

# 基于 CSS 的年度合约电量分解方法

张少迪<sup>1,2</sup>

(1. 上海电器科学研究院, 上海 200063; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 以华东电力市场为背景, 提出一种基于电荷系统搜索(CSS)算法的年度合约电量分解方法。针对国内外电量合同形式差异, 分析总结合约电量分解方法的研究现状; 介绍华东电力市场在年度市场中的运营规则, 充分考虑预测不确定性、机组发电成本以及废气排放等因素, 提出按月度电量分解和按机组电量分解 2 个步骤完成年度合约电量分解的方法; 设计电量分解的带约束优化模型, 利用 CSS 算法求得所建立模型的最优解。结合 IEEE 30 节点标准测试系统的基础数据构建实验数据, 验证了所提年度合约电量分解方法的有效性。

**关键词:** 电力市场; 年度电量合同; 合约电量分解; 电荷系统搜索算法; 模型

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.021

## 0 引言

世界上大多数国家电力市场<sup>[1-3]</sup>都签订年度电量合同, 从而将电力商品虚拟存储起来。为了保证发电企业利益以及供电可靠性, 年度电量合同签订电量总额往往占年度电力消耗较大比例。以英国电力市场为例, 发电侧与用电侧之间签订差价合同, 其签约电量占英国电力消耗总量的 80% 以上。在我国华东区域电力市场, 根据 2006 年发布的《华东电力市场运营规则(试行)》中规定, 由电网企业和发电企业签订年度电量合同, 签约电量占华东区域电力消耗的 90% 以上, 并由电网企业负责将年度合约电量进行分解。由于国内外电力市场体制存在差异, 在年度合约电量分解问题上国内外研究层面也不同。国外电力市场实行差价合同, 属于全电量竞价模式, 即合同约定的电量需要在日前进行竞价, 而且合约是发电企业和用户直接签订的, 因此国外学者从发电企业的角度研究机组组合优化方面较多, 即经济分配 ED(Economic Dispatch)问题; 华东区域电力市场属于部分电量竞价模式, 即合同约定的电量不参与竞价, 而且合约是发电企业和电网企业之间签订的, 因此国内学者考虑电网企业效益的电量分解优化方面研究较多, 称之为合约分解 CD(Contract Decomposition)问题。

传统经济分解问题是为了在成本最小化的系统约束下满足负荷电力需求而制定发电机组有功功率输出计划<sup>[4-5]</sup>, 随着近年来环境污染的加剧, 环境影响成为经济分解问题考虑的约束之一, 因此传统竞价分解问题的最优解无法满足新的需求。国外相关文献一般从 2 个不同角度研究经济分解问题<sup>[6-7]</sup>: 一种是单目标经济分解问题, 考虑在多种系统约束下

燃料消耗最小化<sup>[8-9]</sup>; 另一种是多目标环境经济分解 EED(Environment Economic Dispatch)问题, 考虑 NO<sub>x</sub> 排放量以及燃料消耗<sup>[10-11]</sup>。在大量的文献研究中, 环境经济电量分解问题可视为多目标优化问题, 采用多目标数学规划方法求解, 常用方法有  $\epsilon$  约束算法<sup>[10]</sup>、基于模糊支配的细菌觅食算法和非支配排序基因算法<sup>[11]</sup>、改进的洗蛙跳算法<sup>[12]</sup>、多目标混沌蚁群优化算法<sup>[13]</sup>、改进的粒子群优化算法<sup>[14-17]</sup>、帕累托差异进化算法<sup>[18-19]</sup>、自适应 Hopfield 神经网络算法<sup>[20]</sup>、基于内点的多目标规划方法<sup>[21]</sup>、小生境帕累托基因算法<sup>[22]</sup>、基于生物地理学优化算法<sup>[23-24]</sup>、基于反向万有引力搜索算法<sup>[25]</sup>、人工蜂群克隆算法<sup>[26]</sup>、基于反向的和声搜索算法<sup>[27]</sup>、快速连续线性规划算法<sup>[28]</sup>等。

国内学者对“确定性电量分解算法”和“不确定性电量分解算法”均有相关研究。文献[29]提出了月电量竞价空间滚动均衡化的年中标总电量的分解方法及数学模型, 得出了月电量竞价空间均衡化相对于不均衡时给电网公司节省的供电费用的关系, 并分析了价格浮动对均衡化效益的影响。文献[30]将合约电量分解归纳为二次规划的优化问题, 提出了能考虑检修、水电电量受限、热电联产等特殊问题的进度系数概念, 并根据进度系数提出逐段法进行分解, 使各个时间单元每个发电厂的进度系数尽可能保持均衡。文献[31]提出一种火电机组月度合同电量分解算法, 综合考虑机组月度检修计划调整、合同电量的滚动修正、发电与负荷之间的平衡、最大/最小发电量约束等因素。文献[32]采用双因子非平稳序列方程和广义自回归条件异方差方程建立随机负荷模型, 以合同电量比例与预定比例之差的标准差最小化为目标, 以实际标准差小于预期标准差的概率为机会约束, 构造了最优合同分解的随机规划模型, 采用蒙特卡洛随机模拟和增广拉格朗日遗传算法相结合的方法求解。文献[33]对电力市场环境计及风险的电力公司合约电量分解策略进行了研究, 目标是

收稿日期: 2013-10-31; 修回日期: 2014-09-24  
基金项目: 上海市博士后科研资助计划项目(14R21420900)  
Project supported by Shanghai Post-Doctoral Research Project (14R21420900)

电网公司在整个合约分解过程中的总购电费用最小化,同时计及由电价波动带来的风险,在预测的月度市场电价的前提下,构造了求解该问题的数学模型。

华东区域电力市场的运营规则与国内其他区域电力市场不同,如华东月度市场针对高峰时段和低谷时段分别竞价的特点,本文遵循华东电力市场运营规则,充分考虑预测不确定性、购电成本、发电成本、废气排放等因素,分 2 个方面建立年度合约电量分解模型,即按月度分解模型和按机组分解模型,并设计基于电荷系统搜索(CSS)算法的模型求解方法,最后通过实验验证分解结果。

## 1 年度合约电量分解模型

《华东电力市场运营规则(试行)》中规定,年度基数合同电量的电价由国家有关部门确定,月度市场电价由发电企业竞价确定,而用电侧市场电价由国家政府确定,因此电网企业的效益直接取决于其购电成本。在月度市场竞价过程中,发电企业按照峰、谷时段分别提交报价曲线,对于电网企业而言,如果年度基数合同在用电高峰时段分解电量较少或者在用电低谷时段分解电量较多,那么将导致电网企业在用电高峰时段从发电市场购买较多的电量或者在用电低谷时段购买较少的电量,使得电网企业购电成本增加,因此年度基数合同的合约电量分解与电网企业效益之间关系密切。显然,《华东电力市场运营规则(试行)》中推荐的分解方法没有考虑到电网企业购电成本以及预测的不确定性,因此本文提出一种新的年度合约电量分解模型,下面从按月度电量分解模型和按机组电量分解模型 2 个方面展开。

### 1.1 按月度电量分解模型

华东电力市场的月度交易在用电高峰时段和用电低谷时段分别进行竞价,其月度负荷电量预测也是按高峰时段和低谷时段分别进行的,因此为了实现华东电力市场电网企业购电成本最小化,可建立如下模型:

$$f = \min \left[ \sum_{t=1}^{12} p_c (q_{c,p,t} + q_{c,v,t}) + \sum_{t=1}^{12} p_{p,t} q_{m,p,t} + \sum_{t=1}^{12} p_{v,t} q_{m,v,t} \right] \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{t=1}^{12} (q_{c,p,t} + q_{c,v,t}) = Q_c \quad (2)$$

$$q_{c,p,t} + q_{m,p,t} = q_{p,t} \quad (3)$$

$$q_{c,v,t} + q_{m,v,t} = q_{v,t} \quad (4)$$

$$l q_{p,t} \leq q_{c,p,t} \leq m q_{p,t} \quad (5)$$

$$l q_{v,t} \leq q_{c,v,t} \leq m q_{v,t} \quad (6)$$

其中,  $p_c$ 、 $p_{p,t}$ 、 $p_{v,t}$  分别为合同电价、月度高峰时段电价、月度低谷时段电价;  $q_{m,p,t}$ 、 $q_{m,v,t}$  分别为每月高峰和低谷时段的新增电量;  $q_{c,p,t}$ 、 $q_{c,v,t}$ 、 $q_{p,t}$ 、 $q_{v,t}$  分别为第

$t$  个月高峰时段和低谷时段的合约分解电量和新增电量;  $Q_c$  为签订的年度合约总电量;  $l$  和  $m$  分别为第  $t$  个月合约分解电量的最小值和最大值参数。式(1)是目标函数,使得电网公司购买年度合约电量和月度新增电量的总费用最小化。式(2)表示年度合约电量完全分解到各个月度。式(3)和式(4)保证月度高峰时段和低谷时段供需平衡。式(5)、式(6)约束年度合约电量分解范围,控制月度电力市场竞价空间,防止由于竞争导致的电价剧烈波动。由于年度合约电量以及合同价格由国家政府制定,因此表现为常量性质,于是上述模型精简可得:

$$f = \min \left[ \sum_{t=1}^{12} p_{p,t} (q_{p,t} - q_{c,p,t}) + \sum_{t=1}^{12} p_{v,t} (q_{v,t} - q_{c,v,t}) \right] \quad (7)$$

s.t.

$$\sum_{t=1}^{12} (q_{c,p,t} + q_{c,v,t}) = Q_c \quad (8)$$

$$l q_{p,t} \leq q_{c,p,t} \leq m q_{p,t} \quad (9)$$

$$l q_{v,t} \leq q_{c,v,t} \leq m q_{v,t} \quad (10)$$

考虑电价预测和负荷预测的误差波动,引入机会约束规划,假设随机变量  $p_{p,t}$ 、 $p_{v,t}$ 、 $q_{p,t}$ 、 $q_{v,t}$  满足正态分布,即:

$$p_{p,t} \sim N(\mu_{p,t}^p, (\sigma_{p,t}^p)^2) \quad (11)$$

$$p_{v,t} \sim N(\mu_{v,t}^p, (\sigma_{v,t}^p)^2) \quad (12)$$

$$q_{p,t} \sim N(\mu_{p,t}^q, (\sigma_{p,t}^q)^2) \quad (13)$$

$$q_{v,t} \sim N(\mu_{v,t}^q, (\sigma_{v,t}^q)^2) \quad (14)$$

其中,  $\mu_{p,t}^p$  为第  $t$  个月高峰时段电价预测的均值;  $(\sigma_{p,t}^p)^2$  为第  $t$  个月高峰时段电价预测的方差;  $\mu_{v,t}^p$  为第  $t$  个月低谷时段电价预测的均值;  $(\sigma_{v,t}^p)^2$  为第  $t$  个月低谷时段电价预测的方差;  $\mu_{p,t}^q$  为第  $t$  个月高峰时段负荷预测的均值;  $(\sigma_{p,t}^q)^2$  为第  $t$  个月高峰时段负荷预测的方差;  $\mu_{v,t}^q$  为第  $t$  个月低谷时段负荷预测的均值;  $(\sigma_{v,t}^q)^2$  为第  $t$  个月低谷时段负荷预测的方差。

建立在置信水平为  $\beta$  上的合约电量分解模型为:

$$\min f(q_{c,p,t}, q_{c,v,t}) \quad (15)$$

s.t.

$$P_r \left\{ \sum_{t=1}^{12} p_{p,t} (q_{p,t} - q_{c,p,t}) + \sum_{t=1}^{12} p_{v,t} (q_{v,t} - q_{c,v,t}) \leq \bar{f}(q_{c,p,t}, q_{c,v,t}) \right\} \geq \beta \quad (16)$$

$$P_r \{ q_{p,\min} \leq q_{c,p,t} \leq q_{p,\max} \} \geq \alpha_p \quad (17)$$

$$P_r \{ q_{v,\min} \leq q_{c,v,t} \leq q_{v,\max} \} \geq \alpha_v \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^{12} (q_{c,p,t} + q_{c,v,t}) = Q_c \quad (19)$$

其中,  $P_r \{ \cdot \}$  表示概率计算;  $\alpha_p$ 、 $\alpha_v$  和  $\beta$  由电网公司根据自身对风险的喜好程度事先决定。该模型的含义是在统计出月度负荷预测电量和出清电价概率分布基础上,在保证每个月度合约电量以概率  $\alpha_p$ 、 $\alpha_v$  满足约束前提下,把年度合约电量分解到月度,使得电网

公司在一定置信水平  $\beta$  下月度总购电费用最小。

### 1.2 按机组电量分解模型

在完成按月度电量分解后,需要将月度分解电量按机组进行分解,考虑到许多发电机组都使用矿物燃料,将引起有害气体和微粒排放到大气中,其中废气主要有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ , 相比而言  $\text{NO}_x$  更加有害,许多学者仅考虑  $\text{NO}_x$  的排放。因此这里综合考虑机组发电的燃料成本以及废气排放建立按机组电量分解的优化模型。

机组发电燃料成本函数可以写成:

$$F_G(q_{c,i}) = a_i + b_i q_{c,i} + c_i q_{c,i}^2 \quad (20)$$

其中,  $a_i, b_i, c_i$  为第  $i$  个发电机组成本函数系数;  $q_{c,i}$  为第  $i$  个机组分配的合同电量。

发电机组  $\text{NO}_x$  废气排放最小化目标,建立排放函数有:

$$E_{N_i}(q_{c,i}) = d_i + e_i q_{c,i} + f_i q_{c,i}^2 + g_i \exp(h_i q_{c,i}) \quad (21)$$

其中,  $d_i, e_i, f_i, g_i$  和  $h_i$  为第  $i$  个机组排放函数系数。综合考虑机组发电的燃料成本和废气排放,引入加权因子,建立目标函数为:

$$F_0 = w \sum_{i=1}^{N_G} F_G(q_{c,i}) + (1-w) \gamma \sum_{i=1}^{N_G} E_{N_i}(q_{c,i}) \quad (22)$$

其中,  $N_G$  为发电机组台数;尺度因子  $\gamma$  一般取 1000。

按机组电量分解最优化模型为:

$$\min F_0 \quad (23)$$

s.t.

$$l q_{c,i} \leq q_{c,i} \leq m q_{c,i} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} q_{c,i} = q_c^t \quad (25)$$

其中,  $m$  和  $l$  为介于 0~1 之间的约束系数;  $q_c^t$  为第  $t$  个月分解的电量。

## 2 基于 CSS 算法的年度合约电量分解问题求解方法

解决上述目标优化问题的一种有效方法是启发式随机搜索算法,如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等,在种群特性基础上具有同时寻找多个最优的能力,适用于全局搜索,并且不要求目标函数连续性。与传统的搜索算法相比,CSS 算法在最优解搜索过程中的探索能力和发掘能力较强,尤其是在搜索时一旦遇到越界情况,执行和声搜索(HS)算法以避免脱离搜索区域。针对按月度电量分解问题属于非线性约束非线性规划复杂问题,将利用基于 CSS 算法的优化问题求解方法进行求解,而按机组电量分解问题属于线性约束的非线性规划问题,可以采用传统优化算法进行求解。CSS 算法的基本步骤如图 1 所示。

基于 CSS 算法的合约电量分解的基本步骤如下。

### a. 系统初始化。

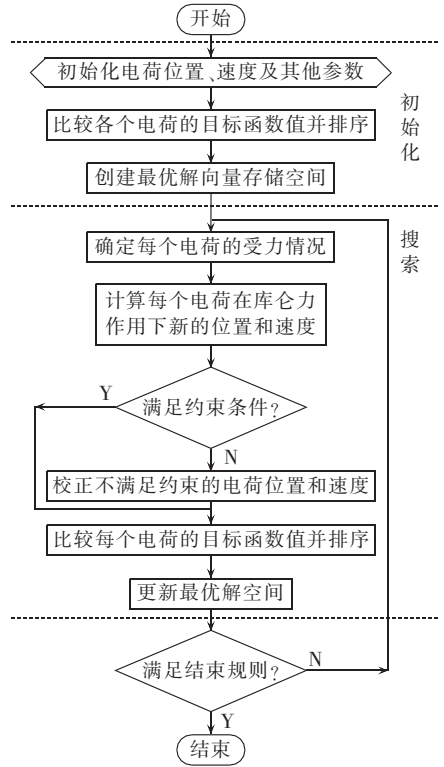


图 1 基于 CSS 算法的求解流程

Fig.1 Flowchart of CSS algorithm

在解空间中随机生成  $N$  个解向量作为电荷 CP (Charged Particle), 并初始化电荷的位置和速度:

$$x_{g,j}^{(0)} = x_{g,\min} + \text{rand} \cdot (x_{g,\max} - x_{g,\min}) \quad g=1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$v_{g,j}^{(0)} = 0 \quad (27)$$

其中,  $x_{g,j}^{(0)}$  为第  $j$  个电荷第  $g$  个变量的初始值;  $x_{g,\min}$  和  $x_{g,\max}$  分别为第  $g$  个变量位置的最小值和最大值;  $\text{rand}$  为介于 0~1 之间的随机数;  $n$  为变量个数;  $v_{g,j}^{(0)}$  为带电微粒的初始速率, 其值为 0。每个电荷所带电量值由下式得到:

$$q_i = \frac{f_{\text{in}}(i) - f_{\text{worst}}}{f_{\text{best}} - f_{\text{worst}}} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (28)$$

其中,  $q_i$  为第  $i$  个电荷所带电量;  $f_{\text{in}}(i)$  表示适应度函数;  $N$  为电荷总数;  $f_{\text{best}}$  和  $f_{\text{worst}}$  分别为最优和最差适应度值。根据每个电荷所代表的解向量的目标函数值, 将电荷按升序排序, 并存储  $N/4$  个目标函数值较大的解向量创建最优解空间。

### b. 搜索。

各电荷在电荷系统中将受到其他电荷的库仑力, 可以根据库仑定律确定每个电荷所受合力大小:

$$F_j = k_e q_j \sum_{i, i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} i_2 \right) p_{ij} \frac{\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j}{\|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|} \quad (29)$$

$$\begin{cases} i_1 = 1, i_2 = 0 & r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 & r_{ij} \geq a \end{cases}$$

其中,  $F_j$  为第  $j$  个电荷受到的合力;  $k_e$  为库仑常量;  $\mathbf{X}_i$  和  $\mathbf{X}_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个电荷在空间中的位置;  $a$  在库仑定律中表示电荷半径大小, 在这里表示以局

部最优解为中心的邻域半径,其值大小由式(30)确定:

$$a=0.10 \times \max \{x_{g,\max} - x_{g,\min} \mid g=1, 2, \dots, n\} \quad (30)$$

$r_{ij}$  为第  $i$  个和第  $j$  个电荷间距离,其表达式为:

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{\text{best}}\| + \varepsilon} \quad (31)$$

其中,  $X_{\text{best}}$  为当前最优电荷的位置;  $\varepsilon$  为一个很小的正数以避免奇异。当电荷距离  $r_{ij}$  大于或等于邻域半径  $a$  时,此时为全局搜索,令控制系数  $i_1=0$  和  $i_2=1$ ,电荷受力大小与电荷距离平方成反比,使得空间电荷能够向好的电荷靠拢;当电荷距离  $r_{ij}$  比邻域半径  $a$  小时,此时转为局域搜索,令控制系数  $i_1=1$  和  $i_2=0$ ,电荷受力大小与电荷距离成正比,使得局域空间电荷收敛至最优电荷位置。 $p_{ij}$  表示电荷之间作用力关系,规定好的电荷可以吸引差的电荷,而一部分差的电荷可以吸引好的电荷,定义为:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{f_{\text{fit}}(i) - f_{\text{fit}}(j)}{f_{\text{fit}}(j) - f_{\text{fit}}(i)} > \text{rand} \text{ 且 } f_{\text{fit}}(j) > f_{\text{fit}}(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

根据牛顿运动定律更新各个电荷的位置和速度:

$$X_{j,\text{new}} = \text{rand}_{j1} k_a \frac{F_j}{m_j} \Delta t^2 + \text{rand}_{j2} k_v V_{j,\text{old}} \Delta t + X_{j,\text{old}} \quad (33)$$

$$V_{j,\text{new}} = \frac{X_{j,\text{new}} - X_{j,\text{old}}}{\Delta t} \quad (34)$$

其中,  $\text{rand}_{j1}$  和  $\text{rand}_{j2}$  为介于 0~1 之间的随机数;  $m_j$  为电荷质量;  $\Delta t$  为时间间隔;  $k_a$  为加速度系数,其主要作用是使加速算法在局部搜索时尽快收敛,  $k_v$  为速度系数,其主要作用是让加速算法在全局搜索时使带电粒子向好的粒子靠拢,因此  $k_a$  是随迭代次数增加的递增函数,  $k_v$  是随迭代次数增加的递减函数,如下式所示:

$$k_a = 0.5(1 + n_{\text{it}} / n_{\text{imax}}) \quad (35)$$

$$k_v = 0.5(1 - n_{\text{it}} / n_{\text{imax}}) \quad (36)$$

其中,  $n_{\text{it}}$ 、 $n_{\text{imax}}$  分别为迭代次数和迭代次数最大值。

判断更新后电荷的位置是否满足约束条件,对于不满足条件的解向量分量应用和声搜索算法进行校正处理,基本流程如图 2 所示,图中  $P_{\text{CR}}$  是校正选择范围的概率,  $P_{\text{AR}}$  是校正值调整概率。

计算更新后的电荷所代表解向量的目标函数值,并按目标函数值大小进行升序排列,比较新生成的最优解向量和原解向量存储空间存储的最优解向量,对解向量存储空间进行更新。

### c. 结束条件。

迭代循环的终止条件类型很多,主要有:设定最大迭代循环次数限制、设定最大无进展迭代次数限制、设定最优目标函数与理想值之间误差、设定最优解和最差解之间差异、设定解向量之间最大距离等。当满足终止条件时,算法终止。

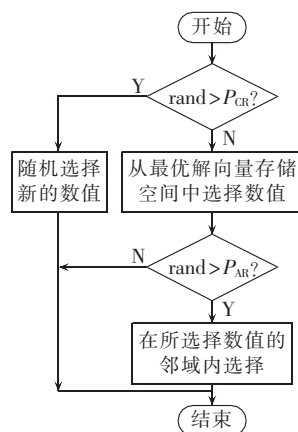


图 2 基于和声搜索算法的校正方法

Fig.2 Calibration method based on harmony search algorithm

## 3 实验与结果

根据 IEEE 30 节点标准测试系统提供的 6 个发电机组基础数据,结合一个假设的省级电力市场模拟数据,验证本文所提出合约电量分解方法特性。发电机组的基础数据如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点系统标准数据  
Table 1 Standard data of IEEE 30-bus system

机组	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$	$f_i$	$g_i$	$h_i$
G <sub>1</sub>	10	200	100	4.091	-5.554	6.490	$2 \times 10^{-4}$	2.857
G <sub>2</sub>	10	150	120	2.543	-6.047	5.638	$5 \times 10^{-4}$	3.333
G <sub>3</sub>	20	180	40	4.258	-5.094	4.586	$10^{-6}$	8.000
G <sub>4</sub>	10	100	60	5.326	-3.550	3.380	$2 \times 10^{-3}$	2.000
G <sub>5</sub>	20	180	40	4.258	-5.094	4.586	$10^{-6}$	8.000
G <sub>6</sub>	10	150	100	6.131	-5.555	5.151	$10^{-5}$	6.667

假设省电网公司在年初与某发电公司签订的购电合约总电量为 80 TW·h,每个月的电价实行高峰时段和低谷时段分别竞价出清的方式,因此在分解合约电量之前需要对月度负荷和电价进行预测,这里假设每个月的预测负荷和预测月度市场出清价格服从正态分布,分布参数如表 2 所示。

运用 CSS 算法将年度合约电量分配到每个月发电企业完成的发电电量,给定模型参数  $m=0.9$ 、 $l=0.4$ ,相应约束的置信水平  $\alpha_p = \alpha_v = 0.9$ 、 $\beta=0.9$ 。同时按照《华东电力市场运营规则(试行)》中推荐的基于相似负荷拟合的确定性电量分解算法得到按月度分解结果,从购电成本上对这 2 种合约电量分解方法进行比较,结果如表 3 所示。

从表 3 结果可以看出,利用本文合约电量分解算法得到的目标函数值为 26.21 亿元,即电网公司实现最小月度购电成本为 26.21 亿元的概率为 90%。而按照规则推荐的电量分解方法得到的结果是 26.87 亿元,即在不考虑任何不确定风险下电网公司能够实现最小月度购电成本为 26.87 亿元,显然采用

表 2 负荷预测和电价预测数据

Table 2 Data of load forecasting and price forecasting

月份	高峰时段	高峰时段	低谷时段	低谷时段	高峰时段电	高峰时段电	低谷时段电	低谷时段电
	预测均	预测均	预测均	预测均	价预测均	价预测均	价预测均	价预测均
	值/	值/	值/	值/	值/[元·	值/[元·	值/[元·	值/[元·
	(TW·h)	(TW·h)	(TW·h)	(TW·h)	(MW·h) <sup>-1</sup> ]	(MW·h) <sup>-1</sup> ]	(MW·h) <sup>-1</sup> ]	(MW·h) <sup>-1</sup> ]
	方差	方差	方差	方差	预测方	预测方	预测方	预测方
1	6.08	0.09	1.52	0.07	271.3	81.6	135.4	138.5
2	6.24	0.06	1.56	0.08	236.9	108.0	117.0	88.0
3	6.88	0.04	1.72	0.06	277.3	124.0	135.2	144.2
4	6.56	0.09	1.64	0.11	252.1	113.4	121.1	90.3
5	7.12	0.05	1.78	0.07	241.7	89.5	119.1	121.8
6	7.04	0.08	1.76	0.05	277.3	98.4	138.2	191.0
7	6.56	0.08	1.64	0.13	255.2	103.0	129.4	125.0
8	6.72	0.06	1.68	0.05	230.4	129.1	110.0	145.1
9	6.24	0.10	1.56	0.09	223.0	87.8	112.9	88.6
10	6.72	0.12	1.68	0.12	238.1	122.7	118.9	91.7
11	7.20	0.08	1.80	0.07	276.9	112.2	137.4	160.6
12	6.64	0.04	1.66	0.08	261.9	98.8	130.4	154.4

表 3 按月度电量分解结果

Table 3 Results of monthly power decomposition

月份	本文电量分解		规则推荐分解方法结果 (高峰时段)/(TW·h)
	方法结果/(TW·h)		
	高峰时段	低谷时段	
1	5.13	1.28	6.18
2	3.98	1.01	6.14
3	5.97	1.41	6.78
4	5.57	1.39	6.56
5	5.93	1.48	7.22
6	5.96	1.49	7.04
7	5.62	1.40	6.46
8	4.34	1.09	6.72
9	4.13	1.02	6.34
10	5.57	1.29	6.72
11	6.18	1.55	7.30
12	5.77	1.44	6.54
购电成本/亿元	26.21		26.87

本文提出的方法可以使电网公司在选择一定程度的置信水平下减少购电成本。

电网公司的购电成本和承担风险是对矛盾体,即如果电网公司片面地追求较低的购电成本,将承

担较大的风险,本文选择不同的置信水平,分析购电费用和 risk 之间的相互关系,如表 4 所示。

表 4 不同置信水平的最小购电成本

Table 4 Minimum power purchase cost for different confidence levels

$\beta$	购电成本/亿元	$\beta$	购电成本/亿元
0.95	26.76	0.70	25.03
0.90	26.21	0.60	24.57
0.80	25.34		

从表 4 中结果可以看出,随着  $\beta$  值逐渐减小,即电网公司所承担风险逐渐增加,电网公司在月度购电成本上支出逐渐减小,反映出电网公司购电成本随风险变化的一般规律。

本文应用 CSS 算法解决目标优化问题,为了验证该算法对解的搜索和发掘能力,这里采用多种常见搜索算法加以比较,结果如表 5 所示。

表 5 多种算法结果比较

Table 5 Comparison among multiple algorithms

算法	购电成本/亿元	算法	购电成本/亿元
本文算法	26.21	蚁群算法	26.70
遗传算法	26.78	万有引力法	26.76
粒子群算法	26.51		

从表 5 可见,与其他算法相比,利用本文算法进行电量分解得到的成本值较小,说明得到的解较优。

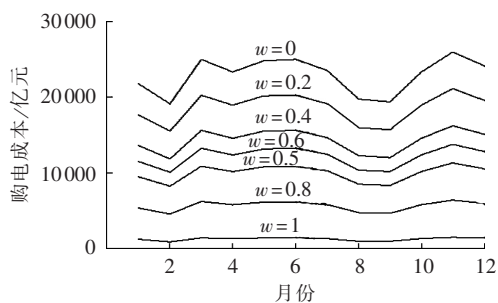
年度合约电量分解到月度后,需要针对发电企业的各个发电机组制定月度发电计划,在假设权值  $w=0.5$  的条件下,应用本文方法得到的结果见表 6。

在模型求解过程中,将成本和排放量 2 个目标通过加权的方式转变成为 1 个目标,因此加权值不同,成本和排放量的考虑比重亦不同,如图 3 所示给出在不同权值下的分解结果。从图 3 结果可以看出,不同权值下的目标函数曲线,当权值  $w$  较大时,即考虑机组成本较多,考虑环境影响较小,此时目标函数值偏小,因此为了提高目标函数值,应该适当减少权

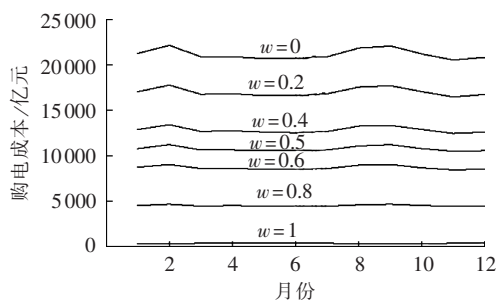
表 6 按机组分解结果

Table 6 Results of unit power decomposition

月份	$G_1$		$G_2$		$G_3$		$G_4$		$G_5$		$G_6$	
	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$	$q_{c,p,t}$	$q_{c,v,t}$
1	0.669	0.196	0.810	0.271	0.904	0.232	1.000	0.098	0.904	0.232	0.843	0.251
2	0.527	0.163	0.649	0.233	0.703	0.185	0.731	0.035	0.703	0.185	0.666	0.209
3	0.773	0.212	0.929	0.289	1.050	0.254	1.198	0.129	1.050	0.254	0.971	0.271
4	0.723	0.210	0.872	0.287	0.981	0.251	1.104	0.124	0.981	0.251	0.910	0.268
5	0.768	0.221	0.923	0.299	1.043	0.267	1.188	0.145	1.043	0.267	0.965	0.282
6	0.771	0.222	0.927	0.301	1.048	0.268	1.195	0.147	1.048	0.268	0.969	0.283
7	0.729	0.211	0.879	0.288	0.989	0.253	1.115	0.126	0.989	0.253	0.918	0.269
8	0.571	0.173	0.700	0.245	0.766	0.199	0.815	0.054	0.766	0.199	0.721	0.222
9	0.546	0.164	0.670	0.235	0.730	0.186	0.766	0.037	0.730	0.186	0.689	0.211
10	0.723	0.197	0.872	0.273	0.981	0.234	1.104	0.101	0.981	0.234	0.910	0.252
11	0.799	0.229	0.958	0.309	1.086	0.279	1.248	0.162	1.086	0.279	1.003	0.292
12	0.748	0.216	0.900	0.294	1.015	0.260	1.151	0.136	1.015	0.260	0.940	0.276



(a) 高峰时段不同权值按机组分解目标曲线



(b) 低谷时段不同权值按机组分解目标曲线

图3 按机组分解在不同权值下的目标曲线

Fig.3 Objective curves by unit power decomposition for different weights

值  $w$ , 即应该适当考虑环境影响。

## 4 结论

本文以华东电力市场为背景研究年度合约电量分解方法,充分考虑电网企业购电成本、发电企业机组燃料成本、机组发电废气排放及负荷预测、电价预测等不确定因素,建立不确定性电量分解的数学模型,并利用CSS算法解决目标优化问题,该方法在解空间的搜索和发掘能力方面性能较好。最后根据IEEE30节点测试系统提供的机组基础数据并构建预测数据,利用求解算法分别求解了按月度电量分解问题及按机组电量分解问题的结果。分析不确定性因素的风险对月度电量分解结果的影响,给出在不同置信区间下购电成本结果,结果表明购电成本越低所承担的风险越大;分析权值对机组电量分解结果的影响,给出在不同权值下目标函数曲线;通过对多种传统启发性搜索算法进行对比,验证了本文求解算法性能较优。从理论上本文提出的算法是可行的,下一步工作是将该方法应用到实际电力市场运营中。

## 参考文献:

[1] 周冬旭,李晓明. 面向电力市场的含风电机组配电网无功优化模型及其求解算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):24-30.  
ZHOU Dongxu,LI Xiaoming. Reactive power optimization model and its algorithms for distribution system with wind farm in electricity market [J]. Electric Power Automation Equipment,

2013,33(4):24-30.

- [2] 王娟娟,吕泉,李卫东,等. 电力市场环境下需求侧AGC成本的分摊策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):31-36.  
WANG Juanjuan,LÜ Quan,LI Weidong,et al. Allocation of customer-side AGC cost in electricity market environment [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):31-36.
- [3] 张新松,袁越,吴博文,等. 电力市场环境下含大规模风电场的输电网规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):100-106.  
ZHANG Xinsong,YUAN Yue,WU Bowen,et al. Expansion planning of transmission network with large wind farm in deregulated electricity market environment [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):100-106.
- [4] YASAR C,OZYON S. A new hybrid approach for nonconvex economic dispatch problem with valve-point effect [J]. Energy, 2011,36(10):5838-5845.
- [5] AMJADY N,NASIRI-RAD H. Economic dispatch using an efficient real-coded genetic algorithm [J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2009,3(3):266-278.
- [6] NIKNAM T,FIROUZI B B,MOJARRAD H D. A new evolutionary algorithm for nonlinear economic dispatch [J]. Expert Systems with Applications,2011,38(10):13301-13309.
- [7] NIKNAM T,MOJARRAD H D,MEYMAND H Z. Non-smooth economic dispatch computation by fuzzy and self adaptive particle swarm optimization [J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2805-2817.
- [8] NIKNAM T,MOJARRAD H D,MEYMAND H Z. A new honey bee mating optimization algorithm for non-smooth economic dispatch [J]. Energy,2011,36(2):896-908.
- [9] NIKNAM T. A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for non-linear,non-smooth and non-convex economic dispatch [J]. Applied Energy,2010,87(1):327-339.
- [10] VAHIDINASAB V,JADID S. Joint economic and emission dispatch in energy markets:a multiobjective mathematical programming approach [J]. Energy,2010,35(3):1497-1504.
- [11] PANIGRAHI B K,RAVIKUMAR P V,SSANJOY D. Multi-objective fuzzy dominance based bacterial foraging algorithm to solve economic emission dispatch problem [J]. Energy,2011,36(11):6420-6432.
- [12] NIKNAM T,NARIMANI M R,JABBARI M,MALEKPOUR A R. A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow [J]. Energy,2011,36(11):6420-6432.
- [13] CAI J,MA X,LI Q. A multi-objective chaotic ant swarm optimization for environmental/economic dispatch [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,38(1):54-62.
- [14] ABIDO M A. Multiobjective particle swarm optimization for environmental economic dispatch problem [J]. Electric Power Systems Research,2009,79(7):1105-1113.
- [15] WANG L,SINGH C. Environmental/economic dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Systems Research,2007,77(12):1654-1664.
- [16] HAZRA J,SINHA A K. A multi-objective optimal power flow using particle swarm optimization [J]. European Transactions on Electrical Power,2011,21(1):1028-1045.
- [17] CAI J,SINHA A K. A multi-objective optimal power flow using particle swarm optimization for environmental/economic dispatch

- [J]. Energy Conversion and Management,2009,50(5):1318-1325.
- [18] BASU M. Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution[J]. Applied Soft Computing,2011,11(2): 2845-2853.
- [19] WU L H,WANG Y N,YUAN X F. Environmental/economic power dispatch problem using multi-objective differential evolution algorithm[J]. Electric Power Systems Research,2010, 80(9):1171-1181.
- [20] BALAKRISHNAN S,KANNAN P S,ARAVINDAN C. On-line emission and economic load dispatch using adaptive Hopfield neural network[J]. Applied Soft Computing,2003,2(4):297-305.
- [21] SALGADO R S,RANGEL J R E L. Optimal power flow solutions through multiobjective programming[J]. Energy,2012, 42(1):35-45.
- [22] RAGLEND I J,VEERAVALLI S,SAILAJA K,et al. Comparison of AI techniques to solve combined economic emission dispatch problem with line flow constraints[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2010,32(6): 592-598.
- [23] BHATTACHARYA A,CHATTOPADHYAY P K. Solving economic emission load dispatch problems using hybrid differential evolution[J]. Applied Soft Computing,2011,11(2):2526-2537.
- [24] BHATTACHARYA A,CHATTOPADHYAY P K. Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization algorithm for solution of economic emission load dispatch problems [J]. Expert Systems with Applications,2011,38(11):14001-14010.
- [25] SHAW B,MUKHERJEE V,GHOSHAL S P. A novel opposition-based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems of power systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,35(1):21-33.
- [26] OZYON S,YASAR C,OZCAN G. An Artificial Bee Colony algorithm(ABC) approach to environmental economic power dispatch problems[C]//National Electrical,Electronics,Computer Symposium(FEEB 2011). Lzmir,Turkey:FEEB,2011:222-228.
- [27] CHATTERJEE A,GHOSHAL S P,MUKHERJEE V. Solution of combined economic and emission dispatch problems of power systems by an opposition-based harmony search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012,39(1):9-21.
- [28] ZEHAR K,SAYAH S. Optimal power flow with environmental constraint using a fast successive linear programming algorithm;application to the Algerian power system [J]. Energy Conversion and Management,2008,49(11):3361-3365.
- [29] 王漪,于继来,柳焯. 基于年度竞价空间滚动均衡化的年中标电量分解[J]. 电力系统自动化,2006,30(17):24-28.  
WANG Yi,YU Jilai,LIU Zhuo. Decomposition of yearly bided volume based on roll-uniformization of monthly competitive bidding spaces[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(17):24-28.
- [30] 黎灿兵,胡亚杰,赵弘俊,等. 合约电量分解通用模型与算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):26-30.  
LI Canbing,HU Yajie,ZHAO Hongjun,et al. General model and algorithm for contract energy decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(11):26-30.
- [31] 温丽丽,刘俊勇,吴志云,等. 基于月度滚动修正的合同电量分解算法与应用[J]. 现代电力,2008,25(1):26-30.  
WEN Lili,LIU Junyong,WU Zhiyun,et al. Study and application of resolution algorithm of contract volume based on monthly rolling amendment[J]. Modern Electric Power,2008,25(1):26-30.
- [32] 陈建华. 中长期差价合同分解及相关问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.  
CHEN Jianhua. Research on mid-long term contract for difference decomposition and related issues [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2008.
- [33] 苏鹏飞. 考虑不确定性的合约电量分解策略研究[D]. 济南:山东大学,2010.  
SU Pengfei. Study on the electric contract decomposition strategies considering uncertain factors [D]. Ji'nan:Shandong University,2010.

#### 作者简介:



张少迪(1984—),男,吉林吉林人,工程师,博士,主要从事智能电网、需求响应、电力市场方面的研究(E-mail:zhangshd2013@163.com)。

## Annual contract power decomposition method based on CSS

ZHANG Shaodi<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** On the background of East China electricity market, a method of annual contract power decomposition based on CSS (Charge System Search) algorithm is proposed. According to the difference between domestic and foreign power contract types, the research status of contract power decomposition methods is analyzed. The annual operational rules of East China electricity market are introduced and a two-step annual contract power decomposition method composed of monthly power decomposition and unit power decomposition is proposed, which fully considers the factors of forecast uncertainty, unit power generation cost, waste gas emission, etc. An optimal power decomposition model with constraints is designed and solved by CSS algorithm. The basic data of IEEE 30-bus test system are applied as the experiment data and the effectiveness of the proposed method is verified by the experimental results.

**Key words:** electricity market; annual power contract; contract power decomposition; CSS algorithm; models