1 記号一覧

集合

T : 時間集合

Ω : シナリオ集合

$\mathcal{L}$: ノード集合

$\mathcal{N}$: DR に参加する需要家の集合

$\mathcal{S}_u$: ノード u における DR に参加する需要家の集合

BM_u : ノード u におけるアグリゲータの入札ブロックの集合

BO_u : ノード u における発電業者の入札ブロックの集合

BN_u : ノード u における需要の入札ブロックの集合

定数

$\gamma(\omega)$: シナリオ ω の生起確率

$C_{t,u,i}^{DR}$: 時間 t における需要家 i の調達費用 [JPY/kWh]

$\overline{P_{t,u,i}^{DR}}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の需要家 i の調達量上限値 [kWh]

$\lambda_{t,u}^{Bal+}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の余剰インバランス価格 [JPY/kWh]

$\lambda_{t,u}^{Bal-}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の不足インバランス価格 [JPY/kWh]

B_{uv} : ノード u,v 間のサセプタンス $[S]$

f_{uv}^{max} : ノード u,v 間の送電線容量 [MW]

$p_{t,u,m}^{A}$: 時間 t，アグリゲータのノード u におけるブロック m の入札量 [kWh]

$\lambda_{t,u,o}^{G}$: 時間 t，ノード u における発電業者のブロック o の入札価格 [JPY/kWh]

$p_{t,u,o}^{G}$: 時間 t，ノード u における発電業者のブロック o の入札量 [kWh]

$\lambda_{t,u,n}^{D}$: 時間 t，ノード u における需要のブロック n の入札価格 [JPY/kWh]

$p_{t,u,n}^{D}$: 時間 t，ノード u における需要のブロック n の入札量 [kWh]

決定変数

$\lambda_{t,u,m}^{A}$: 時間 t，アグリゲータのノード u におけるブロック m の入札価格 [JPY/kWh]

$\alpha_{t,u}$: 時間 t，ノード u における前日市場の約定価格（LMP）[JPY/kWh]

$P_{t,u,m}^{A}$: 時間 t，アグリゲータのノード u における m ブロック目の約定量 [kWh]

$P_{t,u,i}^{DR}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の需要家 i の調達量 [kWh]

$P_{t,u,o}^{G}$: 時間 t，ノード u における発電業者の o ブロック目の約定量 [kWh]

$P_{t,u,n}^{D}$: 時間 t，ノード u における需要のノード u における n ブロック目の約定量 [kWh]

$P_{t,u}^{Bal+}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の余剰インバランス [kWh]

$P_{t,u}^{Bal-}(\omega)$: 時間 t，シナリオ ω におけるノード u の不足インバランス [kWh]

$\theta_{t,u}$: 時間 t，ノード u における位相角 [rad]

2 定式化

$$
\begin{aligned}
\text{maximize} \quad & \sum_{\Omega\in\omega}\sum_{t\in T}\gamma(\omega)\Bigg[\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{m\in BM_u}\alpha_u P^A_{t,u,m} - \sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{i\in\mathcal{S}_u} C^{DR}_{t,u,i}P_{t,u,i}(\omega)^{DR} \\
& \qquad + \sum_{u\in\mathcal{L}}\lambda^{Bal+}_{t,u}(\omega)P^{Bal+}_{t,u}(\omega) - \sum_{u,\in\mathcal{L}}\lambda^{Bal-}_{t,u,}(\omega)P^{Bal-}_{t,u}(\omega)\Bigg] \qquad \text{(DA1)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{subject to} \quad & 0 \le P^{DR(t)}_{u,i}(\omega) \le \overline{P^{DR(t)}_{u,i}(\omega)} && \forall t\in T, u\in\mathcal{L},\ \forall i\in\mathcal{S}_u, \forall\omega\in\Omega \qquad \text{(DA2)} \\
& \sum_{i\in T}\sum_{i\in\mathcal{S}_u}P^{DR}_{t,u,i} - P^{Bal+}_{t,u}(\omega) + P^{Bal-}_{t,u}(\omega) = \sum_{t\in T}\sum_{m\in BM_u}P^A_{t,u,m} && \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L},\ \forall\omega\in\Omega \qquad \text{(DA3)} \\
& P^{Bal+}_{t,u}(\omega)P^{Bal-}_{t,u}(\omega) = 0 && \forall t\in T,\ \forall u\in\mathcal{L},\ \forall\omega\in\Omega \qquad \text{(DA4)} \\
& 0 \le P^{Bal+}_{t,u}(\omega), P^{Bal-}_{t,u}(\omega), \lambda^A_{t,u,m} && \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L},\ m\in BM_u,\ \forall\omega\in\Omega \qquad \text{(DA5)}
\end{aligned}
$$

$$
\text{minimize} \quad \sum_{t\in T}\sum_{u\in\mathcal{L}}\Bigg[\sum_{m\in BM_u}\lambda^A_{t,u,m}P^A_{t,u,m} + \sum_{o\in BO_u}\lambda^G_{t,u,o}P^G_{t,u,o} - \sum_{n\in BN_u}\lambda^D_{t,u,n}P^D_{t,u,n}\Bigg] \qquad \text{(DA6)}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{subject to} \quad & \sum_{m\in BM_u}P^A_{t,u,m} + \sum_{o\in BO_u}P^G_{t,u,o} - \sum_{n\in BN_u}P^D_{t,u,n} \\
& \qquad - \sum_{v\in\mathcal{L}}B_{uv}(\theta_{t,u}-\theta_{t,v}) = 0 && \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L} \qquad \text{(DA7)} \\
& -f^{max}_{uv} \le B_{uv}(\theta_{t,u}-\theta_{t,v}) \le f^{max}_{uv} && \forall t\in T, \forall u,v\in\mathcal{L} \qquad \text{(DA8)} \\
& 0 \le P^A_{t,u,m} \le p^A_{t,u,m} && \forall m\in BM_u, \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L} \qquad \text{(DA9)} \\
& 0 \le P^G_{t,u,o} \le p^G_{t,l,o} && \forall o\in BO_u, \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L} \qquad \text{(DA10)} \\
& 0 \le P^D_{t,u,n} \le p^D_{t,l,n} && \forall n\in BN_u, \forall t\in T, \forall u\in\mathcal{L} \qquad \text{(DA11)} \\
& \theta_{t,u=1} = 0 && \forall t\in T \qquad \text{(DA12)}
\end{aligned}
$$

3　MILP 化までの手順

3.1　下位問題の式を分解

不等式 DA8DA9,DA10,DA11 を分解すると以下のような形となる．

$$-B_{uv}(\theta_{t,u}-\theta_{t,v}) \leq f_{uv}^{max} \qquad B_{uv}(\theta_{t,u}-\theta_{t,v}) \leq f_{uv}^{max} \tag{1}$$
$$-P_{t,u,m}^{A} \leq 0 \qquad P_{t,u,m}^{A} \leq p_{t,u,m}^{A} \tag{2}$$
$$-P_{t,u,o}^{G} \leq 0 \qquad P_{t,l,o}^{G} \leq p_{t,u,o}^{G} \tag{3}$$
$$-P_{t,u,o}^{G} \leq 0 \qquad P_{t,l,o}^{G} \leq p_{t,u,o}^{G} \tag{4}$$

KKT 条件

局所最適解 x^* において目的関数 $f(x)$，不等式制約関数 $g_i(x)$，等式制約関数 $h_j(x)$ の間に以下の関係が成り立つ．

$$min \qquad f(x) \tag{K1}$$
$$s.t \qquad g_i(x) \leq 0 \tag{K2}$$
$$h_j(x) = 0 \tag{K3}$$

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^{m} \bar{\lambda}_i \nabla g_i(x^*) + \sum_{i=1}^{l} \bar{\mu}_j \nabla h_j(x^*) = 0 \tag{K4}$$
$$0 \leq \nabla g_i(x^*) \perp \bar{\lambda}_i \geq 0 \tag{K5}$$
$$h_j(x^*) = 0 \tag{K6}$$

KKT 条件に適応できるように解問題を式変形すると以下のような形となる．2，3 の右側にある変数はラグランジュ乗数で不等式制約では非負，等式制約では自由変数である．

1. $f(x)$ に対しては

$$\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{m\in BM_u} \lambda_{u,m}^{A(t)} P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{o\in BO_u} \lambda_{u,o}^{G(t)} P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{u,t\in\mathcal{L}}\sum_{n\in BN_u} \lambda_{u,n}^{D(t)} P_{u,n}^{D(t)} \tag{K7}$$

2. $g_i(\bar{x}) \leq 0$ に対しては

$$B_{uv}(\theta_v^{(t)}-\theta_u^{(t)}) \leq f_{uv}^{max} \qquad B_{uv}(\theta_v^{(t)}-\theta_u^{(t)}) - f_{uv}^{max} \leq 0 \qquad \rho_{uv}^{min} \tag{K8}$$
$$B_{uv}(\theta_u^{(t)}-\theta_v^{(t)}) \leq f_{uv}^{max} \qquad B_{uv}(\theta_u^{(t)}-\theta_v^{(t)}) - f_{uv}^{max} \leq 0 \qquad \rho_{uv}^{max} \tag{K9}$$
$$-P_{u,m}^{A(t)} \leq 0 \qquad -P_{u,m}^{A(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,m}^{Amin} \tag{K10}$$
$$P_{u,m}^{A(t)} \leq p_{u,m}^{A(t)} \qquad P_{u,m}^{A(t)} - p_{u,m}^{A(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,m}^{Amax} \tag{K11}$$
$$-P_{u,o}^{G(t)} \leq 0 \qquad -P_{u,o}^{G(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,o}^{Gmin} \tag{K12}$$
$$P_{l,o}^{G(t)} \leq p_{l,o}^{G(t)} \qquad P_{l,o}^{G(t)} - p_{l,o}^{G(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,o}^{Gmax} \tag{K13}$$
$$-P_{u,n}^{D(t)} \leq 0 \qquad -P_{u,n}^{D(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,n}^{Dmin} \tag{K14}$$
$$P_{u,n}^{D(t)} \leq p_{u,n}^{D(t)} \qquad P_{u,n}^{D(t)} - p_{u,n}^{D(t)} \leq 0 \qquad \phi_{u,n}^{Dmax} \tag{K15}$$

3. $h_j(\bar{x}) = 0$ に対しては

$$\sum_{m\in BM_u} P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{o\in BO_u} P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n\in BN_u} P_{u,n}^{D(t)} - \sum_{v\in\mathcal{L}} B_{uv}(\theta_u^{(t)}-\theta_v^{(t)}) = 0 \qquad \alpha_u \tag{K16}$$
$$\theta_{u=1} = 0 \qquad \gamma \tag{K17}$$

3.1.1 K4

KKT 条件の式 K4 について考える．
下位問題における決定変数は $\lambda^A_{u,m}, P^A_{u,m}, P^G_{u,o}, P^D_{u,n}, \theta_u$ であるから，

1. $P^A_{u,m}$ に関係する式は K7,K10,K11,K16 であるから，

$$\frac{\partial}{\partial P^A_{u,m}}\left[\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{m\in BM_u}\lambda^{A(t)}_{u,m}P^{A(t)}_{u,m}+\phi^{Amin}_{u,m}(-P^{A(t)}_{u,m})+\phi^{Amax}_{u,m}(P^{A(t)}_{u,m}-p^{A(t)}_{u,m})+\alpha_u\sum_{m\in BM_u}P^{A(t)}_{u,m}\right]=0 \quad \text{(A1)}$$

$$\lambda^{A(t)}_{u,m}-\phi^{Amin}_{u,m}+\phi^{Amax}_{u,m}+\alpha_u=0 \quad \text{(A1)}$$

2. $P^G_{u,o}$ に関係する式は K7,K12,K13,K16 であるから，

$$\frac{\partial}{\partial P^G_{u,o}}\left[\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{o\in BO_u}\lambda^{G(t)}_{u,o}P^{G(t)}_{u,o}+\phi^{Gmin}_{u,o}(-P^{G(t)}_{u,o})+\phi^{Gmax}_{u,o}(P^{G(t)}_{l,o}-p^{G(t)}_{u,o})+\alpha_u\sum_{o\in BO_u}P^{G(t)}_{u,o}\right]=0 \quad \text{(A2)}$$

$$\lambda^{G(t)}_{u,o}-\phi^{Gmin}_{u,o}+\phi^{Gmax}_{u,o}+\alpha_u=0 \quad \text{(A2)}$$

3. $P^D_{u,n}$ に関係する式は K7,K14,K15,K16 であるから，

$$\frac{\partial}{\partial P^D_{u,n}}\left[-\sum_{u,t\in\mathcal{L}}\sum_{n\in BN_u}\lambda^{D(t)}_{u,n}P^{D(t)}_{u,n}+\phi^{Dmin}_{u,n}(-P^{D(t)}_{u,n})+\phi^{Dmax}_{u,n}(P^{D(t)}_{u,n}-p^{D(t)}_{u,n})+\alpha_u(-\sum_{n\in BN_u}P^{D(t)}_{u,n})\right]=0 \quad \text{(A3)}$$

$$-\lambda^{D(t)}_{u,n}-\phi^{Dmin}_{u,n}+\phi^{Dmax}_{u,n}-\alpha_u=0 \quad \text{(A3)}$$

4. θ_u に関係する式は K8,K9,K16,K17 であるから，

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial\theta_u}&\left[\rho^{min}_{uv}\left\{B_{uv}(\theta^{(t)}_v-\theta^{(t)}_u)-f^{max}_{uv}\right\}+\rho^{max}_{uv}\left\{B_{uv}(\theta^{(t)}_u-\theta^{(t)}_v)-f^{max}_{uv}\right\}\right.\\&\left.+\alpha_u\left\{-\sum_{v\in\mathcal{L}}B_{uv}(\theta^{(t)}_u-\theta^{(t)}_v)\right\}+\gamma\theta_{u=1}\right]=0 \quad \text{(A4)}\end{aligned}$$

$$B_{uv}\left(-\rho^{min}_{uv}+\rho^{max}_{uv}-\alpha_u\right)=0 \quad \text{(A4)}$$

3.1.2 K5

KKT 条件の式 K5 について考える．
非線形の制約である相補性条件を，バイナリ変数 u 及び，十分に大きい実数 M を用いて線形制約に置き換える．以下の式 B1-B8 の 8 本の式は bigM 法を用いることにより合計 32 本の式となる．その時に用いるバイナリ変数を右側に示している．

$$0\le\nabla g(x)\perp\mu\ge0 \qquad \begin{cases}0\le\nabla g(x)\le M(1-u)\\0\le\mu\le Mu\end{cases} \qquad \begin{cases}-\nabla g(x)&\le0\\\nabla g(x)+uM&\le M\\-\mu&\le0\\\mu-Mu&\le0\end{cases} \quad (5)$$

式 1,2,3,4 は以下のように変換することができる．

$$0\le B_{uv}(\theta_u-\theta_v)+f^{max}_{uv}\perp\rho^{min}_{uv}\ge0 \qquad u \quad \text{(B1)}$$

$$0\le f^{max}_{uv}-B_{uv}(\theta_u-\theta_v)\perp\rho^{max}_{uv}\ge0 \qquad u \quad \text{(B2)}$$

$$0\le P^A_{u,m}\perp\phi^{Amin}_{u,m}\ge0 \qquad u^{Amin(t)}_{u,m} \quad \text{(B3)}$$

$$0\le p^A_{u,m}-P^A_{u,m}\perp\phi^{Amax}_{u,m}\ge0 \qquad u^{Amax(t)}_{u,m} \quad \text{(B4)}$$

$$0\le P^G_{u,o}\perp\phi^{Gmin}_{u,o}\ge0 \qquad u^{Gmin(t)}_{u,o} \quad \text{(B5)}$$

$$0\le p^G_{u,o}-P^G_{u,o}\perp\phi^{Gmax}_{u,o}\ge0 \qquad u^{Gmax(t)}_{u,o} \quad \text{(B6)}$$

$$0\le P^D_{u,n}\perp\phi^{Dmin}_{u,n}\ge0 \qquad u^{Dmin(t)}_{u,n} \quad \text{(B7)}$$

$$0\le p^D_{u,n}-P^D_{u,n}\perp\phi^{Dmax}_{u,n}\ge0 \qquad u^{Dmax(t)}_{u,n} \quad \text{(B8)}$$

3.1.3 K6

KKT 条件の式 K6 について考える．

$$\sum_{m\in BM_u} P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{o\in BO_u} P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n\in BN_u} P_{u,n}^{D(t)} - \sum_{v\in\mathcal{L}} B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) = 0 \qquad \alpha_u \tag{C1}$$

$$\theta_{u=1} = 0 \qquad \gamma \tag{C2}$$

3.2 上位問題の目的関数の線形化

上位問題の目的関数の線形化について考える．DA1 より目的関数は非線形関数となっている．これを線形化するためには A1 を用いる．

$$\lambda_{u,m}^{A(t)} - \phi_{u,m}^{Amin} + \phi_{u,m}^{Amax} + \alpha_u = 0 \tag{3.2-1}$$

$$\lambda_{u,m}^{A(t)} P_{u,m}^{A} - \phi_{u,m}^{Amin} P_{u,m}^{A} + \phi_{u,m}^{Amax} P_{u,m}^{A} + \alpha_u P_{u,m}^{A} = 0 \tag{3.2-1}$$

$$\lambda_{u,m}^{A(t)} P_{u,m}^{A} = \phi_{u,m}^{Amin} P_{u,m}^{A} - \phi_{u,m}^{Amax} P_{u,m}^{A} - \alpha_u P_{u,m}^{A} \tag{3.2-1}$$

ここで B3,B4 の式について考えると，垂直記号の右側と左側はどちらか一方は成り立つという意味から，以下の式が求まる．

$$P_{u,m}^{A}\phi_{u,m}^{Amin} = 0 \tag{3.2-2}$$

$$(p_{u,m}^{A} - P_{u,m}^{A})\phi_{u,m}^{Amax} = 0 \qquad p_{u,m}^{A}\phi_{u,m}^{Amax} = P_{u,m}^{A}\phi_{u,m}^{Amax} \tag{3.2-3}$$

これを式に適応させると，

$$\lambda_{u,m}^{A(t)} P_{u,m}^{A} = 0 - p_{u,m}^{A}\phi_{u,m}^{Amax} - \alpha_u P_{u,m}^{A} \tag{3.2-4}$$

ここで強双対定理について考える．

強双対定理

主問題（P）に最適解 x^* が存在すれば双対問題（D）にも最適解 y^* が存在し，以下の式が成立する．

$$\boldsymbol{c^t x^* = b^t y^*}$$

この問題においては K7-K15 を用いる．

$$\begin{aligned}
&\sum_{u\in\mathcal{L}}\left[\sum_{m\in BM_u}\lambda_{u,m}^{A(t)}P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{o\in BO_u}\lambda_{u,o}^{G(t)}P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n\in BN_u}\lambda_{u,n}^{D(t)}P_{u,n}^{D(t)}\right] \\
&= \sum_{u\in\mathcal{L}}\left[\sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{min} + \sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{max} + \sum_{m\in BM_u} p_{u,m}^{A(t)}\phi_{u,m}^{Amax} + \sum_{o\in BO_u} p_{l,o}^{G(t)}\phi_{u,o}^{Gmax} + \sum_{n\in BN_u} p_{u,n}^{D(t)}\phi_{u,n}^{Dmax}\right]
\end{aligned} \tag{3.2-5}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{u\in\mathcal{L}}\left[\sum_{m\in BM_u}\left\{-p_{u,m}^{A}\phi_{u,m}^{Amax} - \alpha_u P_{u,m}^{A}\right\} + \sum_{o\in BO_u}\lambda_{u,o}^{G(t)}P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n\in BN_u}\lambda_{u,n}^{D(t)}P_{u,n}^{D(t)}\right] \\
&= \sum_{u\in\mathcal{L}}\left[\sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{min} + \sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{max} + \sum_{m\in BM_u} p_{u,m}^{A(t)}\phi_{u,m}^{Amax} + \sum_{o\in BO_u} p_{l,o}^{G(t)}\phi_{u,o}^{Gmax} + \sum_{n\in BN_u} p_{u,n}^{D(t)}\phi_{u,n}^{Dmax}\right]
\end{aligned} \tag{3.2-5}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{m\in BM_u}\alpha_u P_{u,m}^{A} = \sum_{u\in\mathcal{L}}\Bigg[&\sum_{m\in BM_u} -2p_{u,m}^{A(t)}\phi_{u,m}^{Amax} + \sum_{o\in BO_u}\lambda_{u,o}^{G(t)}P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n\in BN_u}\lambda_{u,n}^{D(t)}P_{u,n}^{D(t)} \\
&-\sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{min} - \sum_{v\in\mathcal{L}} f_{uv}^{max}\rho_{uv}^{max} - \sum_{o\in BO_u} p_{l,o}^{G(t)}\phi_{u,o}^{Gmax} - \sum_{n\in BN_u} p_{u,n}^{D(t)}\phi_{u,n}^{Dmax}\Bigg]
\end{aligned} \tag{3.2-5}$$

4 定式化された MILP

4.1 目的関数

$$\sum_{t=1}^{48}\Bigg[-\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{o\in BO_u}\lambda_{u,o}^{G(t)}P_{u,o}^{G(t)}+\sum_{u\in\mathcal{L}}\sum_{n\in BN_u}\lambda_{u,n}^{D(t)}P_{u,n}^{D(t)}-\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\rho_{uv}^{min}f_{uv}^{max}+\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\rho_{uv}^{max}f_{uv}^{max}$$
$$-\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\sum_{m\in BM_u}2\phi_{uv,m}^{Amax}p_{u,m}^{A(t)}-\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\sum_{o\in BO_u}\phi_{uv,o}^{Gmax}p_{u,o}^{G(t)}-\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\sum_{n\in BN_u}\phi_{uv,n}^{Dmax}p_{u,n}^{D(t)}-\sum_{u,v\in\mathcal{L}}\sum_{i\in\mathcal{S}_u}C_{u,i}^{DR(t)}P_{u,i(\omega)}^{DR(t)}\Bigg] \quad \text{(OBJ)}$$

4.2 不等式制約条件

$$-P_{u,m}^{A(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-1)}$$
$$P_{u,m}^{A(t)} \le p_{u,m}^{A(t)} \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-2)}$$
$$-\phi_{u,m}^{Amin} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BM_u \qquad \text{(m-3)}$$
$$-\phi_{u,m}^{Amax} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BM_u \qquad \text{(m-4)}$$
$$\phi_{u,m}^{Amin(t)}-Mu_{u,m}^{Amin(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-5)}$$
$$P_{u,m}^{A(t)}+Mu_{u,m}^{Amin(t)} \le M \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-6)}$$
$$\phi_{u,m}^{Amax(t)}-Mu_{u,m}^{Amax(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-7)}$$
$$-P_{u,m}^{A(t)}+Mu_{u,m}^{Amax(t)} \le M-p_{u,m}^{A(t)} \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall m\in BM_u \qquad \text{(m-8)}$$

$$-P_{u,o}^{G(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-1)}$$
$$P_{l,o}^{G(t)} \le p_{u,o}^{G(t)} \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-2)}$$
$$-\phi_{u,o}^{Gmin} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-3)}$$
$$-\phi_{u,o}^{Gmax} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-4)}$$
$$\phi_{u,o}^{Gmin(t)}-Mu_{u,o}^{Gmin(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-5)}$$
$$P_{u,o}^{G(t)}+Mu_{u,o}^{Gmin(t)} \le M \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-6)}$$
$$\phi_{u,o}^{Gmax(t)}-Mu_{u,o}^{Gmax(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-7)}$$
$$-P_{l,o}^{G(t)}+Mu_{u,o}^{Gmax(t)} \le M-p_{u,o}^{G(t)} \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall o\in BO_u \qquad \text{(o-8)}$$

$$-P_{u,n}^{D(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-1)}$$
$$P_{u,n}^{D(t)} \le p_{u,n}^{D(t)} \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-2)}$$
$$-\phi_{u,n}^{Dmin} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-3)}$$
$$-\phi_{u,n}^{Dmax} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-4)}$$
$$\phi_{u,n}^{Dmin(t)}-Mu_{u,n}^{Dmin(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-5)}$$
$$P_{u,n}^{D(t)}+Mu_{u,n}^{Dmin(t)} \le M \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-6)}$$
$$\phi_{u,n}^{Dmax(t)}-Mu_{u,n}^{Dmax(t)} \le 0 \qquad \forall u,t\in\mathcal{L},\forall n\in BN_u \qquad \text{(n-7)}$$
$$-P_{u,n}^{D(t)}+Mu_{l,n}^{Dmax(t)} \le M-p_{u,n}^{D(t)} \qquad \forall n,t\in BN_u \qquad \text{(n-8)}$$

$$-\rho_{uv}^{min} \leq 0 \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-1}$$
$$-\rho_{uv}^{max} \leq 0 \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-2}$$
$$\rho_{uv}^{min} - Mu_{uv}^{min} \leq 0 \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-3}$$
$$\rho_{uv}^{max} - Mu_{uv}^{max} \leq 0 \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-4}$$
$$B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) \leq f_{uv}^{max} \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-5}$$
$$-B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) \leq f_{uv}^{max} \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-6}$$
$$B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) + Mu_{uv}^{min(t)} \leq M - f_{uv}^{max} \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-7}$$
$$-B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) + Mu_{uv}^{max(t)} \leq M - f_{uv}^{max} \qquad \forall u,v \in \mathcal{L} \tag{rho-8}$$

$$-\lambda_{u,m}^{A(t)} \leq 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall m \in BM_u \tag{lambdaA}$$

$$-P_{u,i(\omega)}^{DR(t)} \leq 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L},\ \forall i \in \mathcal{S}_u, \forall \omega \in \Omega \tag{PDR-1}$$
$$P_{u,i(\omega)}^{DR(t)} \leq \overline{P_{ru,i(\omega)}^{DR(t)}} \qquad \forall u,t \in \mathcal{L},\ \forall i \in \mathcal{S}_u, \forall \omega \in \Omega \tag{PDR-2}$$

$$-P_{u(\omega)}^{(t)Bal+} \leq 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall \omega \in \Omega \tag{ppv-1}$$
$$-P_{u(\omega)}^{(t)Bal-} \leq 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall \omega \in \Omega \tag{ppv-2}$$

4.3 等式制約

$$-\sum_{m \in BM_u} P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{i \in \mathcal{S}_u} P_{u,i}^{DR(t)} - P_{u(\omega)}^{(t)Bal+} + P_{u(\omega)}^{(t)Bal-} = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L},\ \forall \omega \in \Omega \tag{eq-1}$$
$$\sum_{m \in BM_u} P_{u,m}^{A(t)} + \sum_{o \in BO_u} P_{u,o}^{G(t)} - \sum_{n \in BN_u} P_{u,n}^{D(t)} - \sum_{v \in \mathcal{L}} B_{uv}(\theta_u^{(t)} - \theta_v^{(t)}) = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L} \tag{eq-2}$$
$$\theta_{u=1} = 0 \tag{eq-3}$$
$$\lambda_{u,m}^{A(t)} - \phi_{u,m}^{Amin(t)} + \phi_{u,m}^{Amax(t)} + \alpha_u^{(t)} = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall m \in BM_u \tag{eq-4}$$
$$\lambda_{u,o}^{G(t)} - \phi_{u,o}^{Gmin(t)} + \phi_{u,o}^{Gmax(t)} + \alpha_u^{(t)} = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall o \in BO_u \tag{eq-5}$$
$$\lambda_{u,n}^{D(t)} - \phi_{u,n}^{Dmin(t)} + \phi_{u,n}^{Dmax(t)} - \alpha_u^{(t)} = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L}, \forall n \in BN_u \tag{eq-6}$$
$$B_{uv}(-\alpha_u^{(t)} - \rho_{uv}^{min(t)} + \rho_{uv}^{max(t)} - \rho_{uv}^{min(t)} + \rho_{uv}^{max(t)}) + (\gamma)_{u=1} = 0 \qquad \forall u,t \in \mathcal{L} \tag{eq-7}$$