



# 1. Variables And Parameters

## 1.1. Decision Variables

$p_{i,t}^g$ : 火电机组 $i$ 在时刻 $t$ 的出力

$\overline{p_{i,t}^g}$ : 火电机组 $i$ 在时刻 $t$ 能达到的最大出力

$p_t^{w,act}$ : 送端风电在时刻 $t$ 的实际出力

$p_t^{w,curtail}$ : 送端风电在时刻 $t$ 的弃风量

$p_t^{dc}$ : 直流传输在时刻 $t$ 的功率

$v_t^{dc}$ : 0-1 变量, 用来标识时刻 $t$ 直流传输功率是否发生调整 (1 表示发生调整)

$x_{i,t}$ : 0-1 变量, 用来标识时刻 $t$ 火电机组 $i$ 的开关状态 (1 表示开启, 0 表示关闭)

$C_{i,t}^{g,p}$ : 火电机组 $i$ 在时刻 $t$ 的出力成本

$C_{i,t}^{g,u}$ : 火电机组 $i$ 在时刻 $t$ 的开机成本

$C_{i,t}^{g,d}$ : 火电机组 $i$ 在时刻 $t$ 的关机成本

$C_t^{w,curtail}$ : 风电在时刻 $t$ 的弃风成本

$\tilde{D}_t$ : 受端在时刻 $t$ 时引入不确定性后的实际负荷

$u_t$ : 受端负荷在时刻 $t$ 时的变化范围

$\delta_{i,l,t}$ : 火电机组 $i$ 时刻 $t$ 在分段 $l$ 处的出力

## 1.2. Parameters

$\overline{P_i^g}, \underline{P_i^g}$ : 火电机组 $i$ 最大/小出力

$RU_i$ : 火电机组 $i$ 的爬坡能力

$P_t^{w,pred}$ : 送端风电在时刻 $t$ 的预计出力

$R^{dc}$ : 直流传输功率爬坡限制

$D_t$ : 受端在时刻 $t$ 时的预计负荷

$F_{i,l}$ : 火电机组 $i$ 线性化出力成本函数中分段 $l$ 的斜率  
 $T^M$ : 直流传输功率调整最小持续时间  
 $X$ : 直流传输功率最大调整次数  
 $Q$ : 直流联络线计划日交易点电量  
 $\Delta t$ : 模拟时间步长  
 $T$ : 模拟总时间数  
 $K_i$ : 火电机组 $i$ 的开机成本  
 $C_i$ : 火电机组 $i$ 的关机成本  
 $UT_i$ : 机组 $i$ 的最小开机时间  
 $DT_i$ : 机组 $i$ 的最小关机时间  
 $U_{i,0}/S_{i,0}$ : 机组 $i$ 在开始时刻前开/关的时间段  
 $V_{i,0}$ : 0-1 变量, 标识机组 $i$ 在开始时刻前的开关机状态 (1 表示开机, 0 表示关机)  
 $\sigma$ : 用来表示负荷变化的可能程度  
 $NL_i$ : 火电机组 $i$ 成本函数分段数  
 $T_{i,l}$ : 火电机组 $i$ 成本函数在分段 $l$ 中的节点

### 1.3. Sets

$\mathcal{T}$ : 总时间  
 $\mathcal{A}$ : 送端火电机组  
 $\mathcal{B}$ : 受端火电机组  
 $\mathcal{I}$ : 所有火电机组  
 $\mathcal{L}$ : 火电线性化成本函数分段数

## 2. Constraints

### 2.1. 成本

#### 2.1.1. 火电出力成本 1~6

$$C_{i,t}^{g,p} = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} F_{i,l} \delta_{i,l,t}, \forall t \in \mathcal{T} \forall i \in \mathcal{I}$$

$$p_{i,t}^g = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \delta_{i,l,t}$$

$$\delta_{i,1,t} \leq T_{i1} - \underline{P_i^g}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\delta_{i,l,t} \leq T_{i,l} - T_{i,l-1}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}, l = 2 \cdots NL_i - 1$$

$$\delta_{i,NL_i,t} \leq \overline{P_i^g} - T_{NL_i-1,i} \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\delta_{i,l,k} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.1.2. 火电启停成本 7~10

火电开机成本：(统一使用热启动成本)

$$C_{i,t}^{g,u} \geq K_i (x_{i,t} - x_{i,t-1}), \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$C_{i,t}^{g,u} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

火电关机成本：

$$C_{i,t}^{g,d} \geq C_i (x_{i,t-1} - x_{i,t}), \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$C_{i,t}^{g,d} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.1.3. 风电弃风成本 11

$$C^{w,curtail} = \sum_{t=1}^T p_t^{w,curtail} v$$

其中， $v$  为弃风惩罚项，在本题中为常数

## 2.2. 火电运行约束

### 2.2.1. 火电出力约束 12 13

$$\underline{P_i^g} x_{i,t} \leq p_{i,t}^g \leq \overline{p_{i,t}^g}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$0 \leq \overline{p_{i,t}^g} \leq \overline{P_j} x_{j,t}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.2.2. 爬坡约束 14

$$\overline{p}_{i,t}^g \leq p_{i,t-1} + RU_j x_{i,t-1} + \underline{P}_i [x_{i,t} - x_{i,t-1}] + \overline{P}_i [1 - x_{i,t}], \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.2.3. 最小开/关机时间约束 15~20

$$\sum_{t=1}^{G_i} [1 - x_{i,t}] = 0, \forall i \in \mathcal{I}$$

$$\sum_{t=k}^{k+UT_i-1} x_{i,t} \geq UT_i [x_{i,t} - x_{i,t-1}]$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, \forall k = G_i + 1, \dots, T - UT_i + 1$$

$$\sum_{t=k}^T \{x_{i,t} - [x_{i,k} - x_{i,k-1}]\} \geq 0$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, \forall k = T - UT_i + 2 \dots T$$

其中， $G_i$ 是指机组 $i$ 在最开始时必须保持开机的时间，可表示为：

$$G_i = \min\{T, [UT_i - U_{i,0}]V_{i,0}\}$$

相应地，最小开机时间约束可以定义为：

$$\sum_{t=1}^{L_i} x_{i,t} = 0, \forall i \in \mathcal{I}$$

$$\sum_{t=k}^{k+DT_i-1} [1 - x_{i,t}] \geq DT_i [x_{i,t-1} - x_{i,t}]$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, \forall k = L_i + 1, \dots, T - DT_i + 1$$

$$\sum_{t=k}^T \{1 - x_{i,t} - [x_{i,k-1} - x_{i,k}]\} \geq 0$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, \forall k = T - DT_i + 2 \dots T$$

其中， $L_i$ 是指机组 $i$ 在最开始时必须保持关机的时间，可表示为：

$$L_i = \min\{T, [DT_i - S_{i,0}][1 - V_{i,0}]\}$$

## 2.3. HVDC (High Voltage Direct Current) Constraints

### 2.3.1. 直流传输爬坡约束 21

$$-v_t^{dc} R^{dc} \leq p_t^{dc} - p_{t-1}^{dc} \leq v_t^{dc} R^{dc}, v_t^{dc} \in \{0, 1\}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.3.2. 直流传输功率约束 22

$$\underline{P}^{dc} \leq p_t^{dc} \leq \overline{P}^{dc}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.3.3. 最小调整持续时间约束 23

$$\sum_t^{t+T^M} v_t^{dc} \leq 1, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.3.4. 最多调整次数约束 24

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} v_t^{dc} \leq X$$

### 2.3.5. 联络线计划日交易电量约束 25

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} p_t^{dc} \Delta t = Q$$

## 2.4. Sending End Constraints

### 2.4.1. 送端功率平衡约束 26

$$\sum_{i \in \mathcal{A}} p_{i,t}^g + p_t^{w,act} = p_t^{dc}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.4.2. 送端风电最大出力约束 27

$$p_t^{w,act} \leq P_t^{w,pred}, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.4.3. 定义弃风量 28

$$p_t^{w,curtail} = P_t^{w,pred} - p_t^{w,act}$$

## 2.5. Receiving End Constraints

### 2.5.1. 受端功率平衡约束 29

$$\sum_{i \in \mathcal{B}} p_{i,t}^g + p_t^{dc} = \tilde{D}_t, \forall t \in \mathcal{T}$$

### 2.5.2. 负荷不确定集 30 31

$$\tilde{D}_t = D_t + u_t \sigma, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$u_t \in [-1, 1], \forall t \in \mathcal{T}$$

## 3. 二阶段鲁棒模型的建立及 C&CG 算法的求解

第一层：确定机组启停以及直流潮流变化（决策变量中包含整数变量）

第二层：确定风火电的出力，其中负荷为不确定量

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} C^{g,u} + C^{g,d} + \max_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \min_{\mathbf{y} \in \mathcal{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{u})} C^{g,p} + C^{w,curtail}$$

$$\mathcal{X} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^{\{0,1\}}: (7) \sim (10), (15) \sim (20), (23) \sim (24)\}$$

$$\mathcal{U} = \{u \in \mathbb{R}: (26)\}$$

$$\mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R}^+: (1) \sim (5), (11) \sim (14), (21) \sim (22), (25) \sim (30)\}$$

紧凑形式:

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{x} \in \mathcal{X}} \quad & C^{g,u} + C^{g,d} + \max_{\boldsymbol{u} \in \mathcal{U}} \min_{\boldsymbol{y} \in \mathcal{Y}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})} C^{g,p} + C^{\text{w},\text{curtail}} \\ \text{s.t.} \quad & A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{d} \\ & E\boldsymbol{x} + G\boldsymbol{y} + M\boldsymbol{u} \leq \boldsymbol{h} \\ & \boldsymbol{x} \in \mathbb{Z}^{\{0,1\}} \\ & \boldsymbol{y} \in \mathbb{R}^+ \\ & \boldsymbol{u} \in \mathcal{U} \end{aligned}$$