

五、虚拟电厂接入方案设计

本章将深入分析虚拟电厂商业模式，设计企业接入虚拟电厂的完整技术方案和商业模式，明确收益机制和实施路径。

5.1 虚拟电厂概念与商业模式分析

5.1.1 虚拟电厂基本概念

(1) 什么是虚拟电厂（VPP）

定义：虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）是一种通过先进的控制、计量、通信等技术，将分布式电源、储能系统、可控负荷、电动汽车等分散的电力资源聚合起来，作为一个特殊的电厂参与电力市场和电网运行的能源管理系统。

【虚拟电厂工作原理示意图】

虚拟电厂(VPP)工作原理示意图



图示：通过物联网技术聚合分布式资源，对外等效为一座可控电厂参与电网运行

(2) 虚拟电厂的核心特征

特征	具体内容	对企业的意义
分散聚合	将地理分散的资源聚合为整体	小型资源也能参与大市场
双向调节	既可削减负荷，也可增加负荷	多种盈利模式
智能响应	自动/半自动响应电网信号	降低人工成本
市场化交易	参与电力市场获取收益	新增收益来源
零成本参与	运营商投资平台，企业零成本接入	降低参与门槛

(3) 虚拟电厂的三种类型

类型	主要资源构成	调节方向	典型应用
负荷型 VPP	可控负荷为主	向下调节（削减）	需求响应、削峰
电源型 VPP	分布式电源+储能	向上调节（发电）	填谷、调频
混合型 VPP	负荷+电源+储能	双向调节	全方位服务（最优）

钢帘线企业定位：

- 当前：负荷型 VPP（10,500~15,000kW 可调节负荷）
- 未来：可配置储能升级为混合型 VPP

5.1.2 虚拟电厂商业模式全景分析

（1）虚拟电厂价值链分析

【虚拟电厂价值链】



（2）虚拟电厂盈利模式

模式 A：需求响应补贴模式

要素	内容
----	----

收益来源	电网/政府支付的需求响应补贴
触发条件	电网负荷紧张时发出削峰指令
响应要求	按指令削减负荷，持续一定时间
补偿标准	200~800 元/MW·次（山东）
结算方式	按实际响应效果结算
收益特点	确定性强，但频次有限（50~150 次/年）

企业潜在收益：

- 响应能力：2,000kW = 2MW
- 补偿标准：400 元/MW·次（中位值）
- 年响应次数：100 次
- **年收益：2MW × 400 元 × 100 次 = 8 万元**

模式 B：辅助服务市场模式

要素	内容
收益来源	电力辅助服务市场
服务类型	调频、备用、调峰
响应要求	快速响应（≤5~15 分钟），持续时间不定
补偿标准	调频：800~1,500 元/MW·次 备用：300~600 元/MW·次
结算方式	按调用次数和容量结算
收益特点	收益较高，但对响应速度要求高

企业潜在收益：

- 快速响应能力：800~1,200kW
- 补偿标准：600 元/MW·次（备用）
- 年调用次数：50 次
- **年收益：1MW × 600 元 × 50 次 = 3 万元**

模式 C：电力现货市场套利模式

要素	内容
收益来源	电力现货市场价格波动
套利逻辑	低价时段增加用电（或充电），高价时段减少用电（或放电）
价格特征	日内价格波动 0.2~1.0 元/kWh
操作方式	根据价格预测动态调整负荷
收益特点	理论收益高，但价格波动性大，需精准预测

企业潜在收益（需配储能）：

- 储能容量: 2MW/4MWh
- 日均套利: $4\text{MWh} \times 0.3 \text{ 元}/\text{kWh} = 1,200 \text{ 元}$
- 年收益: $1,200 \times 300 \text{ 天} = 36 \text{ 万元}$

模式 D: 容量市场模式

要素	内容
收益来源	容量市场（部分地区试点）
交易标的	可调节容量 (kW)
补偿方式	按容量支付固定费用（无论是否调用）
补偿标准	50~150 元/kW·年
收益特点	收益稳定，类似“保险费”

企业潜在收益（若有容量市场）：

- 可调节容量: 3,000kW
- 补偿标准: 100 元/kW·年
- 年收益: $3,000 \times 100 = 30 \text{ 万元}$

模式 E: 节能服务模式

要素	内容
收益来源	企业自身电费节省
服务内容	VPP 运营商提供用能优化服务
收益机制	峰谷套利、需量优化、负荷管理
收益分成	节省电费的 20%~40% 给运营商
收益特点	持续稳定，是 VPP 最基础的价值

企业潜在收益：

- 通过 VPP 优化年节省电费: 600~1,000 万元
- 企业保留 60%~80%: **360~800 万元**
- 运营商获得 20%~40%: 240~200 万元（运营商收益）

(3) 虚拟电厂收益综合测算

综合收益矩阵（钢帘线企业）：

收益来源	年收益 (万元)	收益确定性	实现条件	备注
需求响应补贴	50~150 ★★★★		接入 VPP 平台	主要收益来源
辅助服务市场	30~100 ★★★		快速响应能力	需技术改造
现货市场套利	100~200 ★★		配置储能	需投资储能
容量市场	30~50 ★★★★		试点地区	政策依赖

收益来源	年收益（万元）	收益确定性	实现条件	备注
节能服务	360~800	★★★★★	VPP 优化服务	最稳定收益
合计	570~1,300-	-	-	-

收益结构分析：

- 节能服务占比：63%~62%（基础收益）
- 市场化收益占比：37%~38%（增值收益）

5.1.3 山东省虚拟电厂政策与市场环境

（1）山东省虚拟电厂政策梳理

A. 政策文件汇总

时间	文件名称	核心内容
2021 年	《山东省能源发展“十四五”规划》	提出建设虚拟电厂，提升需求侧响应能力
2022 年	《山东省电力需求响应实施细则》	明确需求响应补偿标准和实施流程
2023 年	《山东省虚拟电厂建设试点方案》	启动虚拟电厂试点，明确建设目标
2024 年	《山东省虚拟电厂管理办法（试行）》	规范 VPP 运营、明确准入标准和补贴机制

B. 关键政策要点

政策维度	具体内容
建设目标	<ul style="list-style-type: none"> • 2025 年建成虚拟电厂调节能力 300 万 kW • 培育 5~10 家 VPP 运营商 • 接入资源 1,000 家以上 • 单体资源 $\geq 500\text{ kW}$ 或聚合资源 $\geq 2\text{ MW}$
准入条件	<ul style="list-style-type: none"> • 响应时间 ≤ 15 分钟 • 响应准确率 $\geq 90\%$
补偿标准	<ul style="list-style-type: none"> • 日前响应：200~400 元/MW · 次 • 实时响应：400~800 元/MW · 次 • 年度容量补偿：50~100 元/kW（试点） <ul style="list-style-type: none"> • 响应成功率 $\geq 95\%$
考核要求	<ul style="list-style-type: none"> • 数据上传及时率 $\geq 98\%$ • 违约处罚机制

C. 企业适配性分析

要求项	政策要求	企业现状	符合情况
-----	------	------	------

要求项	政策要求	企业现状	符合情况
资源容量	$\geq 500\text{kW}$	10,500~15,000kW	✓ 远超要求
响应时间	$\leq 15\text{分钟}$	快速响应 800~1,200kW	✓ 符合
响应准确率	$\geq 90\%$	通过技术改造可实现	✓ 可达到
监测能力	实时监测上传	需建设监测系统	△ 需投资
通信能力	与 VPP 平台通信	需建设通信接口	△ 需投资

结论：企业基本符合接入条件，需完善监测和通信系统。

(2) 典型案例参考

案例 A：某钢铁企业接入某 VPP 平台

项目要素	内容
企业规模	年用电量 2.5 亿 kWh, 最大需量 22,000kW
接入容量	可调节负荷 5,000kW
投资情况	监测系统 200 万（国网补贴 50%），通信系统 50 万 • 需求响应补贴：80~120 万
年收益	• 电费优化：400~600 万 • 合计：480~720 万
投资回收期	约 4~6 个月
实施效果	运行 1 年，累计响应 132 次，成功率 98.5%

案例 B：某化工园区虚拟电厂项目

项目要素	内容
聚合对象	园区内 8 家企业
聚合容量	合计 12,000kW
运营模式	第三方 VPP 运营商统一运营
收益分配	运营商 30%，企业 70%
年收益	园区总收益 800~1,200 万，单企业平均 100~150 万
特色	园区统一谈判，议价能力强

5.2 企业参与虚拟电厂的价值分析

5.2.1 直接经济价值

(1) 需求响应补贴收益

基于第 3.3 节可调节资源盘点：

响应级别	响应容量	补偿标准	年响应次数	年收益(万元)
I 级(快速)	800~1,200kW	600 元/MW·次	50 次	24~36
II 级(常规)	1,500~2,500kW	300 元/MW·次	80 次	36~60
III 级(计划)	3,000~5,000kW	200 元/MW·次	100 次	60~100
IV 级(填谷)	2,000~3,000kW	100 元/MW·次	120 次	24~36
合计	-	-	-	144~232

说明:

- 不同级别响应可同时参与
- 年响应次数基于山东市场经验估算
- 实际收益取决于市场需求和企业响应意愿

(2) 电费优化增值收益

虚拟电厂平台提供的智能优化服务可额外提升节电效果:

优化内容	无 VPP 情况	接入 VPP 后	增量收益(万元/年)
峰谷优化	人工调度	AI 智能调度	+100~150
需量控制	人工预警	自动控制	+50~80
负荷预测	经验判断	大数据预测	+30~50
市场套利	无法参与	自动参与	+80~120
合计增量	-	-	260~400

(3) 辅助服务市场收益

服务类型	参与容量	年调用次数	单次补偿	年收益(万元)
备用服务	1,000kW	50 次	500 元/MW	2.5
调峰服务	2,000kW	80 次	300 元/MW	4.8
紧急响应	500kW	20 次	1,000 元/MW	1.0
小计	-	-	-	8.3

(4) 容量市场收益(未来)

若山东开放容量市场:

容量类型	认证容量	补偿标准	年收益(万元)
快速响应容量	1,000kW	150 元/kW·年	15
常规响应容量	3,000kW	80 元/kW·年	24
合计	4,000kW	-	39

(5) 直接经济价值汇总

收益类别	年收益(万元)	确定性	实现时间
需求响应补贴	144~232	高	接入后立即
电费优化增值	260~400	高	3~6 个月

收益类别	年收益（万元）	确定性	实现时间
辅助服务市场	8~15	中	6~12 个月
容量市场（未来）	0~39	低	政策出台后
合计	412~686	-	-

5.2.2 间接价值与战略价值

(1) 管理能力提升价值

价值维度	具体体现	量化价值
能源管理数字化	<ul style="list-style-type: none"> 建立实时监测系统 数据驱动决策 精细化管理 快速响应机制 	管理效率提升 30%
响应能力建设	<ul style="list-style-type: none"> 自动化控制能力 应急处置能力 	降低人工成本 20~30 万/年
决策科学化	<ul style="list-style-type: none"> 负荷预测 成本分析 优化建议 	避免决策失误损失 50~100 万/年

(2) 市场竞争力提升

价值维度	具体体现	战略意义
成本领先优势	电费成本降低 10%~15%	产品价格竞争力提升
绿色形象	参与需求响应，支持电网稳定	提升品牌形象
技术先进性	行业内率先接入 VPP	树立标杆地位

(3) 政策合规与风险对冲

价值维度	具体体现	风险对冲价值
能耗双控应对	通过需求响应，灵活调整用能	降低限电风险
碳达峰碳中和	优化用能结构，降低碳排放	满足未来碳考核
电价上涨对冲	通过市场化手段锁定电价	对冲电价上涨风险

5.2.3 成本与风险分析

(1) 接入成本分析

A. 一次性投资成本

成本项	金额（万元）	备注
监测系统完善	100~150	若已建设可减免
通信系统建设	30~50	VPP 平台对接
控制系统升级	50~80	自动响应功能
数据接口开发	20~30	API 接口对接

成本项	金额（万元）	备注
安全防护系统	15~25	网络安全
合计	215~335	部分可获运营商补贴

B. 持续运营成本

成本项	年度成本（万元）	备注
平台服务费	10~20	部分运营商收取
系统运维费	15~25	软硬件维护
通信费用	2~5	专线+流量
人员培训	5~10	年度培训
考核风险准备金	10~20	响应失败罚款风险
合计	42~80-	

C. 成本收益比

项目	金额（万元）
一次性投资	215~335
年运营成本	42~80
年收益	412~686
年净收益	332~606
投资回收期	约 6~12 个月
投资收益率 (ROI)	98%~180%

(2) 风险识别与评估

风险类型	风险描述	发生概率	影响程度	应对措施
政策变化风险	补贴政策取消或降低	中	高	多元化收益结构, 不依赖单一政策
技术故障风险	系统故障导致响应失败	低	中	备用系统, 冗余设计
生产冲突风险	响应影响生产计划	中	高	设定响应边界, 优先保障生产
履约考核风险	响应不达标被处罚	低	中	保守申报容量, 留有余量
数据安全风险	数据泄露或被攻击	低	高	网络安全防护, 数据加密
运营商风险	运营商经营不善或跑路	低	高	选择国资背景运营商

(3) 风险应对策略

A. 风险分散策略

【风险分散策略】

收益来源分散:

|— 60%: 内部电费优化 (不依赖外部)

└─ 25%: 需求响应补贴（政策支持）

└─ 15%: 市场化交易（市场机会）

运营商选择分散：

└─ 主合作方：国网综合能源（70%容量）

└─ 备选合作方：民营运营商（30%容量）

资源配置分散：

└─ 80%: 可逆转资源（随时退出）

└─ 20%: 专用投资（深度绑定）

B. 退出机制设计

情况	退出方式	成本
正常退出	合同到期不续签	无成本
快速退出	提前 3 个月通知	可能需支付少量违约金
紧急退出	生产需要，立即退出	已建系统可继续用于内部管理

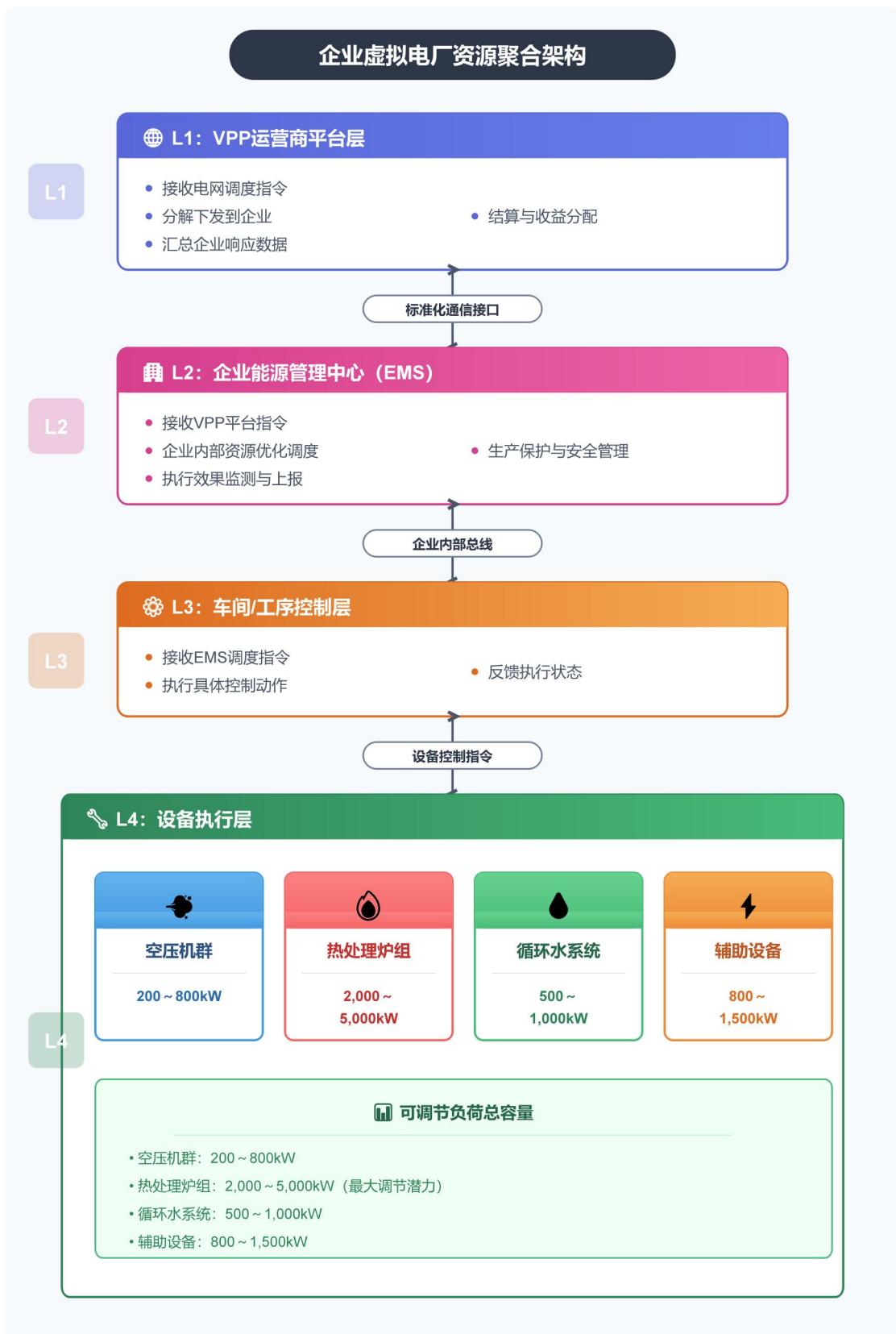
5.3 可调节负荷资源聚合与调度方案

5.3.1 资源聚合架构设计

（1）分层聚合架构

【企业虚拟电厂资源聚合架构】

企业虚拟电厂资源聚合架构



(2) 资源聚合清单

基于第 3.3 节盘点结果，形成标准化资源清单：

A. 快速响应资源池（I 级）

资源编号	资源名称	容量 (kW)	响应时间	持续时长	可用时段
FR-01	空压机群 (1 台)	200	≤5 分钟	30~60 分钟	全天
FR-02	冷却塔风机 (2 台)	60	≤2 分钟	≥2 小时	全天
FR-03	非必要照明	100	≤1 分钟	≥4 小时	峰段
FR-04	部分空调	150	≤3 分钟	1~2 小时	峰段
FR-05	办公设备	50	≤1 分钟	≥2 小时	峰段
合计	-	560	-	-	-

B. 常规响应资源池（II 级）

资源编号	资源名称	容量 (kW)	响应时间	持续时长	可用时段
SR-01	空压机群 (2 台)	400	≤15 分钟	1~2 小时	全天
SR-02	循环水泵 (1 台)	150	≤10 分钟	1~2 小时	全天
SR-03	表面处理工序	500~800	≤30 分钟	1~2 小时	工作日
SR-04	热处理炉 (推迟启动)	800~1,000	≤1 小时	2~4 小时	工作日
SR-05	辅助设施	200~300	≤15 分钟	≥2 小时	全天
合计	-	2,050~2,650	-	-	-

C. 计划响应资源池（III 级）

资源编号	资源名称	容量 (kW)	响应时间	持续时长	可用时段
PR-01	热处理炉组 (批次调整)	2,000~4,000	提前 4~8 小时	2~8 小时	工作日
PR-02	表面处理 (批次转移)	500~800	提前 8 小时	2~4 小时	工作日
PR-03	充电设备 (时段转移)	200~300	提前 12 小时	灵活	全天
PR-04	其他可转移负荷	300~500	提前 24 小时	灵活	全天
合计	-	3,000~5,600	-	-	-

D. 填谷响应资源池（IV 级）

资源编号	资源名称	容量 (kW)	响应时间	持续时长	可用时段
VR-01	热处理炉 (谷段预热)	1,500~2,000	提前 12 小时	2~4 小时	谷段
VR-02	空压机 (满负荷储气)	200~400	提前 4 小时	6~8 小时	谷段
VR-03	充电设备 (集中充电)	200~300	提前 24 小时	6~8 小时	谷段
VR-04	蓄冷/蓄热系统	300~500	提前 4 小时	4~8 小时	谷段
合计	-	2,200~3,200	-	-	-

5.3.2 智能调度策略设计

(1) 多目标优化调度模型

目标函数：

【虚拟电厂调度优化目标】

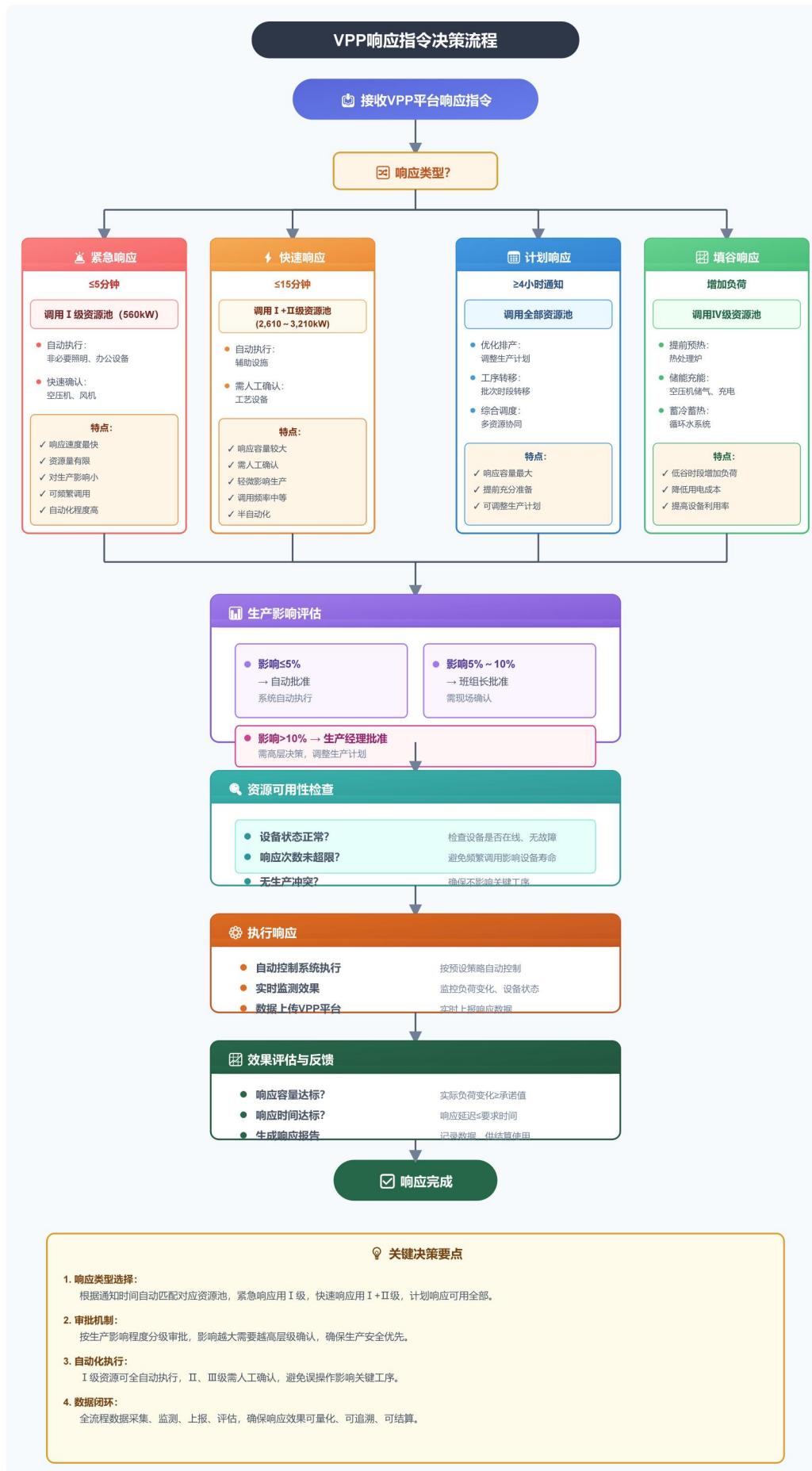
Max: 总收益 = Σ (需求响应收益 + 电费节省 + 辅助服务收益)

约束条件：

1. 生产约束：核心生产线不受影响
2. 容量约束： Σ 调节容量 \leq 承诺容量
3. 时间约束：响应时间 \leq 要求响应时间
4. 持续性约束：持续时间 \geq 要求持续时间
5. 频次约束：日响应次数 \leq 设定上限
6. 安全约束：设备频繁启停次数限制

(2) 分级响应决策树

【VPP 响应指令决策流程】



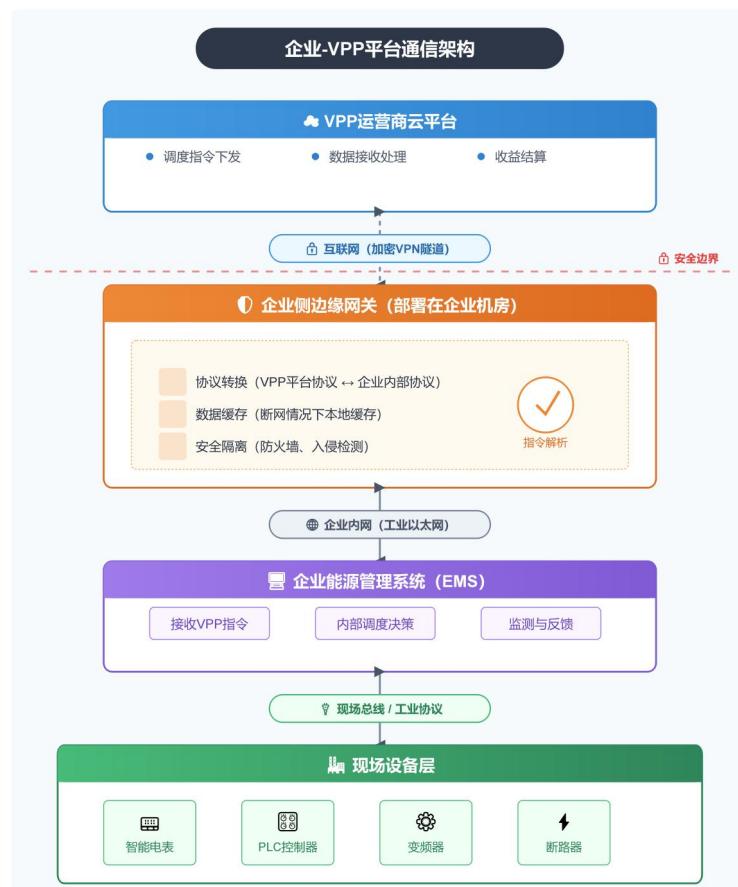
(3) 响应优先级矩阵

响应场景	优先调用资源	响应容量目标	执行方式
电网紧急事件 (红色预警)	I 级→II 级→III 级 依次启动	尽最大能力	自动+人工确认
日常削峰 (黄色预警)	II 级为主 I 级补充	1,500~2,500kW	自动执行为主
日前计划响应	III 级为主 II 级备用	3,000~5,000kW	优化排产
填谷响应	IV 级资源	2,000~3,000kW	计划性增加
辅助服务	I 级+II 级	1,000~2,000kW	快速响应

5.3.3 通信与数据接口方案

(1) 通信架构设计

【企业-VPP 平台通信架构】



(2) 数据接口标准

A. 上传数据 (企业→VPP 平台)

数据类型	数据内容	上传频率	数据格式
实时监测数据	<ul style="list-style-type: none"> • 当前总负荷 • 分项负荷 • 设备运行状态 	1分钟/次	JSON/MQTT
响应执行数据	<ul style="list-style-type: none"> • 响应前负荷 • 响应后负荷 • 实际削减量 	实时	JSON
日数据	<ul style="list-style-type: none"> • 日用电量 • 日负荷曲线 • 峰谷用电量 	每日1次	CSV/JSON
月数据	<ul style="list-style-type: none"> • 月用电量 • 月最大需量 • 月电费 • 设备故障 	每月1次	PDF/Excel
告警数据	<ul style="list-style-type: none"> • 响应失败 • 异常情况 	即时	JSON

B. 下行数据 (VPP 平台→企业)

数据类型	数据内容	下发频率	数据格式
响应指令	<ul style="list-style-type: none"> • 响应类型 • 响应容量 • 开始/结束时间 • 持续时长 	按需	JSON/XML
日前计划	<ul style="list-style-type: none"> • 次日建议负荷曲线 • 峰谷时段提醒 	每日1次	JSON
电价信息	<ul style="list-style-type: none"> • 实时电价 • 日前电价预测 	实时/日前	JSON
市场信息	<ul style="list-style-type: none"> • 需求响应通知 • 辅助服务招标 	按需	JSON
收益对账	<ul style="list-style-type: none"> • 月度收益明细 • 结算单 	每月1次	PDF/Excel

(3) 网络安全方案

安全层级	安全措施	具体技术
L1 物理隔离	生产网与办公网隔离	物理隔离、单向网闸
L2 网络隔离	VPP 接口与生产网隔离	DMZ 区、VLAN 划分
L3 通信加密	数据传输加密	VPN、TLS/SSL、国密算法
L4 身份认证	平台与企业双向认证	数字证书、双因子认证
L5 访问控制	最小权限原则	RBAC 权限管理
L6 入侵防护	实时监测与防护	防火墙、IDS/IPS
L7 数据保护	数据脱敏与备份	敏感数据加密、异地备份

5.3.4 响应效果监测与评估

(1) 响应效果监测指标

指标类别	具体指标	计算方法	考核标准
响应成功率	响应成功次数/总响应次数	按次统计	$\geq 95\%$
容量准确率	实际响应容量/承诺容量	按次统计	$90\% \sim 110\%$
响应及时率	按时响应次数/总次数	按次统计	$\geq 98\%$
持续达标率	持续时长达标次数/总次数	按次统计	$\geq 95\%$
数据上传率	数据成功上传次数/总次数	按次统计	$\geq 98\%$

(2) 响应效果评估流程

【单次响应效果评估流程】



(3) 月度与年度评估

A. 月度综合评估指标

评估维度	指标	权重	目标值
响应能力	月累计响应容量 (MW • 次)	25%	≥20
响应质量	响应成功率	30%	≥95%
经济效益	月度收益 (万元)	25%	≥40
安全合规	无生产安全事故	20%	0 事故

综合得分 = $\sum(\text{指标得分} \times \text{权重})$

B. 年度绩效评估

评估等级	综合得分	年度收益	响应成功率	等级评价
S 级	≥95 分	≥500 万	≥98%	卓越, VPP 平台重点合作伙伴
A 级	85~94 分	400~500 万	95%~98%	优秀, 获额外奖励
B 级	75~84 分	300~400 万	90%~95%	良好, 维持合作
C 级	60~74 分	200~300 万	85%~90%	合格, 需改进
D 级	<60 分	<200 万	<85%	不合格, 可能终止合作