

# 二阶锥松弛交流潮流优化的锥还原方法 (SOCP-AC-OPF-Relaxation-Recovery-Cut-Adding- Method)

## 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. <sup>2</sup>
$\mathbf{x}_{ij}$	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	-
$\mathcal{D}_\ell$	第 $\ell$ 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）
$\epsilon$	收敛容差	p.u. <sup>2</sup> （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