

广东省抽水蓄能参与电力市场交易细则

(征求意见稿)

为贯彻落实国家关于推动开展抽水蓄能参与现货市场试点交易的要求，进一步完善广东抽水蓄能电量价格机制，按照国家发展改革委《关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》（发改价格〔2021〕633号）、《广东省能源局 国家能源局南方监管局关于2024年电力市场交易有关事项的通知》（粤能电力函〔2023〕704号）、《广东省抽水蓄能参与电力市场交易实施方案》（粤能电力〔2024〕27号）等文件有关规定及要求，制定本细则。

1. 总体要求

建立健全抽水蓄能参与电能量市场交易机制，构建抽水蓄能电站价格形成机制，发挥中长期、现货市场在电量电价形成中的作用，试点推动抽水蓄能作为独立经营主体参与市场，促进抽水蓄能健康有序发展。

2. 准入条件

抽水蓄能满足以下准入条件的，可参与电能量市场交易：

（1）具备独立分时正反向电量计量与数据传送条件，数据准确性与可靠性应能满足交易要求。

（2）具备调度直控条件，能够可靠接收和执行电力调度机构实时下达的单机抽水/发电曲线及控制指令，各类性能指标及技术参数应满足相关要求。

(3) 满足国家和行业有关发电企业并网规范、电网调度运行技术标准要求。

(4) 具备独立法人资格，或经法人单位授权。

(5) 以独立主体身份按要求签订并网协议、并网调度协议、购售电合同等。

(6) 依法取得发电项目核准或备案文件，依法取得电力业务许可证。

3. 注册要求

抽水蓄能电站注册时需要向市场运营机构提供的资料及信息包括但不限于：

3.1. 基本信息

已完成投产并具备并网运行条件的相关材料、注册申请表、法定代表人或负责人身份证件、营业执照等。

3.2. 机组运行参数

抽水蓄能电站依据相关投产文件向所属电力调度机构提供机组运行参数，经所属电力调度机构审核批准后生效。如需变更，需通过参数变更管理流程进行更改。具体包括但不限于：

(1) 额定抽水功率 P_{pu}^{Pump} ：单位兆瓦，应与并网调度协议保持一致。

(2) 最大/最小发电功率 $P_{pu}^{Drain,max}$ 、 $P_{pu}^{Drain,min}$ ：单位兆瓦，应与并网调度协议保持一致。

(3) 正常上库容上/下限 $Cr_{pp}^{up,max}$ 、 $Cr_{pp}^{up,min}$ ：单位 m^3 ，表示抽水蓄能电站上库容上限值及下限值。为保留事故情况下

的应急调节能力，抽水蓄能电站的上库容下限应不含紧急库容。由抽水蓄能电站申报，电力调度机构同意后生效。

(4) 正常下库容上/下限 $Cr_{pp}^{dn,max}$ 、 $Cr_{pp}^{dn,min}$ ：单位 m^3 ，表示抽水蓄能电站下库容上限及下限值。为保留事故情况下的应急调节能力，抽水蓄能电站的下库容下限应不含紧急库容。由抽水蓄能电站申报，电力调度机构同意后生效。

(5) 实时上/下库容 $Cr_{pp,t}^{up}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn}$ ：单位 m^3 ，参与市场的抽水蓄能电站原则上应具备向调度传输分时的实时上下库容数据条件，叠加实时出清计划后作为实时出清的初始库容。数据准确性与可靠性应能满足交易要求。起步阶段暂不具备直采的抽水蓄能电站可向电力调度机构每日报送上下库容数据，参与现货交易，并在参与现货交易后 3 个月内完成上下库容数据直采功能。

(6) 抽水库容电力转换效率 η_{pu}^{Pump} ：单位 m^3/MWh ，表示抽水蓄能机组抽水时的库容电力转换效率。

(7) 发电库容电力转换效率 η_{pu}^{Drain} ：单位 m^3/MWh ，表示抽水蓄能机组发电时的库容电力转换效率。

4. 电力调度机构设定的参数

(1) 最小连续开机时间 $t_{pu}^{drain,up}$ ：单位为分钟，表示抽水蓄能机组开机后，距离下一次停机至少需要连续运行的时间。

(2) 最小连续开泵时间 $t_{pu}^{pump,up}$ ：单位为分钟，表示抽水蓄能机组开泵后，距离下一次停机至少需要连续运行的时间。

(3) 最小连续停机时间 t_{pu}^{dn} ：单位为分钟，表示抽水蓄能机组停机后，距离下一次开机/泵至少需要连续停机的时间。

(4) 同厂同时最大增加开机台数 PTS_{pp} ：单位为台。

(5) 同厂同时最大增加开泵台数 UTS_{pp} ：单位为台。

(6) 实时市场库容上下限带宽量 Cr^{bw} ：实时市场中，抽水蓄能电站的上下库容在日前出清上下库容结果带宽量范围内优化。

(7) 抽水蓄能机组的日最大启停次数 $UDTS_{pu}$ ：表示抽水蓄能机组每日启停次数限制。

5. 中长期电能量交易

5.1. 交易品种

抽水蓄能可参与年度、月度、多日（周）等周期的双边协商、挂牌和集中竞争交易，具体以实际交易安排为准。

5.2. 交易方向

抽水蓄能参与双边协商或挂牌交易，在同一场次中允许买入和卖出双向交易，在同一场次挂牌交易中对同一小时的电量只允许买入或卖出单向交易，以首笔成交方向为准。抽水蓄能参与集中竞争交易，在同一场次中对同一标的只允许买入或卖出单向交易，以首笔成交方向为准。

5.3. 结算参考点

抽水蓄能中长期合约的结算参考点按《广东电力市场中长期电能量交易实施细则（2024年修订）》第5.3.6条执行，有最新规定的按最新规定执行。

5.4. 交易电量约束

5.4.1. 月度净合约量约束

抽水蓄能月度净合约量为所交易标的月合约电量的代

数和，其上下限根据最大发电功率/额定抽水功率、月发电/抽水利用小时参数、调整参数 y_4 设置，计算方式如下：

标的月净合约量 = Σ 卖出标的月合约电量 - Σ 买入标的月合约电量

月度净合约量上限 = 最大发电功率 \times 月发电利用小时参数 \times 调整参数 y_4

月度净合约量下限 = - 额定抽水功率 \times 月抽水利用小时参数 \times 调整参数 y_4

5.4.2. 月度累计交易量约束

抽水蓄能月度累计交易量为买入和卖出标的月合约电量的绝对值之和，其上限根据月度净合约量上下限和调整参数 f_4 设置，计算方式如下：

标的月累计交易量 = Σ 卖出标的月合约电量 + Σ 买入标的月合约电量

月度累计交易量上限 = (月度净合约上限 - 月度净合约量下限) \times 调整参数 f_4

5.4.3. 分时净合约量约束

抽水蓄能分时净合约量为所交易标的的小时合约电量的代数和，其上下限根据最大发电功率/额定抽水功率和系数 A_4 设置，计算方式如下：

标的的小时净合约量 = Σ 卖出标的的小时合约电量 - Σ 买入标的的小时合约电量

分时净合约量上限 = 最大发电功率 \times 1 小时 \times 系数 A_4

分时净合约量下限 = - 额定抽水功率 \times 1 小时 \times 系数 A_4

5.4.4. 可申报电量额度

抽水蓄能参与双边协商、挂牌交易，以及年度集中竞争交易、交易标的为典型负荷曲线电量的月度集中竞争交易，应用月度净合约量约束和月度累计交易量约束，不应用分时净合约量约束，可申报买入、卖出电量额度计算方式如下：

可申报卖出电量额度 = $\min\{\text{月度净合约量上限} - \text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{本场交易已申报卖出月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发生月度累计交易量}\}$

可申报买入电量额度 = $\min\{\text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{月度净合约量下限} - \text{本场交易已申报买入月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发生月度累计交易量}\}$

抽水蓄能参与月度和多日分时集中竞争交易，在月度净合约量约束和月度累计交易量约束的基础上，应用分时净合约量约束。月度分时集中竞争交易的可申报买入、卖出电量额度按交易标的时段分别设置，计算方式如下：

分时可卖出电量上限 = $\max\{\text{分时净合约量上限} - \text{本场交易前持有分时净合约量}, 0\}$

分时可买入电量上限 = $\max\{\text{本场交易前持有分时净合约量} - \text{分时净合约量下限}, 0\}$

月度某时段可卖出电量上限 = $\min\{\text{当月 1 日该时段分时可卖出电量上限} / \text{交易标的电量当月 1 日分解比例}, \dots, \text{当月 N 日该时段分时可卖出电量上限} / \text{交易标的电量当月 N 日分解比例}\}$ ，N 为当月天数

月度某时段可买入电量上限 = $\min\{\text{当月 1 日该时段分时}$

可买入电量上限 / 交易标的电量当月 1 日分解比例, ..., 当月 N 日该时段分时可买入电量上限 / 交易标的电量当月 N 日分解比例}, N 为当月天数

月度交易某时段可申报卖出电量额度 = $\min\{\text{月度该时段可卖出电量上限} - \text{本场交易已申报卖出该时段合约电量}, \text{月度净合约量上限} - \text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{本场交易已申报卖出月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发生月度累计交易量}\}$

月度交易某时段可申报买入电量额度 = $\min\{\text{月度该时段可买入电量上限} - \text{本场交易已申报买入该时段合约电量}, \text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{月度净合约量下限} - \text{本场交易已申报买入月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发生月度累计交易量}\}$

多日分时集中竞争交易的可申报买入、卖出电量额度按交易标的时段分别设置, 计算方式如下:

多日交易某时段可申报卖出电量额度 = $\min\{\text{该时段分时可卖出电量上限} - \text{本场交易已申报卖出该时段合约电量}, \text{月度净合约量上限} - \text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{本场交易已申报卖出月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发生月度累计交易量}\}$

多日交易某时段可申报买入电量额度 = $\min\{\text{该时段分时可买入电量上限} - \text{本场交易已申报买入该时段合约电量}, \text{本场交易前持有月度净合约量} - \text{月度净合约量下限} - \text{本场交易已申报买入月内合约电量}, \text{月度累计交易量上限} - \text{已发}$

生月度累计交易量}

6. 现货电能量交易

抽水蓄能按“报量报价”方式参与现货电能量市场交易，进行全电量出清。

6.1. 交易申报

竞价日 13:00 前，试点交易的抽水蓄能通过电力市场交易系统进行现货电能量市场交易申报。若未按时申报，则按照缺省报价信息参与市场出清。申报信息包括：

(1) 抽水状态报价。额定抽水功率对应的电能量报价，单位为元/兆瓦时。

(2) 发电状态电能量价格曲线。可最多申报 10 段，每段需申报出力区间起点（兆瓦）、出力区间终点（兆瓦）以及该区间报价（元/兆瓦时）。第一段出力区间起点为最小发电功率，最后一段出力区间终点为最大发电功率，每段报价的出力区间起点必须等于前一段报价的出力区间终点，两段报价的出力衔接点对应报价值属于前一段报价。每段报价的出力区间长度不得小于报价出力段单段最小区间长度，即 $\max\{(\text{最大发电功率} - \text{最小发电功率}) \times 5\%, 1 \text{ 兆瓦}\}$ 。报价曲线必须随出力增加单调非递减，第一段报价须大于等于抽水状态报价。

抽水、发电状态的电能量报价上限取燃煤机组统一报价上限，启动分类型设置燃煤机组报价上限后取各类型机组报价上限的最大值，电能量报价下限按参数设置。

6.2. 市场出清

在现行日前、实时市场出清模型的目标函数中增加抽水蓄能的抽水、发电费用，出清约束中增加抽水蓄能的抽水发电功率约束、库容约束等，出清计算得到抽水蓄能日前、实时抽发出力计划曲线及节点电价，出清结果作为抽水蓄能调度计划下达执行。电力调度机构可结合系统安全、电力保供需要，对抽水蓄能出清的抽发计划曲线进行调整。

7. 日前出清

7.1. 安全约束机组组合 (SCUC)

7.1.1. 目标函数

日前市场出清模型目标函数为最小化发电资源运行成本，包含常规机组、独立储能及抽水蓄能部分。

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t}(P_{i,t}) + C_{i,t}^U + C_{i,t}^{p\min}] + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M [SL_l^+ + SL_l^-] \\ & + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M [SL_s^+ + SL_s^-] + \sum_{es=1}^{ES} \sum_{t=1}^T [C_{es,t}(P_{es,t})] + \sum_{pp=1}^{PP} \sum_{t=1}^T [C_{pp,t}(P_{pp,t})] \} \end{aligned}$$

其中：

N 表示常规机组的总台数，包括非市场机组与市场机组，不包括新型储能交易单元和抽水蓄能机组；

T 表示所考虑的总时段数，其中D日每15分钟一个时段，考虑96个时段，D+1日考虑负荷高峰、低谷2个时段，故 T 为98；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 、 $C_{i,t}^U$ 、 $C_{i,t}^{p\min}$ 分别表示机组 i 在时段 t 的运行费用、启动费用、最小稳定技术出力费用，其中机组运行费用 $C_{i,t}(P_{i,t})$ 是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段

线性函数；机组启动费用 $C_{i,t}^U$ 是与机组停机时间有关的函数，以表示机组在不同状态（冷态/温态/热态）下的启动费用；最小稳定技术出力费用 $C_{i,t}^{pmin}$ 在机组开机的时段纳入计算；

M 表示用于市场出清优化的网络潮流约束松弛罚因子；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 为线路总数；

SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量； NS 为断面总数；

ES 表示储能交易单元总数， $C_{es,t}(P_{es,t})$ 表示储能 es 在时段 t 的运行费用；

PP 表示抽水蓄能电厂优化单元的数量，每个优化单元由电厂中上网节点相同的机组组成， $C_{pp,t}(P_{pp,t})$ 表示抽水蓄能电厂 pp 在时段 t 的运行费用。

7.1.2. 负荷平衡约束

对于每个时段 t ，负荷平衡约束可以描述为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{dis} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{ch} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{Pump} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{Drain} = \sum_{u=1}^U D_{u,t}$$

其中， $P_{i,t}$ 表示所有机组 i 在 t 时段的出力， $T_{j,t}$ 表示联络线 j 在时段 t 的计划功率（送入为正、输出为负）， NT 为联络线总数， D_t 为 t 时段的系统负荷， $P_{es,t}^{ch}$ 和 $P_{es,t}^{dis}$ 为储能单元 e 在 t 时段充、发电功率， E 表示储能单元的个数。 $P_{pp,t}^{Pump}$ 表示抽水蓄能电厂 pp 在时段 t 的抽水功率， $P_{pp,t}^{Drain}$ 表示发电功率。A 类机组的出力已包含在等式左侧。

7.1.3. 系统正备用容量约束

系统正备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} \alpha_{f,t} P_{f,t}^{\max} + \sum_{pp=1}^{PP} (P_{pp,t}^{\text{single,max}} \times N_{pp}^{\text{pump,max}}) + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{\max} - R_t^{\text{red}} \geq D_t - \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + R_t^U$$

其中， NF 表示火电机组的数量， $\alpha_{f,t}$ 表示机组 f 在时段 t 的启停状态， $\alpha_{f,t} = 0$ 表示机组停机， $\alpha_{f,t} = 1$ 表示机组开机； $P_{f,t}^{\max}$ 为机组 f 在时段 t 的最大出力； $P_{pp,t}^{\text{single,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的单机容量， $N_{pp}^{\text{drain,max}}$ 表示抽蓄电厂最大开机台数， NH 表示常规水电机组数量， $P_{h,t}^{\max}$ 为常规水电机组 h 在时段 t 内的容量， R_t^{red} 表示时段 t 的机组不稳定出力减扣值； R_t^U 表示时段 t 的系统正备用容量要求；正常时期需同时满足 D+1 日最高负荷点的备用要求，在电力供应紧张等特殊时期，电力调度机构可按要求启动特殊时期运行备用。

7.1.4. 系统负备用容量约束

系统负备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} \alpha_{f,t} P_{f,t}^{\min} + \sum_{p=1}^{PP} (P_{pu,t}^{\text{pump}} \times N_{pp}^{\text{unit,max}}) + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{\min} \leq D_t - \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} - R_t^D$$

其中， $P_{f,t}^{\min}$ 表示机组 f 在时段 t 的最小出力； $P_{pu,t}^{\text{pump}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的单机抽水额定功率， $N_{pp}^{\text{pump,max}}$ 表示抽蓄电厂最大开泵台数， $P_{h,t}^{\min}$ 表示常规水电机组的最小出力， R_t^D 表示时段 t 的系统负备用容量要求。

7.1.5. 系统一次调频备用容量约束

系统一次调频备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} P_{f,t}^{\text{first}} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{\text{first}} + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{\text{first}} \geq R_t^{\text{first}}$$

其中， R_t^{first} 表示时段 t 的系统一次调频备用容量要求；

$P_{f,t}^{first}$ 、 $P_{pp,t}^{first}$ 、 $P_{h,t}^{first}$ 分别表示火电机组 i 、抽蓄电厂 pp 、水电机组 h （仅包括开机机组）在时段 t 提供的一次调频备用容量，其中，

$$P_{f,t}^{first} = \min(P_{f,t}^{\max} - P_{f,t}, P_{f,t}^{\max} \times 6\%)$$

$$P_{pp,t}^{first} = \min(P_{pp,t}^{\text{on,max}} - P_{pp,t}, P_{pp,t}^{\text{on,max}} \times 10\%)$$

$$P_{h,t}^{first} = \min(P_{h,t}^{\max} - P_{h,t}, P_{h,t}^{\max} \times 10\%)$$

$P_{pp,t}^{\text{on,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的可开机容量，为电厂最大开机台数乘以单机容量。

7.1.6. 抽水蓄能电厂爬坡约束表达式

$$P_{pp,t}^{Drain} - P_{pp,t-1}^{Drain} \leq \Delta P_{pp,t}^{Drain,\max}$$

$$P_{pp,t}^{Pump} - P_{pp,t-1}^{Pump} \leq \Delta P_{pp,t}^{Pump,\max}$$

$$\Delta P_{pp,t}^{Drain,\max} = 2P_{pu,t}^{\text{single,max}}$$

$$\Delta P_{pp,t}^{Pump,\max} = P_{pp,g}^{Pump} - P_{pp,g-1}^{Pump}$$

其中， $\Delta P_{pp,t}^{Drain,\max}$ 表示时段 t 的电厂发电上爬坡速率，数值为 UTS_{pp} 台抽蓄单机的容量之和，发电下爬坡不受限； $\Delta P_{pp,t}^{Pump,\max}$ 表示时段 t 的电厂抽水下爬坡速率，数值为对应相邻档位的偏差，抽水上爬坡不受限。

7.1.7. 抽水蓄能电厂运行费用表达式

$$C_{pp,t}(P_{pp,t}) = \sum_{m=1}^{NPP} C_{pp,m} P_{pp,t,m}$$

其中， $C_{pp,t,m}$ 表示抽水蓄能电厂 pp 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格， NPP 表示机组报价总段数， $P_{pp,t,m}$ 表示电厂 pp 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力。

$$P_{pp,t} = \sum_{m=1}^{NPP} P_{pp,t,m}$$

电厂发电时的表达式为：

$$0 \leq P_{pp,t,m} \leq P_{pp,m}^{\max} - P_{pp,m}^{\min}$$

电厂抽水时的表达式为：

$$P_{pp,t,m} = P_{pp,t}^{Pump}$$

$P_{pp,m}^{\max}$ 、 $P_{pp,m}^{\min}$ 分别表示电厂 pp 的第 m 个出力区间上、下界，报价相同的厂内抽蓄机组出力区间线性累加，报价不同的出力区间按照报价单调递增的顺序形成抽蓄电厂的阶梯量价曲线。

7.1.8. 抽水蓄能电厂抽发功率约束

$$P_{pp,t}^{Pump} = - \sum_g \alpha_{pp,t,g}^{Pump} P_{pp,g}^{Pump}$$

$$\sum_g \alpha_{pp,t,g}^{Pump} \leq 1$$

$$\alpha_{pp,t}^{Drain} P_{pp,t}^{Drain,\min} \leq P_{pp,t}^{Drain} \leq \alpha_{pp,t}^{Drain} P_{pp,t}^{Drain,\max}$$

$$0 \leq \sum_g \alpha_{pp,t,g}^{Pump} + \alpha_{pp,t}^{Drain} \leq 1$$

$$\alpha_{pp,t,g}^{Pump}, \alpha_{pp,t}^{Drain} \in \{0,1\}$$

$P_{pp,g}^{Pump}$ 表示电厂在档位 g 下的额定抽水功率，每一档的功率为电厂包含机组的额定抽水功率按报价从低到高累加而成。

$$P_{pp,g}^{Pump} = \sum_{pu=1}^g P_{pu}^{Pump}$$

$P_{pp,t}^{Drain,\max}$ 和 $P_{pp,t}^{Drain,\min}$ 表示最大最小发电功率，最大发电功率为电厂包含机组的最大发电功率之和，最小发电功率为厂内机组最小发电功率的较小值， $\alpha_{pp,t,g}^{Pump}$ 和 $\alpha_{pp,t}^{Drain}$ 表示抽水蓄能电厂的抽发状态 0-1 整数变量，1 表示开泵/开机，0 表示停泵/

停机。

7.1.9. 抽水蓄能电厂库容约束

$$Cr_{pp,t}^{up} = Cr_{pp,t-1}^{up} - (\eta_{pp}^{Pump} P_{pp,t}^{Pump} + \eta_{pp}^{Drain} P_{pp,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{dn} = Cr_{pp,t-1}^{dn} + (\eta_{pp}^{Pump} P_{pp,t}^{Pump} + \eta_{pp}^{Drain} P_{pp,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{up,min} \leq Cr_{pp,t}^{up} \leq Cr_{pp,t}^{up,max}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,min} \leq Cr_{pp,t}^{dn} \leq Cr_{pp,t}^{dn,max}$$

$Cr_{pp,t}^{up}$ 和 $Cr_{pp,t}^{dn}$ 表示抽水蓄能电站 pp 的上下库容 (m^3), η_{pp}^{Pump} 表示抽水库容电力转换效率 (m^3/MWh), η_{pp}^{Drain} 表示发电库容电力转换效率 (m^3/MWh), 转换效率与单机的相同, Δt 表示每个时段的时长, $Cr_{pp,t}^{up,min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,max}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,max}$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的最小最大上下库容, 取值分别为上下库容上下限。电力调度机构应视电网安全和电力供应需要, 设置每日日末的库容上下限要求, 不可超过抽水蓄能电站的库容上下限范围, 并于竞价日 (D-1 日) 12:00 前以私有信息披露。

7.1.10. 抽水蓄能电厂最小连续开机时间约束

$$(\alpha_{pp,t-1}^{Drain} - \alpha_{pp,t}^{Drain}) t_{pp}^{drain,up} \leq \sum_{T=t-t_{pp}^{drain,up}-1}^{t-1} (\alpha_{pp,T}^{Drain})$$

其中, $t_{pp}^{drain,up}$ 表示抽水蓄能电厂最小连续开机时间, 数值与单机的时间相同。

7.1.11. 抽水蓄能电厂最小连续开泵时间约束

$$(\alpha_{pp,t-1}^{Pump} - \alpha_{pp,t}^{Pump}) t_{pp}^{pump,up} \leq \sum_{T=t-t_{pp}^{pump,up}-1}^{t-1} (\alpha_{pp,T}^{Pump})$$

其中， $t_{pp}^{pump,up}$ 表示抽水蓄能电厂最小连续开泵时间，数值与单机的时间相同。

7.1.12. 抽水蓄能电厂最小连续停机时间约束

$$\begin{aligned} (\alpha_{pp,t}^{Pump} - \alpha_{pp,t-1}^{Pump})t_{pp}^{dn} &\leq \sum_{T=t-t_{pp}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pp,T}^{Pump} - \alpha_{pp,T}^{Drain}) \\ (\alpha_{pp,t}^{Drain} - \alpha_{pp,t-1}^{Drain})t_{pp}^{dn} &\leq \sum_{T=t-t_{pp}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pp,T}^{Pump} - \alpha_{pp,T}^{Drain}) \end{aligned}$$

其中， t_{pp}^{dn} 表示抽水蓄能电厂最小连续停机时间，数值与单机的时间相同。

7.1.13. 抽水蓄能电厂启停次数限制

$$\sum_{t=1}^T (\beta_{pp,t} + \gamma_{pp,t}) \leq 2UDTS_{pp}$$

其中， $\beta_{pp,t}$ 和 $\gamma_{pp,t}$ 表示抽水蓄能电厂的开机和停机变量， $UDTS_{pp}$ 表示抽水蓄能电厂的最大启停次数，次数等于厂内所有抽水蓄能机组的最大启停次数之和。

7.1.14. 线路潮流约束

线路潮流约束可以描述为：

$$\begin{aligned} -P_l^{\max} &\leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{l-e} P_{es,t}^{dis} + G_{l-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} T_{j,t} \\ &+ \sum_{pp=1}^{PP} (G_{l-p} P_{pp,t}) - \sum_{k=1}^K G_{l-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{\max} \end{aligned}$$

其中， P_l^{\max} 表示线路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 表示机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 表示联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-e} 为节点 e 对线路 l 的灵敏度因子； K 表示系统的节

点数量； G_{l-k} 表示节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-p} 表示抽水交易单元 pp 所在节点 p 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 表示节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量。

7.1.15. 断面潮流约束

考虑关键断面的潮流约束，该约束可以描述为：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{s-e} P_{es,t}^{dis} + G_{s-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} T_{j,t} \\ + \sum_{pp=1}^{PP} (G_{s-p} P_{pp,t}) - \sum_{k=1}^K G_{s-k} \left(\sum_{u=k} D_{u,t} \right) - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{\max}$$

其中， P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别表示断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 表示机组 i 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-e} 表示储能 es 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-j} 表示联络线 j 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-p} 表示抽水交易单元 pp 所在节点 p 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-k} 表示节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

7.2. 经济调度机组组合 (SCED)

7.2.1. 目标函数

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}(P_{i,t}) + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M [SL_l^+ + SL_l^-] + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M [SL_s^+ + SL_s^-] \right. \\ \left. + \sum_{es=1}^{ES} \sum_{t=1}^T [C_{es,t}(P_{es,t})] + \sum_{pu=1}^{PU} \sum_{t=1}^T [C_{pu,t}(P_{pu,t})] \right\}$$

其中：

N 表示常规机组的总台数，包括非市场机组与市场机组，

不包括新型储能交易单元和抽水蓄能机组；

T 表示所考虑的总时段数，其中 D 日每 15 分钟一个时段，考虑 96 个时段， $D+1$ 日考虑负荷高峰、低谷 2 个时段，故 T 为 98；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 表示机组 i 在时段 t 的运行费用，机组运行费用 $C_{i,t}(P_{i,t})$ 是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数；

M 表示用于市场出清优化的网络潮流约束松弛罚因子；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 为线路总数；

SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量； NS 为断面总数；

ES 表示储能交易单元总数， $C_{es,t}(P_{es,t})$ 表示储能 es 在时段 t 的运行费用；

PU 表示抽水蓄能机组的台数， $C_{pu,t}(P_{pu,t})$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的运行费用。

7.2.2. 抽水蓄能机组出力表达式

$$P_{pu,t} = P_{pu,t}^{Pump} + P_{pu,t}^{Drain}$$

$$P_{pu,t} = \sum_{m=1}^{NP} P_{pu,t,m}$$

机组发电时的表达式为：

$$0 \leq P_{pu,t,m} \leq P_{pu,m}^{\max} - P_{pu,m}^{\min}$$

机组抽水时的表达式为：

$$P_{pu,t,m} = P_{pu,t}^{Pump}$$

其中， NP 表示抽水蓄能机组报价总段数， $P_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力， $P_{pu,m}^{\max}$ 、 $P_{pu,m}^{\min}$ 分别表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间上、下界。

7.2.3. 抽水蓄能机组运行费用表达式

$$C_{pu,t}(P_{pu,t}) = \sum_{m=1}^{NP} C_{pu,m} P_{pu,t,m}$$

其中， NP 表示机组报价总段数， $C_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格。

7.2.4. 负荷平衡约束

对于每个时段 t ，负荷平衡约束可以描述为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{dis} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{ch} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Pump} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Drain} = \sum_{u=1}^U D_{u,t}$$

其中， $P_{i,t}$ 表示所有机组 i 在 t 时段的出力， $T_{j,t}$ 表示联络线 j 在时段 t 的计划功率（送入为正、输出为负）， NT 为联络线总数， D_t 为 t 时段的系统负荷， $P_{es,t}^{ch}$ 和 $P_{es,t}^{dis}$ 为储能单元 e 在 t 时段充、发电功率， E 表示储能单元的个数。 $P_{pu,t}^{Pump}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的抽水功率， $P_{pu,t}^{Drain}$ 表示发电功率。A类机组的出力已包含在等式左侧。

7.2.5. 系统一次调频备用容量约束

系统一次调频备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} P_{f,t}^{first} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{first} + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{first} \geq R_t^{first}$$

其中， R_t^{first} 表示时段 t 的系统一次调频备用容量要求；

$P_{f,t}^{first}$ 、 $P_{pp,t}^{first}$ 、 $P_{h,t}^{first}$ 分别表示火电机组 i 、抽蓄电厂 pp 、水电机组 h （仅包括开机机组）在时段 t 提供的一次调频备用容量，其中，

$$P_{f,t}^{first} = \min(P_{f,t}^{\max} - P_{f,t}, P_{f,t}^{\max} \times 6\%)$$

$$P_{pp,t}^{first} = \min(P_{pp,t}^{\text{on,max}} - P_{pp,t}, P_{pp,t}^{\text{on,max}} \times 10\%)$$

$$P_{h,t}^{first} = \min(P_{h,t}^{\max} - P_{h,t}, P_{h,t}^{\max} \times 10\%)$$

$P_{pp,t}^{\text{on,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的开机容量。

7.2.6. 抽水蓄能抽发功率约束

$$P_{pu,t}^{Pump} = -\alpha_{pu,t}^{Pump} P_{pu}^{Pump}$$

$$\alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,\min} \leq P_{pu,t}^{Drain} \leq \alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,\max}$$

$$0 \leq \alpha_{pu,t}^{Pump} + \alpha_{pu,t}^{Drain} \leq 1$$

$$\alpha_{pu,t}^{Pump}, \alpha_{pu,t}^{Drain} \in \{0,1\}$$

P_{pu}^{Pump} 表示机组的额定抽水功率， $P_{pu,t}^{Drain,\max}$ 和 $P_{pu,t}^{Drain,\min}$ 表示最大最小发电功率， $\alpha_{pu,t}^{Pump}$ 和 $\alpha_{pu,t}^{Drain}$ 表示抽水蓄能机组的抽发状态 0-1 整数变量，1 表示开泵/开机，0 表示停泵/停机。

7.2.7. 抽水蓄能库容约束

$$Cr_{pp,t}^{up} = Cr_{pp,t-1}^{up} - \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{dn} = Cr_{pp,t-1}^{dn} + \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{up,\min} \leq Cr_{pp,t}^{up} \leq Cr_{pp,t}^{up,\max}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,\min} \leq Cr_{pp,t}^{dn} \leq Cr_{pp,t}^{dn,\max}$$

$Cr_{pp,t}^{up}$ 和 $Cr_{pp,t}^{dn}$ 表示抽水蓄能电站 pp 的上下库容 (m^3)， PPU_{pp} 表示电站中抽水蓄能机组的数量， η_{pu}^{Pump} 表示抽水库容电力转

换效率 (m^3/MWh), η_{pu}^{Drain} 表示发电库容电力转换效率 (m^3/MWh), Δt 表示每个时段的时长, $Cr_{pp,t}^{up,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,\max}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\max}$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的最小最大上下库容, PPU_{pp} 表示抽水蓄电厂 pp 中包含的抽蓄机组数量。

7.2.8. 抽水蓄能机组群最大最小开机台数约束

抽水蓄能机组群内机组开机台数应在给定范围内, 其约束条件可以描述为:

$$CR_{j,t}^{\min} \leq \sum_{pu \in j} (\alpha_{pu,t}^{Pump} + \alpha_{pu,t}^{Drain}) \leq CR_{j,t}^{\max}$$

其中 $CR_{j,t}^{\max}$ 、 $CR_{j,t}^{\min}$ 为抽水蓄能机组群 j 在时段 t 的最大、最小开机台数。

7.2.9. 抽水蓄能最小连续开机时间约束

$$(\alpha_{pu,t-1}^{Drain} - \alpha_{pu,t}^{Drain}) t_{pu}^{drain,up} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{up}-1}^{t-1} (\alpha_{pu,T}^{Drain})$$

其中, $t_{pu}^{drain,up}$ 表示抽水蓄能机组最小连续开机时间。

7.2.10. 抽水蓄能最小连续开泵时间约束

$$(\alpha_{pu,t-1}^{Pump} - \alpha_{pu,t}^{Pump}) t_{pu}^{pump,up} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{up}-1}^{t-1} (\alpha_{pu,T}^{Pump})$$

其中, $t_{pu}^{pump,up}$ 表示抽水蓄能机组最小连续开泵时间。

7.2.11. 抽水蓄能最小连续停机时间约束

$$(\alpha_{pu,t}^{Pump} - \alpha_{pu,t-1}^{Pump}) t_{pu}^{dn} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pu,T}^{Pump} - \alpha_{pu,T}^{Drain})$$

$$(\alpha_{pu,t}^{Drain} - \alpha_{pu,t-1}^{Drain}) t_{pu}^{dn} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pu,T}^{Pump} - \alpha_{pu,T}^{Drain})$$

其中, t_{pu}^{dn} 表示抽水蓄能机组最小连续停机时间。

7.2.12. 同厂抽水蓄能机组同抽同放约束

$$\begin{cases} \alpha_{pu,t}^{Pump} = 0 & \text{当存在厂内其他机组放水时} \\ \alpha_{pu,t-1}^{Drain} = 0 & \text{当存在厂内其他机组抽水时} \end{cases}$$

为充分发挥市场对抽水蓄能机组调节能力的激励引导，保障电网安全稳定运行，参与现货市场交易的抽蓄蓄能机组须满足同厂抽水蓄能机组同抽同放约束，暂不执行与全省其余抽水蓄能机组同抽同放约束。

7.2.13. 同厂抽水蓄能机组增开机泵台数限制

$$\begin{aligned} \sum_{pu=1}^{PP} (\alpha_{pu,t}^{Pump} - \alpha_{pu,t-1}^{Pump}) &\leq PTS_{pp} \\ \sum_{pu=1}^{PP} (\alpha_{pu,t}^{Drain} - \alpha_{pu,t-1}^{Drain}) &\leq UTS_{pp} \end{aligned}$$

其中， PTS_{pp} 表示抽水蓄能电厂同时最大增加开泵台数， UTS_{pp} 表示抽水蓄能电厂同时最大增加开机台数。

7.2.14. 抽水蓄能机组启停次数限制

$$\sum_{t=1}^T (\beta_{pu,t} + \gamma_{pu,t}) \leq 2UDTS_{pu}$$

其中， $\beta_{pu,t}$ 和 $\gamma_{pu,t}$ 表示抽水蓄能机组的开机和停机变量， $UDTS_{pu}$ 表示抽水蓄能机组的最大启停次数。

7.2.15. 线路潮流约束

线路潮流约束可以描述为：

$$\begin{aligned} -P_l^{\max} &\leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{l-e} P_{es,t}^{dis} + G_{l-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} T_{j,t} \\ &+ \sum_{pu=1}^{PU} (G_{l-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{l-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{l-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{\max} \end{aligned}$$

其中， P_l^{\max} 表示线路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 表示机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 表示联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-e} 为节点 e 对线路 l 的灵敏度因子； K 表示系统的节点数量； G_{l-k} 表示节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 表示节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量。

7.2.16. 断面潮流约束

考虑关键断面的潮流约束，该约束可以描述为：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{s-e} P_{es,t}^{dis} + G_{s-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} T_{j,t} \\ + \sum_{pu=1}^{PU} (G_{s-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{s-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{s-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{\max}$$

其中， P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别表示断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 表示机组 i 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-e} 表示储能 es 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-j} 表示联络线 j 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-k} 表示节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

7.3. 节点电价计算模型（LPC）

7.3.1. 目标函数

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}(P_{i,t}) + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M' [SL_l^+ + SL_l^-] + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M' [SL_s^+ + SL_s^-] \right. \\ \left. + \sum_{es=1}^{ES} \sum_{t=1}^T [C_{es,t}(P_{es,t})] + \sum_{pu=1}^{PU} \sum_{t=1}^T [C_{pu,t}(P_{pu,t})] \right\}$$

其中：

N 表示常规机组的总台数，包括非市场机组与市场机组，不包括新型储能交易单元和抽水蓄能机组；

T 表示所考虑的总时段数，其中D日每15分钟一个时段，考虑96个时段，D+1日考虑负荷高峰、低谷2个时段，故 T 为98；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 表示机组 i 在时段 t 的运行费用，机组运行费用 $C_{i,t}(P_{i,t})$ 是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数；

M' 表示用于用于节点电价计算的网络潮流约束松弛罚因子；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 为线路总数；

SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量； NS 为断面总数；

ES 表示储能交易单元总数， $C_{es,t}(P_{es,t})$ 表示储能 es 在时段 t 的运行费用；

PU 表示抽水蓄能机组的台数， $C_{pu,t}(P_{pu,t})$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的运行费用。

7.3.2. 抽水蓄能机组出力表达式

$$P_{pu,t} = P_{pu,t}^{Pump} + P_{pu,t}^{Drain}$$

$$P_{pu,t} = \sum_{m=1}^{NP} P_{pu,t,m}$$

机组发电时的表达式为：

$$0 \leq P_{pu,t,m} \leq P_{pu,m}^{\max} - P_{pu,m}^{\min}$$

机组抽水时的表达式为：

$$P_{pu,t,m} = P_{pu,t}^{Pump}$$

其中， NP 表示抽水蓄能机组报价总段数， $P_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力， $P_{pu,m}^{\max}$ 、 $P_{pu,m}^{\min}$ 分别表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间上、下界。

7.3.3. 抽水蓄能机组出力上下限约束

$$P_{pu,t}^{\min} \leq P_{pu,t} \leq P_{pu,t}^{\max}$$

对于SCED优化结果中停机的抽水蓄能机组，上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 均取为零；对于不可定价机组，上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 均取SCED优化结果中机组 i 在时段 t 的中标出力 $P_{pu,t}^{SCED}$ ；对于可定价机组，上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 取如下数值：

$$P_{pu,t}^{\min} = \max\{(1-\delta)P_{pu,t}^{SCED}, (P_{pu,t}^{\min})^{SCED}\}$$

$$P_{pu,t}^{\max} = \min\{(1+\delta)P_{pu,t}^{SCED}, (P_{pu,t}^{\max})^{SCED}\}$$

其中， δ 为LMP模型中允许机组偏离日前SCED优化结果的比例， $(P_{pu,t}^{\min})^{SCED}$ 、 $(P_{pu,t}^{\max})^{SCED}$ 分别为日前SCED模型中的机组最小、最大出力。

7.3.4. 抽水蓄能机组运行费用表达式

$$C_{pu,t}(P_{pu,t}) = \sum_{m=1}^{NP} C_{pu,m} P_{pu,t,m}$$

其中， NP 表示机组报价总段数， $C_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格。

7.3.5. 负荷平衡约束

对于每个时段 t ，负荷平衡约束可以描述为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{dis} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{ch} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Pump} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Drain} = \sum_{u=1}^U D_{u,t}$$

其中， $P_{i,t}$ 表示所有机组 i 在 t 时段的出力， $T_{j,t}$ 表示联络线 j 在时段 t 的计划功率（送入为正、输出为负）， NT 为联络线总数， D_i 为 t 时段的系统负荷， $P_{es,t}^{ch}$ 和 $P_{es,t}^{dis}$ 为储能单元 e 在 t 时段充、发电功率， E 表示储能单元的个数。 $P_{pu,t}^{Pump}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的抽水功率， $P_{pu,t}^{Drain}$ 表示发电功率。A类机组的出力已包含在等式左侧。

7.3.6. 系统一次调频备用容量约束

系统一次调频备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} P_{f,t}^{first} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{first} + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{first} \geq R_t^{first}$$

其中， R_t^{first} 表示时段 t 的系统一次调频备用容量要求； $P_{f,t}^{first}$ 、 $P_{pp,t}^{first}$ 、 $P_{h,t}^{first}$ 分别表示火电机组 i 、抽蓄电厂 pp 、水电机组 h （仅包括开机机组）在时段 t 提供的一次调频备用容量，其中，

$$P_{f,t}^{first} = \min(P_{f,t}^{\max} - P_{f,t}, P_{f,t}^{\max} \times 6\%)$$

$$P_{pp,t}^{first} = \min(P_{pp,t}^{\text{on,max}} - P_{pp,t}, P_{pp,t}^{\text{on,max}} \times 10\%)$$

$$P_{h,t}^{first} = \min(P_{h,t}^{\max} - P_{h,t}, P_{h,t}^{\max} \times 10\%)$$

$P_{pp,t}^{\text{on,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的开机容量。

7.3.7. 抽水蓄能抽发功率约束

$$P_{pu,t}^{\text{Pump}} = -\alpha_{pu,t}^{\text{Pump}} P_{pu}^{\text{Pump}}$$

$$\alpha_{pu,t}^{\text{Drain}} P_{pu,t}^{\text{Drain,min}} \leq P_{pu,t}^{\text{Drain}} \leq \alpha_{pu,t}^{\text{Drain}} P_{pu,t}^{\text{Drain,max}}$$

$$0 \leq \alpha_{pu,t}^{\text{Pump}} + \alpha_{pu,t}^{\text{Drain}} \leq 1$$

$$\alpha_{pu,t}^{\text{Pump}}, \alpha_{pu,t}^{\text{Drain}} \in \{0,1\}$$

P_{pu}^{Pump} 表示机组的额定抽水功率， $P_{pu,t}^{\text{Drain,max}}$ 和 $P_{pu,t}^{\text{Drain,min}}$ 表示最大最小发电功率， $\alpha_{pu,t}^{\text{Pump}}$ 和 $\alpha_{pu,t}^{\text{Drain}}$ 表示抽水蓄能机组的抽发状态 0-1 整数变量，1 表示开泵/开机，0 表示停泵/停机。若机组停机，则通过该约束条件可以将机组出力限定为 0；当机组开机时，该约束条件为常规的出力上下限约束。

7.3.8. 抽水蓄能库容约束

$$Cr_{pp,t}^{\text{up}} = Cr_{pp,t-1}^{\text{up}} - \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{\text{Pump}} P_{pu,t}^{\text{Pump}} + \eta_{pu}^{\text{Drain}} P_{pu,t}^{\text{Drain}}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{\text{dn}} = Cr_{pp,t-1}^{\text{dn}} + \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{\text{Pump}} P_{pu,t}^{\text{Pump}} + \eta_{pu}^{\text{Drain}} P_{pu,t}^{\text{Drain}}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{\text{up,min}} \leq Cr_{pp,t}^{\text{up}} \leq Cr_{pp,t}^{\text{up,max}}$$

$$Cr_{pp,t}^{\text{dn,min}} \leq Cr_{pp,t}^{\text{dn}} \leq Cr_{pp,t}^{\text{dn,max}}$$

$Cr_{pp,t}^{\text{up}}$ 和 $Cr_{pp,t}^{\text{dn}}$ 表示抽水蓄能电站 pp 的上下库容 (m^3)， PPU_{pp} 表示电站中抽水蓄能机组的数量， η_{pu}^{Pump} 表示抽水库容电力转换效率 (m^3/MWh)， η_{pu}^{Drain} 表示发电库容电力转换效率 (m^3/MWh)， Δt 表示每个时段的时长， $Cr_{pp,t}^{\text{up,min}}$ 、 $Cr_{pp,t}^{\text{up,max}}$ 、 $Cr_{pp,t}^{\text{dn,min}}$ 、 $Cr_{pp,t}^{\text{dn,max}}$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的最小最大上下库容， PPU_{pp} 表示抽

蓄电厂 pp 中包含的抽蓄机组数量。

7.3.9. 线路潮流约束

线路潮流约束可以描述为：

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{l-e} P_{es,t}^{dis} + G_{l-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} T_{j,t} \\ + \sum_{pu=1}^{PU} (G_{l-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{l-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{l-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{\max}$$

其中， P_l^{\max} 表示线路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 表示机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 表示联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-e} 为节点 e 对线路 l 的灵敏度因子； K 表示系统的节点数量； G_{l-k} 表示节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 表示节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量。

7.3.10. 断面潮流约束

考虑关键断面的潮流约束，该约束可以描述为：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{s-e} P_{es,t}^{dis} + G_{s-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} T_{j,t} \\ + \sum_{pu=1}^{PU} (G_{s-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{s-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{s-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{\max}$$

其中， P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别表示断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 表示机组 i 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-e} 表示储能 es 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-j} 表示联络线 j 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对

断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-k} 表示节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

8. 实时出清

8.1. 经济调度机组组合 (SCED)

8.1.1. 目标函数

实时市场出清模型目标函数为

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}(P_{i,t}) + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M [SL_l^+ + SL_l^-] + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M [SL_s^+ + SL_s^-] \\ & + \sum_{t=1}^T ML [SL_{load}^+ + SL_{load}^-] + \sum_{t=1}^T MR [SL_{pr}^+] + \sum_{es=1}^{ES} \sum_{t=1}^T [C_{es,t}(P_{es,t})] + \sum_{pu=1}^{PU} \sum_{t=1}^T [C_{pu,t}(P_{pu,t})] \\ & + \sum_{pp=1}^{PP} \sum_{t=1}^T MP [SL_{pp,t}^+ + SL_{pp,t}^-] \} \end{aligned}$$

其中：

N 表示机组的总台数，包括非市场机组与市场机组；

T 表示所考虑的总时段数，其中 D 日每 15 分钟一个时段；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 表示机组 i 在时段 t 的运行费用，是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数；

M 表示用于市场出清优化的网络潮流约束松弛罚因子， ML 表示用于市场出清优化的系统负荷平衡约束松弛罚因子， MR 表示用于市场出清优化的备用约束松弛罚因子； MP 表示用于实时市场抽水蓄能库容上下限约束松弛罚因子；

SL_{load}^+ 、 SL_{load}^- 分别表示系统负荷的正、反向松弛变量；

SL_{pr}^+ 表示紧急备用的松弛变量；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 表示线路总数；

SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量； NS 表示断面总数；

$SL_{pp,t}^+$ 和 $SL_{pp,t}^-$ 表示实时市场抽水蓄能库容上下限约束正负松弛变量；

ES 表示储能交易单元总数， $C_{es,t}(P_{es,t})$ 表示储能 es 在时段 t 的运行费用；

PU 表示抽水蓄能机组的台数， $C_{pu,t}(P_{pu,t})$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的运行费用。

8.1.2. 抽水蓄能机组出力表达式

$$P_{pu,t} = P_{pu,t}^{Pump} + P_{pu,t}^{Drain}$$

$$P_{pu,t} = \sum_{m=1}^{NP} P_{pu,t,m}$$

机组发电时的表达式为：

$$0 \leq P_{pu,t,m} \leq P_{pu,m}^{\max} - P_{pu,m}^{\min}$$

机组抽水时的表达式为：

$$P_{pu,t,m} = P_{pu,t}^{Pump}$$

其中， NP 表示抽水蓄能机组报价总段数， $P_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力， $P_{pu,m}^{\max}$ 、 $P_{pu,m}^{\min}$ 分别表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间上、下界。

8.1.3. 抽水蓄能机组运行费用表达式

$$C_{pu,t}(P_{pu,t}) = \sum_{m=1}^{NP} C_{pu,m} P_{pu,t,m}$$

其中， NP 表示机组报价总段数， $C_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格。

8.1.4. 负荷平衡约束

对于每个时段 t ，负荷平衡约束可以描述为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{dis} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{ch} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Pump} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Drain} + SL_{load}^+ - SL_{load}^- = \sum_{u=1}^U D_{u,t}$$

其中， $P_{i,t}$ 表示所有机组 i 在 t 时段的出力， $T_{j,t}$ 表示联络线 j 在时段 t 的计划功率（送入为正、输出为负）， NT 为联络线总数， D_i 为 t 时段的系统负荷， $P_{es,t}^{ch}$ 和 $P_{es,t}^{dis}$ 为储能单元 e 在 t 时段充、发电功率， E 表示储能单元的个数。 $P_{pu,t}^{Pump}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的抽水功率， $P_{pu,t}^{Drain}$ 表示发电功率。A类机组的出力已包含在等式左侧。

8.1.5. 抽水蓄能抽发功率约束

$$P_{pu,t}^{Pump} = -\alpha_{pu,t}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump}$$

$$\alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,min} \leq P_{pu,t}^{Drain} \leq \alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,max}$$

$$0 \leq \alpha_{pu,t}^{Pump} + \alpha_{pu,t}^{Drain} \leq 1$$

$$\alpha_{pu,t}^{Pump}, \alpha_{pu,t}^{Drain} \in \{0,1\}$$

$P_{pu,t}^{Pump}$ 表示机组的额定抽水功率， $P_{pu,t}^{Drain,max}$ 和 $P_{pu,t}^{Drain,min}$ 表示最大最小发电功率， $\alpha_{pu,t}^{Pump}$ 和 $\alpha_{pu,t}^{Drain}$ 表示抽水蓄能机组的抽发状态0-1整数变量，1表示开泵/开机，0表示停泵/停机。

8.1.6. 抽水蓄能库容约束

$$Cr_{pp,t}^{up} = Cr_{pp,t-1}^{up} - \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{dn} = Cr_{pp,t-1}^{dn} + \sum_{pu=1}^{PPU_{pp}} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{up,\min} \leq Cr_{pp,t}^{up} \leq Cr_{pp,t}^{up,\max}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,\min} \leq Cr_{pp,t}^{dn} \leq Cr_{pp,t}^{dn,\max}$$

$Cr_{pp,t}^{up}$ 和 $Cr_{pp,t}^{dn}$ 表示抽水蓄能电站 pp 的上下库容 (m^3) , PP 表示电站中抽水蓄能机组的数量, η_{pu}^{Pump} 表示抽水容量电力转换效率 (m^3/MWh) , η_{pu}^{Drain} 表示发电容量电力转换效率 (m^3/MWh) , Δt 表示每个时段的时长, $Cr_{pp,t}^{up,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,\max}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\max}$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的最小最大上下库容, PPU_{pp} 表示抽蓄电厂 pp 中包含的抽蓄机组数量。

8.1.7. 实时市场抽水蓄能库容上下限约束

$$Cr_{pp,t}^{up,DA} - Cr^{bw} \leq Cr_{pp,t}^{up,RT} + SL_{pp,t}^+ - SL_{pp,t}^- \leq Cr_{pp,t}^{up,DA} + Cr^{bw}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,DA} - Cr^{bw} \leq Cr_{pp,t}^{dn,RT} + SL_{pp,t}^+ - SL_{pp,t}^- \leq Cr_{pp,t}^{dn,DA} + Cr^{bw}$$

其中, $Cr_{pp,t}^{up,RT}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,RT}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,DA}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,DA}$ 表示实时和日前的上下库容, Cr^{bw} 表示带宽度。

为确保高峰时段抽水蓄能场站顶峰能力, 电力调度机构可按照“以发定抽”原则最大化安排蓄能机组低谷抽水, 在相应时段设置库容期望约束; 为保障低谷时段清洁能源消纳和系统安全, 确保低谷时段抽水蓄能场站调峰能力, 可按照“以抽定发”原则最大化安排蓄能机组高峰发电, 在相应时段设置库容期望约束。

8.1.8. 抽水蓄能机组群最大最小开机台数约束

抽水蓄能机组群内机组开机台数应在给定范围内, 其约束条件可以描述为:

$$CR_{j,t}^{\min} \leq \sum_{pu \in j} (\alpha_{pu,t}^{Pump} + \alpha_{pu,t}^{Drain}) \leq CR_{j,t}^{\max}$$

其中 $CR_{j,t}^{\max}$ 、 $CR_{j,t}^{\min}$ 为抽水蓄能机组群 j 在时段 t 的最大、最小开机台数。

8.1.9. 抽水蓄能最小连续开机时间约束

$$(\alpha_{pu,t-1}^{Drain} - \alpha_{pu,t}^{Drain}) t_{pu}^{drain,up} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{up}-1}^{t-1} (\alpha_{pu,T}^{Drain})$$

其中， $t_{pu}^{drain,up}$ 表示抽水蓄能机组最小连续开机时间。

8.1.10. 抽水蓄能最小连续开泵时间约束

$$(\alpha_{pu,t-1}^{Pump} - \alpha_{pu,t}^{Pump}) t_{pu}^{pump,up} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{up}-1}^{t-1} (\alpha_{pu,T}^{Pump})$$

其中， $t_{pu}^{pump,up}$ 表示抽水蓄能机组最小连续开泵时间。

8.1.11. 抽水蓄能最小连续停机时间约束

$$(\alpha_{pu,t}^{Pump} - \alpha_{pu,t-1}^{Pump}) t_{pu}^{dn} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pu,T}^{Pump} - \alpha_{pu,T}^{Drain})$$

$$(\alpha_{pu,t}^{Drain} - \alpha_{pu,t-1}^{Drain}) t_{pu}^{dn} \leq \sum_{T=t-t_{pu}^{dn}-1}^{t-1} (1 - \alpha_{pu,T}^{Pump} - \alpha_{pu,T}^{Drain})$$

其中， t_{pu}^{dn} 表示抽水蓄能机组最小连续停机时间。

8.1.12. 同厂抽水蓄能机组同抽同放约束

$$\begin{cases} \alpha_{pu,t}^{Pump} = 0 & \text{当存在厂内其他机组放水时} \\ \alpha_{pu,t-1}^{Drain} = 0 & \text{当存在厂内其他机组抽水时} \end{cases}$$

为充分发挥市场对抽水蓄能机组调节能力的激励引导，保障电网安全稳定运行，参与现货市场交易的抽蓄蓄能机组须满足同厂抽水蓄能机组同抽同放约束，暂不执行与全省其余抽水蓄能机组同抽同放约束。

8.1.13. 同厂抽水蓄能机组增开机泵台数限制

$$\sum_{pu=1}^{PP} (\alpha_{pu,t}^{Pump} - \alpha_{pu,t-1}^{Pump}) \leq PTS_{pp}$$

$$\sum_{pu=1}^{PP} (\alpha_{pu,t}^{Drain} - \alpha_{pu,t-1}^{Drain}) \leq UTS_{pp}$$

其中， PTS_{pp} 表示抽水蓄能电厂同时最大增加开泵台数， UTS_{pp} 表示抽水蓄能电厂同时最大增加开机台数。

8.1.14. 线路潮流约束

线路潮流约束可以描述为：

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{l-e} P_{es,t}^{dis} + G_{l-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} T_{j,t}$$

$$+ \sum_{pu=1}^{PU} (G_{l-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{l-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{l-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{\max}$$

其中， P_l^{\max} 表示线路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 表示机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 表示联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-e} 为节点 e 对线路 l 的灵敏度因子； K 表示系统的节点数量； G_{l-k} 表示节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 表示节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量。

8.1.15. 断面潮流约束

考虑关键断面的潮流约束，该约束可以描述为：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{s-e} P_{es,t}^{dis} + G_{s-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} T_{j,t}$$

$$+ \sum_{pu=1}^{PU} (G_{s-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{s-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{s-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{\max}$$

其中， P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别表示断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 表示机组 i 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-e} 表示储能 es 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-j} 表示联络线 j 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-k} 表示节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

8.1.16. 抽蓄机组开机准备时间约束

$$\begin{cases} \alpha_{pu,t}^{Pump} = 0 \\ \alpha_{pu,t}^{Drain} = 0 \end{cases} \quad t=1 \text{ and } \alpha_{pu,0}^{Pump} = 0 \text{ and } \alpha_{pu,0}^{Drain} = 0$$

考虑抽蓄机组开机时间限制，为确保下发的计划值可执行，抽蓄机组初始点计划停机的情况下，第一个计算时刻不开机。

8.1.17. 系统一次调频备用容量约束

系统一次调频备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} P_{f,t}^{first} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{first} + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{first} \geq R_t^{first}$$

其中， R_t^{first} 表示时段 t 的系统一次调频备用容量要求； $P_{f,t}^{first}$ 、 $P_{pp,t}^{first}$ 、 $P_{h,t}^{first}$ 分别表示火电机组 i 、抽蓄电厂 pp 、水电机组 h （仅包括开机机组）在时段 t 提供的一次调频备用容量，其中，

$$P_{f,t}^{first} = \min(P_{f,t}^{\max} - P_{f,t}, P_{f,t}^{\max} \times 6\%)$$

$$P_{pp,t}^{first} = \min(P_{pp,t}^{\text{on,max}} - P_{pp,t}, P_{pp,t}^{\text{on,max}} \times 10\%)$$

$$P_{h,t}^{first} = \min(P_{h,t}^{\max} - P_{h,t}, P_{h,t}^{\max} \times 10\%)$$

$P_{pp,t}^{\text{on,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的开机容量。

8.1.18. 系统紧急备用容量约束

为应对系统负荷预测偏差以及各种实际运行事故带来的系统供需不平衡波动，需保证各时段开机容量满足系统的最小紧急备用容量要求。该约束可以描述为：

$$\sum_{i \in NT} \alpha_{i,t} R_{i,t}^T + \sum_{i \in NT} R_{i,t}^H + \sum_{i \in NF} \alpha_{i,t} R_{i,t}^F + \sum_{pp \in PP} R_{pp,t}^P + SL_{pr}^+ \geq R_t^U + R_t^{red}$$

其中， R_t^U 表示时段 t 的系统紧急备用容量需求； R_t^{red} 表示系统备用减扣值。 NT 表示非固定出力火电机组集合； $\alpha_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的启停状态， $\alpha_{i,t} = 0$ 表示机组停机， $\alpha_{i,t} = 1$ 表示机组开机； $R_{i,t}^T$ 表示非固定出力火电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 NH 表示常规水电机组集合， $R_{i,t}^H$ 表示常规水电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 NF 表示固定出力火电机组集合， $R_{i,t}^F$ 表示固定出力火电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 PP 表示抽蓄电厂集合， $R_{pp,t}^P$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 的紧急备用。 SL_{pr}^+ 表示正备用的松弛变量。

若某蓄能厂的计划总出力为非负数，紧急备用为限开机容量减计划总出力；若蓄能厂的计划总出力为负数，紧急备用为计划总出力取负，可以描述为：

$$\begin{cases} R_{pp,t}^P = P_{pp,t}^{max} - \sum_{i \in pp} P_{i,t}, \sum_{i \in pp} P_{i,t} \geq 0 \\ R_{pp,t}^P = -\sum_{i \in pp} P_{i,t}, \sum_{i \in pp} P_{i,t} < 0 \\ P_{pp,t}^{max} = \sum_{i \in pp} P_{i,t}^{on,max} \end{cases}, pp \in NP$$

其中， $\sum_{i \in pp} P_{i,t}$ 表示蓄能厂 pp 在时段 t 的计划总出力； $P_{pp,t}^{max}$ 表示限开机容量。

8.2. 节点电价计算模型 (LPC)

8.2.1. 目标函数

实时市场出清模型目标函数为

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}(P_{i,t}) + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M' [SL_l^+ + SL_l^-] + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M' [SL_s^+ + SL_s^-] \\ & + \sum_{t=1}^T ML' [SL_{load}^+ + SL_{load}^-] + \sum_{t=1}^T MR' [SL_{pr}^+] + \sum_{es=1}^{ES} \sum_{t=1}^T [C_{es,t}(P_{es,t})] + \sum_{pu=1}^{PU} \sum_{t=1}^T [C_{pu,t}(P_{pu,t})] \\ & + \sum_{pp=1}^{PP} \sum_{t=1}^T MP' [SL_{pp,t}^+ + SL_{pp,t}^-] \} \end{aligned}$$

其中：

N 表示机组的总台数，包括非市场机组与市场机组；

T 表示所考虑的总时段数，其中 D 日每 15 分钟一个时段；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 表示机组 i 在时段 t 的运行费用，是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数；

M' 表示用于节点电价计算的潮流约束松弛罚因子，

ML' 表示用于节点电价计算的负荷平衡约束松弛罚因子，

MR' 表示用于节点电价计算的备用约束松弛罚因子； MP' 表示

用于实时市场节点电价计算的抽水蓄能库容上下限约束松弛罚因子；

SL_{load}^+ 、 SL_{load}^- 分别表示系统负荷的正、反向松弛变量；

SL_{pr}^+ 表示紧急备用的松弛变量；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 表示线路总数；

SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量； NS 表示断面总数；

$SL_{pp,t}^+$ 和 $SL_{pp,t}^-$ 表示实时市场抽水蓄能库容上下限约束正负松弛变量；

ES 表示储能交易单元总数， $C_{es,t}(P_{es,t})$ 表示储能 es 在时段 t 的运行费用；

PU 表示抽水蓄能机组的台数， $C_{pu,t}(P_{pu,t})$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的运行费用。

8.2.2. 抽水蓄能机组出力表达式

$$P_{pu,t} = P_{pu,t}^{Pump} + P_{pu,t}^{Drain}$$

$$P_{pu,t} = \sum_{m=1}^{NP} P_{pu,t,m}$$

机组发电时的表达式为：

$$0 \leq P_{pu,t,m} \leq P_{pu,m}^{\max} - P_{pu,m}^{\min}$$

机组抽水时的表达式为：

$$P_{pu,t,m} = P_{pu,t}^{Pump}$$

其中， NP 表示抽水蓄能机组报价总段数， $P_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力， $P_{pu,m}^{\max}$ 、

$P_{pu,m}^{\min}$ 分别表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间上、下界。

8.2.3. 抽水蓄能机组出力上下限约束

$$P_{pu,t}^{\min} \leq P_{pu,t} \leq P_{pu,t}^{\max}$$

对于 SCED 优化结果中停机的抽水蓄能机组, 上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 均取为零; 对于不可定价机组, 上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 均取 SCED 优化结果中机组 i 在时段 t 的中标出力 $P_{pu,t}^{SCED}$; 对于可定价机组, 上式中 $P_{pu,t}^{\min}$ 、 $P_{pu,t}^{\max}$ 取如下数值:

$$P_{pu,t}^{\min} = \max\{(1-\delta)P_{pu,t}^{SCED}, (P_{pu,t}^{\min})^{SCED}\}$$

$$P_{pu,t}^{\max} = \min\{(1+\delta)P_{pu,t}^{SCED}, (P_{pu,t}^{\max})^{SCED}\}$$

其中, δ 为 LMP 模型中允许机组偏离日前 SCED 优化结果的比例, $(P_{pu,t}^{\min})^{SCED}$ 、 $(P_{pu,t}^{\max})^{SCED}$ 分别为日前 SCED 模型中的机组最小、最大出力。

8.2.4. 抽水蓄能机组运行费用表达式

$$C_{pu,t}(P_{pu,t}) = \sum_{m=1}^{NP} C_{pu,m} P_{pu,t,m}$$

其中, NP 表示机组报价总段数, $C_{pu,t,m}$ 表示抽水蓄能机组 pu 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格。

8.2.5. 负荷平衡约束

对于每个时段 t , 负荷平衡约束可以描述为:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{dis} + \sum_{es=1}^E P_{es,t}^{ch} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Pump} + \sum_{pu=1}^{PU} P_{pu,t}^{Drain} + SL_{load}^+ - SL_{load}^- = \sum_{u=1}^U D_{u,t}$$

其中, $P_{i,t}$ 表示所有机组 i 在 t 时段的出力, $T_{j,t}$ 表示联络线 j 在时段 t 的计划功率 (送入为正、输出为负), NT 为联

络线总数, D_t 为 t 时段的系统负荷, $P_{es,t}^{ch}$ 和 $P_{es,t}^{dis}$ 为储能单元 e 在 t 时段充、发电功率, E 表示储能单元的个数。 $P_{pu,t}^{Pump}$ 表示抽水蓄能机组 pu 在时段 t 的抽水功率, $P_{pu,t}^{Drain}$ 表示发电功率。 A 类机组的出力已包含在等式左侧。

8.2.6. 抽水蓄能抽发功率约束

$$P_{pu,t}^{Pump} = -\alpha_{pu,t}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump}$$

$$\alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,\min} \leq P_{pu,t}^{Drain} \leq \alpha_{pu,t}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain,\max}$$

$$0 \leq \alpha_{pu,t}^{Pump} + \alpha_{pu,t}^{Drain} \leq 1$$

$$\alpha_{pu,t}^{Pump}, \alpha_{pu,t}^{Drain} \in \{0,1\}$$

$P_{pu,t}^{Pump}$ 表示机组的额定抽水功率, $P_{pu,t}^{Drain,\max}$ 和 $P_{pu,t}^{Drain,\min}$ 表示最大最小发电功率, $\alpha_{pu,t}^{Pump}$ 和 $\alpha_{pu,t}^{Drain}$ 表示抽水蓄能机组的抽发状态 0-1 整数变量, 1 表示开泵/开机, 0 表示停泵/停机。若机组停机, 则通过该约束条件可以将机组出力限定为 0; 当机组开机时, 该约束条件为常规的出力上下限约束。

8.2.7. 抽水蓄能库容约束

$$Cr_{pp,t}^{up} = Cr_{pp,t-1}^{up} - \sum_{pu=1}^{PP} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{dn} = Cr_{pp,t-1}^{dn} + \sum_{pu=1}^{PP} (\eta_{pu}^{Pump} P_{pu,t}^{Pump} + \eta_{pu}^{Drain} P_{pu,t}^{Drain}) \Delta t$$

$$Cr_{pp,t}^{up,\min} \leq Cr_{pp,t}^{up} \leq Cr_{pp,t}^{up,\max}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,\min} \leq Cr_{pp,t}^{dn} \leq Cr_{pp,t}^{dn,\max}$$

$Cr_{pp,t}^{up}$ 和 $Cr_{pp,t}^{dn}$ 表示抽水蓄能电站 pp 的上下库容 (m^3), PP 表示电站中抽水蓄能机组的数量, η_{pu}^{Pump} 表示抽水库容电力转换效率 (m^3/MWh), η_{pu}^{Drain} 表示发电库容电力转换效率 (m^3/MWh),

Δt 表示每个时段的时长， $Cr_{pp,t}^{up,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,\max}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\min}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,\max}$ 表示抽水蓄能电站在时段 t 的最小最大上下库容。

8.2.8. 实时市场抽水蓄能库容上下限约束

$$Cr_{pp,t}^{up,DA} - Cr^{bw} \leq Cr_{pp,t}^{up,RT} + SL_{pp,t}^+ - SL_{pp,t}^- \leq Cr_{pp,t}^{up,DA} + Cr^{bw}$$

$$Cr_{pp,t}^{dn,DA} - Cr^{bw} \leq Cr_{pp,t}^{dn,RT} + SL_{pp,t}^+ - SL_{pp,t}^- \leq Cr_{pp,t}^{dn,DA} + Cr^{bw}$$

其中， $Cr_{pp,t}^{up,RT}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,RT}$ 、 $Cr_{pp,t}^{up,DA}$ 、 $Cr_{pp,t}^{dn,DA}$ 表示实时和日前的上下库容， Cr^{bw} 表示带宽度。

8.2.9. 线路潮流约束

线路潮流约束可以描述为：

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{l-e} P_{es,t}^{dis} + G_{l-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} T_{j,t}$$

$$+ \sum_{pu=1}^{PU} (G_{l-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{l-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{l-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{\max}$$

其中， P_l^{\max} 表示线路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 表示机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 表示联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-e} 为节点 e 对线路 l 的灵敏度因子； K 表示系统的节点数量； G_{l-k} 表示节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 表示节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别表示线路 l 的正、反向潮流松弛变量。

8.2.10. 断面潮流约束

考虑关键断面的潮流约束，该约束可以描述为：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{es=1}^{ES} (G_{s-e} P_{es,t}^{dis} + G_{s-e} P_{es,t}^{ch}) + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} T_{j,t}$$

$$+ \sum_{pu=1}^{PU} (G_{s-p} P_{pu,t}^{Pump} + G_{s-p} P_{pu,t}^{Drain}) - \sum_{k=1}^K G_{s-k} \left(\sum_{u \in k} D_{u,t} \right) - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{\max}$$

其中， P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别表示断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 表示机组 i 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-e} 表示储能 es 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-j} 表示联络线 j 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-p} 表示抽水蓄能机组 pu 所在节点 p 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子； G_{s-k} 表示节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别表示断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

8.2.11. 抽蓄机组开机准备时间约束

$$\begin{cases} \alpha_{pu,t}^{Pump} = 0 \\ \alpha_{pu,t}^{Drain} = 0 \end{cases} \quad t=1 \text{ and } \alpha_{pu,0}^{Pump} = 0 \text{ and } \alpha_{pu,0}^{Drain} = 0$$

考虑抽蓄机组开机时间限制，为确保下发的计划值可执行，抽蓄机组初始点计划停机的情况下，第一个计算时刻不开机。

8.2.12. 系统一次调频备用容量约束

系统一次调频备用容量约束可以描述为：

$$\sum_{f=1}^{NF} P_{f,t}^{first} + \sum_{pp=1}^{PP} P_{pp,t}^{first} + \sum_{h=1}^{NH} P_{h,t}^{first} \geq R_t^{first}$$

其中， R_t^{first} 表示时段 t 的系统一次调频备用容量要求； $P_{f,t}^{first}$ 、 $P_{pp,t}^{first}$ 、 $P_{h,t}^{first}$ 分别表示火电机组 i 、抽蓄电厂 pp 、水电机组 h （仅包括开机机组）在时段 t 提供的一次调频备用容量，其中，

$$P_{f,t}^{first} = \min(P_{f,t}^{\max} - P_{f,t}, P_{f,t}^{\max} \times 6\%)$$

$$P_{pp,t}^{first} = \min(P_{pp,t}^{\text{on,max}} - P_{pp,t}, P_{pp,t}^{\text{on,max}} \times 10\%)$$

$$P_{h,t}^{first} = \min(P_{h,t}^{\max} - P_{h,t}, P_{h,t}^{\max} \times 10\%)$$

$P_{pp,t}^{\text{on,max}}$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 内的开机容量。

8.2.13. 系统紧急备用容量约束

为应对系统负荷预测偏差以及各种实际运行事故带来的系统供需不平衡波动，需保证各时段开机容量满足系统的最小紧急备用容量要求。该约束可以描述为：

$$\sum_{i \in NT} \alpha_{i,t} R_{i,t}^T + \sum_{i \in NT} R_{i,t}^H + \sum_{i \in NF} \alpha_{i,t} R_{i,t}^F + \sum_{pp \in NP} R_{pp,t}^P + SL_{pr}^+ \geq R_t^U + R_t^{red}$$

其中， R_t^U 表示时段 t 的系统紧急备用容量需求； R_t^{red} 表示系统备用减扣值。 NT 表示非固定出力火电机组集合； $\alpha_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的启停状态， $\alpha_{i,t} = 0$ 表示机组停机， $\alpha_{i,t} = 1$ 表示机组开机； $R_{i,t}^T$ 表示非固定出力火电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 NH 表示常规水电机组集合， $R_{i,t}^H$ 表示常规水电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 NF 表示固定出力火电机组集合， $R_{i,t}^F$ 表示固定出力火电机组 i 在时段 t 的紧急备用。 NP 表示抽蓄电厂集合， $R_{pp,t}^P$ 表示抽蓄电厂 pp 在时段 t 的紧急备用。 SL_{pr}^+ 表示正备用的松弛变量。

若某蓄能厂的计划总出力为非负数，紧急备用为限开机容量减计划总出力；若蓄能厂的计划总出力为负数，紧急备用为计划总出力取负，可以描述为：

$$\begin{cases} R_{pp,t}^P = P_{pp,t}^{max} - \sum_{i \in pp} P_{i,t}, \sum_{i \in pp} P_{i,t} \geq 0 \\ R_{pp,t}^P = -\sum_{i \in pp} P_{i,t}, \sum_{i \in pp} P_{i,t} < 0 \\ P_{pp,t}^{max} = \sum_{i \in pp} P_{i,t}^{on,max} \end{cases}, pp \in NP$$

其中， $\sum_{i \in pp} P_{i,t}$ 表示蓄能厂 pp 在时段 t 的计划总出力； $P_{pp,t}^{max}$

表示限开机容量。

9. 市场定价

现货电能量市场中，抽水蓄能以所在节点的小时平均节点电价作为相应时段的抽水、发电结算价格，其中小时平均节点电价为每小时内出清形成的 4 个 15 分钟节点电价的算术平均值。

10. 考核机制

试点交易的抽水蓄能按照常规市场机组执行限高、限低和实时调度计划执行偏差考核。

限高、限低考核：限高指抽水蓄能实际发电能力上限达不到最大发电功率的情况，限低指抽水蓄能实际发电能力下限达不到最小发电功率或实际抽水能力达不到额定抽水功率的情况。

在抽水蓄能实际发生限高的时段，按以下公式计算考核费用：

$$R_{\text{限高}} = \sum_{t=1}^n \left[(P_{\text{max}} - P_{\text{限高}}) \times T_t \times LMP_{i,t,\text{实时}} \times \alpha_1 \right]$$

其中， n 为机组发生实际限高的时段，以小时为单位进行累计；

P_{\max} 为机组的最大发电功率；

$P_{\text{限高}}$ 为机组的实际发电能力上限；

T_t 为第 t 小时内机组实际发生限高的时间长度；

$LMP_{i,t,\text{实时}}$ 为第 t 小时内机组所在节点的实时电能量市场结算价格(每 15 分钟实时电能量市场节点价格的算术平均值)；

α_1 为限高考核系数。

在抽水蓄能实际发生限低的时段，按照如下公式计算考核费用：

$$R_{\text{限低}} = \sum_{t=1}^n [(P_{\text{限低}} - P_{\min}) \times T_t \times LMP_{i,t,\text{实时}} \times \alpha_2]$$

其中， n 为机组实际发生限低的时段，以小时为单位进行累计；

P_{\min} 为机组的最小发电功率或额定抽水功率；

$P_{\text{限低}}$ 为机组的实际发电能力下限或实际抽水能力；

T_t 为第 t 小时内机组实际发生限低的时间长度；

$LMP_{i,t,\text{实时}}$ 为第 t 小时内机组所在节点的实时电能量市场结算价格(每 15 分钟实时电能量市场节点价格的算术平均值)；

α_2 为限低考核系数。

实时调度计划执行偏差考核：抽水蓄能发电及抽水能力受水头影响，综合考虑水力机械固有特性，确定发电计划允许的执行偏差率。

抽水蓄能实时调度计划执行偏差所对应的结算费用按照如下公式计算：

$$R_{\text{实时调度计划执行偏差}} = \sum_{t \in \text{调度计划执行偏差时段}} \left[\left(Q_{i,t,\text{实际}} - \frac{P_{t-1} + P_{t-2} + P_{t-3} + P_{t-4}}{4} \times D_i \times 1h \right) \times LMP_{i,t,\text{实时}} \times \beta_3 \right]$$

其中：

发电状态时， $D_i = 1 - d_i$ ，抽水状态时， $D_i = \frac{1}{1 - d_i}$ ， d_i 为抽水蓄能 i 的综合厂用电率；

t 为抽水蓄能 i 实时发电计划执行偏差时段，以小时为单位进行累计；

$Q_{i,t,\text{实际}}$ 为抽水蓄能实际运行后第 t 小时的实际净发电电量，按实际发电电量减实际抽水电量计算；

P_{t-1} 、 P_{t-2} 、 P_{t-3} 、 P_{t-4} 分别为第 t 小时内每个 15 分钟电力调度机构向抽水蓄能 i 下达的出力计划指令；

$1h$ 为 1 小时；

$LMP_{i,t,\text{实时}}$ 为第 i 小时内抽水蓄能所在节点的实时电能量市场结算价格（每 15 分钟实时电能量市场节点价格的算术平均值）；

β_3 为实时调度计划执行偏差考核系数。

若考核费用计算结果为负，则不予考核。

抽水蓄能入市后不执行南方区域“两个细则”发电能力、抽水能力受限的等效停运时间折算和调度计划偏差考核。

11. 交易结算

抽水蓄能电能量交易电费根据发电、抽水电量分为两个交易结算单元按“日清月结”模式结算，由中长期合约电费、中长期阻塞电费、日前偏差电费、实时偏差电费和考核电费组成，其中考核电费全部计入发电交易结算单元。计算公式

如下:

$$R^{\text{发电}} = R_{\text{中长期合约}}^{\text{发电}} + R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{发电}} + R_{\text{日前偏差}}^{\text{发电}} + R_{\text{实时偏差}}^{\text{发电}} + R_{\text{考核}}$$

$$R^{\text{抽水}} = R_{\text{中长期合约}}^{\text{抽水}} + R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{抽水}} + R_{\text{日前偏差}}^{\text{抽水}} + R_{\text{实时偏差}}^{\text{抽水}}$$

其中:

$R^{\text{发电}}$ 、 $R^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的电能量交易电费;

$R_{\text{中长期合约}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{中长期合约}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的中长期合约电费;

$R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的中长期阻塞电费;

$R_{\text{日前偏差}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{日前偏差}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的前日偏差电费;

$R_{\text{实时偏差}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{实时偏差}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的实时偏差电费;

$R_{\text{考核}}$ 为考核电费。

11.1. 中长期合约电费

抽水蓄能中长期净合约分时电量按照净合约综合价格结算全电量电费。

$$R_{\text{中长期合约}}^{\text{发电}} = \sum_t (Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}} \times P_{\text{中长期净合约},t})$$

$$R_{\text{中长期合约}}^{\text{抽水}} = \sum_t (Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}} \times P_{\text{中长期净合约},t})$$

其中:

$R_{\text{中长期合约}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{中长期合约}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的中长期合约电费;

$Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}}$ 、 $Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}}$ 分别为时段 t 发电、抽水交易结算单元的中长期净合约量，中长期合约净卖出时，时段 t 合约计入发电交易结算单元，以正值表示，反之计入抽水交易结算单元，以负值表示；

$P_{\text{中长期净合约},t}$ 为时段 t 的中长期净合约综合价格。

11.2. 中长期阻塞电费

抽水蓄能单独结算中长期阻塞电费，按照中长期净合约分时电量和所在节点与统一结算点日前市场分时价格的差价计算。

$$R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{发电}} = \sum_t \left[Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}} \times (P_{\text{日前},t} - P_{\text{日前统一},t}) \right]$$

$$R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{抽水}} = \sum_t \left[Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}} \times (P_{\text{日前},t} - P_{\text{日前统一},t}) \right]$$

其中：

$R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{中长期阻塞}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的中长期阻塞电费；

$Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}}$ 、 $Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}}$ 分别为时段 t 发电、抽水交易结算单元的中长期净合约量，中长期合约净卖出时，时段 t 合约计入发电交易结算单元，以正值表示，反之计入抽水交易结算单元，以负值表示；

$P_{\text{日前},t}$ 为时段 t 的所在节点日前市场价格；

$P_{\text{日前统一},t}$ 为时段 t 的统一结算点日前市场价格。

11.3. 日前偏差电费

抽水蓄能每小时日前市场出清电量与中长期合约电量的偏差，按照所在节点日前市场分时价格结算。

$$R_{\text{日前偏差}}^{\text{发电}} = \sum_t \left[(Q_{\text{日前},t}^{\text{发电}} - Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}}) \times P_{\text{日前},t} \right]$$

$$R_{\text{日前偏差}}^{\text{抽水}} = \sum_t \left[(Q_{\text{日前},t}^{\text{抽水}} - Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}}) \times P_{\text{日前},t} \right]$$

其中：

$R_{\text{日前偏差}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{日前偏差}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的日前偏差电费；

$Q_{\text{日前},t}^{\text{发电}}$ 、 $Q_{\text{日前},t}^{\text{抽水}}$ 分别为时段 t 的日前市场出清发电、抽水交易结算单元电量，日前市场出清为发电时，时段 t 日前市场出清电量计入发电交易结算单元，以正值表示，反之计入抽水交易结算单元，以负值表示；

$Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{发电}}$ 、 $Q_{\text{中长期净合约},t}^{\text{抽水}}$ 分别为时段 t 发电、抽水交易结算单元的中长期净合约量，中长期合约净卖出时，时段 t 合约计入发电交易结算单元，以正值表示，反之计入抽水交易结算单元，以负值表示；

$P_{\text{日前},t}$ 为时段 t 的所在节点日前市场价格。

11.4. 实时偏差电费

抽水蓄能每小时实际充发电量与日前市场出清电量的偏差，按照所在节点实时市场分时价格结算。

$$R_{\text{实时偏差}}^{\text{发电}} = \sum_t \left[(Q_{\text{实际},t}^{\text{发电}} - Q_{\text{日前},t}^{\text{发电}}) \times P_{\text{实时},t} \right]$$

$$R_{\text{实时偏差}}^{\text{抽水}} = \sum_t \left[(Q_{\text{实际},t}^{\text{抽水}} - Q_{\text{日前},t}^{\text{抽水}}) \times P_{\text{实时},t} \right]$$

其中：

$R_{\text{实时偏差}}^{\text{发电}}$ 、 $R_{\text{实时偏差}}^{\text{抽水}}$ 分别为发电、抽水交易结算单元的实时偏差电费；

$Q_{实际,t}^{发电}$ 、 $Q_{实际,t}^{抽水}$ 分别为时段 t 的发电、抽水交易结算单元实际计量电量（即该时段计量上网、下网电量），发电电量以正值表示、抽水电量以负值表示；

$Q_{日前,t}^{发电}$ 、 $Q_{日前,t}^{抽水}$ 分别为时段 t 的日前市场出清发电、抽水交易结算单元电量，日前市场出清为发电时，时段 t 日前市场出清电量计入发电交易结算单元，以正值表示，反之计入抽水交易结算单元，以负值表示；

$P_{实时,t}$ 为时段 t 的所在节点实时市场价格。

11.5. 考核电费

抽水蓄能功率限高考核费用、功率限低考核费用、实时调度计划执行偏差考核费用以月度为单位，由全体工商业用户按当月用电量比例分享。

11.6. 其他电费

现阶段，抽水蓄能暂不参与用户侧峰谷平衡电费等市场分摊及返还电费计算。抽水蓄能机组因非自身原因导致在现货电能量市场中的收益低于运行成本费用和电能量报价费用的较小值时，根据抽水蓄能机组运行成本费用、报价费用、现货电能量市场中的收益等计算系统运行补偿费用。现阶段抽水蓄能暂不执行系统运行补偿，后续拟结合试点交易情况确定，具体实施办法另行制定。深度调峰补偿按“两个细则”相关规定执行。抽水蓄能抽水电量不执行输配电价、不承担政府性基金及附加。抽水蓄能容量电费按照政府批复的年容量电费结算。

11.7. 结算衔接

1.抽水蓄能进入电能量市场后，其电量电费不再计入保障居民、农业用电价格稳定产生的新增损益分摊。

2.试点交易的抽水蓄能出清电量和节点电价纳入统一结算点现货价格计算，具体如下：

$$P_{\text{统一},t}^{\text{日前}} = \frac{\sum_{m \in \text{机组/储能/抽蓄}} [(Q_{m,t}^{\text{日前}} - Q_{m,t}^{\text{代购及跨省}}) \times P_{m,t}^{\text{日前}}]}{\sum_{m \in \text{机组/储能/抽蓄}} (Q_{m,t}^{\text{日前}} - Q_{m,t}^{\text{代购及跨省}})}$$

$$P_{\text{统一},t}^{\text{实时}} = \frac{\sum_{m \in \text{机组/储能/抽蓄}} [(Q_{m,t}^{\text{实时}} - Q_{m,t}^{\text{代购及跨省}}) \times P_{m,t}^{\text{实时}}]}{\sum_{m \in \text{机组/储能/抽蓄}} (Q_{m,t}^{\text{实时}} - Q_{m,t}^{\text{代购及跨省}})}$$

其中：

$P_{\text{统一},t}^{\text{日前}}$ 、 $P_{\text{统一},t}^{\text{实时}}$ 分别表示 t 小时的统一结算点日前、实时价格；

$Q_{m,t}^{\text{日前}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{实时}}$ 分别表示参与现货市场的发电机组、独立储能或抽水蓄能 m 在 t 小时的前日、实时市场出清电量，其中独立储能发电量以正值表示、充电量以负值表示，抽水蓄能发电量以正值表示、抽水电量以负值表示，以电力市场交易系统发布的交易结果为准；

$Q_{m,t}^{\text{代购及跨省}}$ 表示发电机组 m 在 t 小时的转让前电网代购市场及跨省外送电量（含基数电量），以电力交易机构首次发布的 D 日日清算电量数据为准，后续电量如有调整，不进行重算；

$P_{m,t}^{\text{日前}}$ 、 $P_{m,t}^{\text{实时}}$ 分别表示 t 小时参与现货市场的发电机组、独立储能或抽水蓄能 m 所在节点的前日、实时市场价格，即 t 小时内每 15 分钟日前、实时市场节点电价的算术平均值；

$\sum_{m \in \text{机组/储能/抽蓄}}$ 表示对所有参与现货市场的发电机组、独立

储能或抽水蓄能求和。

3. 试点交易的抽水蓄能实际抽、发电量纳入代购市场及跨省外送实结电量计算，具体如下：

$$Q_{\text{代购及外送实结},t} = (Q_{\text{总上网},t} - Q_{\text{总用电},t}) \times \frac{Q_{\text{代购及外送计划},t}}{Q_{\text{总代购及外送计划},t}}$$

其中：

$Q_{\text{代购及外送实结},t}$ 为单个机组时段 t 代购市场及跨省外送电量的实结电量；

$Q_{\text{总上网},t}$ 为直接参与交易的市场机组（含独立储能、抽水蓄能）时段 t 实际总上网电量（独立储能取实际充、放电量的代数和，其中放电量以正值表示、充电量以负值表示；抽水蓄能取实际抽、发电量的代数和，其中发电量以正值表示、抽水电量以负值表示）；

$Q_{\text{总用电},t}$ 为市场购电用户时段 t 实际总用电量；

$Q_{\text{代购及外送计划},t}$ 为单个机组时段 t 代购市场及跨省外送电量计划值；

$Q_{\text{总代购及外送计划},t}$ 为直接参与交易的市场机组时段 t 代购市场及跨省外送电量计划值之和。

本计算公式均不含省外水电受让电量、核电基数电量、核电代购市场电量、现货新能源交易单元基数电量。计算直接参与交易的市场机组代购市场电量实结电量时，优先保证跨省转让、省内核电基数电量、核电代购市场电量、现货新

能源交易单元基数电量刚性执行（100%结算），再计算整体直接参与交易的市场机组剩余代购市场及跨省外送电量计划的完成进度系数。

4. 试点交易的抽水蓄能日前出清电量纳入市场发用电量不平衡偏差电费计算，具体如下：

$$R_{\text{发用不平衡},t} = (Q_{\text{用户日前},t} - Q_{\text{机组日前市场},t}) \times (P_{\text{日前统一},t} - P_{\text{实时统一},t})$$

其中：

$R_{\text{发用不平衡},t}$ 为时段 t 的市场发用电量不平衡偏差电费；

$Q_{\text{用户日前},t}$ 为市场购电用户日前时段 t 申报总电量，扣除需求侧响应中标容量折算电量；

$Q_{\text{机组日前市场},t}$ 为直接参与交易的市场机组（含核电、新能源、独立储能、抽水蓄能）日前时段 t 出清总市场电量；

$P_{\text{日前统一},t}$ 为统一结算点日前时段 t 价格；

$P_{\text{实时统一},t}$ 为统一结算点实时时段 t 价格。

附表：参数取值

序号	名称	取值	说明
1	月发电/抽水利用小时	以交易安排、交易通知等文件发布数值为准	
2	调整参数 y_4	1	
3	调整参数 f_4	2	
4	系数 A_4	1	
5	现货电能量报价下限	0 元/千瓦时	
6	最小连续开机时间 $t_{pu}^{drain,up}$	30 分钟	
7	最小连续开泵时间 $t_{pu}^{pump,up}$	30 分钟	
8	最小连续停机时间 t_{pu}^{dn}	15 分钟	
9	同厂同时最大增加开机台数 UTS_{pp}	2 台	
10	同厂同时最大增加开泵台数 PTS_{pp}	1 台	
11	实时市场库容上下限 带宽量 Cr^{bw}	100 万方	
12	发电计划允许的 执行偏差率	2.5%	
13	抽水蓄能机组的 最大启停次数 $UDTS_{pu}$	6 次	
14	限高考核系数 α_1	与常规机组一致	用于功率限高考核费用计算
15	限低考核系数 α_2	与常规机组一致	用于功率限低考核费用计算
16	实时调度计划执行偏	0.2	实时调度计划执

	差考核费用调整系数 β_3		行偏差考核费用 计算
--	------------------------	--	---------------