

二阶锥交流潮流优化模型 (SOCP-AC-OPF-Model)

目录

1 符号表

1.1 索引与集合

符号	描述	说明
t	时段索引	$t \in \{0, 1, \dots, T-1\}$
i, j, k	节点索引	$i, j, k \in N$
g	发电机索引	$g \in G$
dr	可调负荷索引	$dr \in DR$
N	节点集合	配电网所有节点的集合, $ N =$ 节点总数
E	支路集合	配电网所有支路的集合, 每条支路表示为 (i, j, r_{ij}, x_{ij})
G	发电机集合	所有发电机的集合, $ G =$ 发电机总数
DR	可调负荷集合	所有可调负荷的集合, $ DR =$ 可调负荷总数
G_j	节点 j 的发电机集合	连接在节点 j 的所有发电机
DR_j	节点 j 的可调负荷集合	连接在节点 j 的所有可调负荷

1.2 决策变量

1.2.1 支路变量

符号	描述	单位
$P_{t,i,j}$	支路 (i, j) 在时段 t 的有功功率	p.u.
$Q_{t,i,j}$	支路 (i, j) 在时段 t 的无功功率	p.u.
$l_{t,i,j}$	支路 (i, j) 在时段 t 的电流幅值平方 $ I_{ij} ^2$	p.u.

1.2.2 节点变量

符号	描述	单位
$v_{t,i}$	节点 i 在时段 t 的电压幅值平方 $ V_i ^2$	p.u.
$p_{t,i}$	节点 i 在时段 t 的有功注入功率	p.u.

$q_{t,i}$	节点 i 在时段 t 的无功注入功率	p.u.
-----------	------------------------	------

1.2.3 发电机变量

符号	描述	单位
$P_{g,t,g}$	发电机 g 在时段 t 的有功出力	p.u.
$Q_{g,t,g}$	发电机 g 在时段 t 的无功出力	p.u.

1.2.4 可调负荷变量

符号	描述	单位
$P_{DR,t,dr}$	可调负荷 dr 在时段 t 的削减量 (正数表示削减)	p.u.

1.3 网络参数

符号	描述	单位
r_{ij}	支路 (i, j) 的电阻	p.u.
x_{ij}	支路 (i, j) 的电抗	p.u.
V_{\min}	节点电压幅值下限	p.u. (默认 0.9)
V_{\max}	节点电压幅值上限	p.u. (默认 1.1)

1.4 锥还原相关符号 (第 7 节)

符号	描述	单位
$\Delta_{t,i,j}$	支路 (i, j) 在时段 t 的锥松弛间隙	p.u. ²
\mathbf{x}_{ij}	支路功率向量, $\mathbf{x}_{ij} = (P_{t,i,j}, Q_{t,i,j})^T$	p.u.
\mathbf{d}	方向向量, $\mathbf{d} = (d_P, d_Q)^T$	无量纲
r	收缩因子, $r \in [0, 1]$	无量纲
r_{\min}	初始收缩因子	无量纲 (默认 0.5)
r_k	第 k 层的收缩因子	无量纲
\mathcal{L}	线性割约束集合	-
\mathcal{D}_ℓ	第 ℓ 层的方向集合	-

L_{\max}	最大层数	正整数（默认 3-5）
K_{\max}	最大迭代次数	正整数（默认 50）
ϵ	收敛容差	p.u. ² （默认 10^{-6} ）

2 优化模型

$$\min_{P_{t,i,j}, Q_{t,i,j}, l_{t,i,j}, v_{t,i}, p_{t,i}, q_{t,i}, P_{g,t,g}, Q_{g,t,g}, P_{DR,t,dr}} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{(i,j) \in E} l_{t,i,j} \quad (1)$$

s.t.

$$v_{t,0} = 1.0, \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, T-1\} \quad (1)$$

$$p_{t,j} = \sum_{g \in G_j} P_{g,t,g} + \sum_{dr \in DR_j} P_{DR,t,dr} + P_{d,t,j}, \quad \forall t, j \in N \quad (2a)$$

$$q_{t,j} = \sum_{g \in G_j} Q_{g,t,g} + Q_{d,t,j}, \quad \forall t, j \in N \quad (2b)$$

$$p_{t,j} = \sum_{(j,k) \in E} P_{t,j,k} - \sum_{(i,j) \in E} (P_{t,i,j} - r_{ij} \cdot l_{t,i,j}), \quad \forall t, j \in N \quad (3a)$$

$$q_{t,j} = \sum_{(j,k) \in E} Q_{t,j,k} - \sum_{(i,j) \in E} (Q_{t,i,j} - x_{ij} \cdot l_{t,i,j}), \quad \forall t, j \in N \quad (3b)$$

$$v_{t,j} = v_{t,i} - 2(r_{ij}P_{t,i,j} + x_{ij}Q_{t,i,j}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)l_{t,i,j}, \quad \forall t, (i,j) \in E \quad (4)$$

$$(2P_{t,i,j})^2 + (2Q_{t,i,j})^2 + (l_{t,i,j} - v_{t,i})^2 \leq (l_{t,i,j} + v_{t,i})^2, \quad \forall t, (i,j) \in E \quad (5)$$

$$P_{g,\min}(t) \leq P_{g,t,g} \leq P_{g,\max}(t), \quad \forall t, g \in G \quad (6)$$

$$P_{DR,\min}(t) \leq P_{DR,t,dr} \leq P_{DR,\max}(t), \quad \forall t, dr \in DR \quad (7)$$

$$V_{\min}^2 \leq v_{t,i} \leq V_{\max}^2, \quad \forall t, i \in N \quad (8)$$

$$-2.5 \leq P_{t,i,j} \leq 2.5, \quad \forall t, (i,j) \in E \quad (9a)$$

$$-2.5 \leq Q_{t,i,j} \leq 2.5, \quad \forall t, (i,j) \in E \quad (9b)$$

$$0 \leq l_{t,i,j} \leq 2.5, \quad \forall t, (i,j) \in E \quad (9c)$$

3 决策变量

3.1 支路变量

- $P_{t,i,j}$: 支路 (i,j) 在时段 t 的有功功率 (p.u.)
- $Q_{t,i,j}$: 支路 (i,j) 在时段 t 的无功功率 (p.u.)
- $l_{t,i,j}$: 支路 (i,j) 在时段 t 的电流幅值平方 $|I_{ij}|^2$ (p.u.)

3.2 节点变量

- $v_{t,i}$: 节点 i 在时段 t 的电压幅值平方 $|V_i|^2$ (p.u.)
- $p_{t,i}$: 节点 i 在时段 t 的有功注入功率 (p.u.)
- $q_{t,i}$: 节点 i 在时段 t 的无功注入功率 (p.u.)

3.3 发电机变量

- $P_{g,t,g}$: 发电机 g 在时段 t 的有功出力 (p.u.)
- $Q_{g,t,g}$: 发电机 g 在时段 t 的无功出力 (p.u.)

3.4 可调负荷变量

- $P_{DR,t,dr}$: 可调负荷 dr 在时段 t 的削减量 (p.u.) (正数表示削减)

4 基于方向割的锥还原方法

4.1 问题背景

在二阶锥交流潮流优化模型中，二阶锥松弛约束 (5) 对原始非凸约束进行了凸松弛：

$$l_{t,i,j} \cdot v_{t,i} = P_{t,i,j}^2 + Q_{t,i,j}^2 \Rightarrow \left\| \begin{bmatrix} 2P_{t,i,j} \\ 2Q_{t,i,j} \\ l_{t,i,j} - v_{t,i} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq l_{t,i,j} + v_{t,i} \quad (2)$$

松弛的几何意义：

- 原始约束要求点 $(P_{t,i,j}, Q_{t,i,j}, l_{t,i,j}, v_{t,i})$ 必须位于**二阶锥的表面**（锥面约束）
- 松弛后的约束允许点位于**二阶锥的内部或表面**（锥约束）

在辐射状配电网中，该松弛通常是紧的（tight），即最优解自然满足等式约束。但在某些情况下，松弛解可能落在锥的内部，此时需要进行**锥还原**，将解投影到锥面上以获得原问题的可行解。

4.2 锥松弛间隙检测

设 SOCP 求解得到的最优解为 $(P_{t,i,j}^*, Q_{t,i,j}^*, l_{t,i,j}^*, v_{t,i}^*)$ ，定义**锥松弛间隙**为：

$$\Delta_{t,i,j} = l_{t,i,j}^* \cdot v_{t,i}^* - [(P_{t,i,j}^*)^2 + (Q_{t,i,j}^*)^2] \quad (3)$$

间隙判定：

- 若 $\Delta_{t,i,j} \approx 0$ （在数值误差范围内），则松弛是紧的，无需还原
- 若 $\Delta_{t,i,j} > \epsilon$ （给定容差），则需要进行锥还原

4.3 基于方向的锥还原方法

当检测到松弛间隙时，采用基于方向的迭代方法将解还原到锥面上。该方法基于**Cauchy-Schwarz 不等式**和**方向割约束**。

4.3.1 Cauchy-Schwarz 不等式

对于支路 (i, j) ，记 $\mathbf{x}_{ij} = (P_{t,i,j}, Q_{t,i,j})^T$ ，则二阶锥约束为：

$$\|\mathbf{x}_{ij}\|_2 \leq \sqrt{l_{t,i,j} \cdot v_{t,i}} \quad (4)$$

对于任意方向向量 $\mathbf{d} = (d_P, d_Q)^T$ ，由 Cauchy-Schwarz 不等式可得：

$$\frac{\mathbf{d}^T \mathbf{x}_{ij}}{\|\mathbf{d}\|_2} \leq \|\mathbf{x}_{ij}\|_2 \leq \sqrt{l_{t,i,j} \cdot v_{t,i}} \quad (5)$$

这表明：沿任意方向 \mathbf{d} 的投影不超过 $\sqrt{l_{t,i,j} \cdot v_{t,i}}$ 。

4.3.2 方向割约束

为了收紧可行域，在方向 \mathbf{d} 上添加带收缩因子的方向割：

$$\frac{\mathbf{d}^T \mathbf{x}_{ij}}{\|\mathbf{d}\|_2} \geq r \cdot \sqrt{l_{t,i,j} \cdot v_{t,i}} \quad (6)$$

其中 $r \in [0, 1]$ 为收缩因子：

- $r = 1$ ：最紧的割，仅保留方向 \mathbf{d} 上的锥面点
- $r < 1$ ：较松的割，保留方向 \mathbf{d} 附近一定角度范围内的锥面点

4.4 算法伪代码

输入: SOCP 松弛解 (P^*, Q^*, l^*, v^*) , 参数 $\epsilon, \epsilon_{\text{stag}}, W_{\text{stag}}, L_{\text{max}}, K_{\text{max}}, r_{\text{min}}$

输出: 还原解 $(\bar{P}, \bar{Q}, \bar{l}, \bar{v})$, 收敛状态

// 阶段一: 初始化

$k \leftarrow 0, \ell \leftarrow 1;$

$\mathcal{L} \leftarrow \emptyset$ // 方向割约束集合

$\mathcal{H} \leftarrow \emptyset$ // 间隙历史记录

$r_1 \leftarrow r_{\text{min}};$

$\mathcal{D}_1 \leftarrow \{(1, 1)^T, (-1, 1)^T, (-1, -1)^T, (1, -1)^T\}$ // 第一层全局方向集

// 添加初始方向割约束

foreach $(i, j) \in E, t \in [0, T - 1], \mathbf{d} \in \mathcal{D}_1$ **do**

$\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \cup \{\mathbf{d}^T \mathbf{x}_{ij} / \|\mathbf{d}\| \geq r_1 \sqrt{l_{t,i,j} v_{t,i}}\};$

end

// 阶段二: 主迭代循环

while $k < K_{\text{max}}$ **do**

$k \leftarrow k + 1;$

 // 步骤 1: 求解带约束的 SOCP 问题

$(P^k, Q^k, l^k, v^k) \leftarrow \text{SOLVE_SOCP}(\mathcal{L});$

 // 步骤 2: 计算锥松弛间隙

foreach $(i, j) \in E, t \in [0, T - 1]$ **do**

$\Delta_{t,i,j}^k \leftarrow l_{t,i,j}^k \cdot v_{t,i}^k - [(P_{t,i,j}^k)^2 + (Q_{t,i,j}^k)^2];$

end

$\Delta_{\text{max}}^k \leftarrow \max_{t,i,j} \Delta_{t,i,j}^k;$

$\mathcal{H} \leftarrow \mathcal{H} \cup \{\Delta_{\text{max}}^k\};$

 // 步骤 3: 检查全局收敛

if $\Delta_{\text{max}}^k \leq \epsilon$ **then**

return $(P^k, Q^k, l^k, v^k), \text{CONVERGED};$

end

 // 步骤 4: 层内自适应方向搜索 (固定 r_ℓ)

$r_\ell \leftarrow r_{\text{min}} + (\ell - 1) / (L_{\text{max}} - 1) \cdot (1 - r_{\text{min}});$

foreach $(i, j) \in E, t \in [0, T - 1]$ **do**

if $\Delta_{t,i,j}^k > \epsilon$ **then**

$\hat{\mathbf{d}} \leftarrow (P_{t,i,j}^k, Q_{t,i,j}^k)^T / \|(P_{t,i,j}^k, Q_{t,i,j}^k)\|;$

$\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \cup \{\hat{\mathbf{d}}^T \mathbf{x}_{ij} / \|\hat{\mathbf{d}}\| \geq r_\ell \sqrt{l_{t,i,j} v_{t,i}}\};$

end

end

 // 步骤 5: 判断层内停滞

if $|\mathcal{H}| \geq W_{\text{stag}}$ **then**

$\text{recent} \leftarrow \text{LAST_N_ELEMENTS}(\mathcal{H}, W_{\text{stag}});$

$\text{improvements} \leftarrow \{\text{recent}[i] - \text{recent}[i + 1] \mid i = 1, \dots, W_{\text{stag}} - 1\};$

if $\max(\text{improvements}) < \epsilon$ **then**

4.5 算法复杂度分析

时间复杂度（单次迭代）：

操作	复杂度	说明
SOCP 求解	$O(n^3)$	n 为决策变量数
间隙计算	$O(T \cdot E)$	遍历所有支路和时段
方向割添加	$O(T \cdot E)$	最多添加 $T \cdot E $ 个约束
总计	$O(n^3)$	由 SOCP 求解主导

空间复杂度：

数据结构	复杂度	说明
决策变量	$O(T \cdot E)$	支路变量和节点变量
方向割约束集合 \mathcal{L}	$O(K_{\max} \cdot T \cdot E)$	最坏情况
总计	$O(K_{\max} \cdot T \cdot E)$	-

迭代次数：

- 典型情况：10-30 次迭代
- 最坏情况： $K_{\max} = 50$ 次迭代
- 层数：通常 2-3 层

5 模型特点（修订）

1. **凸优化问题**：通过二阶锥松弛，将非凸的交流潮流问题转化为凸优化问题，可以高效求解并获得全局最优解
2. **精确性保证**：
 - 在辐射状配电网络中，二阶锥松弛通常自然紧致
 - 当松弛不紧时，通过锥还原方法确保解满足物理约束
 - 结合相角恢复技术，可获得原问题的高质量解
3. **多时段优化**：考虑多个时间断面的联合优化，支持时变的负荷、发电机出力限制等
4. **适用场景**：适用于辐射状配电网络的最优潮流计算，可用于配电网规划、运行优化等场景

5. **模型依据**: 基于 Branch Flow Model (BFM) 和二阶锥松弛 (SOCP relaxation) 技术, 并提供完整的锥还原求解方法

6. **鲁棒性**:

- 方向割方法保持问题凸性, 确保全局最优性
- 差凸规划方法提供快速收敛的备选方案
- 层次化策略平衡了求解效率和精度

注: 该模型实现基于 Gurobi 优化器求解, 使用了高精度参数设置 ($\text{MIPGap}=1\text{e-}8$, $\text{OptimalityTol}=1\text{e-}8$, $\text{FeasibilityTol}=1\text{e-}8$) 以确保求解精度。锥还原方法可在必要时自动激活, 确保解的物理可行性。