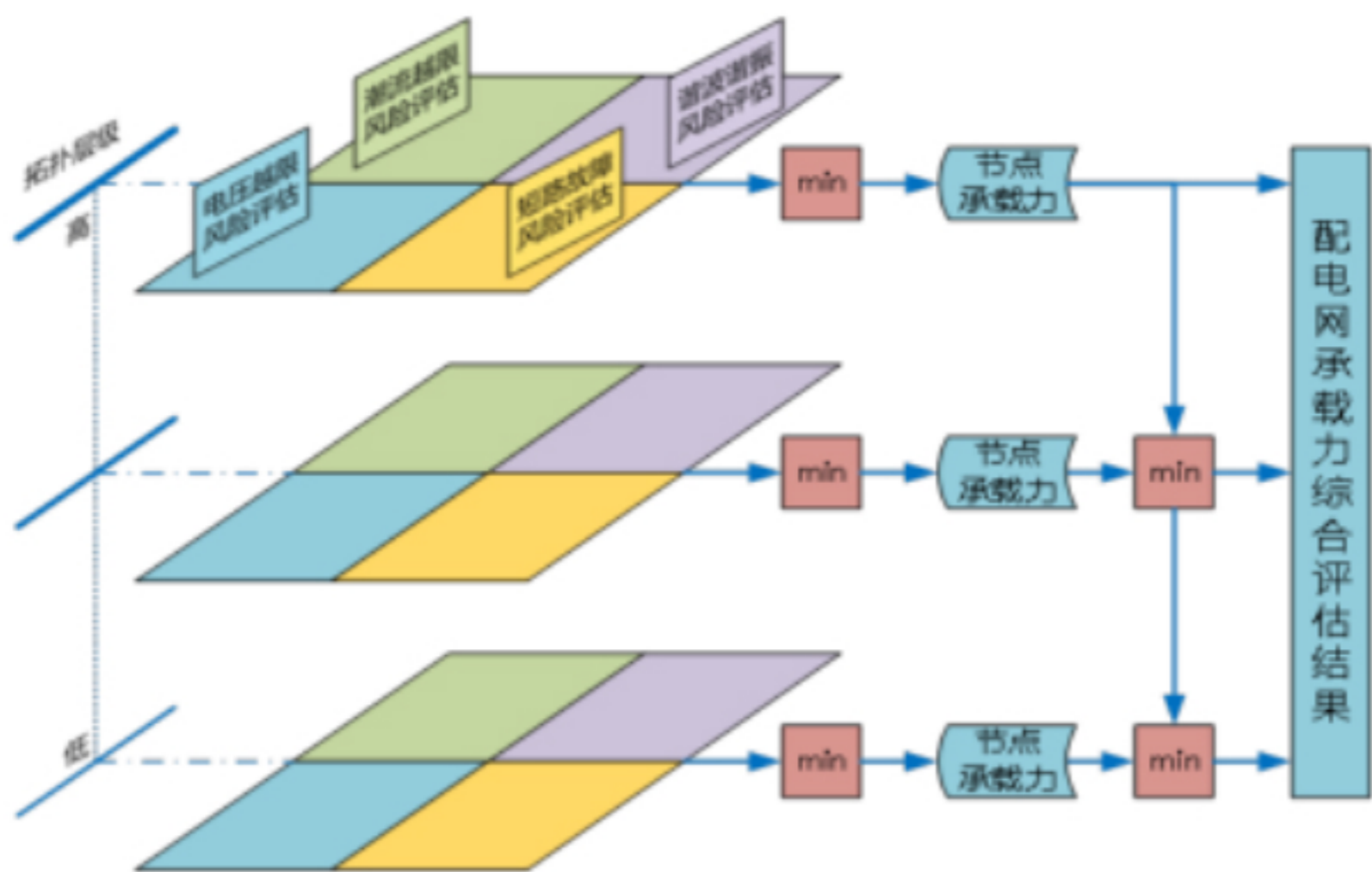


软件应用推广情况

二、新能源并网技术发展现状

2.4 分布式承载力评估技术——主配协同的分布式光伏接入电网承载力评估


基于配网设备热稳极限等电网运行和设备状态约束，结合不同类型分布式光伏可调节能力模型和主配网运行风险评估模型，形成考虑主网调峰和新能源消纳边界的分布式光伏分层分区承载力评估技术，能够科学量化省-地-县的分布式光伏承载力，为分布式光伏规划和运行提供决策支撑。



分层分区承载力综合评估方法



分布式新能源承载力评估系统页面及应用效果

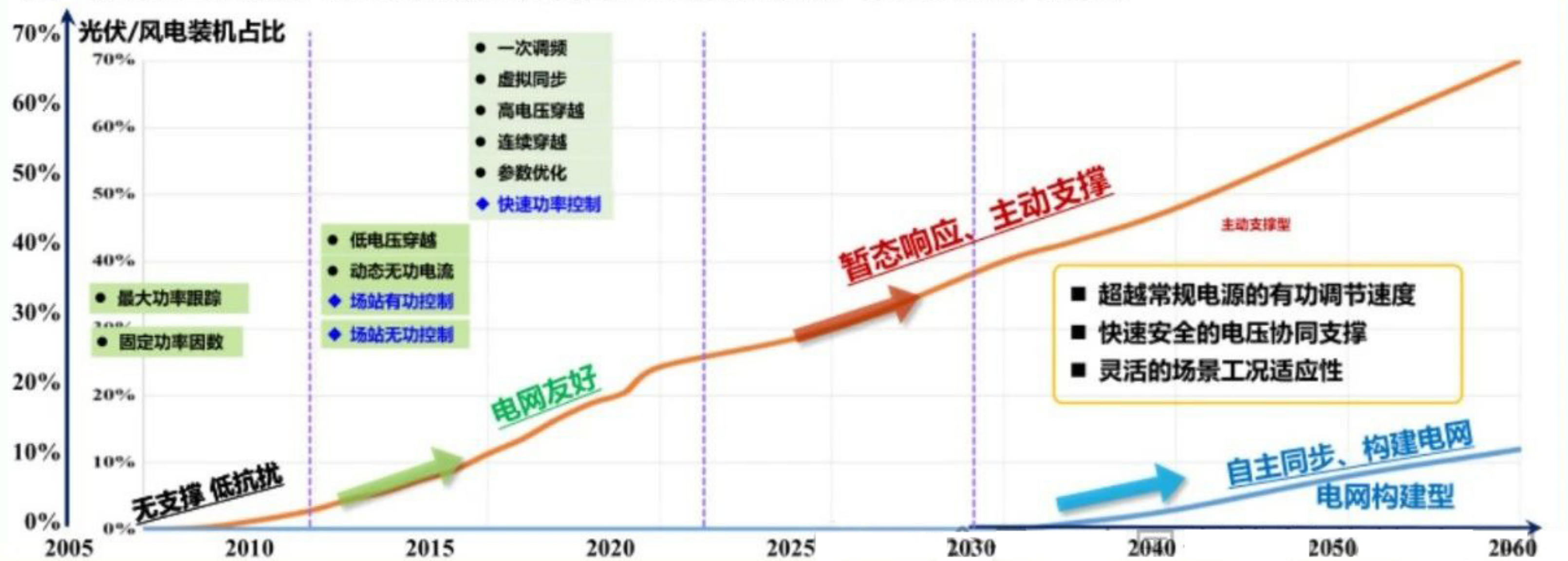


稳定控制技术

二、新能源并网技术发展现状

2.5 新能源主动支撑技术

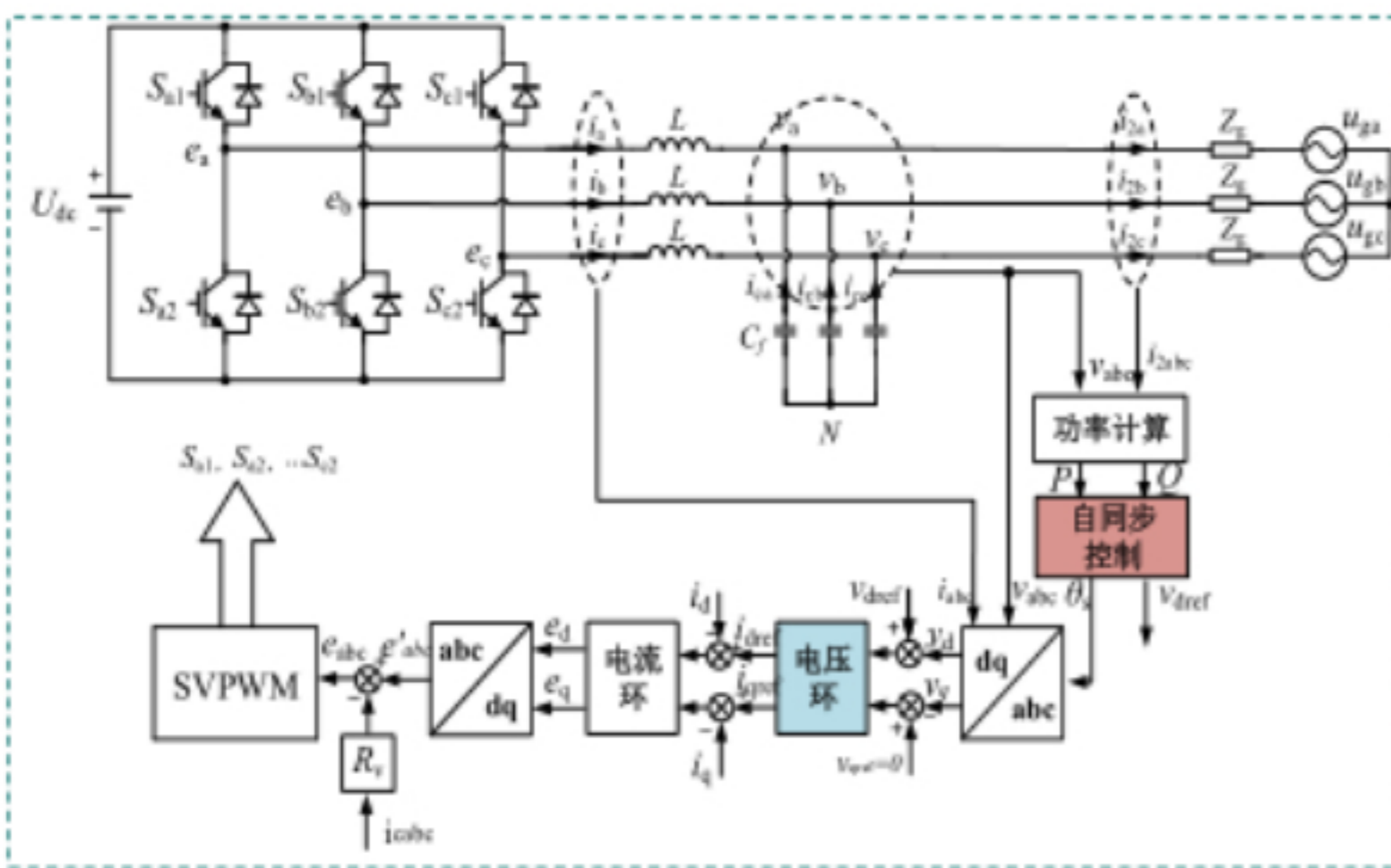
光伏/风电已经完成从“无支撑、低抗扰”向“电网友好”的转型；光伏/风电单机/场站已普遍具备功率调节、故障穿越等功能。未来新能源应具备暂态主动支撑功能，部分具有构网能力。



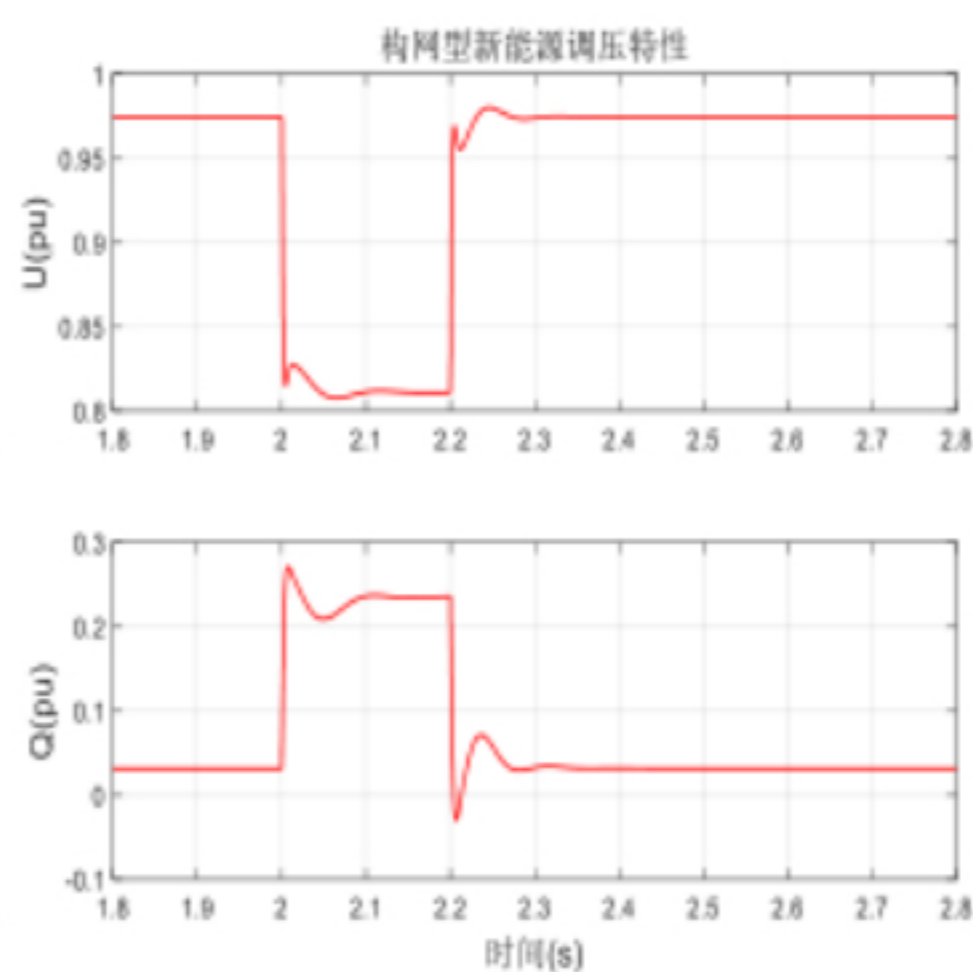
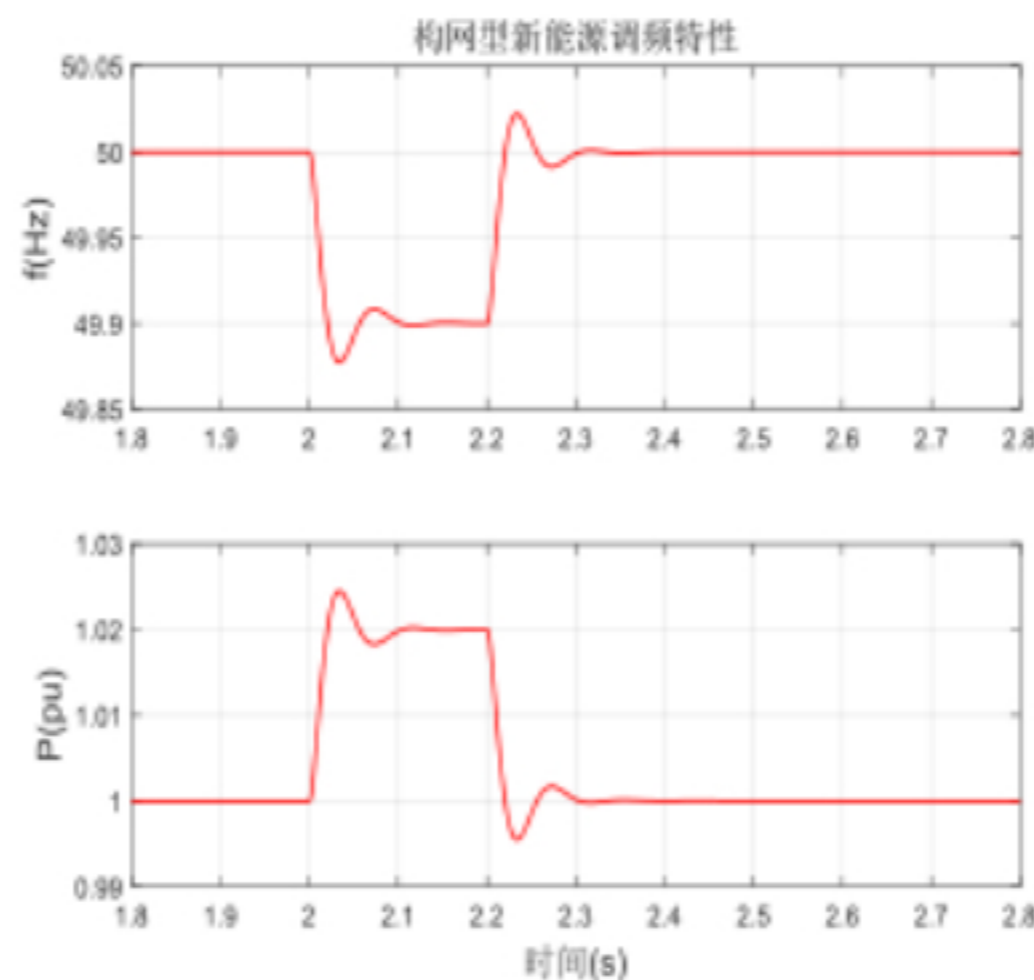
二、新能源并网技术发展现状

2.5 新能源主动支撑技术——构网型控制技术

区别于传统电流源基于锁相环（PLL）与电网同步，构网型控制技术通过**自同步控制算法**与电网同步，自生内电势，具备自主建立和调节频率和电压的能力，实现不依赖同步锁相的并网运行。



构网型新能源基本控制框图

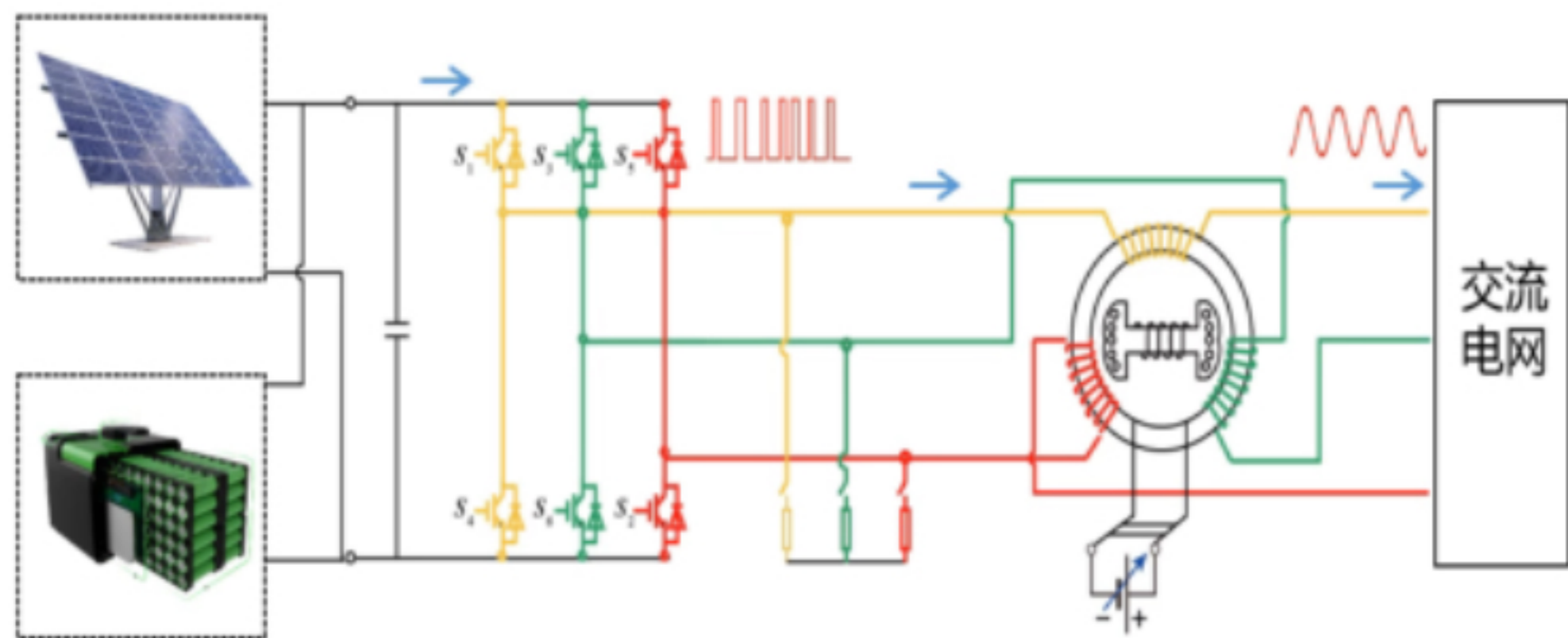


构网型新能源调频、调压特性

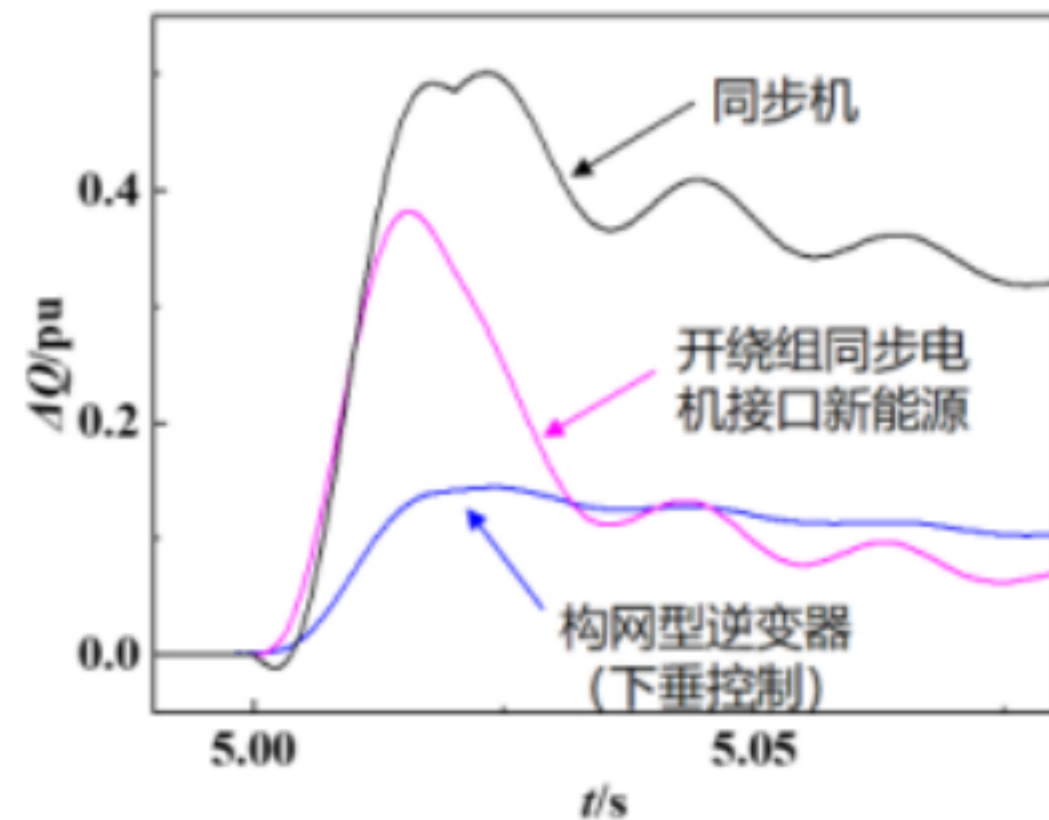
二、新能源并网技术发展现状

2.5 新能源主动支撑技术——同步电机接口型新能源发电技术

同步电机接口新能源发电是一种**基于开绕组同步电机的新能源发电新型拓扑**，通过**新能源发电拓扑结构和控制策略**的双重改进，使新能源发电在稳态运行时具有同步发电机的电压和频率支撑能力，在电网故障时具有与同步调相机相近的短路电流水平和暂态过电压抑制能力。



开绕组电机接口新能源发电基本拓扑

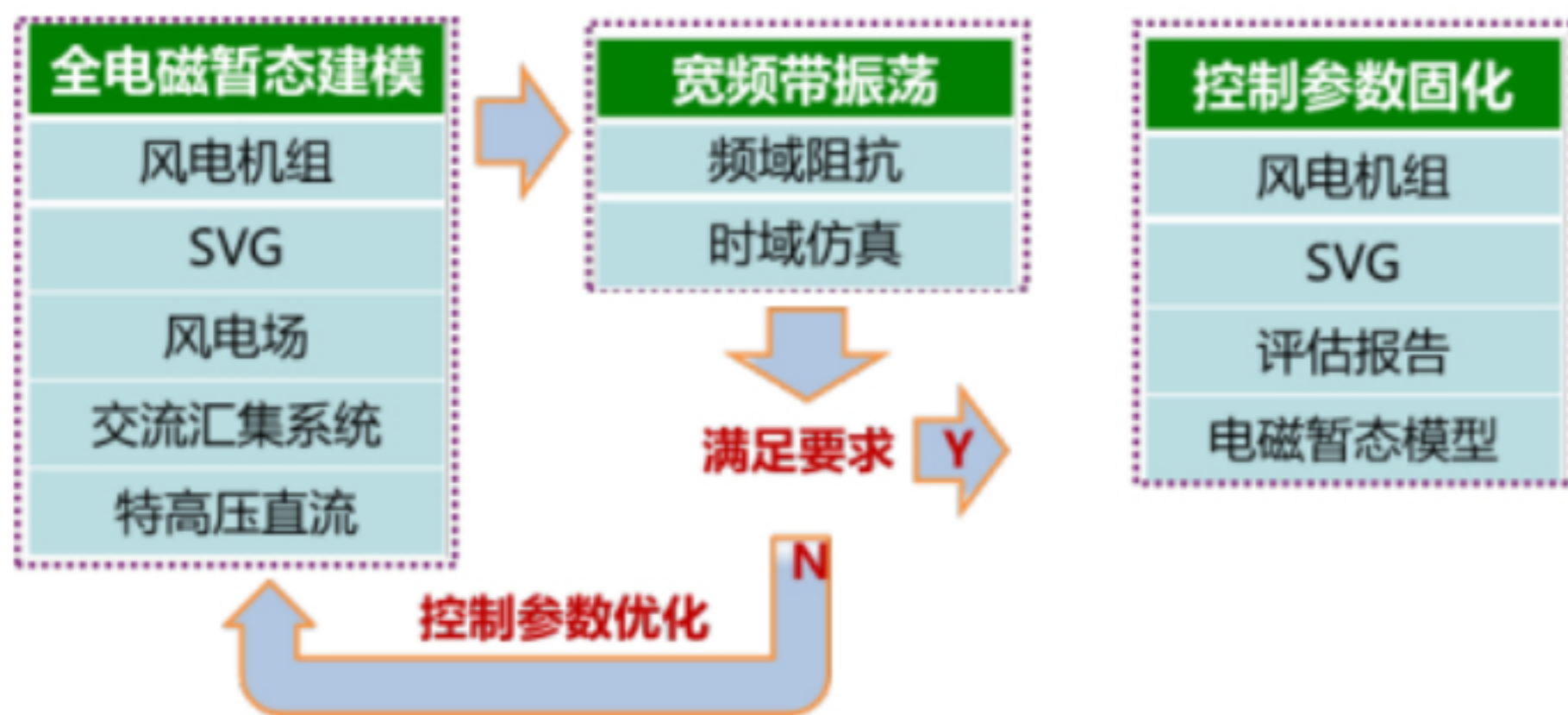


电压跌落时同步电机接口与同步机、构网型逆变特性对比

二、新能源并网技术发展现状

2.6 宽频振荡分析技术——技术路线

建立了基于**全电磁暂态建模-频域阻抗+时域仿真分析-参数优化与验证**的大规模新能源及电力电子装备并网宽频带振荡分析与抑制技术方案，制定了行业标准NB/T 10651-2021《风电场阻抗特性评估技术规范》，《光伏电站阻抗特性评估技术规范》（送审稿）。



风电场振荡风险评估与控制优化流程

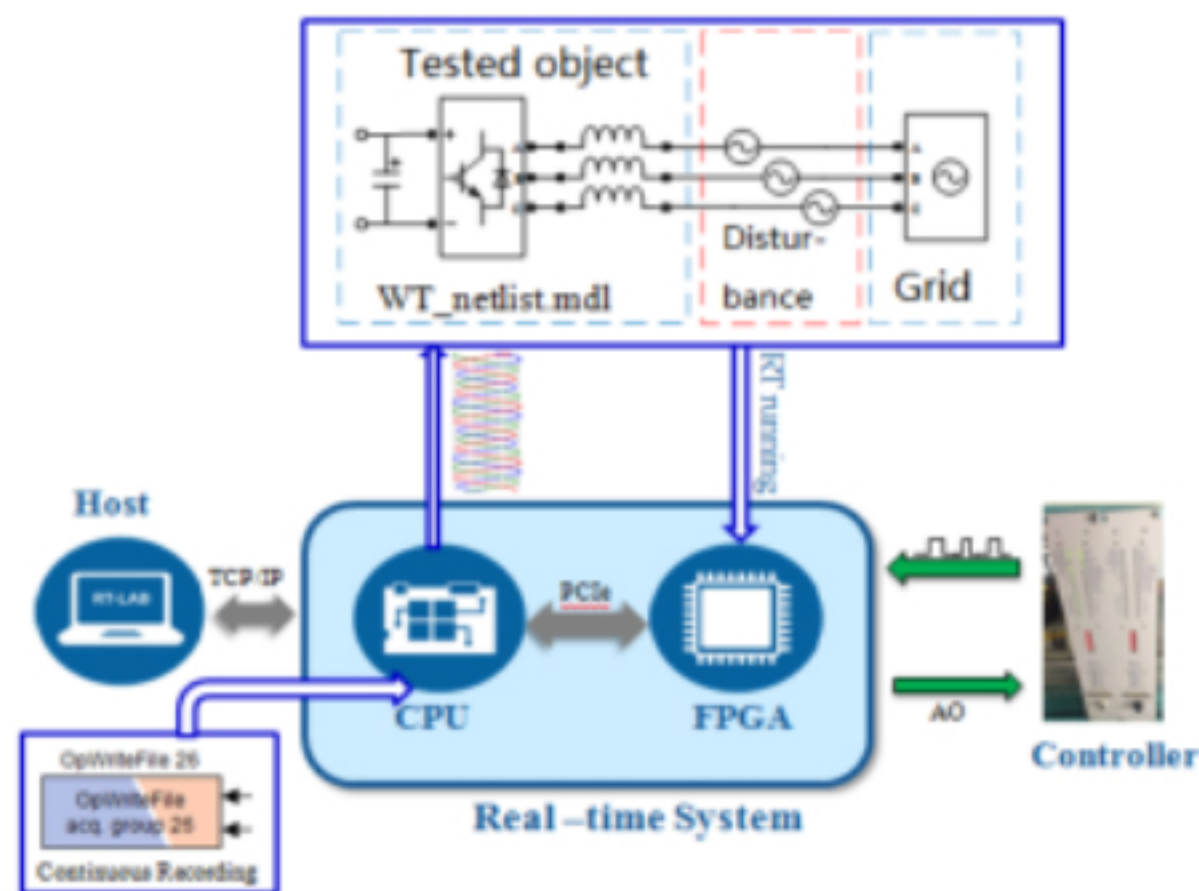
无功出力		有功出力
风电机组	无功补偿装置	
对应有功出力下的最大容性无功出力	满发容性无功、零出力、退出运行	10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%
功率因数1.0	满发容性无功、零出力、退出运行、满发感性无功	
对应有功出力下的最大感性无功出力	满发容性无功、零出力、退出运行	
静止无功发生器定电压控制模式，风电机组定功率因数1.0		

风电场振荡风险评估工况

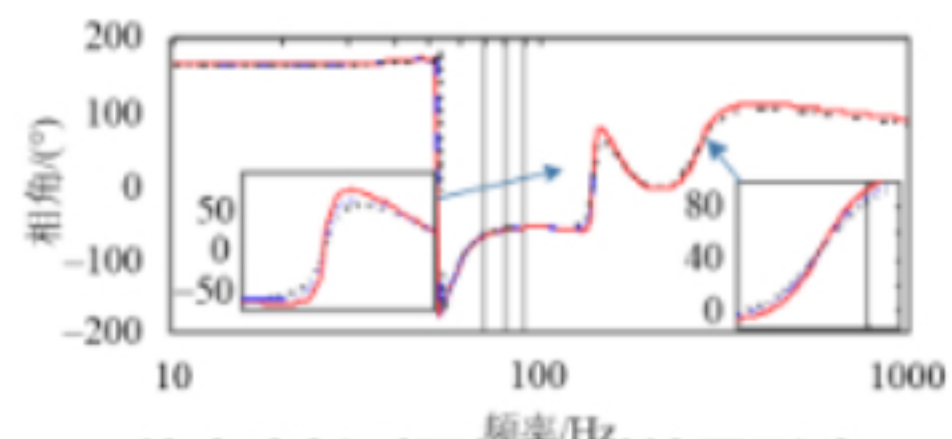
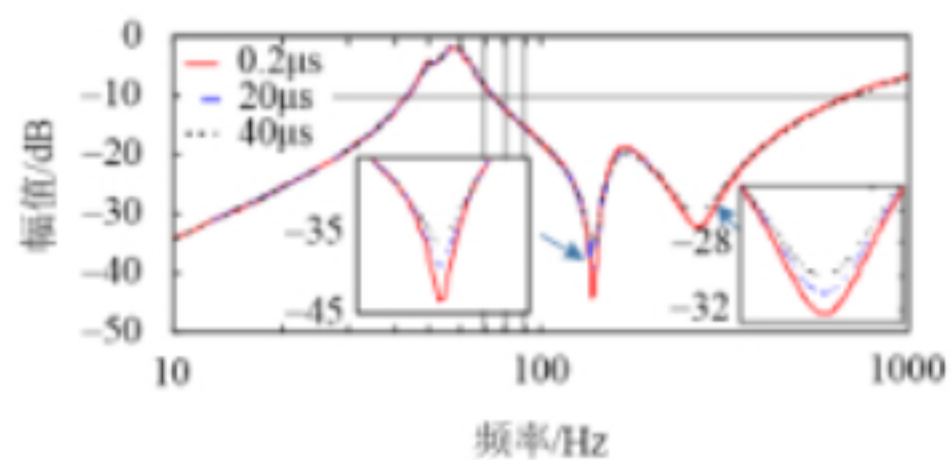
二、新能源并网技术发展现状

2.6 宽频振荡分析技术——新能源及电力电子装备阻抗扫描方法

提出了基于控制硬件在环仿真的**新能源及电力电子装备阻抗扫描方法**，建立了阻抗测量误差影响的数学模型，分析并消除了仿真步长、接口延时、开关模型参数在不同频段对阻抗测量精度的影响，建立了覆盖国内80%装机容量以上的阻抗模型库。



新能源发电宽频带阻抗扫描



仿真步长对阻抗扫描结果影响

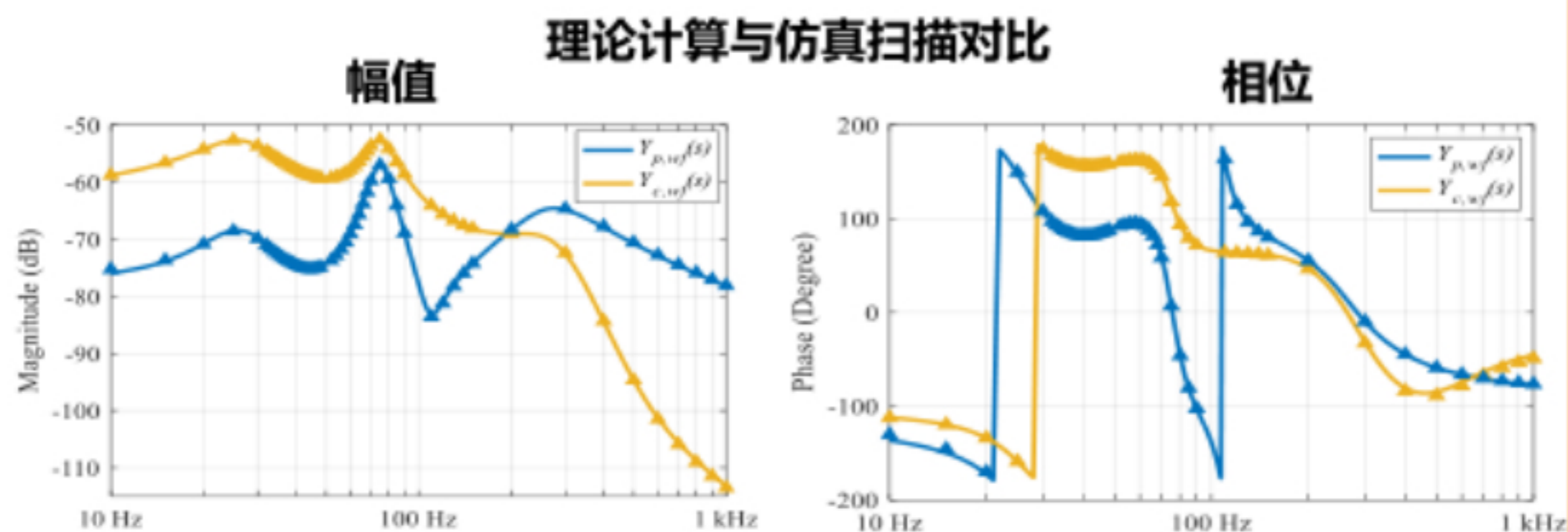
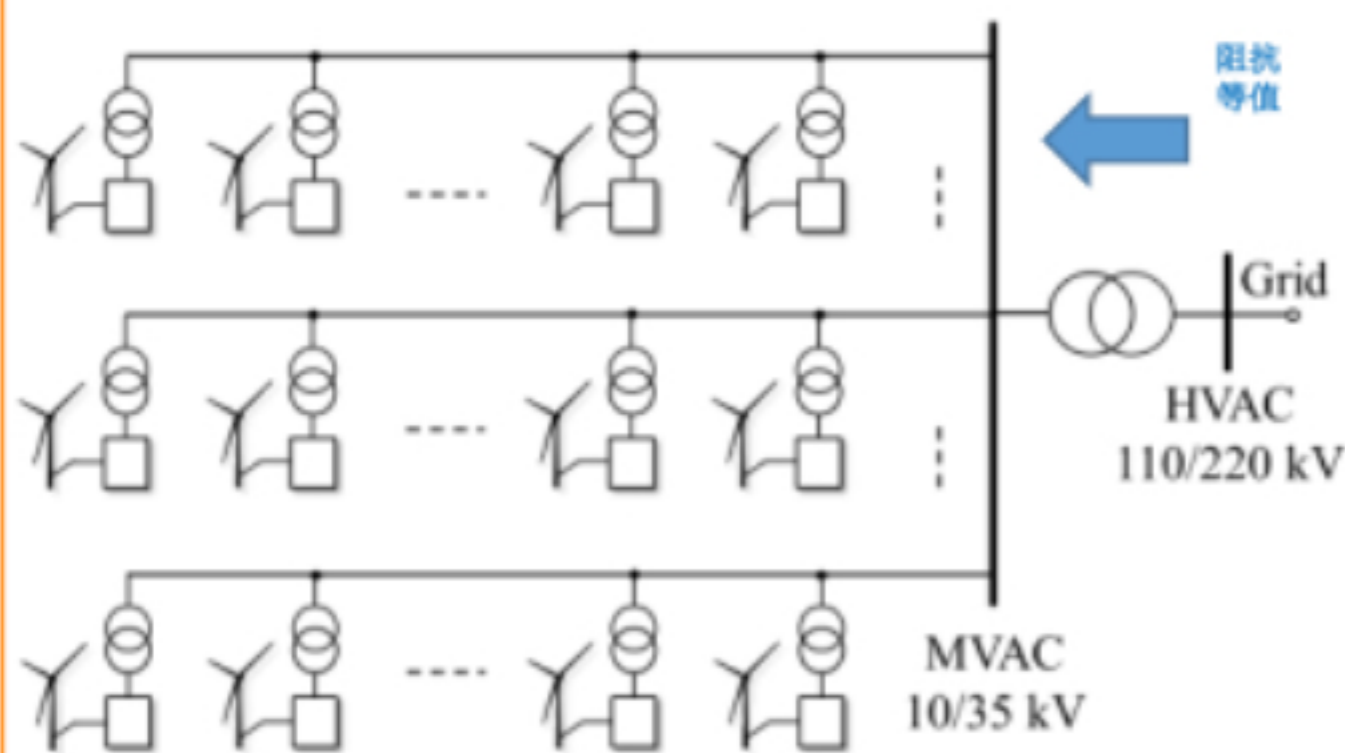


实际新能源发电控制器

二、新能源并网技术发展现状

2.6 宽频振荡分析技术——新能源场站宽频阻抗建模

新能源发电场站包含数十台装备及升压汇集网络，场站的整体阻抗特性由装备特性和网络特性共同决定，采用计及频率耦合和汇集网络的新能源发电场站阻抗等值方法，能够用于准确分析实际系统振荡问题中普遍存在的频率耦合问题。



等值
导纳

$$Y_{p,wf}(s) = \sum_{i=1}^n Y_{oi}(s) - y_0^T(s) \{ Y_N(s) - Y_r(s') Y_{N'}^{-1}(s') Y_c(s) \}^{-1} y_0(s)$$

耦合
导纳

$$Y_{c,wf}(s) = y_0^T(s') \{ Y_{N'}(s') - Y_c(s) Y_{N'}^{-1}(s) Y_r(s') \}^{-1} Y_c(s) Y_N^{-1}(s) y_0(s)$$

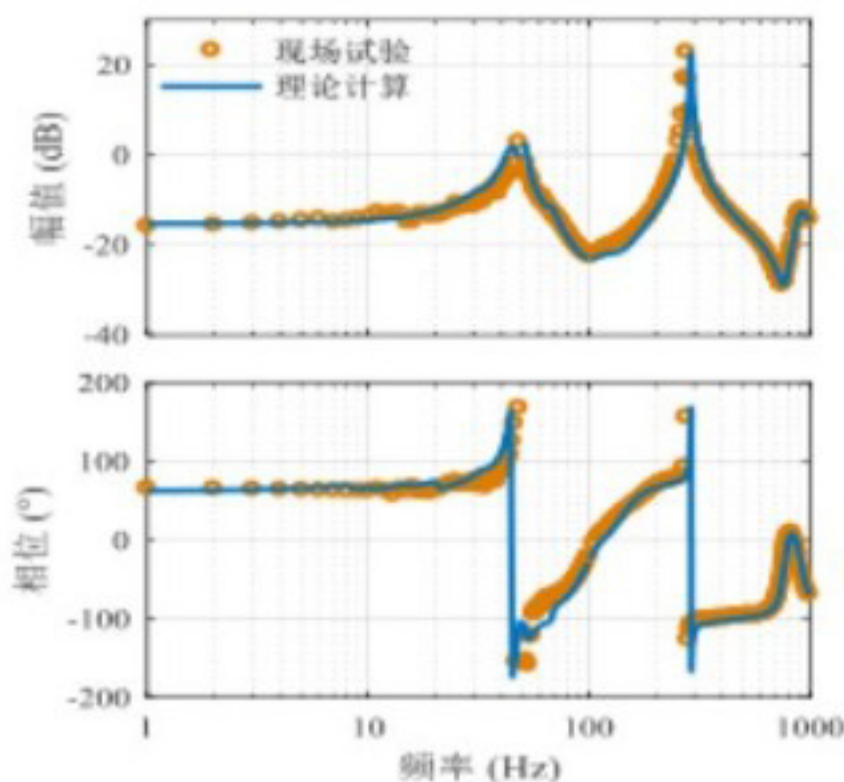
二、新能源并网技术发展现状

2.6 宽频振荡分析技术——宽频阻抗测量装备

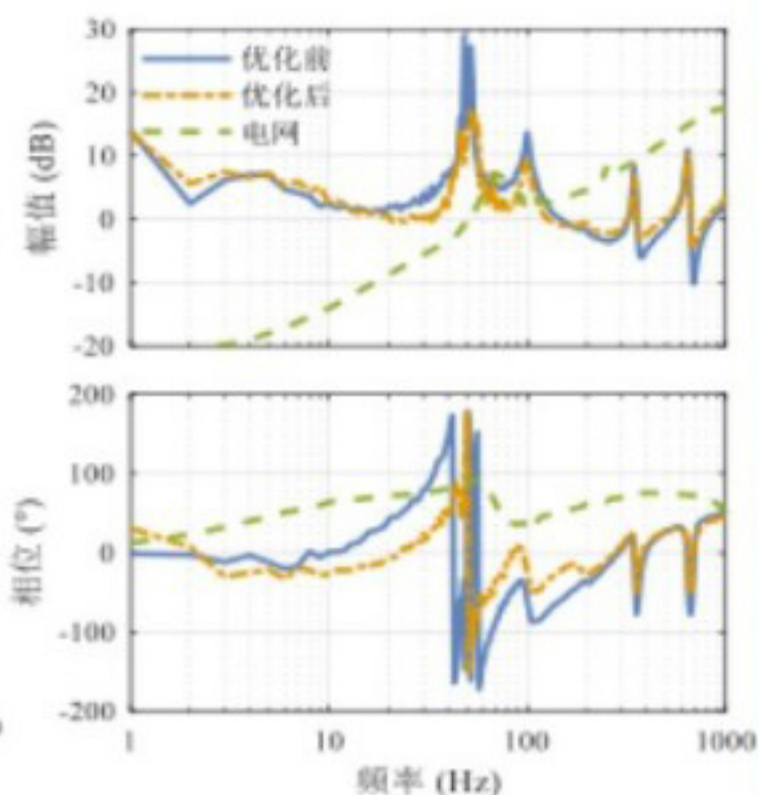
研制了新能源机组宽频阻抗测试装备，电压等级35kV，最大被测对象容量16MVA，测量频率范围2~1000Hz，最小频率步长1Hz。经实测与理论曲线比对，验证了阻抗测量装备的有效性，并在蒙东、宁夏、陕西开展了风电机组、光伏逆变器的阻抗实测。



风电机组宽频阻抗特性移动测试车



阻抗测量装置性能验证



阻抗特性优化效果现场实测

二、新能源并网技术发展现状

2.6 宽频振荡分析技术——新能源基地全电磁暂态实时仿真平台

构建了新能源基地经特高压/柔性直流送端系统的实时仿真平台，可开展新能源单机、场站、集群的**宽频振荡仿真分析及抑制措施验证**。



实时仿真平台实景图

■ 机组建模

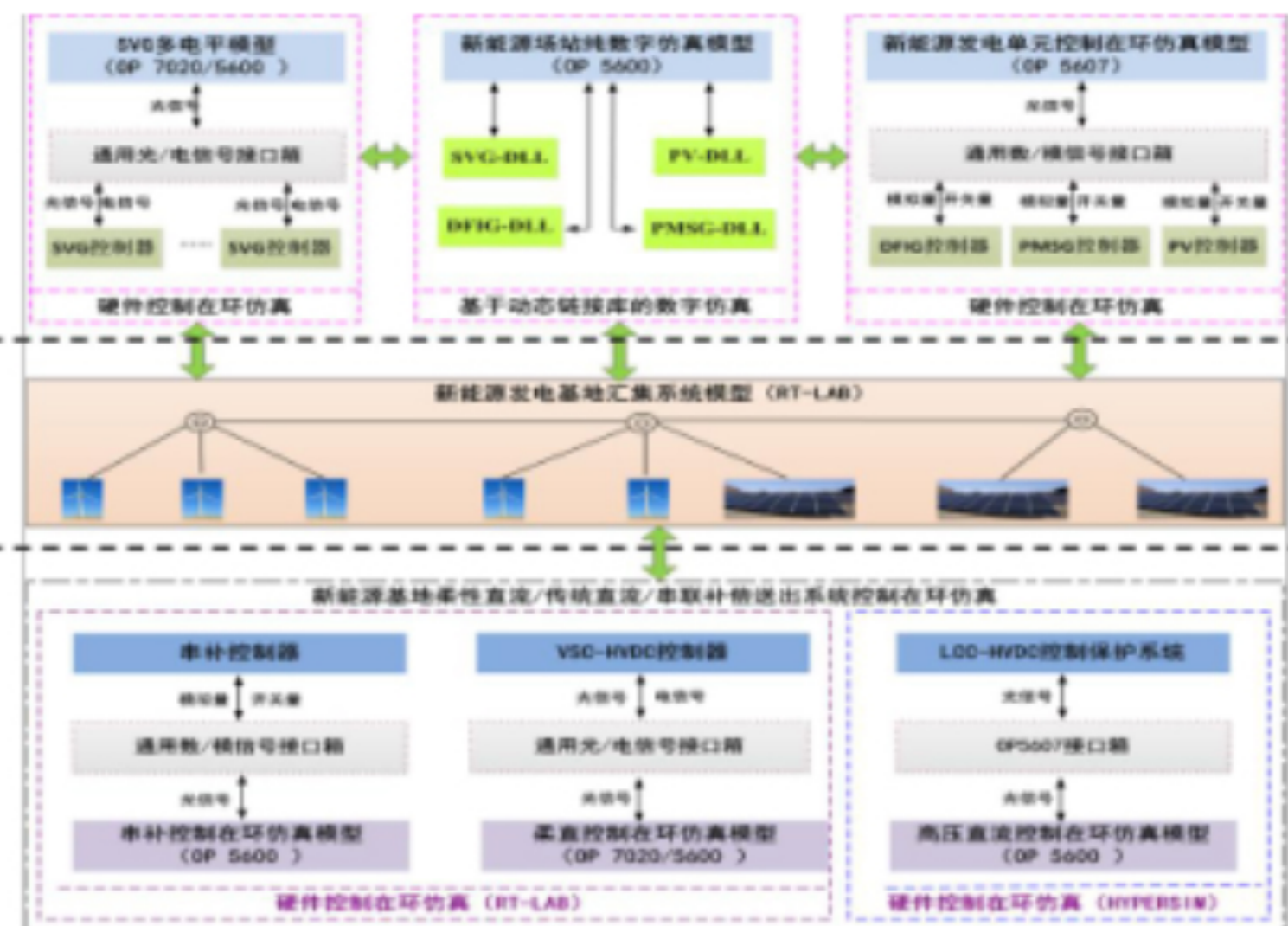
- ✓ 型式试验
- ✓ 控制在环
- ✓ 动态链接库

■ 汇集系统

- ✓ 分割/解耦

■ 送出方式

- ✓ 串联补偿
- ✓ VSC-HVDC
- ✓ LCC-HVDC



实时仿真平台结构图

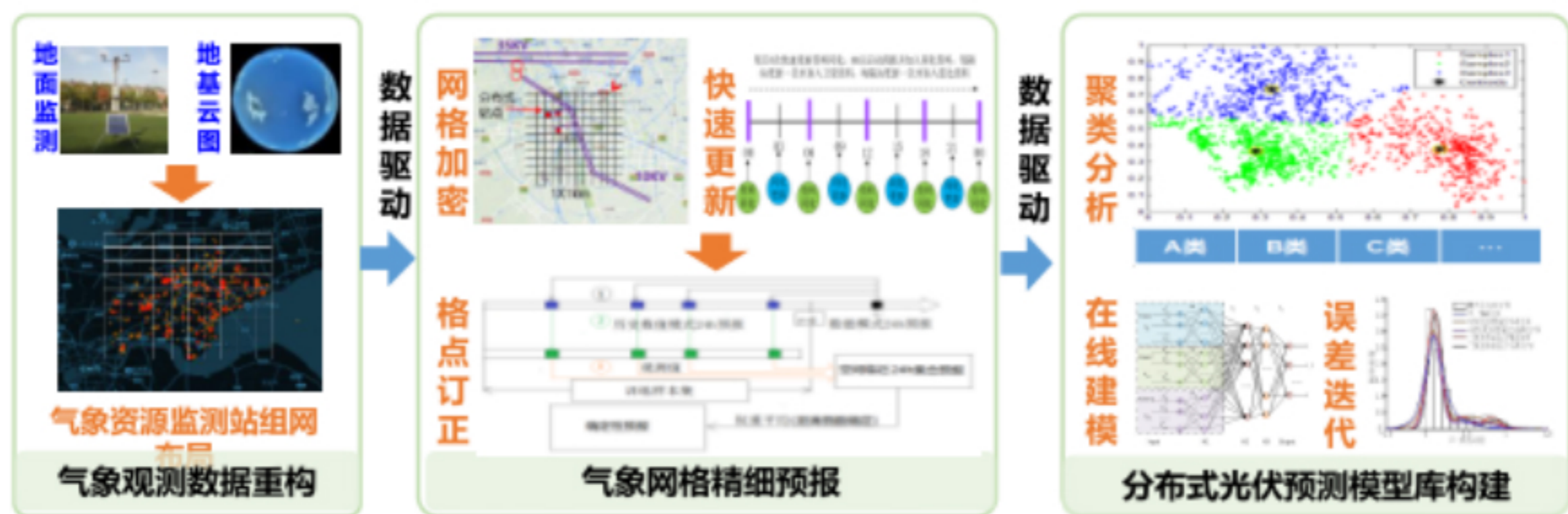
二、新能源并网技术发展现状

2.7 分布式光伏——“可观、可测、可调、可控”技术

通过PLC通讯模块的HPLC升级、智能电表非计量功能拓展，用采系统主站和集中器软件升级，实现有功、无功、电压、电流等数据分钟级“可观”。探索了基于3*3千米网格数值天气预报的分布式光伏预测方法，日前预测准确率达93%。通过智能电表费控开关、在表后加装光伏专用断路器、“集中器+规约转换器”“智能融合终端”等技术路径，实现低压分布式光伏“可控”和“可调”。



低压分布式光伏数据采集路径



分布式光伏功率预测技术路线

二、新能源并网技术发展现状

2.8 并网技术标准——光伏发电并网技术标准修订

GB/T 19964《光伏电站接入电力系统技术规定》、GB/T 29319《光伏发电系统接入配电网技术规定》（报批稿）是光伏发电最核心的并网技术标准。

最新修订稿相比2012版本有较大改动，新增了一次调频、高电压穿越、连续故障电压穿越等技术条款，提高了有功功率控制、电压适应性、频率适应性等指标要求。

标准名称	适用范围
GB/T 19964 《光伏电站接入电力系统技术规定》	> 10kV
GB/T 29319 《光伏发电系统接入配电网技术规定》	10kV、380V



《光伏电站接入电力系统技术规定》
(报批稿)



《光伏发电系统接入配电网技术规定》
(报批稿)

二、新能源并网技术发展现状

2.8 并网技术标准——光伏发电并网技术标准修订

技术要求	GB/T 19964		GB/T 29319	
	2012版本	报批稿	2012版本	报批稿
有功功率控制	只要求光伏具备有功功率控制能力	对有功功率控制的响应时间、响应速度提出明确要求	/	对有功功率控制的响应时间、响应速度提出明确要求
一次调频	/	具备一次调频能力，且对响应时间、调节时间有明确要求	/	具备一次调频能力，且对响应时间、调节时间有明确要求
电压适应性	0.9p.u.~1.1p.u.	0.9p.u.~1.1p.u.	0.9p.u.~1.1p.u.	0.85p.u.~1.1p.u.
频率适应性	49.5Hz~50.2Hz	48.5Hz~50.5Hz	49.5Hz~50.2Hz	48.5Hz~50.5Hz
高电压穿越	高电压耐受	具备最高1.3p.u.电压穿越能力，且高穿期间应提供无功支撑。	/	具备最高1.3p.u.电压穿越能力，且高穿期间应提供无功支撑。
连续故障电压穿越	/	至少具备连续两次低电压和低高电压穿越的能力	/	至少具备连续两次低电压穿越的能力

目录

CONTENTS

一

新能源并网特性

二

新能源并网技术发展情况

三

展望



三、展望

1. **新能源功率预测方面**，新能源高占比的电力系统面临源侧更大的波动性和不确定性，亟需高精度的新能源预测作为调度机构制定发电计划的决策基础。

探索不同时空尺度新能源预测误差传递特性以及**重大转折天气对新能源的影响机理**，建立面向不同预测尺度、不同预测对象的差异化预测、优化理论，持续**提升预测精度，延长预见期，丰富预测结果形式**是本领域重要的攻关方向。

2. **新能源消纳方面**，我国新能源每年新增装机将超过2亿千瓦，随着大型沙戈荒基地建设推进和海量分布式光伏并网，新能源消纳面临巨大挑战，需要**加强新能源和各类灵活调节资源的协同规划和优化运行技术研究**，实现新能源高效消纳。

三、展望

3. **新能源稳定控制方面**，应加强风/光发电主动支撑控制新方法与新理论研究，着力发展构网型新能源实证与工程应用。

4. 新能源并网涉及能源、电气工程、控制和气象等多专业，需加强**多学科、跨行业**的产学研协同攻关。

谢 谢!

THANK YOU!

