

# 考虑禁止运行区的环境经济调度混合逻辑约束优化方法

郭小璇<sup>1,2</sup>, 龚仁喜<sup>1</sup>, 鲍海波<sup>1</sup>, 杭乃善<sup>1</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区南宁市 530004;

2. 广西电网公司电力科学研究院, 广西壮族自治区南宁市 530023)

**摘要:** 为了准确描述考虑禁止运行区域的发电机出力限制, 分析了优化问题约束条件之间存在的“与”和“或”的逻辑关系, 研究了一种同时包含“与”和“或”逻辑约束的混合逻辑约束优化(MLCO)问题, 并基于此, 将考虑禁止运行区域的发电机出力限制表示为一组“或”逻辑关系的约束条件, 建立了环境经济调度的 MLCO 模型。根据布尔代数逻辑变换的思想, 延伸出约束条件逻辑关系的等价数学变换, 实现了“或”逻辑和“与”逻辑的约束条件之间的转换。从而将 MLCO 问题转化为仅含“与”逻辑约束的常规非线性优化问题, 最后采用现代内点算法加以求解。6 机和 15 机系统的测试结果表明所提出的 MLCO 模型与方法行之有效, 具有较高的求解精度和效率。

**关键词:** 环境经济调度; 禁止运行区域; 混合逻辑约束优化; 数学变换; 内点法

## 0 引言

发电调度问题是在满足电力系统负荷需求和运行约束条件下, 确定系统指标最优的调度方案的寻优问题<sup>[1-5]</sup>。传统的发电调度仅追求系统的经济性最优, 是一种经济调度(economic dispatching, ED)问题。近年来, 为了兼顾经济利益和环境利益, 保证发电调度计划同时具备经济性、环保性和科学性, 环境经济发电调度<sup>[6-10]</sup>(environmental economic dispatching, EED)问题逐渐成为研究热点之一。

由于发电机组运行物理条件限制, 在某些特定运行区域会出现轴承振动放大而影响机组安全运行, 这些特定运行区域需设置为机组的禁止运行区域。考虑发电机禁止运行区域后, 环境经济调度问题变成一个具有离散解空间的非线性优化问题, 仅适用于连续解空间的算法难以应用于其求解。对于考虑禁止运行区域的经济调度或厂内负荷分配问题, 国内外不少文献采用遗传算法、进化算法等智能算法<sup>[11-15]</sup>进行求解, 取得了不错的计算效果。而文献<sup>[16-19]</sup>采用数值方法处理, 则具有计算量小、理论支撑充分等特点。文献<sup>[16]</sup>利用发电机离散出力约束特点, 根据函数的零点定理, 将一台发电机的若干离散约束重新构造为一个不等式约束, 该方法不具备普遍应用的一般性。文献<sup>[17]</sup>利用半定规划松

弛策略, 建立了经济调度问题的半定规划模型。文献<sup>[18-19]</sup>通过引入 0-1 变量, 将原含禁止区间的非线性优化问题转化为混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)问题, 并采用分支定界法或大 M 方法求解, 在计算质量和速度上均有一定优势。

本文将考虑禁止运行区域的发电机出力限制表达为一组“或”逻辑关系的约束条件, 提出了环境经济调度的混合逻辑约束优化(mixed logic constrained optimization, MLCO)模型和方法。通过 6 机和 15 机系统的测试结果, 所提出的 MLCO 模型与方法行之有效, 具有较高的求解精度和效率, 且可推广应用于其他问题求解。

## 1 混合逻辑约束优化

### 1.1 约束条件的逻辑关系

在布尔代数中, 任意两个数值  $a$  和  $b$  之间的逻辑关系分为“与”和“或”两种, 分别使用 AND 和 OR 表达运算关系, 那么有: ①  $a$  AND  $b$ ,  $a$  和  $b$  同时为真时, 运算结果为真; ②  $a$  OR  $b$ ,  $a$  和  $b$  至少一个为真时, 运算结果为真。

将此逻辑关系扩展至优化问题的约束条件。对于任意两个约束条件或两组约束条件  $L(x) \leq 0$  和  $K(x) \leq 0$ , 它们之间“与”和“或”逻辑关系为: ①  $L(x) \leq 0$  AND  $K(x) \leq 0$ , 其含义是  $L(x) \leq 0$  和  $K(x) \leq 0$  所确定的解空间的交集为解空间, 即优化问题的可行域; ②  $L(x) \leq 0$  OR  $K(x) \leq 0$ , 其含义是  $L(x) \leq 0$  和  $K(x) \leq 0$  的解空间并集为可行域。

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-06-24。

广西青年基金资助项目(2014GXNSFBA118277); 南宁市科学研究与科技开发计划项目(20121025)。

## 1.2 混合逻辑约束优化问题

常规的优化问题可以表达为如下一般形式:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h_i(x)=0 & i=1,2,\dots,n_E \\ g_i(x)\leq 0 & i=1,2,\dots,n_I \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$  为变量; $f(x)$  为目标函数; $h_i(x)$  和  $g_i(x)$  分别为等式和不等式约束的函数; $n_E$  和  $n_I$  分别为等式约束和不等式约束个数。

容易理解,优化问题式(1)的可行域是所有等式约束和不等式约束定义的解空间的交集。这些约束条件之间存在逻辑“与”的关系。可将常规优化问题表达为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h_1(x)=0 \text{ AND}\dots\text{AND } h_{n_E}(x)=0 \text{ AND} \\ g_1(x)\leq 0 \text{ AND}\dots\text{AND } g_{n_I}(x)\leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于某些优化问题的可行域不仅仅由众多约束条件的交集构成,也可能由若干约束条件的并集,或者混合约束条件的并集和交集共同构成<sup>[20-21]</sup>,即为如下优化问题:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h_1(x)=0 \text{ AND}\dots\text{AND } h_{n_E}(x)=0 \text{ AND} \\ g_1(x)\leq 0 \text{ AND}\dots\text{AND } g_{n_I}(x)\leq 0 \text{ AND} \\ \{d_{1,1}(x)\leq 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{1,k}(x)\leq \\ 0\} \text{ AND}\dots\text{AND}\{d_{m,1}(x)\leq 0 \text{ OR}\dots\text{OR} \\ d_{m,km}(x)\leq 0\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_{i,j}\leq 0 (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,km)$ , 为包含“或”关系的约束条件。

式(3)就是混合“与”和“或”逻辑关系的优化问题,显然式(2)的常规优化问题是仅含“与”逻辑优化问题,可以看作混合逻辑优化问题的一种特殊形式。

## 1.3 逻辑约束的转换

混合逻辑约束优化问题的求解可以有两种思路:①直接求解,目前尚没有合适的求解方法;②转化为仅含“与”逻辑的常规优化问题,通过常规优化技术求解,本文采用这种思路。

任意两个布尔代数  $a$  和  $b$ , 其“或”逻辑关系可以通过下式转化为“与”逻辑:

$$a \text{ OR } b = \overline{\overline{a} \text{ AND } \overline{b}} \quad (4)$$

式中: $\overline{a}$  表示  $a$  的“非”逻辑运算。

根据这种思想,分析 MLCO 模型式(3)中一组“或”逻辑约束条件  $d_{i,1}(x)\leq 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x)\leq 0$ 。假设  $d_{i,1}(x)> 0 \text{ AND}\dots\text{AND } d_{i,ki}(x)> 0$  所定义的可行域如图 1 中空白色区域所示,该空白区域边界由  $d_{i,j}(x)=0 (j=1,2,\dots,ki)$  确定,该区域以外空间为约束条件  $d_{i,1}(x)\leq 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x)\leq 0$

定义的可行域。

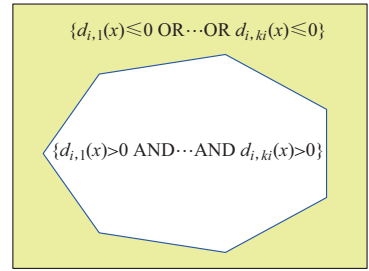


图 1 “或”逻辑约束定义的可行域  
Fig.1 Feasible region defined by OR logic constraints

按照式(4)逻辑关系变换思想,可将原“或”逻辑约束条件的可行域进行如下转换<sup>[20,22]</sup>:

$$\begin{aligned} x \in \{d_{i,1}(x)\leq 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x)\leq 0\} \Leftrightarrow \\ x \notin \{d_{i,1}(x)> 0 \text{ AND}\dots\text{AND } d_{i,ki}(x)> 0\} \end{aligned} \quad (5)$$

## 1.4 重新构造约束条件

由于很难直接利用式(5)变换,需要重新构造函数,对于任意一个函数  $d_{i,j}(x)$ , 可定义如下函数:

$$v_j = (d_{i,j}^2 + t^2)^{\frac{1}{2}} - d_{i,j} \quad j=1,2,\dots,ki \quad (6)$$

$$V = \sum_{j=1}^{ki} v_j \quad (7)$$

式中: $t$  为一个很小的正实数,  $t \ll 1$ ;  $v_j$  和  $V$  为关于  $x$  和  $t$  的函数。

分析函数  $v_j$  和  $V$  的特性,明确它们与函数  $d_{i,j}(x)$  的关系:

$$\begin{cases} v_j = -2d_{i,j} + O(t^2) \gg t > 0 & d_{i,j} < 0 \\ v_j \approx t & d_{i,j} = 0 \\ v_j \approx O(t^2) & d_{i,j} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} V \gg t & \{d_{i,1}(x) < 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x) < 0\} \\ V = O(t^2) & \{d_{i,1}(x) > 0 \text{ AND}\dots\text{AND } d_{i,ki}(x) > 0\} \\ V = \omega t + O(t^2) & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $j=1,2,\dots,ki$ ;  $\omega$  为满足  $1 < \omega \leq ki$  的正实数。

由于  $t$  是很小的正实数,当其趋向于 0, 即  $t \rightarrow 0$  时,可以有

$$\begin{cases} v_j > 0 & d_{i,j} < 0 \\ v_j = 0 & d_{i,j} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} V > 0 & \{d_{i,1}(x) < 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x) < 0\} \\ V = 0 & \{d_{i,1}(x) \geq 0 \text{ AND}\dots\text{AND } d_{i,ki}(x) \geq 0\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $j=1,2,\dots,ki$ 。

从式(11)可知,  $d_{i,1}(x) < 0 \text{ OR}\dots\text{OR } d_{i,ki}(x) < 0$  是  $V > 0$  成立的充分必要条件,而

$d_{i,1}(x) \geq 0$  AND...AND  $d_{i,ki}(x) \geq 0$  同样是  $V=0$  成立的充分必要条件。若需保证  $x$  在图 1 的黄色区域(可行域内部),即  $x$  不在图中空白区域,只需  $d_{i,1}(x) \geq 0$  AND...AND  $d_{i,ki}(x) \geq 0$  不满足即可,只需满足:

$$V = \sum_{j=1}^{ki} v_j > 0 \quad (12)$$

那么,给定一个很小的正实数  $\Delta v$ ,可以有:

$$V = \sum_{j=1}^{ki} v_j \geq \Delta v \Rightarrow \Delta v - \sum_{j=1}^{ki} v_j \leq 0 \quad (13)$$

由  $d_{i,1}(x) < 0$  OR...OR  $d_{i,ki}(x) < 0$  所确定的可行域及其边界,可等价于  $\Delta v - \sum_{j=1}^{ki} v_j \leq 0$  表达。当  $\Delta v \rightarrow 0$  时,可确保  $x$  在可行域边界上,本文选取  $\Delta v = 0.0001$ 。

综上所述,有如下等价变换:

$$\{d_{i,1}(x) \leq 0 \text{ OR } \dots \text{ OR } d_{i,ki}(x) \leq 0\} \Leftrightarrow \Delta v - \sum_{j=1}^{ki} ((d_{i,j}^2)^{\frac{1}{2}} - d_{i,j}) \leq 0 \quad (14)$$

同理,有

$$\{d_{i,1}(x) \geq 0 \text{ OR } \dots \text{ OR } d_{i,ki}(x) \geq 0\} \Leftrightarrow \Delta v - \sum_{j=1}^{ki} ((d_{i,j}^2)^{\frac{1}{2}} + d_{i,j}) \leq 0 \quad (15)$$

将混合整数优化问题式(3)中“或”逻辑约束按式(14)和式(15)进行转化,即可将原混合逻辑约束优化问题重构为仅含“与”逻辑的常规优化问题:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t.} & h_i(x) = 0 & i = 1, 2, \dots, n_E \\ & g_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, n_I \\ & \Delta v - \sum_{j=1}^{ki} ((d_{i,j}^2)^{\frac{1}{2}} - d_{i,j}) \leq 0 \\ & & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (16)$$

式中:各约束条件之间均为“与”逻辑关系,为描述方便,省略“AND”运算符。

## 2 环境经济调度的 MLCO 模型

### 2.1 发电机的禁止运行区域

禁止运行区域将发电机运行区间分割成多个离散的区间。图 2 表达了发电机能耗成本和环境成本与发电机出力的关系。图中发电机的出力区间即被两个禁止运行区域分割成 3 个离散的运行区间。

对于出力范围有  $ki$  个禁止运行区域的发电机  $i$ ,发电机出力区间将被分割成  $ki+1$  个离散区间,那么考虑禁止运行区域的发电机出力约束描述为<sup>[14-15]</sup>:

$$\begin{cases} \underline{P}_i \leq P_i \leq P_i^{U,1} \\ P_i^{L,2} \leq P_i \leq P_i^{U,2} \\ \vdots \\ P_i^{L,ki+1} \leq P_i \leq \bar{P}_i \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_i$  为第  $i$  台发电机的计划出力, $\bar{P}_i$  和  $\underline{P}_i$  为  $P_i$  的上下限,各禁止运行区域分别为: $[P_i^{U,1}, P_i^{L,2}]$ ,  $[P_i^{U,2}, P_i^{L,3}]$ , ...,  $[P_i^{U,ki}, P_i^{L,ki+1}]$ 。

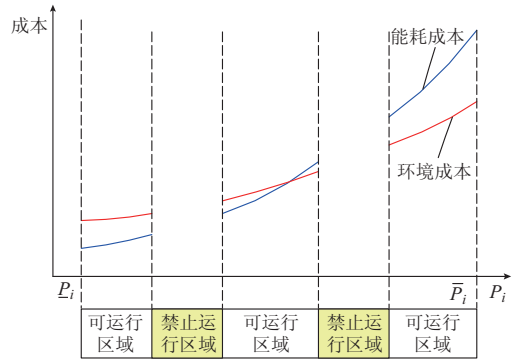


图 2 发电机能耗成本和环境成本与发电出力的关系  
Fig.2 Relationship between energy cost, environmental cost and power output of generator

### 2.2 环境经济调度的 MLCO 模型构建

环境经济调度问题主要目标是:在给定的负荷水平下,确定发电成本及污染气体排放量同时最小的调度方案,且满足系统的安全运行条件及设备的物理极限等约束<sup>[6-10]</sup>。通常被构造为一个非线性、多目标的优化问题,本文通过污染气体排放的惩罚因子将之转化为以经济的发电成本为目标的单目标优化问题,目标函数为:

$$\min F(P_i) = f_C(P_i) + f_E(P_i) \quad (18)$$

$$f_C(P_i) = \sum_{i=1}^n (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (19)$$

$$f_E(P_i) = E_M \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \zeta_i e^{\lambda_i P_i}) \quad (20)$$

式中: $F$  为系统总的发电成本; $f_C$  和  $f_E$  为系统的能耗成本和环境成本,即污染气体排放量惩罚成本; $n$  为系统中的发电机组数; $a_i, b_i, c_i$  为机组  $i$  的能耗参数; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \lambda_i$  为机组  $i$  的污染气体排放量参数; $E_M$  为排放单位污染气体的惩罚因子,其将污染气体排放量转化为发电成本,其计算公式<sup>[23]</sup>为  $E_M = \left( \sum_{i=1}^k \lambda_1 \lambda_2 S_i G_i / N_i \right) / Q$ ,其中  $Q$  为发电机组的年发电量, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为地区和环境功能区收费调整系数, $G_i$  和  $S_i$  为第  $i$  种污染气体的排放量和收费标准, $N_i$  为排放当量值。

本文发电调度考虑的约束条件是功率平衡约束和机组出力约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i - P_D + P_{\text{loss}} = 0 \\ \text{式(17)} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $P_D$  为系统实时的负荷水平;  $P_{\text{loss}}$  为系统总的网损。

本文采用  $B$  系数法<sup>[24]</sup>, 将电力网络损耗近似表达为发电出力的二次函数, 具体为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{0,i} P_i + B_{00} = \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P} + \mathbf{B}_0 \mathbf{P}^T + B_{00} \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{P}$  为发电机的出力向量;  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{B}_0$ ,  $B_{00}$  分别为  $B$  系数法中的二次项矩阵、一次项向量和常数, 其中  $B_{ij}$  和  $B_{0,i}$  分别为矩阵  $\mathbf{B}$  和向量  $\mathbf{B}_0$  的元素。

将环境经济调度模型(式(18)一式(21))表达为混合逻辑约束优化模型:

$$\begin{cases} \min F(P_i) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^G P_i - P_D + P_{\text{loss}} = 0 \text{ AND} \{ \underline{P}_1 \leq P_1 \leq P_1^{U,1} \text{ OR } P_1^{L,2} \leq P_1 \leq P_1^{U,2} \text{ OR} \dots \text{ OR } P_1^{L,k+1} \leq P_1 \leq \bar{P}_1 \} \\ \text{AND} \dots \text{AND} \{ \underline{P}_i \leq P_i \leq P_i^{U,1} \text{ OR } P_i^{L,2} \leq P_i \leq P_i^{U,2} \text{ OR} \dots \text{ OR } P_i^{L,ki+1} \leq P_i \leq \bar{P}_i \} \\ \text{AND} \dots \text{AND} \{ \underline{P}_n \leq P_n \leq P_n^{U,1} \text{ OR } P_n^{L,2} \leq P_n \leq P_n^{U,2} \text{ OR} \dots \text{ OR } P_n^{L,kG+1} \leq P_n \leq \bar{P}_n \} \end{cases} \quad (23)$$

### 3 环境经济调度 MLCO 模型的求解

#### 3.1 模型变换

环境经济调度问题(式(23))中考虑禁止运行区域的发电机出力约束为双边界约束, 可以表达为:

$$\begin{cases} \{ \underline{P}_i \leq P_i \leq P_i^{U,1} \text{ OR } P_i^{L,2} \leq P_i \leq P_i^{U,2} \text{ OR} \dots \text{ OR } P_i^{L,ki+1} \leq P_i \leq \bar{P}_i \} = \{ (P_i - \underline{P}_i)(P_i - P_i^{U,1}) \leq 0 \} \text{ OR } \{ (P_i - P_i^{L,2})(P_i - P_i^{U,2}) \leq 0 \} \text{ OR} \dots \text{ OR } \{ (P_i - P_i^{L,ki+1})(P_i - \bar{P}_i) \leq 0 \} \end{cases} \quad (24)$$

那么根据前文所述, 可以构造如下函数:

$$\begin{cases} v_{i,1} = \{ [(P_i - \underline{P}_i)(P_i - P_i^{U,1})]^2 \}^{\frac{1}{2}} - (P_i - \underline{P}_i)(P_i - P_i^{U,1}) \\ v_{i,2} = \{ [(P_i - P_i^{L,2})(P_i - P_i^{U,2})]^2 \}^{\frac{1}{2}} - (P_i - P_i^{L,2})(P_i - P_i^{U,2}) \\ \vdots \\ v_{i,ki+1} = \{ [(P_i - P_i^{L,ki+1})(P_i - \bar{P}_i)]^2 \}^{\frac{1}{2}} - (P_i - P_i^{L,ki+1})(P_i - \bar{P}_i) \end{cases} \quad (25)$$

$$\Delta v - \sum_{j=1}^{ki+1} v_{i,j} \leq 0 \quad (26)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, n$ 。

最终, 经过推导可将原含禁止运行区域的环境经济调度模型转化为:

$$\begin{cases} \min F(P_i) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_{\text{loss}} = 0 \\ \Delta v - \sum_{j=1}^{ki+1} v_{i,j} \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (27)$$

式(27)是常规非线性规划问题, 可采用现代内点算法直接求解。但是由于其约束条件具有较强非线性, 属于非凸优化问题, 为保证较高计算性能的同时获得更好的优化解, 本文采用信赖域内点算法<sup>[25-26]</sup>求解。

#### 3.2 信赖域内点算法

考虑禁止运行区的环境经济调度(式(27))可表达为式(1)所示的非线性规划一般形式。根据信赖域思想, 将该问题在迭代点  $x_k$  处序列二次化, 建立序列二次规划(successive quadratic programming, SQP)子问题为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{d}} \mathbf{f}_k + \nabla \mathbf{f}_k^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{W}_k \mathbf{d} \\ \text{s.t.} \quad \nabla \mathbf{h}_k^T \mathbf{d} + \mathbf{h}_k = \mathbf{0} \\ \nabla \mathbf{g}_k^T \mathbf{d} + \mathbf{g}_k \leq \mathbf{0} \\ \|\mathbf{d}\|_{\infty} \leq \Delta_k \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $\mathbf{f}_k$  和  $\nabla \mathbf{f}_k^T$  分别为在当前点  $x_k$  处的目标函数及其导数;  $\mathbf{h}_k$  和  $\mathbf{g}_k$  为在当前点  $x_k$  处的约束条件函数,  $\nabla \mathbf{h}_k^T$  和  $\nabla \mathbf{g}_k^T$  为其导数;  $\mathbf{W}_k$  为拉格朗日函数的海森矩阵;  $\mathbf{d}$  为迭代步长;  $\Delta_k$  为信赖域半径, 即步长约束。

这里采用内点法求解信赖域 SQP 子问题, 构成了信赖域内点算法, 算法的详细求解步骤参见文献<sup>[25-27]</sup>。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 6 机系统测试结果

本文在 MATLAB R2013b 平台编写程序, 所用计算机为 IBM-PC 兼容机, CPU 主频为  $2 \times 2.19$  GHz, 内存为 3 GB。所采用的 6 机系统算例的发电机能耗参数和环境成本参数如表 1 所示, 表 2 为发电机出力限制, 网架参数参考 IEEE 30 系统。基准值选为 100 MVA, 系统的负荷水平分别为 1 283 MW, 排放单位污染气体的惩罚因子  $E_M = 5$ 。

表 1 6 机系统发电机能耗参数与环境参数  
Table 1 Energy consumption and environmental parameters of generators in 6-unit system

发电 机号	能耗参数				环境参数				
	$a_i$ /美元	$b_i$ / (美元·MW <sup>-1</sup> )	$c_i$ / (美元·MW <sup>-2</sup> )	$\alpha_i$ / 10 <sup>-4</sup> t	$\beta_i$ / (10 <sup>-4</sup> t·MW <sup>-1</sup> )	$\gamma_i$ / (10 <sup>-6</sup> t·MW <sup>-2</sup> )	$\lambda_i$ / MW <sup>-1</sup>	$\zeta_i$ / 10 <sup>-4</sup> t	
G1	786.798 8	38.539 7	0.152 4	6.490	-5.554	4.091	2.857	2	
G2	945.633 2	46.159 1	0.105 8	5.638	-6.047	2.543	3.333	5	
G3	1 049.997 7	40.396 5	0.028 0	4.586	-5.094	4.258	8.000	1	
G4	1 243.531 1	38.305 5	0.035 4	3.380	-3.550	5.426	2.000	2	
G5	1 658.569 6	36.327 8	0.021 1	4.586	-5.094	4.258	8.000	1	
G6	1 356.659 2	38.270 4	0.017 9	5.373	-4.223	5.782	4.236	3	

表 2 6 机系统发电机出力限制  
Table 2 Generator output limitation of 6-unit system

发电 机号	出力限制/MW		禁止运行区域/MW	
	下界	上界	区域 1	区域 2
G1	50	400	[100,130]	[240,270]
G2	25	300	[80,110]	[250,280]
G3	30	300	[100,130]	[210,240]
G4	50	450	[200,230]	[300,330]
G5	20	450	[90,120]	[210,240]
G6	20	280	[70,80]	[150,190]

对于考虑禁止运行区域的环境经济调度问题,通过与文献[15]中的 MINLP 和文献[16]的重构约束方法对比,验证本文所建立的 MLCO 模型与方法的有效性和可行性。其中 MINLP 模型采用互补约束优化理论<sup>[28-29]</sup>转化为常规非线性规划问题后应用内点法进行求解,互补约束处理的相关参数参照文献[29],或采用文献[30]的割平面法构造,割平面后采用内点法求解。

表 3 是 6 机系统不计入系统网络损耗情况下,不同模型计算结果和运行时间对比。不考虑禁止运行区域的环境经济调度问题,可直接采用内点法求解,需迭代 8 次。考虑禁止区域后,系统的环境经济

表 3 6 机系统不计入网损的环境经济调度结果  
Table 3 Environmental economic dispatch results of 6-unit system without line loss

方法	出力/MW						能耗成 本/美元	环境成 本/美元	总成本/ 美元	计算时 间/s	
	G1	G2	G3	G4	G5	G6					
不考虑禁止区域	308.24	271.66	125.07	250.31	131.30	196.42	7 557.3	534.7	8 092.0	0.009	
文献[16]方法	316.38	280.00	130.00	265.56	90.00	201.06	7 559.0	559.4	8 118.4	0.010	
考虑禁 止区域	互补约束法	314.57	250.00	130.00	262.00	126.40	200.03	7 555.7	541.6	8 097.3	0.022
	割平面法	332.53	281.20	130.00	200.00	128.88	210.38	7 558.4	547.0	8 105.4	0.025
	MLCO	305.99	280.00	130.00	246.53	125.33	195.14	7 558.1	534.5	8 092.6	0.018

表 4 6 机系统考虑网损的环境经济调度结果  
Table 4 Environmental economic dispatch results of 6-unit system considering line loss

方法	出力/MW						能耗成 本/美元	环境成 本/美元	总成本/ 美元	网络损 耗/MW	计算时 间/s	
	G1	G2	G3	G4	G5	G6						
不考虑禁止区域	310.84	272.61	125.41	254.93	131.61	197.89	7 561.3	547.1	8 108.4	10.285	0.009	
文献[16]方法	318.24	250.00	130.00	269.31	126.88	202.12	7 561.0	558.7	8 119.7	13.545	0.012	
考虑禁 止区域	互补约束法	317.81	250.00	130.00	268.43	126.82	201.87	7 560.3	556.6	8 117.0	11.928	0.025
	MLCO	309.43	280.00	130.00	252.48	125.75	197.10	7 562.7	548.3	8 111.0	11.761	0.019

调度总费用有所增加,模型计算难度增大。采用文献[16]方法处理,仅需采用内点法求解一个常规非线性规划问题,迭代 11 次即可收敛完成,求解效率很高,但其极易陷入局部最优,故其求解结果较差,而且不同的初始点将获得不同的结果。MINLP 模型考虑了离散变量,采用互补理论的内点算法求解效率不高,需要迭代 16 次,计算时间为 0.022 s,而采用割平面法处理方便,但其求解需要进行线性化处理,一定程度降低了解的质量。而本文 MLCO 模型采用信赖域内点法加以求解,消耗时间为 0.018 s,兼顾了计算效率和求解质量,在消耗较少计算时间的同时,所获得的解优于互补约束法和割平面法。虽然本文所提方法无法取得全局最优解,但其可以避免直接采用内点法迭代步长过大而导致数值振荡甚至不收敛的问题。表 4 是考虑网损的计算结果,与不计入网损得到的结果类似。

表 5 是采用信赖域内点法求解 MLCO 模型的迭代过程分析。经过 3 次信赖域迭代后,计入网络损耗和不计入网损情况的 MLCO 模型均求得最终结果,而且每次迭代构造的 SQP 子问题都可采用内点法有效快速地求解。

表 5 信赖域内点法求解 MLCO 模型分析  
Table 5 Analysis of MLCO model solved by trust region interior-point method

环境经济调度类型	信赖域迭代次数	信赖域子问题迭代次数	计算时间/s
不计入网损	1	5	0.006 1
	2	4	0.005 6
	3	5	0.006 3
计入网损	1	5	0.006 1
	2	5	0.006 0
	3	6	0.007 0

本文所提方法受微小量  $\Delta v$  的影响较大,表 6 是不同微小量对不考虑网损考虑禁止区域的 EED 结果的影响。如表 6 所示,随着  $\Delta v$  的不断减小,发电成本逐渐减小,解的质量不断提高,但表中  $\Delta v = 0.000\ 01$  的结果已违反部分约束条件。这是由于选择微小量过大时,会造成解的质量下降;而微小量选择过小时,将会造成问题的非线性增强,部分发电机出力处于禁止运行区域,同时计算时间增加甚至计算不收敛。

表 6  $\Delta v$  对 EED 计算结果的影响  
Table 6 Influence of  $\Delta v$  on result of EED

$\Delta v$	能耗成本/美元	环境成本/美元	总成本/美元
0.100 00	7 555.0	609.6	8 164.6
0.010 00	7 563.8	550.9	8 113.7
0.001 00	7 554.7	558.4	8 112.1
0.000 10	7 558.1	534.5	8 092.6
0.000 01	7 557.4	533.2	8 090.6

## 4.2 15 机系统测试结果

为进一步说明本文模型与方法的有效性和可行性。将文献[12]的 15 机系统增加发电机的环境参数,计算含禁止区域的环境经济调度问题。附录 A 表 A1 和表 A2 分别为 15 机系统的发电机能耗参数、环境参数和发电机的运行限制。同样选择基准值选为 100 MVA,系统的负荷水平分别为 2 506 MW,排放单位污染气体的惩罚因子  $E_M = 15$ 。

表 7 是 15 机系统不考虑网络损耗情况下,采用不同模型的计算结果分析。与 6 机系统结果类似,本文所提出的 MLCO 模型与方法在求解质量和效率两方面都具有一定优势。

表 7 15 机系统环境经济调度结果  
Table 7 Environmental economic dispatch results of 15-unit system

方法	出力/MW															能耗成本/美元	环境成本/美元	总成本/美元	计算时间/s
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15				
不考虑禁止区域	215.22	250.12	130	130	314.14	231.69	257.82	300	162	160	80	80	85	55	55	23 381	1 081	24 462	0.018
考虑禁止区域	文献[16]方法	206.56	240.04	130	130	335.00	255.00	247.40	300	162	160	80	80	85	55	23 853	1 074	24 927	0.027
	互补约束法	224.39	260.77	130	130	260.00	255.00	268.84	300	162	160	80	80	85	55	23 563	1 093	24 656	0.041
	MLCO	210.53	244.66	130	130	335.00	226.64	252.18	300	162	160	80	80	85	55	23 413	1 077	24 490	0.036

## 4.3 系统规模的影响

采用 MLCO 结合信赖域内点法,避免了求解混合整数规划问题,具备更高的求解效率。图 3 是随着系统规模的不断增大,不同模型的计算情况,显然随着系统规模不断增大,本文 MLCO 模型与方法对系统规模敏感性略低,仍可保持较高的求解性能。

## 5 结论

本文研究了考虑禁止运行区域的发电机出力限制的环境经济调度的 MLCO 模型,主要结论如下。

1)研究了一种同时包含“与”和“或”逻辑约束的混合逻辑约束优化问题,适合于分析多种电力系统实际问题。

2)通过考虑禁止运行区域的发电机出力限制的环境经济调度,建立了环境经济调度的 MLCO 模型。

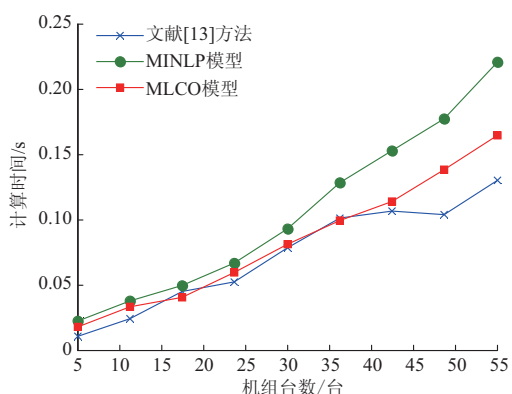


图 3 系统规模对计算时间的影响  
Fig.3 Influence of system scale on the computing time

3)根据布尔代数逻辑变换的思想,推导了约束条件逻辑关系的等价数学变换,实现了“或”逻辑和“与”逻辑的约束条件之间的转换。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 李文沅. 电力系统安全经济运行——模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989: 48-58.
- [2] LI Jianming, WEN Jinyu, HAN Xingning. Low-carbon unit commitment with intensive wind power generation and carbon capture power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 63-71.
- [3] 付一木, 刘明波. 求解多目标随机动态经济调度问题的场景解耦方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 34-40.  
FU Yimu, LIU Mingbo. Scenario decomposition method for multi-objective stochastic dynamic economical dispatch problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 34-40.
- [4] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 碳市场环境下计及碳捕集电厂和换电站的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 150-156.  
GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Power system optimal dispatch incorporating carbon capture power plant and battery swap station under carbon market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 150-156.
- [5] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.  
LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97.
- [6] ABIDO M A. Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1529-1537.
- [7] 刘静, 罗先觉. 采用多目标随机黑洞粒子群优化算法的环境经济发电调度[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 105-111.  
LIU Jing, LUO Xianjue. Environmental economic dispatching adopting multiobjective black-hole particle swarm optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 105-111.
- [8] YANG Zhile, LI Kang, NIU Qun, et al. A self-learning TLBO based dynamic economic/environmental dispatch considering multiple plug-in electric vehicle loads[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 298-307.
- [9] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.  
YU Jie, HUANG Xueliang, XIA Anbang. Environmental economic dispatch based on sub-area coordinated optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [10] 邱威, 张建华, 刘念. 含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 8-16.  
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Model and solution for environmental/economic dispatch considering large-scale wind power penetration [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 8-16.
- [11] FRED N L, ARTHUR M B. Reserve constrained economic dispatch with prohibited operation zones[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 246-254.
- [12] ORERO S O, IRVING M R. Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, 1996, 143(6): 529-534.
- [13] CHATURVEDI K T, PANDIT M, SRIVASTAVA L. Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1079-1087.
- [14] 初壮, 于继来. 一种计及网络约束和禁止运转区影响的经济负荷分配算法[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 21-25.  
CHU Zhuang, YU Jilai. An approach to economic load dispatch with network constraints and prohibited operating zones [J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 21-25.
- [15] 刘吉臻, 苏凯, 牛玉广, 等. 考虑脱硫补偿电价的厂内负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 104-111.  
LIU Jizhen, SU Kai, NIU Yuguang, et al. Plant load optimal distribution considering electricity price compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 104-111.
- [16] LIU X. On compact formulation of constraints induced by disjoint prohibited-zones[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(4): 2004-2005.
- [17] JABR R A. Solution to economic dispatching with disjoint feasible regions via semidefinite programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 572-573.
- [18] 丁涛, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 含禁止区间的电力系统经济调度求解方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(4): 447-452.  
DING Tao, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Power system economic algorithm with prohibited zones [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(4): 447-452.
- [19] DING T, BO R, GU W, et al. Big-M based MIQP method for economic dispatch with disjoint prohibited zones [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 976-977.
- [20] WANG Y J, LANE D M. Solving a generalized constrained optimization problem with both logic AND and OR relationships by a mathematical transformation and its application to robot path planning[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Application and Reviews, 2000, 30(4): 525-536.
- [21] 季晓慧, 黄拙, 张健. 约束求解与优化技术的结合[J]. 计算机学报, 2005, 28(11): 1790-1797.  
JI Xiaohui, HUANG Zhuo, ZHANG Jian. On the integration of constraint programming and optimization [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(11): 1790-1797.

- [22] WANG Y J, MATTHEW C, TAO Q M, et al. A generalized real-time obstacle avoidance method without the Cspace calculation[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2005, 20(6): 774-787.
- [23] 谢瑛, 谭忠富, 程晋, 等. 节能减排调度环境下燃煤电厂发电成本分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 137-142.  
XIE Ying, TAN Zhongfu, CHENG Jin, et al. Generation cost analysis of coal-fired power plant in environment of energy saving and emission reduction dispatching[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 137-142.
- [24] 于尔铿, 赵国虹, 王世纓, 等. 电力系统经济调度中网损修正方法的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1985, 5(3): 21-27.  
YU Erkeng, ZHAO Guohong, WANG Shiyong, et al. Comparison of the computing methods of loss formula coefficient on power system economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 1985, 5(3): 21-27.
- [25] SOUSA A A, TORRES G L, CANIZARES C A. Robust optimal power flow solution using trust region and interior-point methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 487-499.
- [26] LIU X W, YUAN Y X. A robust trust region algorithm for solving general nonlinear programming [J]. Journal of Computational Mathematics, 2001, 19(3): 309-322.
- [27] HUA Wei, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [28] 鲍海波, 韦化. 考虑发电机运行极限的电压稳定临界点互补模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 12-18.  
BAO Haibo, WEI Hua. A complementary model and algorithm for critical points of static voltage stability considering generator capability limits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 12-18.
- [29] LEYFFER S, GABRIEL L C, NOCEDAL J. Interior methods for mathematical programs with complementarity constraints [J]. SIAM Journal on Optimization, 2006, 17(1): 52-77.
- [30] 丁晓莺, 王锡凡, 张显, 等. 基于割平面法的混合整数最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 1-7.  
DING Xiaoying, WANG Xifan, ZHANG Xian, et al. Mixed integer optimization power flow based on interior point cutting plane method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 1-7.

郭小璇(1986—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统运行与分析。E-mail: guo\_xiaoxuan@live.cn

龚仁喜(1962—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力电子及新能源发电技术。E-mail: rxgong@gxu.edu.cn

鲍海波(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统随机性分析。

(编辑 蔡静雯)

## Mixed Logic Constrained Optimization Method for Environmentally Economical Dispatch Considering Operation Prohibited Zones

GUO Xiaoxuan<sup>1,2</sup>, GONG Renxi<sup>1</sup>, BAO Haibo<sup>1</sup>, HANG Naishan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

**Abstract:** In order to accurately describe generator output limits considering operation prohibited zones, “AND” and “OR” logic relationships between optimization constraints are analyzed. A mixed logic constrained optimization (MLCO) problem including both “AND” and “OR” logic constraints is studied, based on which, the generator output limitations considering operation prohibited zones are expressed as a set of constraints with “OR” logic relationship. And the MLCO model of environmentally economical dispatch is developed. According to the ideas of the Boolean algebra logic transformation, the equivalent mathematical transformation of the constraint logical relationship is derived, and the transformation between “OR” and “AND” logic constraints is implemented. Thus the MLCO problem is converted to a conventional nonlinear optimization problem with “OR” logical constraints only, which can be solved by the interior-point method. The test results of a 6-unit and 15-unit system show the validity of the MLCO model and method proposed, and their high solving accuracy and efficiency.

This work is supported by Guangxi Youth Fund (No. 2014GXNSFBA118277) and Science and Technology Development of Nanning (No. 20121025).

**Key words:** environmentally economical dispatch; operation prohibited zones; mixed logic constrained optimization (MLCO); mathematical transformation; interior-point method