

安全约束机组组合SCUC的目标函数如下所示：

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t}(P_{i,t}) + C_{i,t}^U + C_{i,t}^K] + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M[SL_l^+ + SL_l^-] + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^T M[SL_s^+ + SL_s^-]$$

其中：

N 表示机组的总台数；

T 表示所考虑的总时段数，每天考虑96时段；

$P_{i,t}$ 表示机组 i 在时段 t 的出力；

$C_{i,t}(P_{i,t})$ 、 $C_{i,t}^U$ 、 $C_{i,t}^K$ 分别为机组 i 在时段 t 的运行费用、启动费用及空载费用，

其中机组运行费用是与机组申报的各段出力区间和对应电量价格有关的多段线性函数；

M 为网络潮流约束松弛罚因子；

SL_l^+ 、 SL_l^- 分别为支路 l 的正、反向潮流松弛变量； NL 为线路总数；

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

机组出力表达式：

$$P_{i,t} = \sum_{m=1}^{NM} P_{i,t,m}$$

$$P_{i,m}^{min} \leq P_{i,t,m} \leq P_{i,m}^{max}$$

其中， NM 为机组报价总段数， $P_{i,t,m}$ 为机组 i 在时段 t 第 m 个出力区间中的中标电力， $P_{i,m}^{min}$ 、 $P_{i,m}^{max}$ 分别为机组 i 申报的第 m 个出力区间上、下界。

机组运行费用表达式：

$$C_{i,t}(P_{i,t}) = \sum_{m=1}^{NM} C_{i,m} P_{i,t,m}$$

其中， NM 为机组报价总段数， $C_{i,m}$ 为机组 i 申报的第 m 个出力区间对应的能量价格。

机组启动费用表达式:

$$C_{i,t}^U = \gamma_{i,t} C_i^U$$

其中, C_i^U 为机组*i*申报的单次启动费用。 $\gamma_{i,t}$ 为机组*i*在时段*t*是否切换到启动状态, $\gamma_{i,t}$ 满足如下条件:

$$\gamma_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{仅当 } \alpha_{i,t} = 1 \text{ 且 } \alpha_{i,t-1} = 0 \\ 0 & \text{其余情况} \end{cases}$$

$\alpha_{i,t}$ 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。

机组空载费用表达式:

$$C_{i,t}^K = \alpha_{i,t} C_i^K$$

其中, C_i^K 为机组*i*申报的空载费用;

安全约束机组组合SCUC的约束条件包括:

(一) 系统负荷平衡约束

对于每个时段*t*, 负荷平衡约束可以描述为:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} T_{j,t} = D_t$$

其中, $P_{i,t}$ 表示发电机组*i*在时段*t*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 为时段*t*的系统负荷。

(二) 系统正备用容量约束

在确保系统功率平衡的前提下, 为了防止全网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, 一般整个系统需要留有一定的容量备用。需要保证每天的总开机容量满足系统的最小备用容量。系统正备用容量约束可以描述为:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{i,t} P_{i,t}^{max} \geq D_t + R_t^U$$

其中, $P_{i,t}^{max}$ 为机组*i*在时段*t*的最大出力; R_t^U 为时段*t*的系统正备用容量要求。

(三) 系统负备用容量约束

系统负备用容量约束可以描述为:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{i,t} P_{i,t}^{min} \leq D_t - R_t^D$$

其中, $P_{i,t}^{min}$ 为机组*i*在时段*t*的最小出力; R_t^D 为时段*t*的系统负备用容量要求。

(四) 系统旋转备用约束

各个时段机组出力的上调能力总和与下调能力总和需满足实际运行的上调、下调旋转备用要求。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \min \{ \Delta P_i^U, P_{i,t+1}^{max} - P_{i,t} \} &\geq \Delta S R_t^U \\ \sum_{i=1}^N \min \{ \Delta P_i^D, P_{i,t} - P_{i,t+1}^{min} \} &\geq \Delta S R_t^D \end{aligned}$$

其中, ΔP_i^U 为机组*i*最大上爬坡速率, ΔP_i^D 为机组*i*最大下爬坡速率; $P_{i,t+1}^{max}$ 、 $P_{i,t+1}^{min}$ 分别是机组*i*在时段*t*的最大、最小出力; $\Delta S R_t^U$ 、 $\Delta S R_t^D$ 分别为时段*t*上调、下调旋转备用要求。

(五) 机组出力上下限约束

机组的出力应该处于其最大/最小出力范围之内, 其约束条件可以描述为:

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

(六) 机组爬坡约束

机组上爬坡或下爬坡时, 均应满足爬坡速率要求。爬坡约束可描述为:

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_i^U \alpha_{i,t-1} + P_{i,t}^{min} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + P_{i,t}^{max} (1 - \alpha_{i,t})$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^D \alpha_{i,t} - P_{i,t}^{min} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + P_{i,t}^{max} (1 - \alpha_{i,t-1})$$

其中, ΔP_i^U 为机组*i*最大上爬坡速率, ΔP_i^D 为机组*i*最大下爬坡速率。

(七) 机组最小连续开停时间约束

由于火发电机组的物理属性及实际运行需要, 要求火发电机组满足最小连续开机/停机时间。最小连续开停时间约束可以描述为:

$$T_{i,t}^D - (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1})T_D \geq 0$$

$$T_{i,t}^U - (\alpha_{i,t-1} - \alpha_{i,t})T_U \geq 0$$

其中, $\alpha_{i,t}$ 为机组*i*在时段*t*的启停状态; T_D 、 T_U 为机组的最小连续运行时间和最小连续停机时间; $T_{i,t}^U$ 、 $T_{i,t}^D$ 为机组*i*在时段*t*时已经连续开机的时间和连续停机的时间, 可以用状态变量 $\alpha_{i,t}(i=1\sim N, t=1\sim N)$ 来表示:

$$T_{i,t}^U = \sum_{k=t-T_U}^{t-1} \alpha_{i,k}$$

$$T_{i,t}^D = \sum_{k=t-T_D}^{t-1} (1 - \alpha_{i,k})$$

(八) 机组最大启停次数约束

首先定义启动与停机的切换变量。定义 $\rho_{i,t}$ 表示机组*i*在时段*t*是否切换到停机状态, $\rho_{i,t}$ 满足如下条件:

$$\rho_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{仅当 } \alpha_{i,t} = 0 \text{ 且 } \alpha_{i,t-1} = 1 \\ 0 & \text{其余情况} \end{cases}$$

相应机组*i*的启停次数限制可表达如下:

$$\sum_{t=1}^T \gamma_{i,t} \leq \gamma_i^{max}$$

$$\sum_{t=1}^T \rho_{i,t} \leq \rho_i^{max}$$

(九) 支路潮流约束

支路潮流约束可以描述为：

$$-P_l^{min} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} G_{l-j} P_{j,t} - \sum_{k=1}^K G_{l-k} D_{k,t} - SL_l^+ + SL_l^- \leq P_l^{max}$$

其中， P_l^{min} 、 P_l^{max} 分别为支路 l 的潮流传输极限； G_{l-i} 为机组 i 所在节点对支路 l 的发电机输出功率转移分布因子； G_{l-j} 为联络线 j 所在节点对支路 l 的发电机输出功率转移分布因子； K 为系统的节点数量； G_{l-k} 为节点 k 对支路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 为节点 k 在时段 t 的母线负荷值。 SL_l^+ 、 SL_l^- 分别为支路 l 的正、反向潮流松弛变量。

（十）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：

$$-P_s^{min} \leq \sum_{i=1}^N G_{s-i} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NT} G_{s-j} P_{j,t} - \sum_{k=1}^K G_{s-k} D_{k,t} - SL_s^+ + SL_s^- \leq P_s^{max}$$

其中， P_s^{min} 、 P_s^{max} 分别为断面 s 的潮流传输极限； G_{s-i} 为机组 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-j} 为联络线 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-k} 为节点 k 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。 SL_s^+ 、 SL_s^- 分别为断面 s 的正、反向潮流松弛变量。

（十一）新能源电站出力约束

$$0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^f (i \in E)$$

其中， E 为新能源场站集合， $P_{i,t}^f$ 为新能源场站 i 在时段 t 的预测出力。