



国家电网
STATE GRID

港口微电网建模仿真与运行管控技术

南瑞集团有限公司

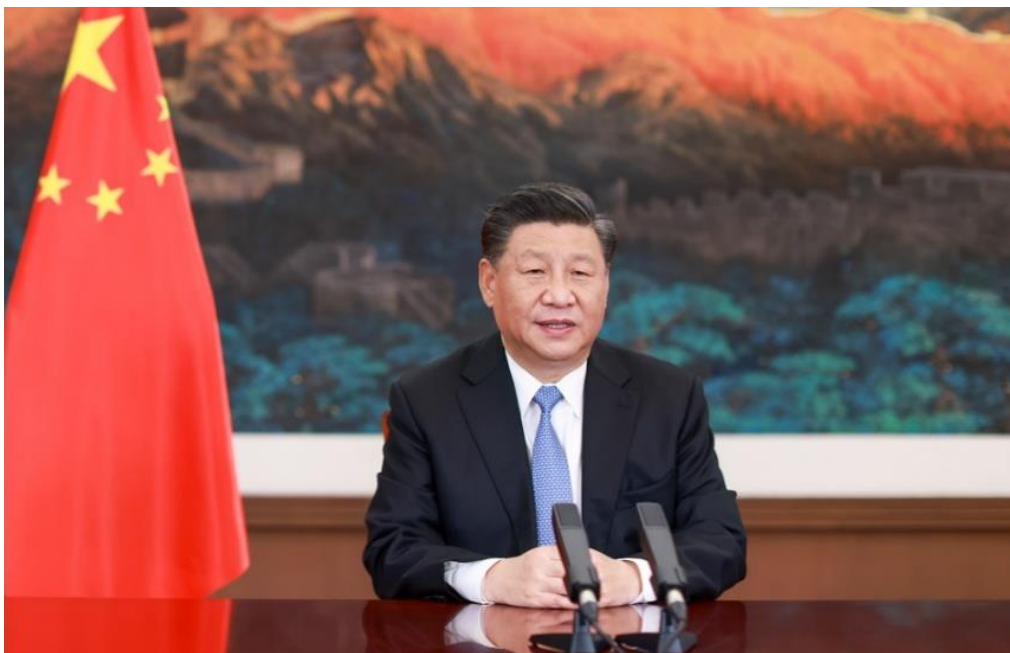
2024.04.18

- 1** 港口微电网发展背景
- 2** 港口微电网运行控制策略
- 3** 港口微电网建模仿真
- 4** 实际工程应用情况
- 5** 建议与展望

1. 发展背景



国家电网
STATE GRID



- 习近平在第七十五届**联合国大会**上作出**碳达峰、碳中和**的郑重承诺
- 2021年3月，习近平主持**中央财经委员会第九次会议**并发表重要讲话，再次对碳达峰、碳中和作出重要部署，强调要构建**以新能源为主体的新型电力系统**，明确了“双碳”背景下我国**能源电力转型**发展的方向。

我国制定了实现CO₂排放于2030年前**达峰**，2060年前实现**碳中和**的目标。

1. 发展背景

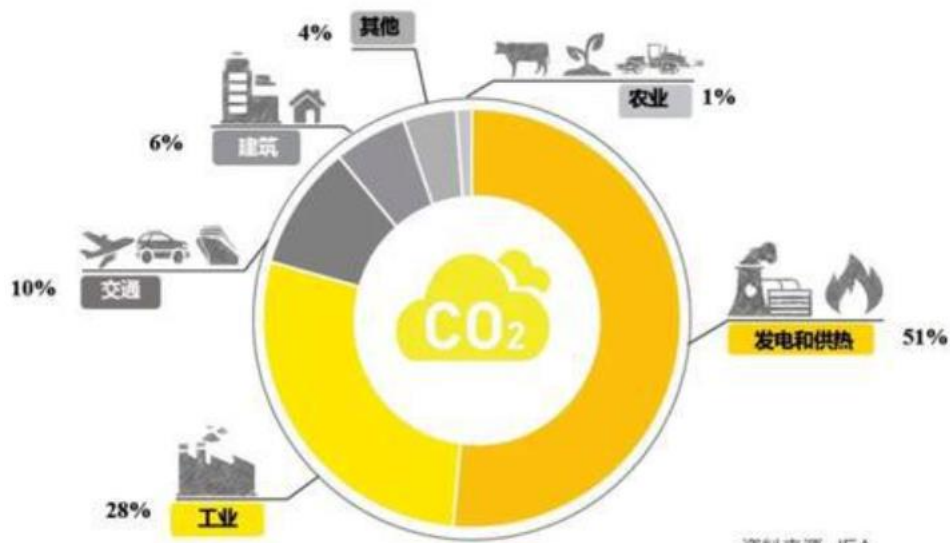


国家电网
STATE GRID

交通运输行业 能源消费情况

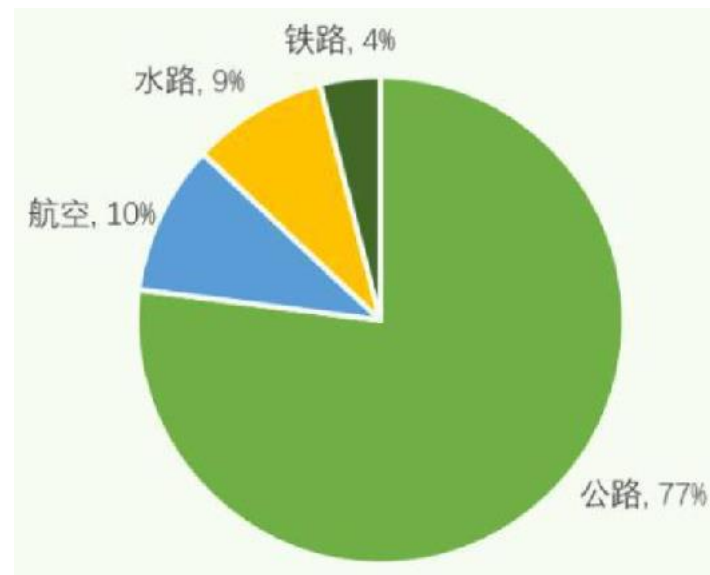
交通运输行业化石能源消费占比近90%，是唯一的碳排放还在上升的领域，任务更为艰巨！

交通运输行业能源消费占全行业的**10%**



各行业能源消费占比

水运占交通行业能源消费的**9%**



各类交通能源消费占比

1. 发展背景



国家电网
STATE GRID

政策、法规、规划

2017年以来，国家重点出台一系列政策推动港口发展，如中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等，交通运输部等多部门印发《关于建设世界一流港口的指导意见》、《关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》等政策性文件，为包括智慧港口和智慧航道在内的智慧交通发展指明了前进方向、提供了根本遵循。

- 到**2025年**，世界一流港口建设取得重要进展，主要港口“**绿色、智慧、安全**”发展实现重大突破，地区性重要港口和一般港口专业化、规模化水平明显提升。
- 到**2035年**，全国港口发展水平整体跃升，主要港口总体达到世界一流水平，若干个枢纽港口建成世界一流港口，引领**全球港口绿色发展、智慧发展**
- 到**2050年**，全面建成**世界一流港口**，形成若干个世界级港口群，发展水平位居世界前列。



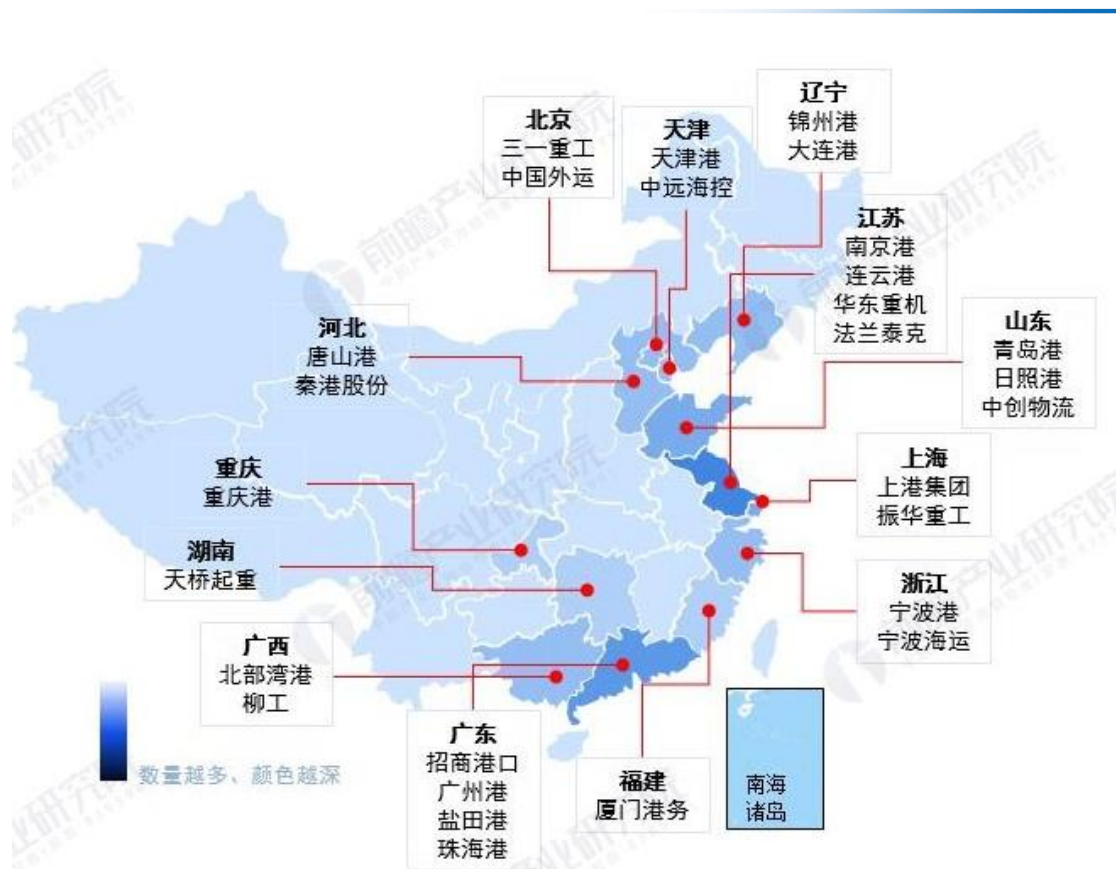
建设世界一流港口

1. 发展背景



国家电网
STATE GRID

全国港口基本情况



标志港口与上市企业热力分布图

(来源：前瞻产业研究院)

全国拥有沿海港口150余个，含**24个主要港口**、8个区域性枢纽港口、24个地区性重要港口等；内河港口1300多个，含**28个主要港口**。典型的如：

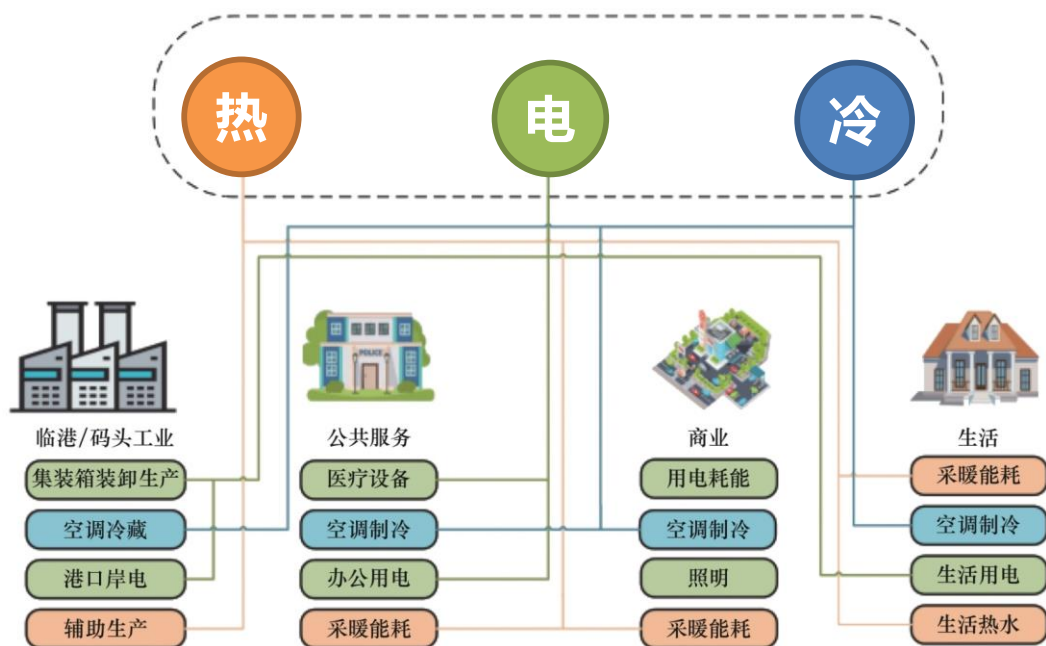
- **上海洋山港**：全球最大的智能集装箱码头，年集装箱吞吐量突破2500万标准箱；
- **宁波舟山港**：全球第三大运输港口，是中国超大型巨轮进出最多的港口，也是世界上少有的深水良港；
- **青岛港**：是世界最大的40万吨级矿石码头、45万吨级原油码头，可停靠世界最大22.7万吨级邮轮的专用码头和世界一流的国际邮轮客运中心；
-

1. 发展背景

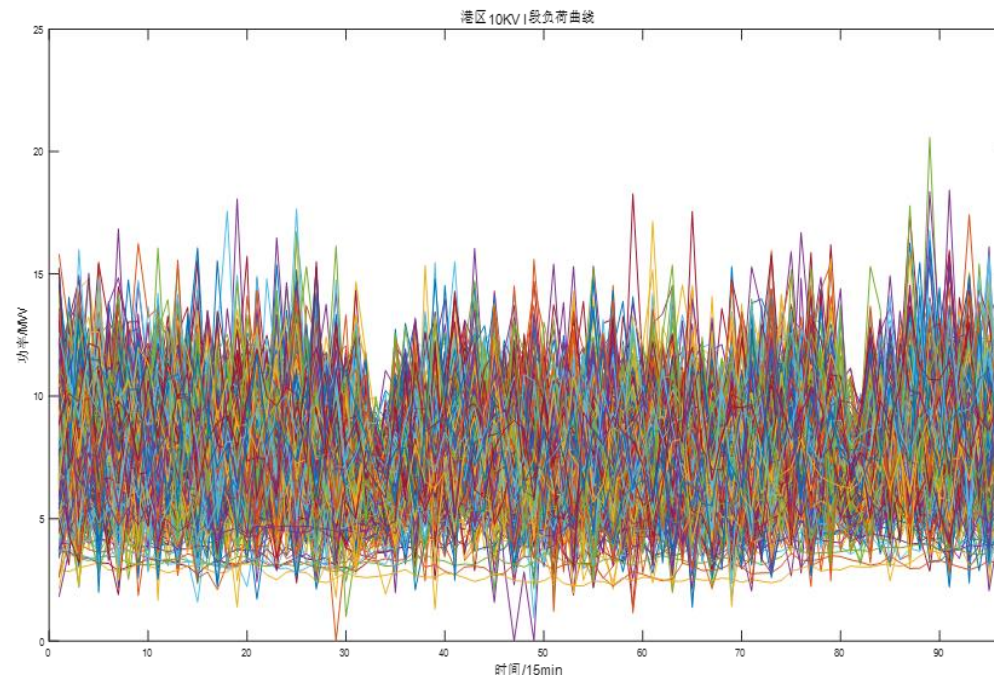


国家电网
STATE GRID

港口能源使用现状



港口多能负荷需求示意图



港口电网负荷统计图

港口基础设施的能量需求主要由**电能、燃油、煤炭、LNG**等能源提供。现有的**能源利用形式单一**，尚未充分实现不同种类能源间的交互以及循环利用。

从电网角度看，港区电网为**传统供电网络**，岸桥场桥等**主要负荷潮流双向流动**且有较强的冲击性，存在**排放强度大、电能质量差、损耗高、运营成本高**等问题。

1. 发展背景



国家电网
STATE GRID

港区多能源融合场景



港口多能源管控场景示意图

结合港区自然资源禀赋、港区及靠港船舶能耗特征，可引入风力、光伏等分布式新能源发电、多形式储能、船舶岸电、绿电制氢、各类冷热源等新元素，以提升港区新能源发电与消纳率，港口电能获取也将由“远方来”转化为“远方来”和“身边取”共存。

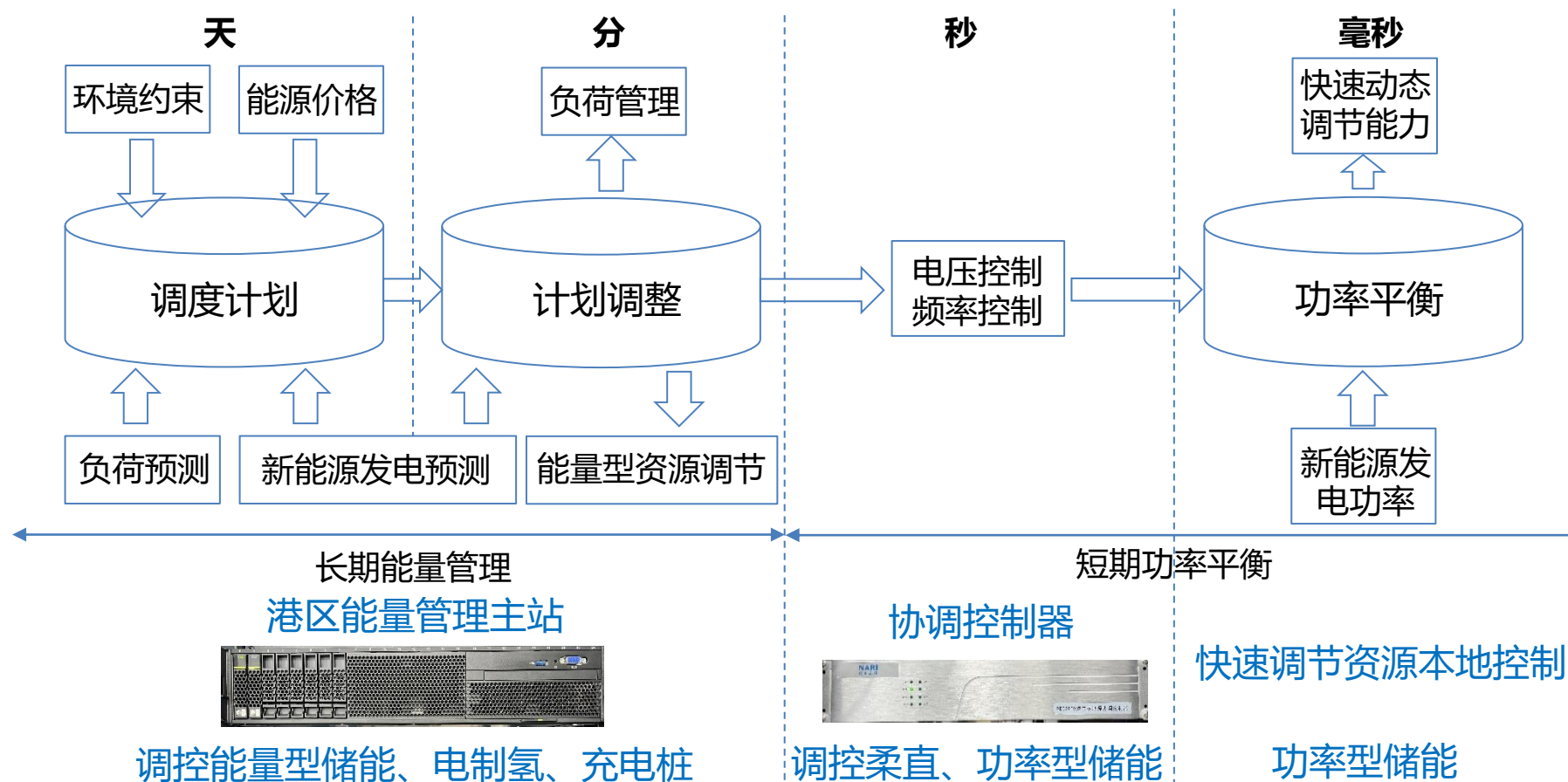
如此，港区电网转变为具有“双高”特征的微电网，新老问题交织，需要掌握其复杂运行特性并进行协调优化控制，以实现港区多种能源互补利用，提升能源利用效率。

- 1** 港口微电网发展背景
- 2** 港口微电网运行控制策略
- 3** 港口微电网建模仿真
- 4** 实际工程应用情况
- 5** 建议与展望



2. 港口微电网运行控制策略

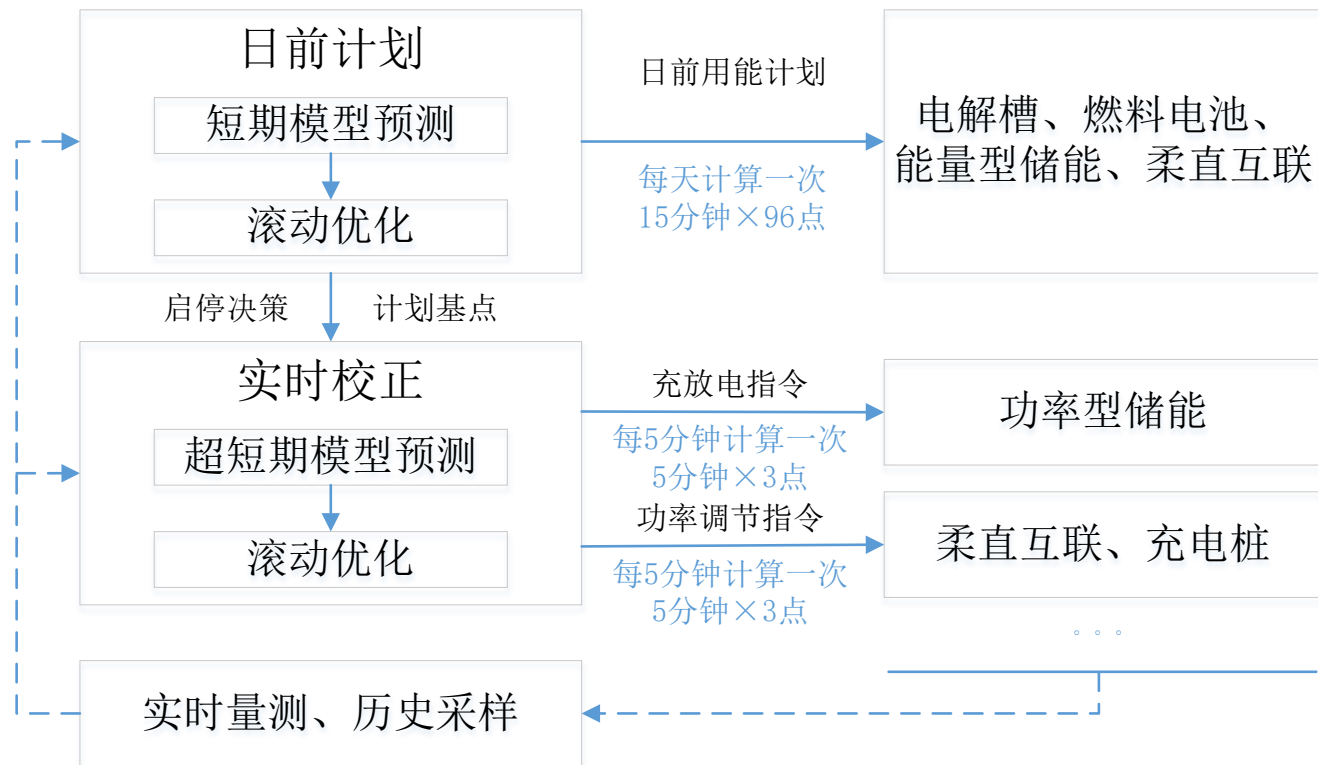
□ 港区多时间尺度能量管理架构示意图





2. 港口微电网运行控制策略

□ 能量管理主站多时间尺度优化调度架构



递阶模型预测控制是在传统MPC的基础上，将系统调度控制过程在**不同时间尺度**上进行分解，解决传统MPC方法在应用中面临的**优化调度的复杂性和实时控制的快速性之间的矛盾**。根据不同设备/对象的响应速度进行**分类调度**。

基于递阶模型预测控制的多能协调优化调度架构如图所示，分为**日前计划**、**实时校正**两个不同时间尺度，每个时间尺度的调度资源、优化模型**各有侧重**。



2. 港口微电网运行控制策略

□ 能量管理主站优化调度策略-日前计划

➤ 优化目标函数

为适应港区多种运行场景及运行经济性、绿色性的需求，在港区实际生产运行过程中，需要通过多能源融合系统协调各类可调资源，实现整体运行指标最优，故本方案中多能源融合系统日前计划采用**考虑港区本地新能源消纳的运行经济性**作为主要的优化目标。

港区新能源本地消纳率最优

$$\min f = C_{cost} = C_{buy} + C_{op} + C_{pun}$$

购售电/氢成本

$$C_{buy} = B_e \sum_{t=1}^T P_{buy_e,t} - S_e \sum_{t=1}^T P_{sell_e,t} + B_g \sum_{t=1}^T P_{buy_g,t} - S_g \sum_{t=1}^T P_{sell_g,t}$$

设备运维成本

$$C_{op} = C_{PV} \cdot \sum_{t=1}^T P_{PV,t} + C_{WT} \cdot \sum_{t=1}^T P_{WT,t} + C_{ES} \cdot \left(\sum_{t=1}^T P_{ES,t}^{ch} + \sum_{t=1}^T P_{ES,t}^{dis} \right) + C_{FLEX} \cdot \sum_{t=1}^T P_{FLEX,t} + C_{EH} \cdot \sum_{t=1}^T P_{EH,t} + C_{HC} \cdot \sum_{t=1}^T P_{HC,t}$$

弃风弃光惩罚

$$C_{pun} = S_{pun} \left[\sum_{t=1}^T (\overline{P_{PV,t}} - P_{PV,t}) + \sum_{t=1}^T (\overline{P_{WT,t}} - P_{WT,t}) \right]$$



2. 港口微电网运行控制策略

□ 能量管理主站优化调度策略-日前计划

➤ 约束条件

1、系统电功率与氢负荷平衡约束

(1) 电功率与产氢用氢平衡约束

$$\Delta P_{bus1} = P_{bus1_buy_e} - P_{bus1_sell_e} - P_{bus1_waste_e} + P_{bus1_PV} + P_{bus1_WT} - P_{bus1_ES}^{ch} + P_{bus1_ES}^{dis} - P_{bus1_EH} - P_{bus1_load} + P_{FLEX} = 0$$

$$\Delta P_{bus2} = P_{bus2_buy_e} - P_{bus2_sell_e} - P_{bus2_waste_e} + P_{bus2_PV} + P_{bus2_WT} - P_{bus2_ES}^{ch} + P_{bus2_ES}^{dis} + P_{bus2_HC} - P_{bus2_load} - P_{FLEX} = 0$$

$$\Delta P_{gas} = P_{buy_g} - P_{sell_g} - P_{bus2_HC} + P_{bus1_EH} - P_{load_g} = 0$$

(2) 110kV母线倒送功率约束

$$0 \leq P_{bus1_sell_e} \leq P_{sell,max}$$

$$0 \leq P_{bus2_sell_e} \leq P_{sell,max}$$

2、电储能设备运行约束

在日前计划阶段只考虑能量型储能的动作。

$$\begin{cases} E_{EES,t} + P_{EES,t}^{ch} \times \eta_{EES}^{ch} \times \Delta t - \frac{P_{EES,t}^{dis}}{\eta_{EES}^{dis}} \times \Delta t = E_{EES,t+1} & t = 1, 2, \dots, T_{EES} - 1 \\ E_{EES,t} + P_{EES,t}^{ch} \times \eta_{EES}^{ch} \times \Delta t - \frac{P_{EES,t}^{dis}}{\eta_{EES}^{dis}} \times \Delta t = E_{EES,1} & t = T_{EES} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{EES,t}^{ch} \leq P_{EES,max}^{ch} \times D_{EES,t}^{ch} \\ 0 \leq P_{EES,t}^{dis} \leq P_{EES,max}^{dis} \times D_{EES,t}^{dis} \\ D_{EES,t}^{ch} + D_{EES,t}^{dis} \leq 1 \end{cases}$$

$$E_{EES,min} \times SOC_{min} \leq E_{EES,t} \leq E_{EES,max} \times SOC_{max}$$

$$\sum_{t=1}^{T_{BESS}} (D_{EES,t}^{ch} + D_{EES,t}^{dis}) \leq 4$$



2. 港口微电网运行控制策略

□ 能量管理主站优化调度策略-日前计划

➤ 约束条件

3、柔直设备运行约束

$$-P_{FLEX,max} \leq P_{FLEX,t} \leq P_{FLEX,max}$$

4、电解水制氢设备运行约束

(1) 电解水制氢设备功率约束

$$P_{EH}^{min} \leq P_{EH,t} \leq 1.1P_{EH}^{rated}$$

(2) 电解水制氢设备功率爬坡/滑坡约束

$$|P_{EH,t} - P_{EH,t-1}| \leq \Delta P_{EH}$$

5、电能系统潮流约束

6、储氢设备状态约束

$$\begin{cases} 0 \leq V_{EH,t}^{in} \leq V_{EH,max}^{in} \times D_{EH,t}^{in} \\ 0 \leq V_{EH,t}^{out} \leq V_{EH,max}^{out} \times D_{EH,t}^{out} \\ D_{EH,t}^{in} + D_{EH,t}^{out} \leq 1 \end{cases}$$

$$SOH_{EH,t} - SOH_{EH,t-1} = \left(\frac{V_{EH,t}^{in}}{M_{EH}^{rated}} - \frac{V_{EH,t}^{out}}{M_{EH}^{rated}} \right) \Delta t$$

$$SOH_{EH}^{min} \leq SOH_{EH,t} \leq SOH_{EH}^{max}$$

7、氢燃料电池设备运行约束

$$P_{HC}^{min} \leq P_{HC,t} \leq 1.17P_{HC}^{rated}$$

$$\sum_{k=t}^{t+TS-1} (1 - u_{n,k}) \geq TS(u_{n,t-1} - u_{n,t})$$



2. 港口微电网运行控制策略

□ 能量管理主站优化调度策略-实时校正

- **实时校正每5分钟执行一次，给出未来15分钟的调度计划**，对因短期源荷预测误差及系统突发性事件带来的日前计划偏差进行修正。值得注意的是，**实时校正策略的制定是建立在日前计划基础上的**，需考虑部分调节响应速度较慢的设备已根据日前计划确定并开始执行相应指令，并以此作为校正策略制定的计划基点。
- 实时校正确定**可快速调控设备**的功率调节策略，如：功率型储能、柔直设备以及电动作业车辆充电站等。



2. 港口微电网运行控制策略

□ 港区多能源协调控制器-协控策略

- 依托**多能源协调控制器**，在稳态实时运行与系统异常运行状态下，对港区电网各个设备进行实时协调控制，控制设备包括储能与柔直转供系统。
- **在系统正常运行状态下**：协调控制器根据**实时采集**的港区电网各设备运行遥测数据，对功率型储能及柔直转供系统协调控制，其他资源均按照港区能量管理主站指令运行。
- **在系统异常运行状态下**：执行相应异常控制策略。
 - **异常工况1**：主变重载且两段母线负载出现严重不均衡；
 - **异常工况2**：协调控制器与能量管理系统通信断开。

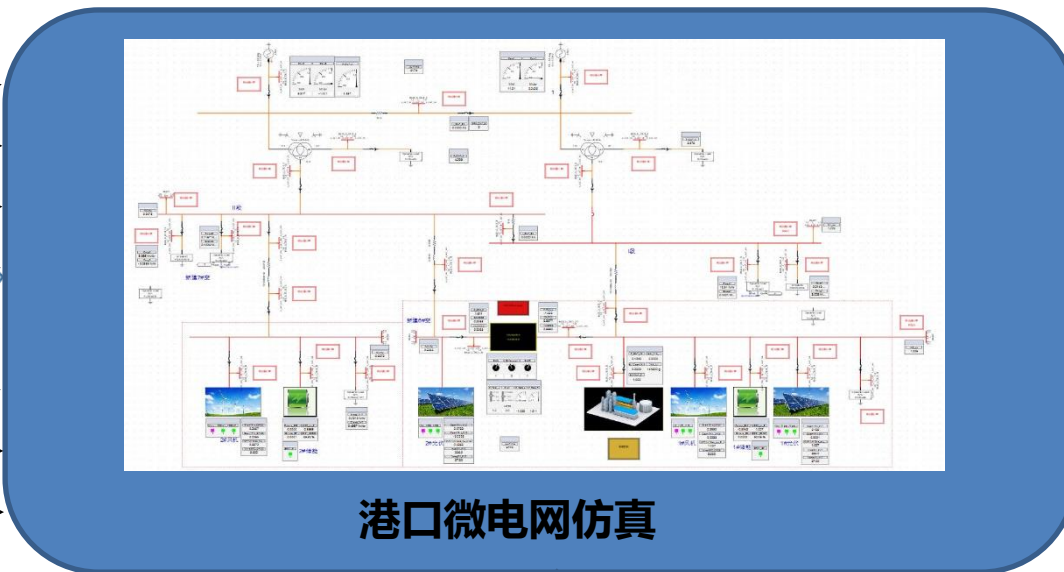
- 1** 港口微电网发展背景
- 2** 港口微电网运行控制策略
- 3** 港口微电网建模仿真
- 4** 实际工程应用情况
- 5** 建议与展望



3. 港口微电网建模仿真

建模仿真是港口微电网规划设计、优化运行的有效支撑手段。遵循“基于模型做预测（即建模仿真），基于预测做决策（即优化规划和优化运行）”的思想，建立面向港口微电网离线/在线仿真分析能力，通过在仿真平台上推演优化方案，验证优化结果，最终形成优化决策方案。

- 运行方案1
- 运行方案2
- 运行方案...
- 运行方案N
- 规划方案1
- 规划方案2
- 规划方案...
- 规划方案N

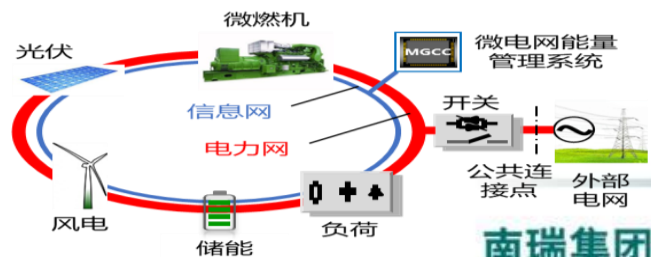


- 运行预测效果1
- 运行预测效果2 (最优)
- 运行预测效果...
- 运行预测效果N
- 规划预测效果1
- 规划预测效果2
- 规划预测效果... (最优)
- 规划预测效果N

港口微电网仿真

映射

调控

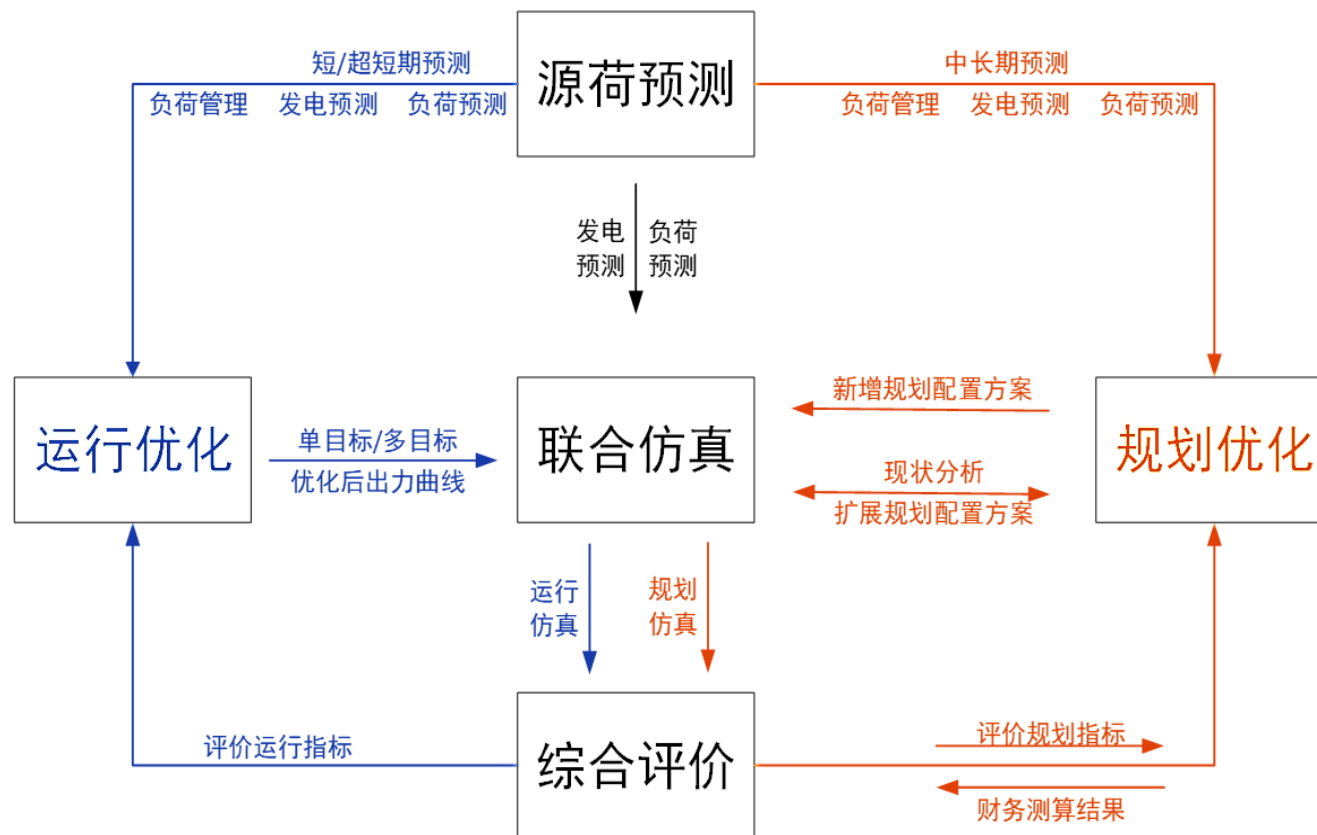


规划设计
运行调控
保护控制



3. 港口微电网建模仿真

面向港口微电网的仿真需求，搭建仿真分析与辅助决策平台（生产模拟平台），主要包括源荷预测、联合仿真、规划优化、运行优化、综合评价五大功能模块。源荷预测模块为联合仿真、规划优化、运行优化提供基础数据，联合仿真对运行优化、规划优化结果进行仿真验证，综合评价对运行仿真、规划仿真的结果进行评价，并将结果反馈回去以进行进一步调整，这样形成方案-仿真-评价-调整方案的闭环流程。





3. 港口微电网建模仿真

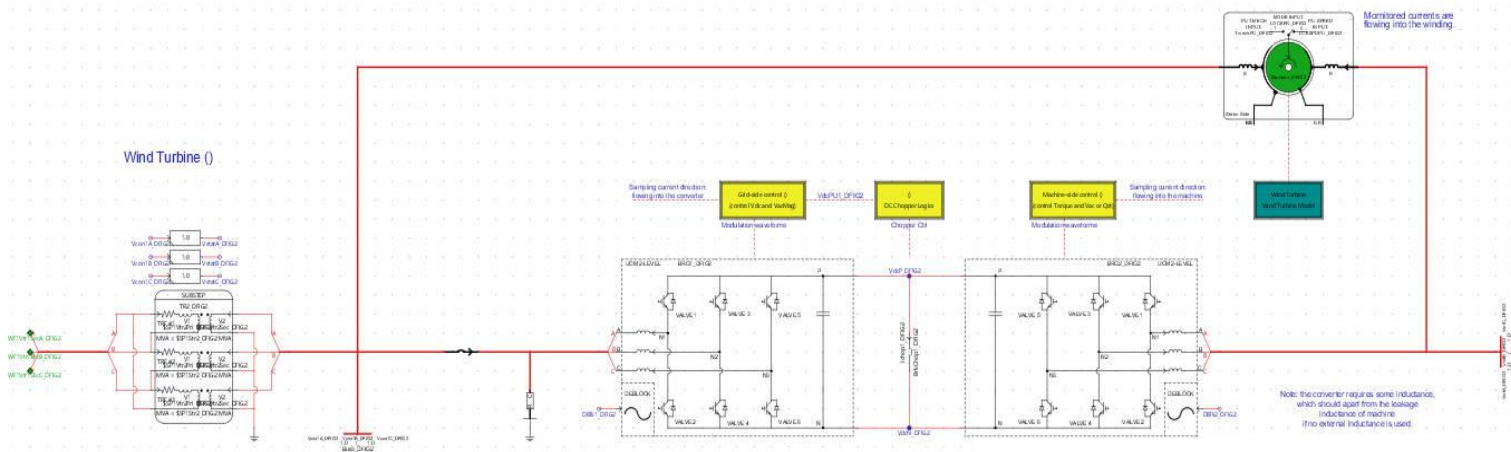
硬件在环仿真 (Hardware-in-the-Loop, HIL) 是一种用于复杂设备控制器的开发与测试技术，通过接入真实的控制器，采用或者部分采用实时仿真模型来模拟被控对象和系统运行环境，实现系统仿真。



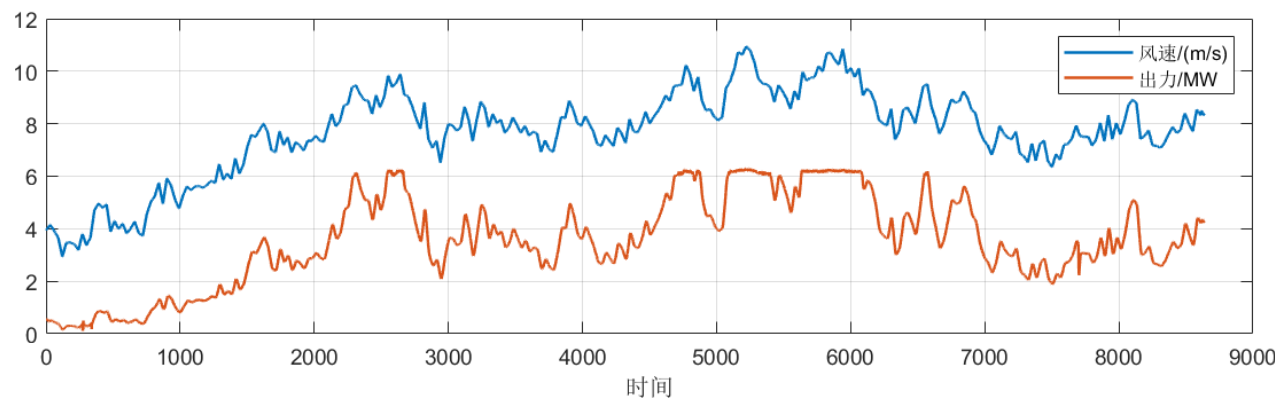
3. 港口微电网建模仿真



国家电网
STATE GRID

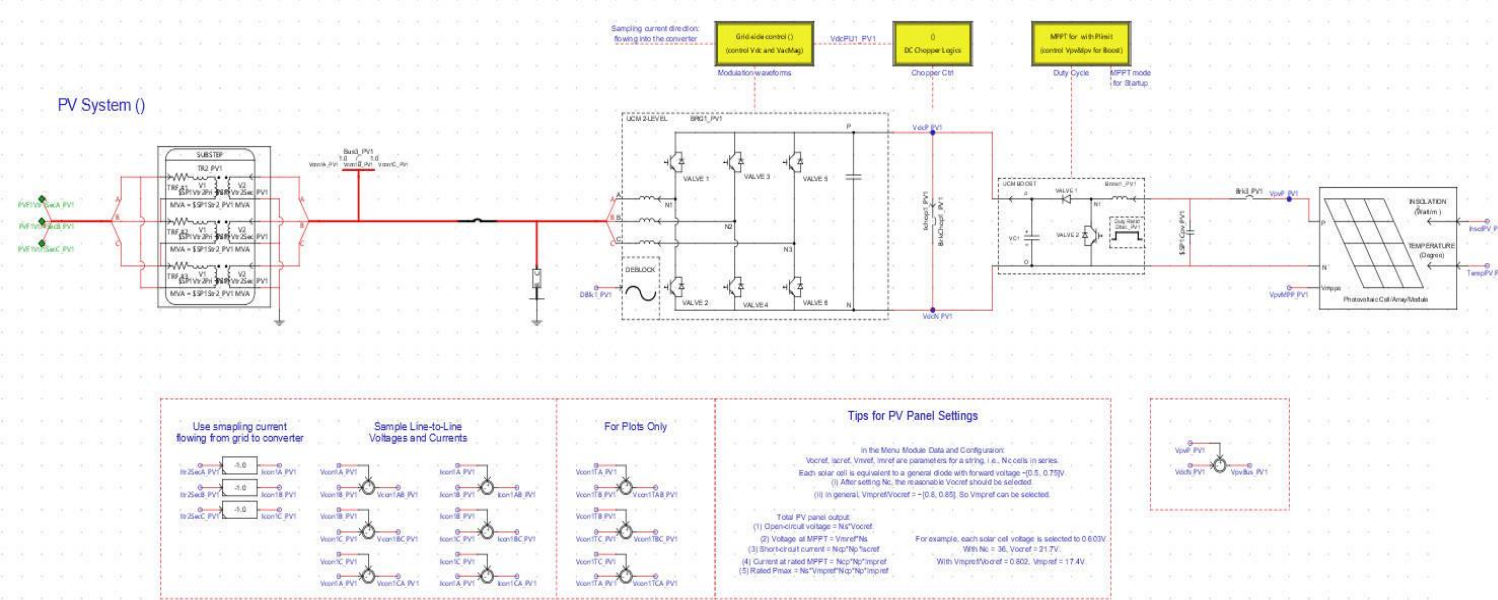


风机模型

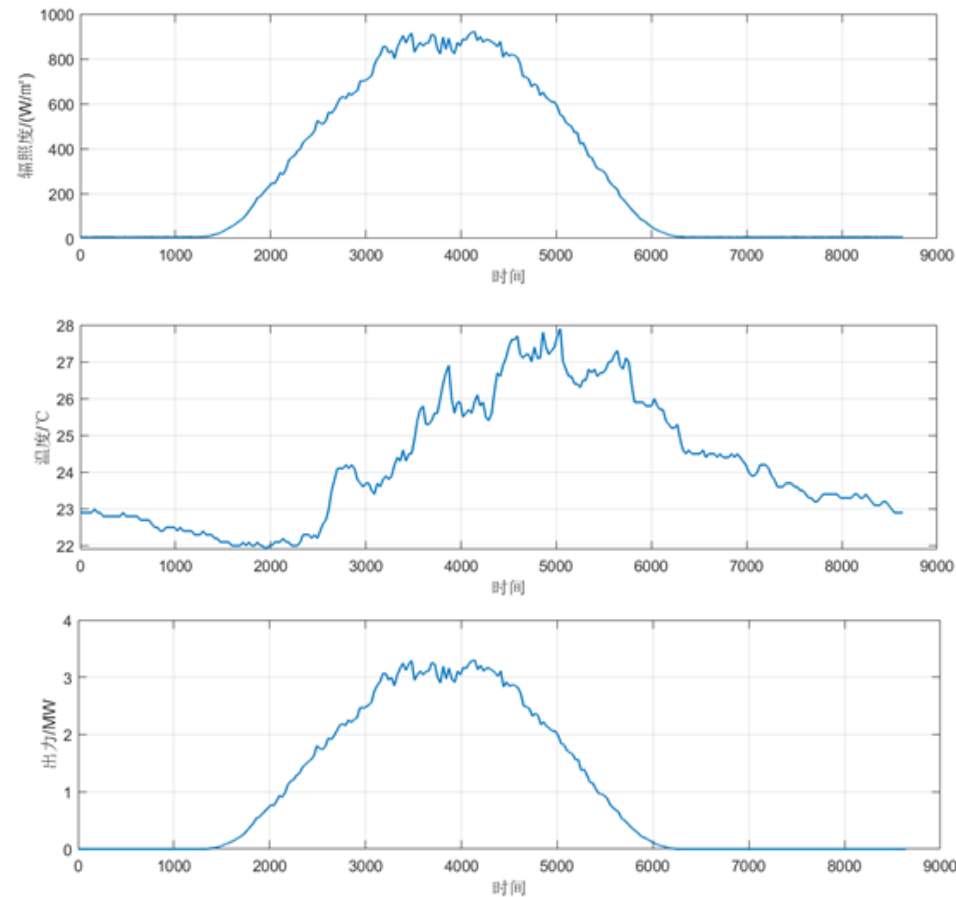


风速与风功率曲线

3. 港口微电网建模仿真

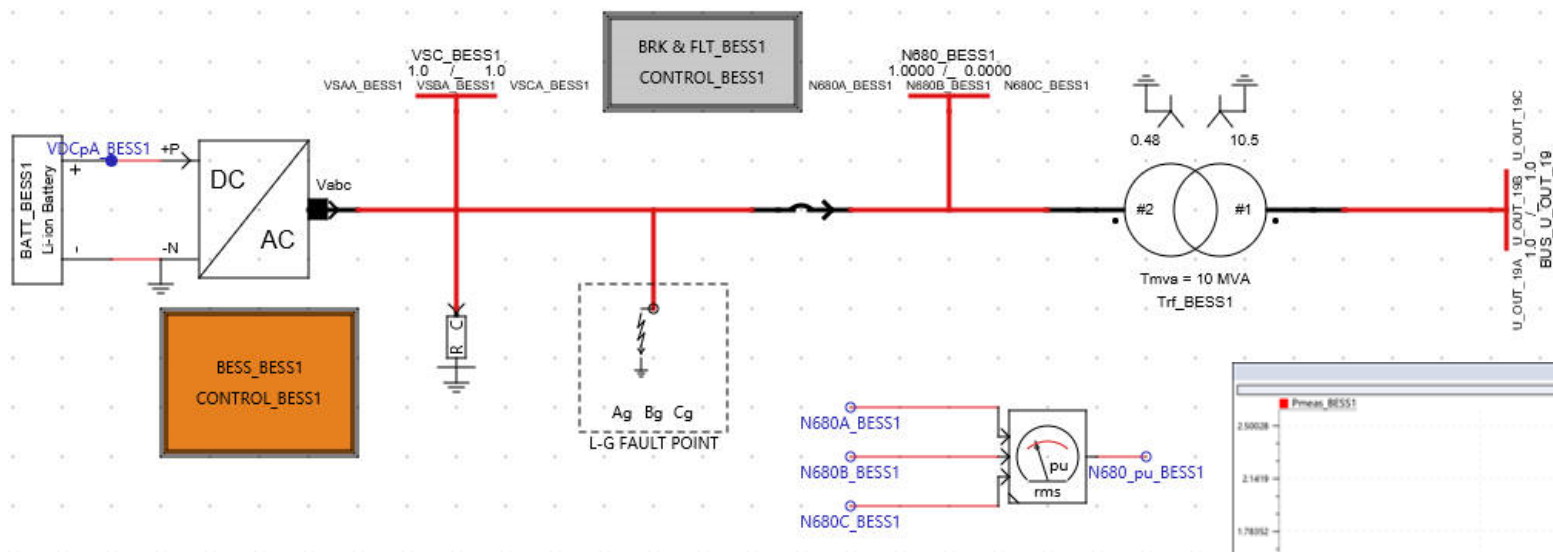


光伏模型

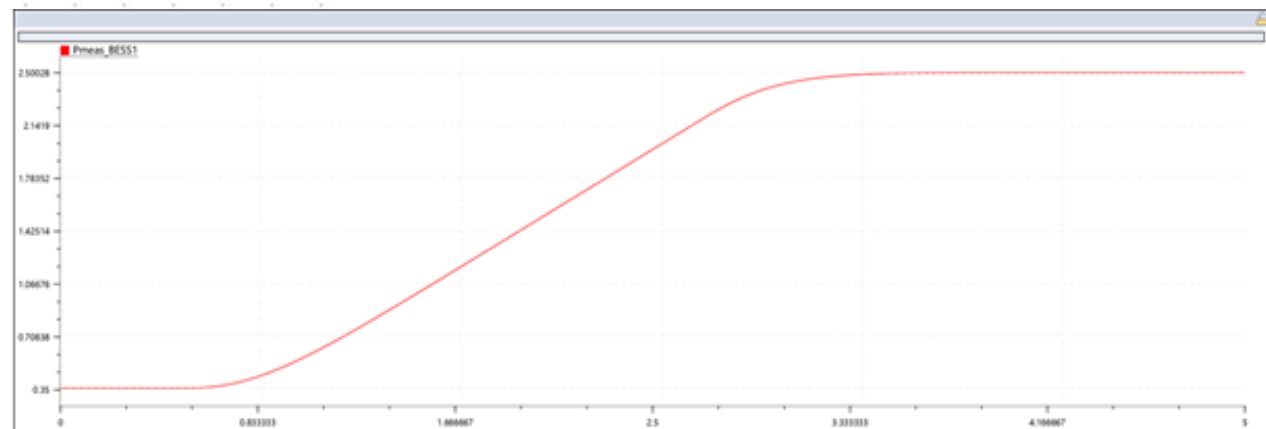


光伏辐照度-温度-功率曲线

3. 港口微电网建模仿真



储能模型

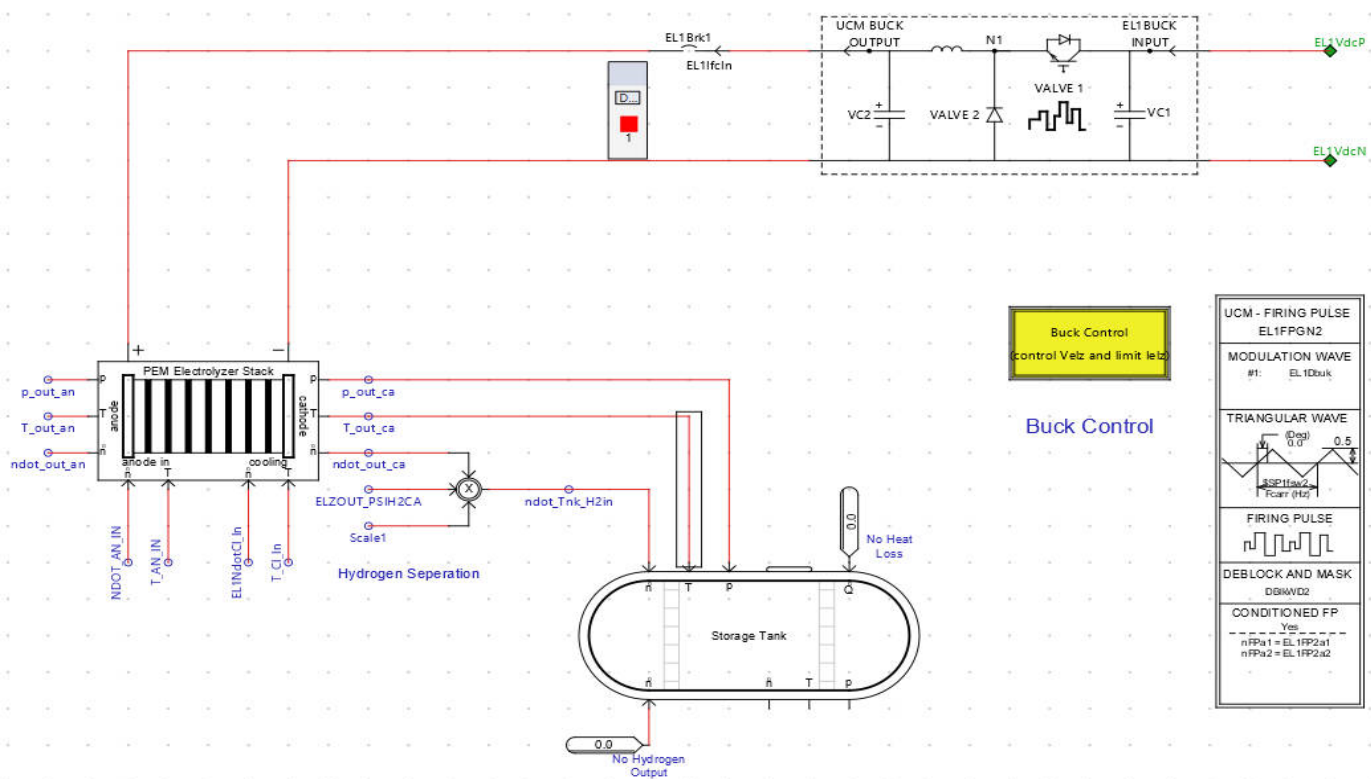


储能功率曲线

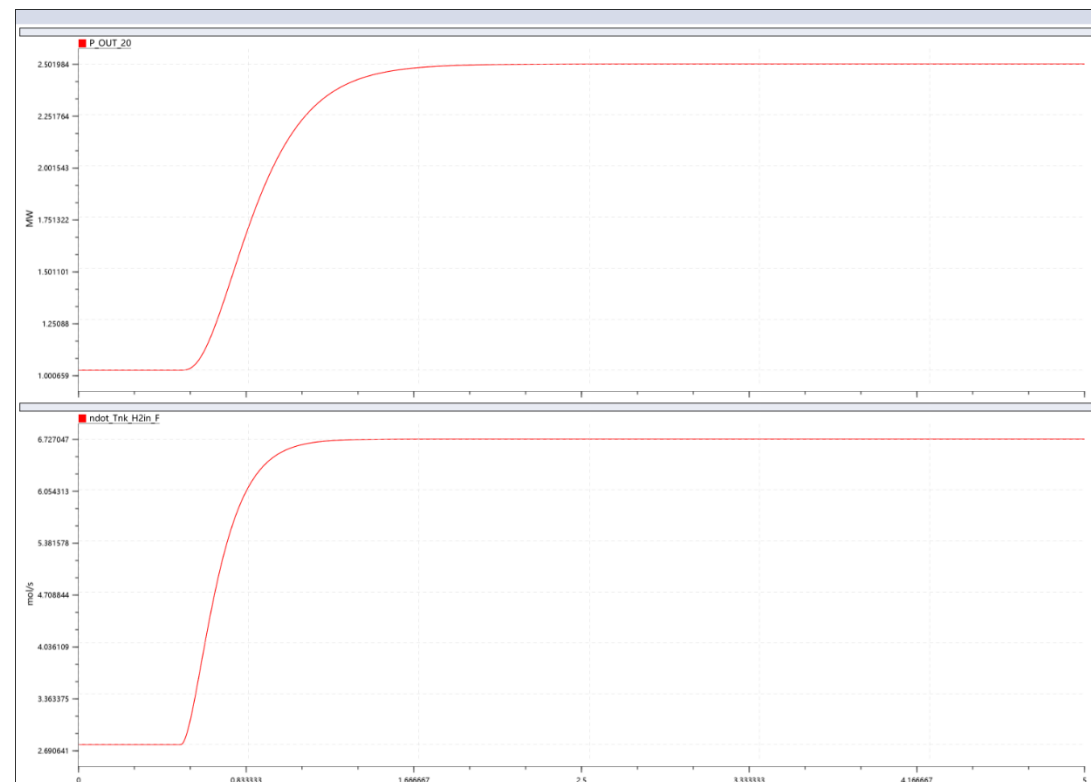
3. 港口微电网建模仿真



国家电网
STATE GRID



电制氢模型

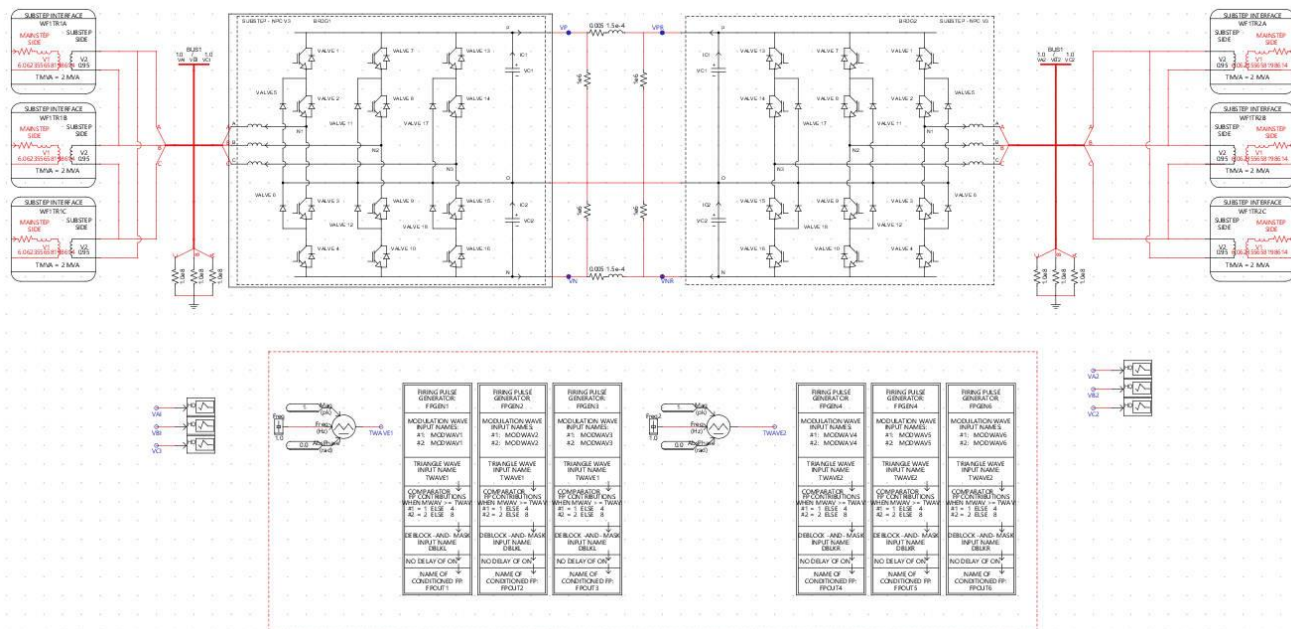


电制氢功率与制氢量曲线

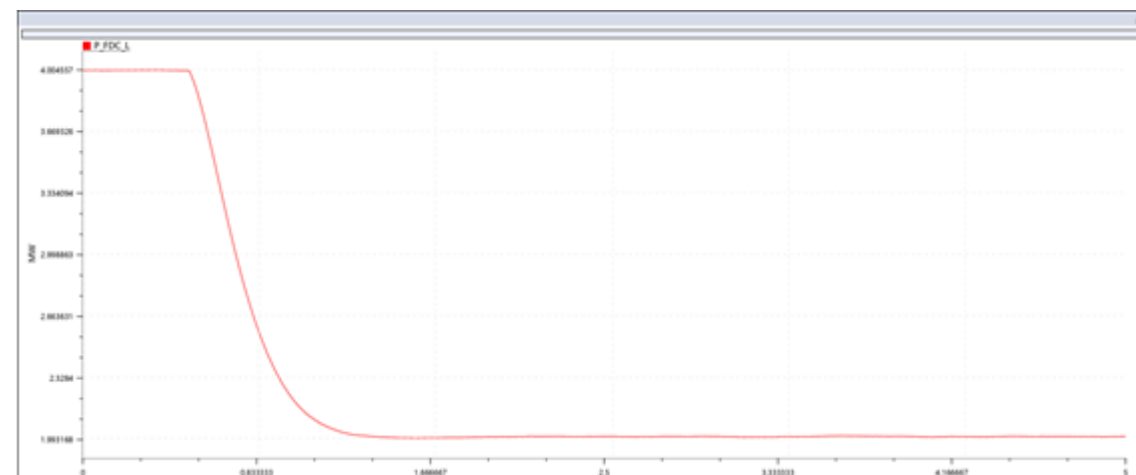
3. 港口微电网建模仿真



国家电网
STATE GRID



柔直模型



柔直传输功率曲线

- 1** 港口微电网发展背景
- 2** 港口微电网运行控制策略
- 3** 港口微电网建模仿真
- 4** 实际工程应用情况
- 5** 建议与展望



2. 港口微电网运行控制策略

□ 港区多能源融合管控系统



港口多能源管控系统示意图

为了实现港区多种能源互补利用，提升能源利用效率，需要在满足港区高比例新能源电源及各类可调设备接入、满足港区电网无人值守运行要求的条件下，设计考虑港区多能源融合的能量管理系统与管理策略，并在仿真环境中进行验证和分析，对实际港区电网进行有效的协调优化控制。



国家电网
STATE GRID

4. 实际工程应用情况

□ 能量管理策略在电力系统实时仿真系统上的验证

在RTDS系统上针对港区电网进行建模与运行状态仿真，运行数据通过IEC104规约上送至港区电网能量管理与协调控制系统，由后者生成在线优化调度策略并下发至RTDS仿真模型执行。



PEC5000-G 能量管理主站



PEC3900 协调控制器

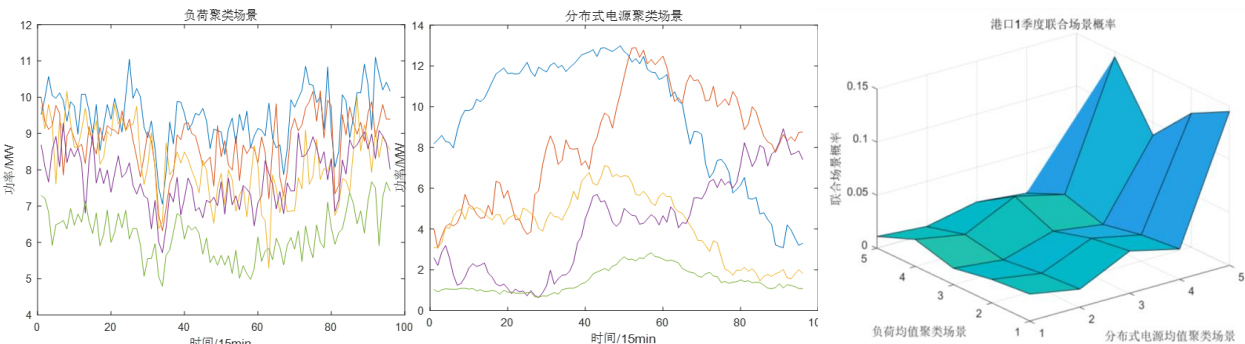


4. 实际工程应用情况

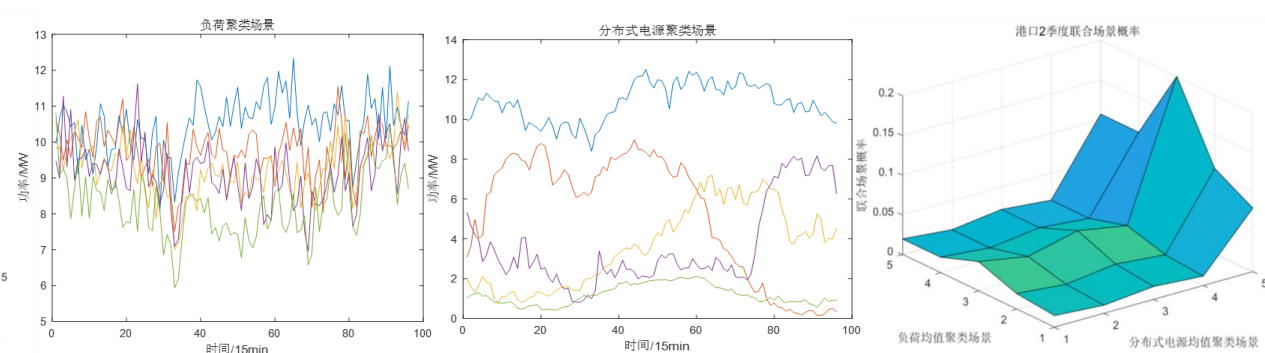
收资及数据准备工作-可能的典型运行场景

基于某港区源荷历史数据，首先利用“手肘法”确定最佳聚类数，接着利用K-means聚类算法求出港区负荷与新能源（风电+光伏）的季度典型场景。下图展示了港区各季度的源荷典型场景。

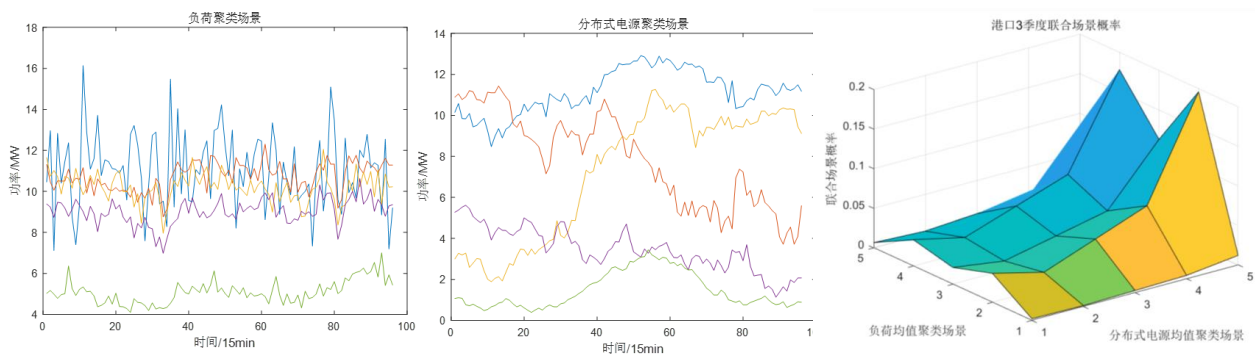
一季度聚类信息



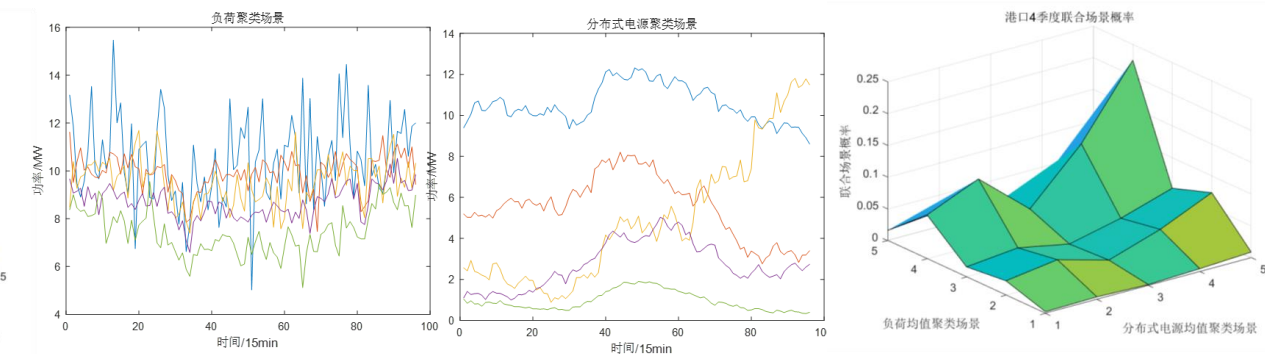
二季度聚类信息



三季度聚类信息



四季度聚类信息



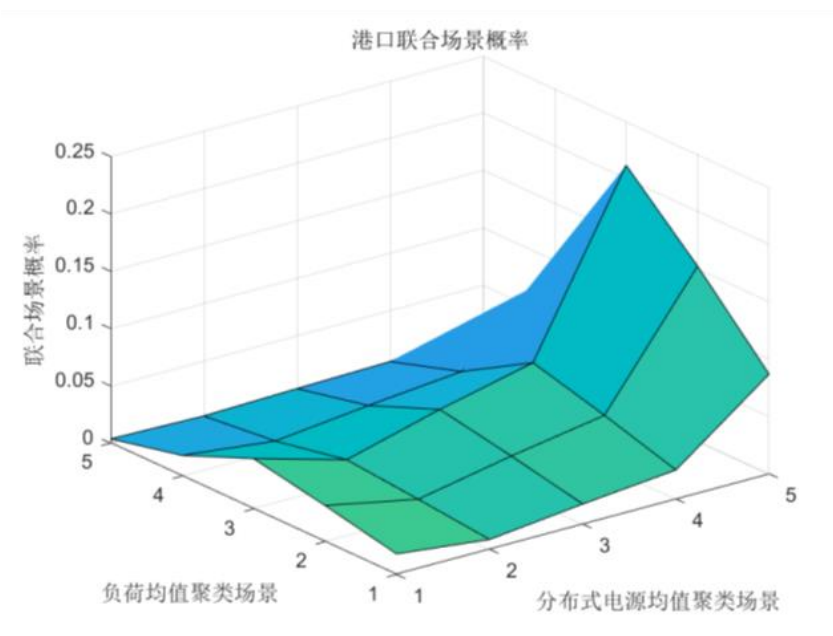
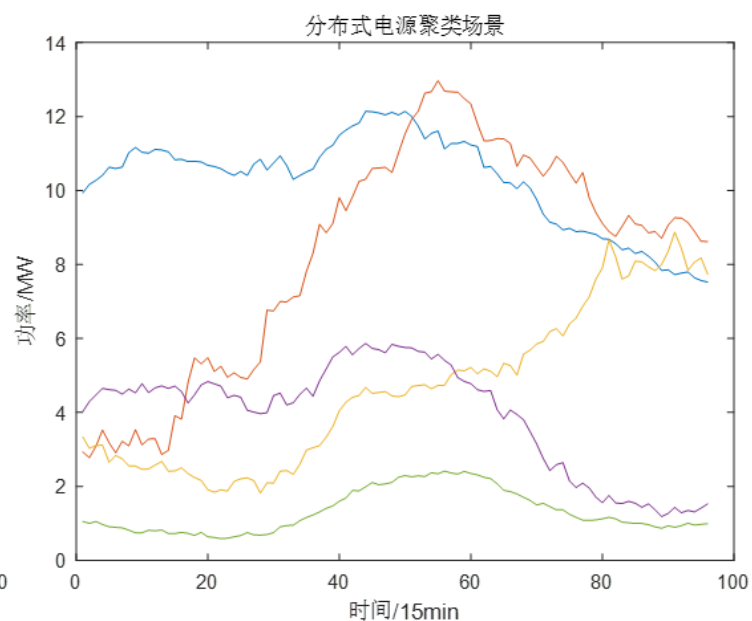
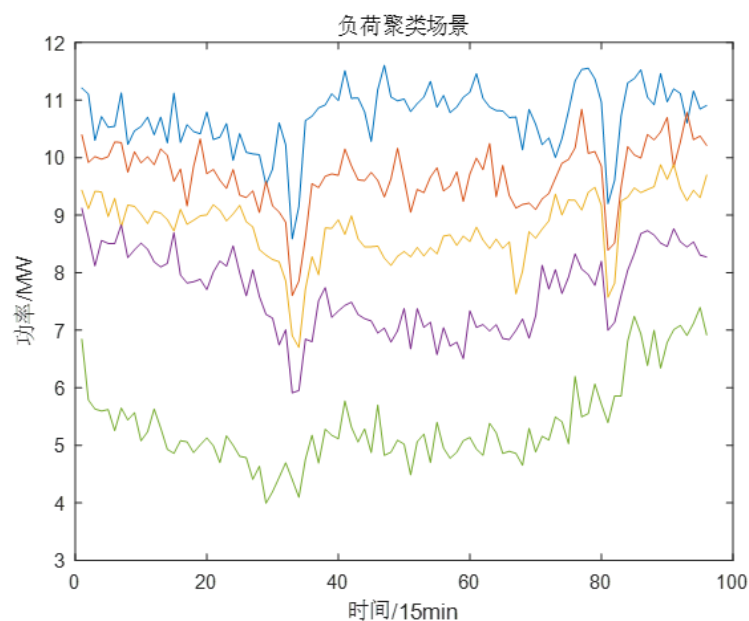


4. 实际工程应用情况

收资及数据准备工作-可能的典型运行场景

基于某港区源荷历史数据，首先利用“手肘法”确定最佳聚类数，接着利用K-means聚类算法求出港区负荷与新能源（风电+光伏）的年度典型场景。下图展示了港区全年的源荷典型场景。

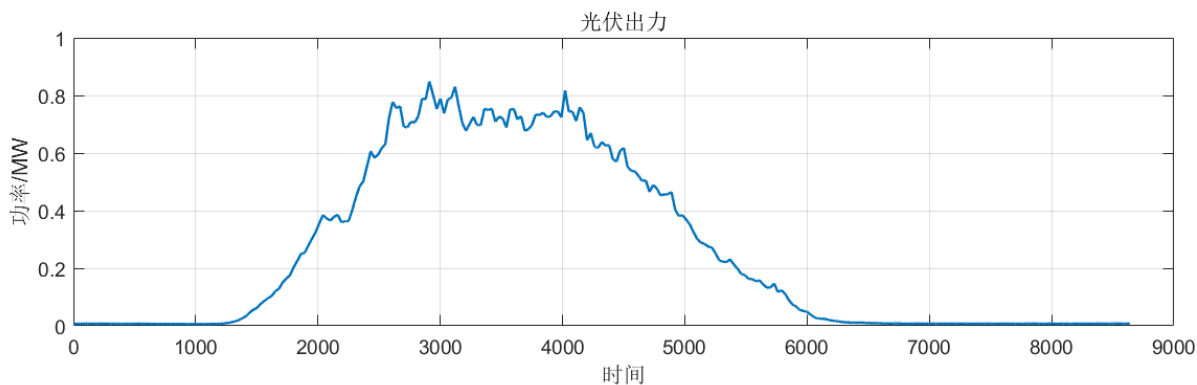
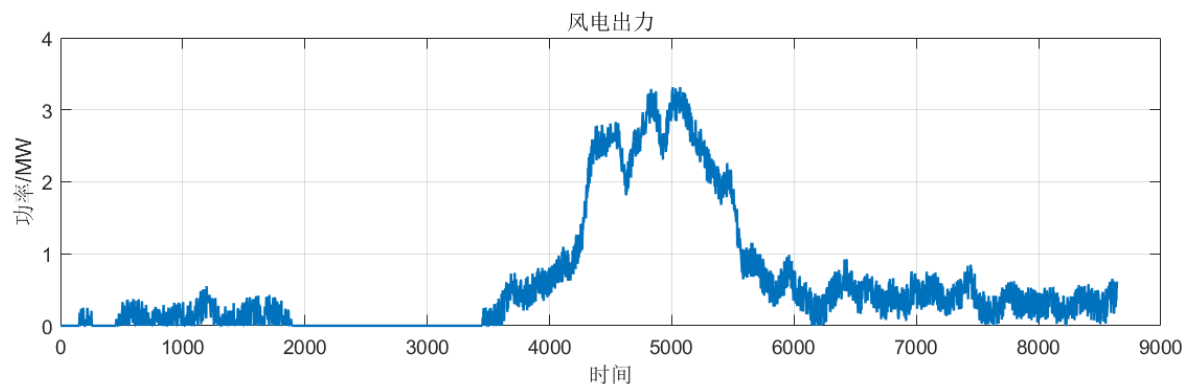
全年聚类信息



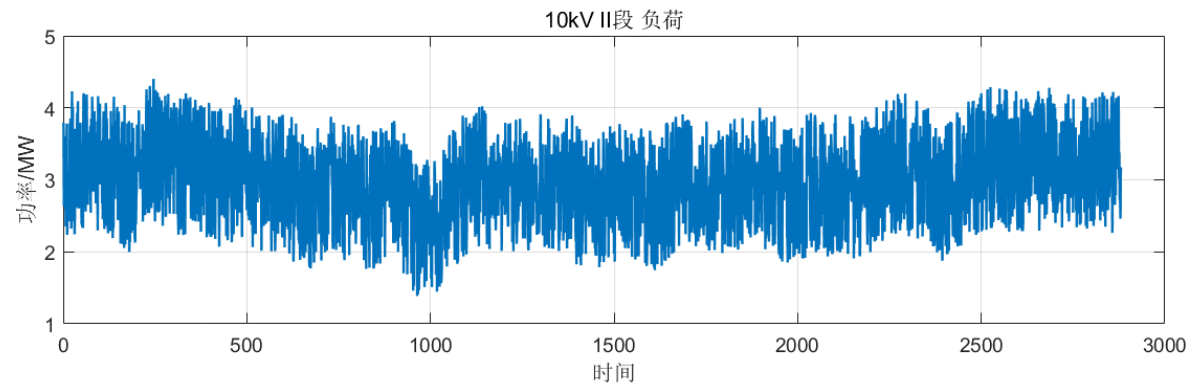
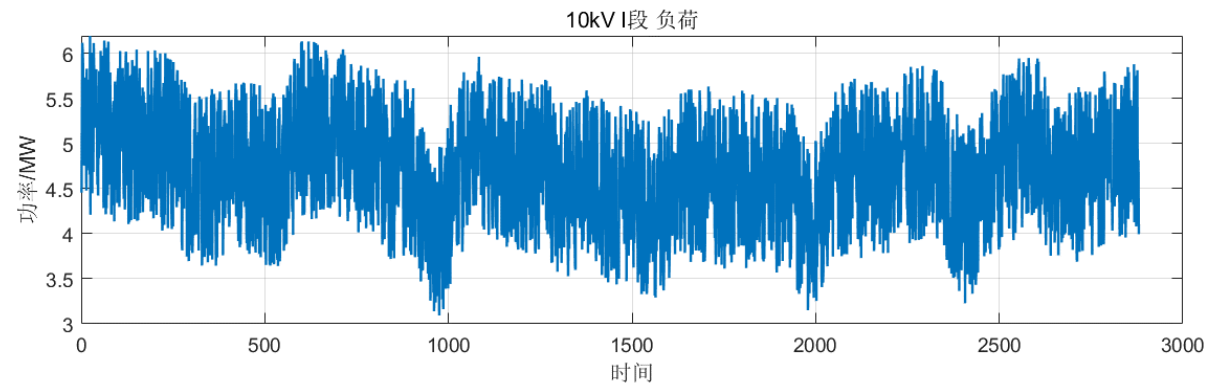


4. 实际工程应用情况

□ 港区日常运行场景仿真-概率最大场景



风机光伏出力曲线



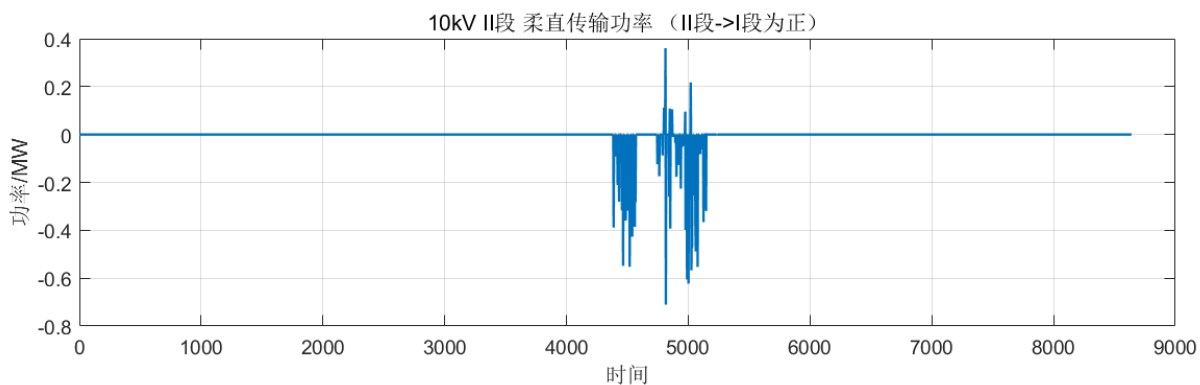
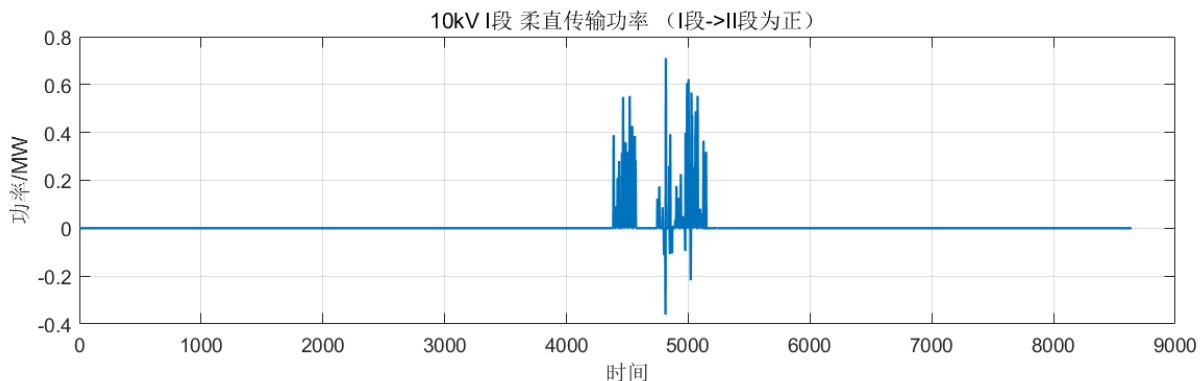
港区负荷曲线



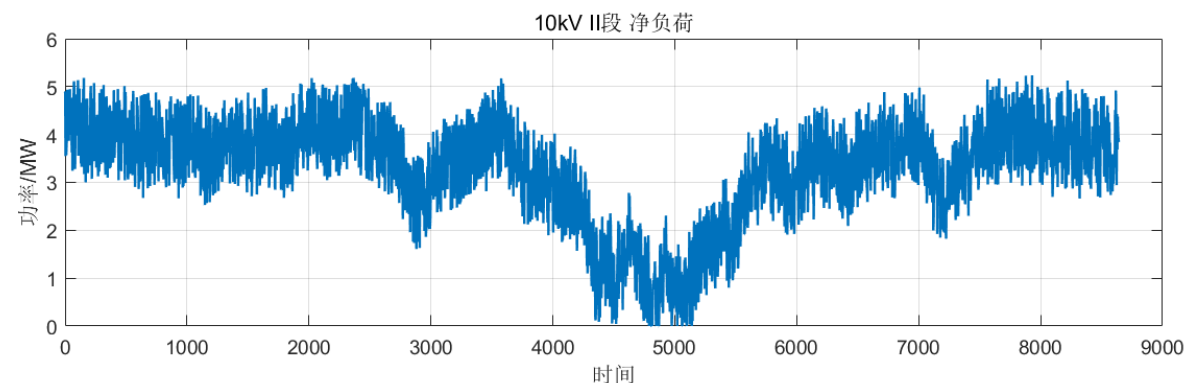
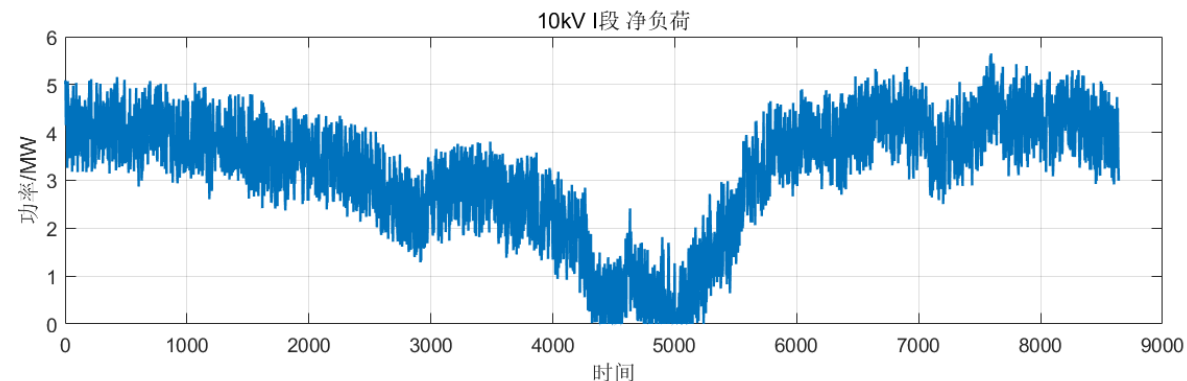
4. 实际工程应用情况

□ 港区日常运行场景仿真-概率最大场景

新能源消纳率：100% 用电自洽率：21.5%



港区10KV I、II段间柔直传输功率曲线

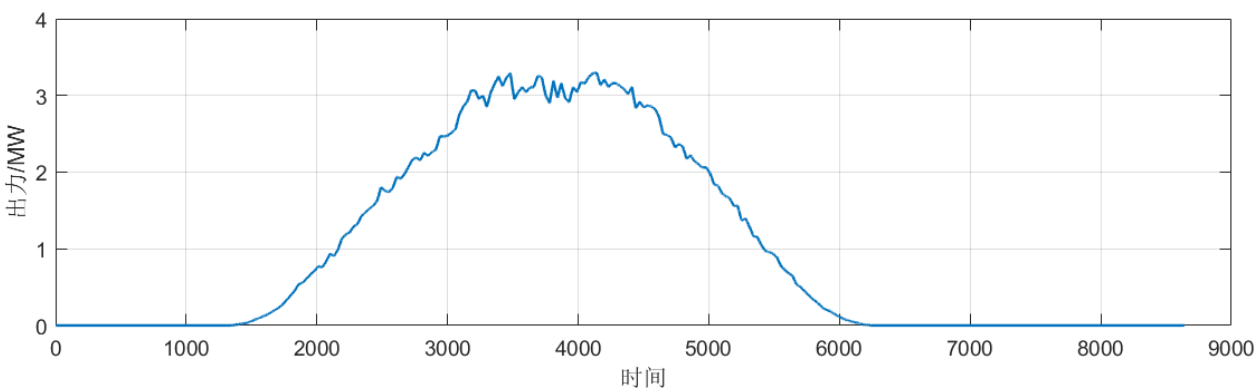
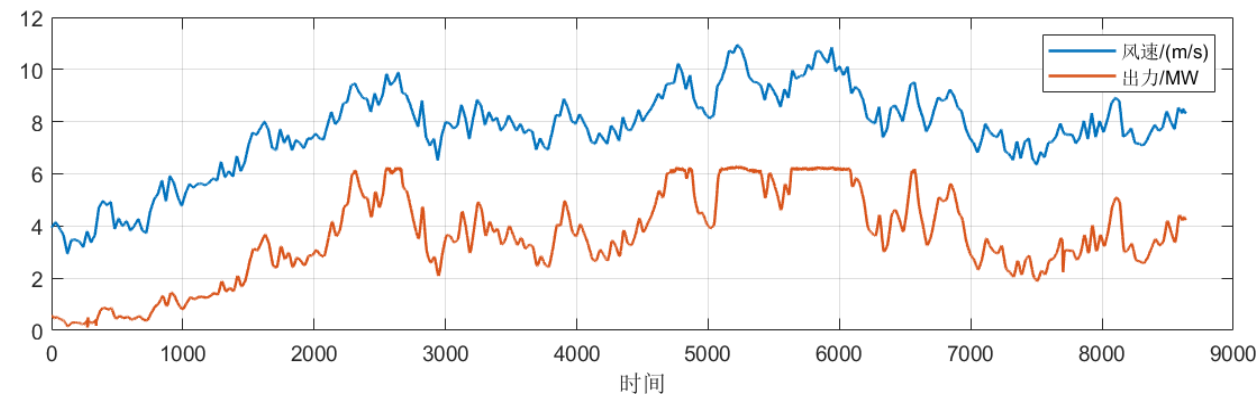


港区10kV净负荷曲线

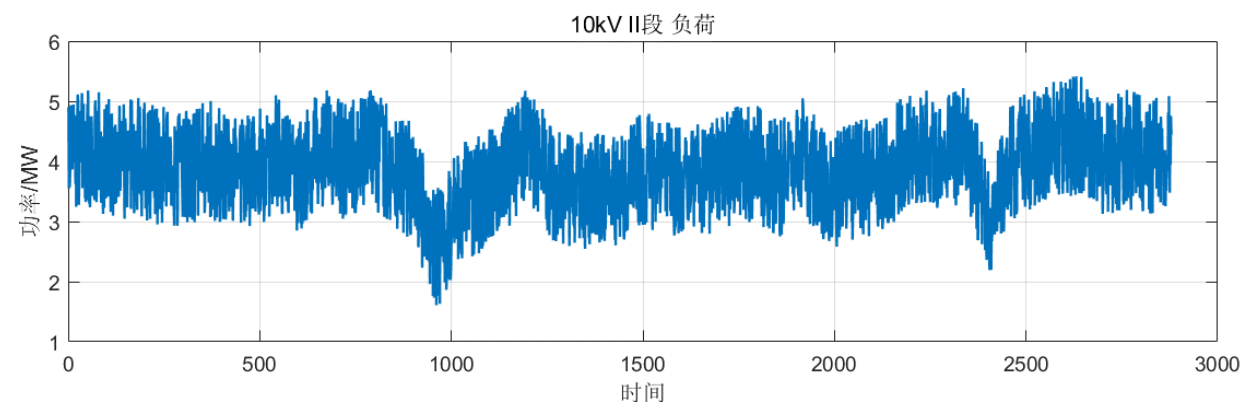
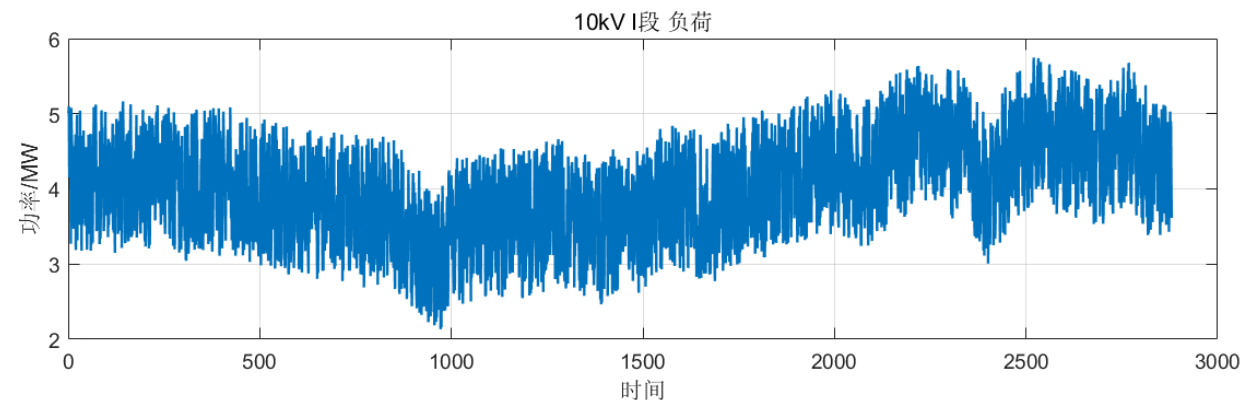


4. 实际工程应用情况

□ 港区“源大荷小”场景仿真



风机光伏出力曲线

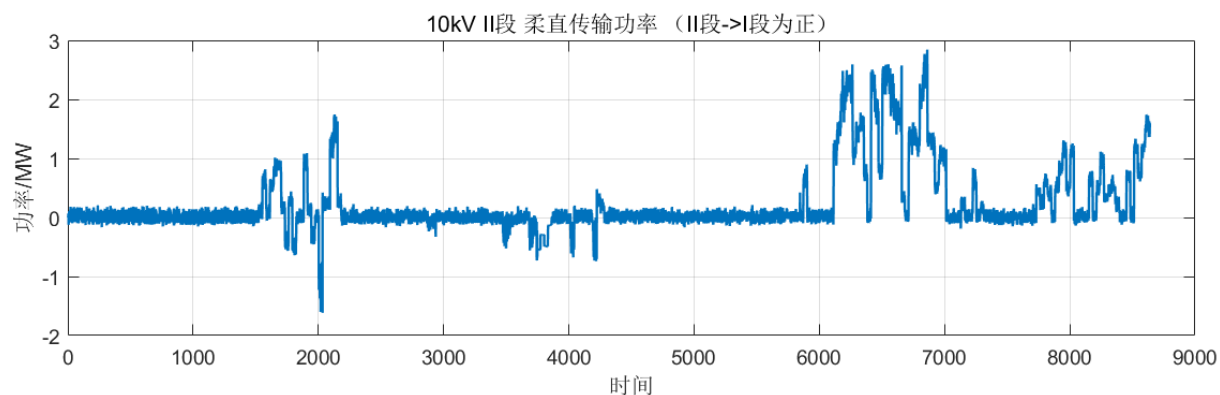
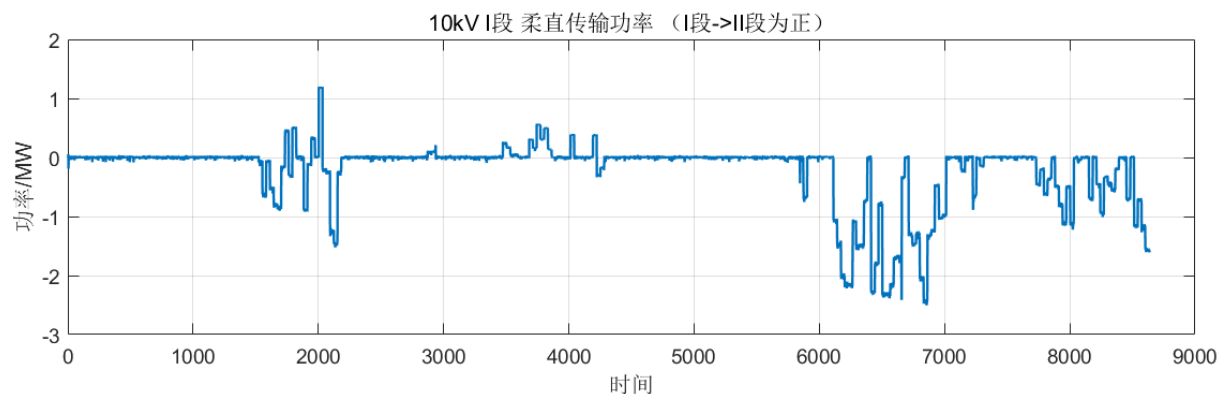


港区负荷曲线

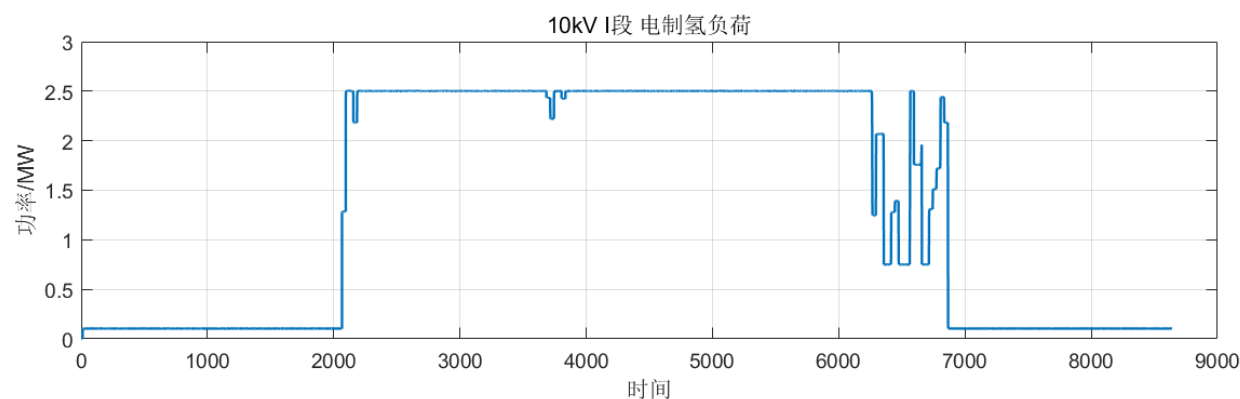
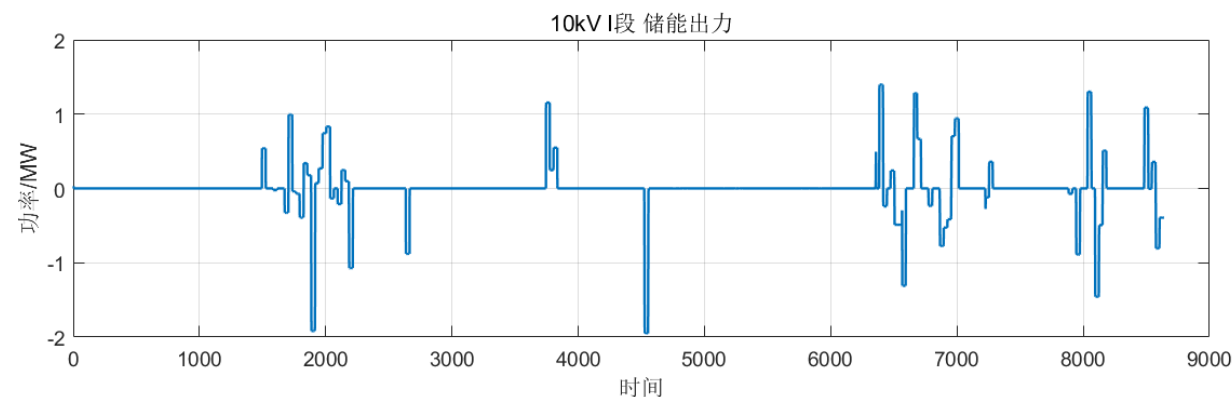


4. 实际工程应用情况

□ 港区“源大荷小”场景仿真



港区10KV I、II段间柔直传输功率曲线

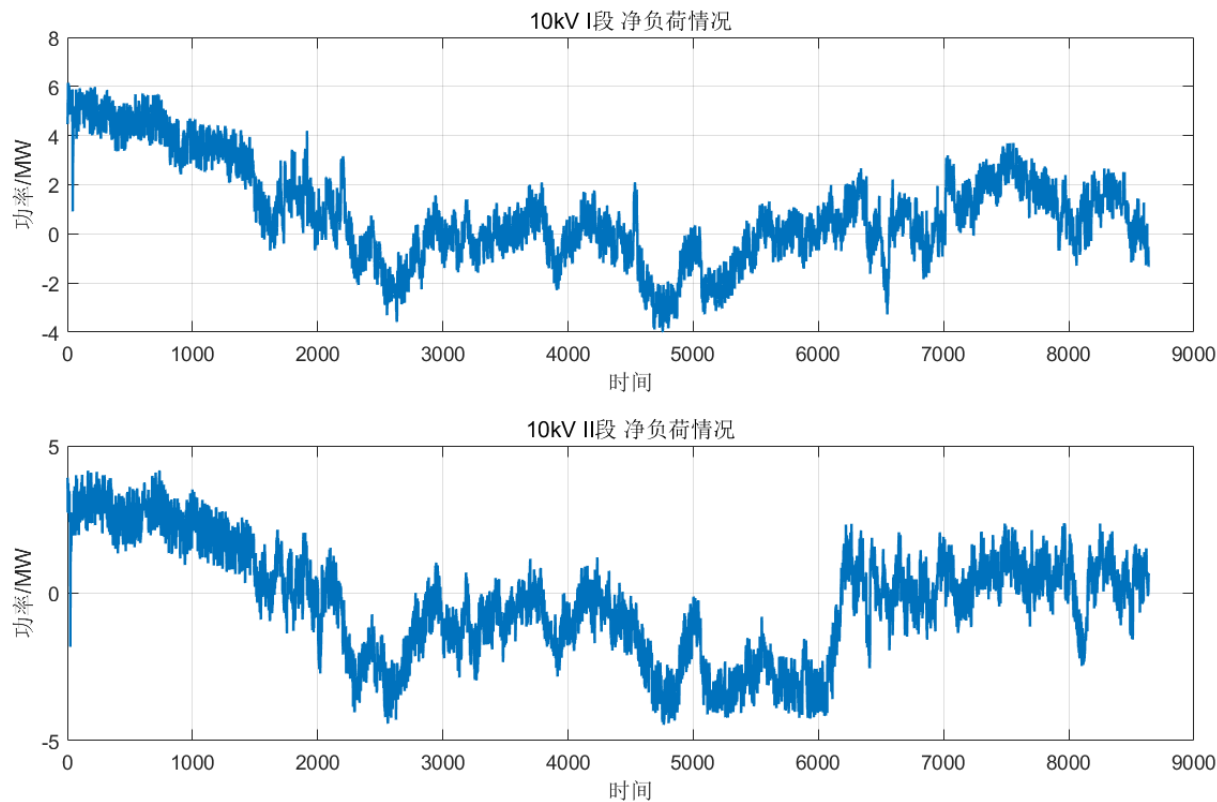


储能与电制氢功率曲线



4. 实际工程应用情况

□ 港区“源大荷小”场景仿真



净负荷曲线

新能源消纳率：84.6%

用电自洽率：81.1%



4. 实际工程应用情况

□ 小结

1. 基于港口微电网建模仿真平台，**搭建了港区电网多能源融合及能量管理系统在环仿真环境**，在具体运行场景下对运行管控策略进行了仿真；
2. 基于实际数据场景集，对**正常运行场景**（概率最大场景）、**源大荷小场景**（极端场景）进行模拟仿真，得到了新能源消纳率、本地用电自洽率等指标；
3. 在“**源大荷小**”场景下，验证了能量管理主站和协调控制器策略的有效性，新能源消纳率由 70.92% 提升至 84.6%，本地用电自洽率由 80% 提升至 81.1%。

- 1** 港口微电网发展背景
- 2** 港口微电网运行控制策略
- 3** 港口微电网建模仿真
- 4** 实际工程应用情况
- 5** 建议与展望

5. 建议与展望



国家电网
STATE GRID

1. 港口是**连接水陆交通的枢纽**，是支撑我国“一带一路”建设的**重要节点**，也是推动我国经济高质量快速发展的重要载体。要努力打造**世界一流的智慧港口、绿色港口**，提升港口航运行业能源利用效率，降低碳排放，助力“30·60”双碳目标实现；
2. 港口绿色化发展中引入光伏、风电等分布式新能源发电及氢能、热能等**多种能源形式**，微电网“双高”特征明显，源荷不确定性特点突出、各设备之间的协调运行策略难以确定，**需要结合仿真平台，指导微电网运行策略形成，支撑策略的在环验证工作**；
3. 后续需联合行业内各单位、主体进一步完善港区各类模型与仿真系统搭建，**提升适用性、易用性**，支撑更为丰富的场景仿真模拟，不断**迭代港区电网多能源融合及能量管理系统调度控制策略**，提升港区微电网短时间尺度功率平衡能力及异常运行状态下的稳定运行能力，**支撑港口能源系统绿色低碳转型**。



国家电网
STATE GRID

谢谢！

南瑞集团有限公司

2024.04.18