

# 基于改进非劣分层遗传算法及 基点和熵多属性决策的互联电网交易方法

刘继春<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 吴磊<sup>2</sup>, 杨柳<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065;

2. 克拉克森大学 电气与计算机工程系, 美国 纽约 13699-5720)

## Multi-Objective Optimal Electricity Transaction of Interconnected Power Network Based on Improved Non-Dominated Sorting Genetic II Algorithm and Multiple Attributes Decision

### Making of Base Point and Entropy

LIU Jichun<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, WU Lei<sup>2</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Clarkson University, New York 13699-5720, USA)

**ABSTRACT:** The optimization model for multi-objective transaction of interconnected power grid is solved by non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) algorithm and the solutions over diversified Pareto front are obtained which can offer wealth of information for the decision-making; further combining the Pareto front with multiple attributes decision-making (MADM), the optimal solution is screened out. Results of calculation example show that the optimal solution attained by the proposed method is better than that obtained by Shapley value-based cooperative game method. The attained solution can provide optimized allocation scheme for electric power transaction of integrated power grid precisely.

**KEY WORDS:** multi-objective optimization; interconnected power grid; multiple attributes decision making; genetic algorithm; Pareto solution set

**摘要:** 利用改进非劣分层遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对互联电网多目标交易优化模型进行求解, 得到多样化的帕雷托前沿, 为决策提供丰富的信息, 进一步与基于基点和熵的多属性决策方法结合, 筛选出最优解。算例分析结果表明, 该方法得出的解比用基于沙普利值的合作博弈法得出的解更优, 能准确提供互联电网交易的优化分配方案, 具有一定的实用性。

**关键词:** 多目标优化; 互联电网; 多属性决策; 演化算法; 帕雷托解集

## 0 引言

随着我国电力市场化改革的不断深入, 互联电

网电能交易量已从2004年的2387亿kW·h剧增到2008年的4712亿kW·h。互联电网交易的主体是大型发电公司, 它们拥有的发电机组分布在不同的互联电网中。多家发电公司如何在互联电网交易中获得最大利润是值得研究的课题, 文献[1-2]针对电力市场寡头垄断特性, 主要在同一区域电网内构建基于博弈的电力交易策略模型; 文献[3-6]对区域电力市场竞价交易的模型及其机制进行研究, 提出互联市场交易的整体框架, 并建立基于市场盈余的公平分配模型, 但该模型是为降低发电公司在互联交易中的风险而建立, 没有考虑发电公司如何获取利润; 文献[7]将节能发电调度结合到区域电网建设中, 并对相关问题进行了探讨; 文献[8-12]提出基于合作博弈的互联电网优化交易及其分配模型, 利用沙普利值法对各联网成员的效益进行分配, 但对得到的方案是否为最优没有研究。

本文研究的互联电网交易方法是以各发电公司利润最大为目标, 属于典型的多目标优化问题。由于各目标之间可能存在冲突, 寻求此类问题的帕雷托前沿解一直是重要的研究课题, 由Kalyanmoy Deb提出的基于最优保存策略的第二代非劣分层遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)是解决问题的一种较好算法<sup>[13-14]</sup>, 解集以组的方式向帕雷托域逼近, 计算复杂度较低。本文不仅将NSGA-II多目标优化算法引入到互联电网电力交易多目标优化模型中, 而且对其中的变异算子进行改

进, 得到更加多样化的帕雷托前沿, 进而对总解集进行基于基点和熵的多属性决策分析, 钻取出最优解。

## 1 互联电网多目标交易模型及其求解方法

### 1.1 目标函数

优化目标是使各发电公司尽可能获得最大利润, 表示为

$$\max \boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m]^T \quad (1)$$

式中  $\pi_i (i=1, 2, \dots, m)$  为第  $i$  个发电公司的利润。

设互联电网由  $N$  个区域电网组成, 共有  $m$  个发电公司参与互联电网交易, 其中第  $i$  个发电公司在第  $n$  个区域中有  $K_n^i$  台发电机组, 则它的利润可写为

$$\pi_i = \sum_{n \in N} \left( \sum_{j=1}^{K_n^i} G_{i,n,j} \right) p_n - \sum_{n \in N} \sum_{j=1}^{K_n^i} C_{i,n,j} (G_{i,n,j}) \quad (2)$$

式中:  $C_{i,n,j}$  和  $G_{i,n,j}$  分别为第  $i$  个发电公司在第  $n$  个区域中的第  $j$  台发电机组的成本函数和出力;  $p_n$  为第  $n$  个区域的电价。

机组的发电成本具有二次函数性质如下

$$C_{i,n,j} (G_{i,n,j}) = \frac{1}{2} a_{i,n,j} G_{i,n,j}^2 + b_{i,n,j} G_{i,n,j} \quad (3)$$

式中:  $a_{i,n,j}$  和  $b_{i,n,j}$  分别为第  $i$  个发电公司在第  $n$  个区域中的第  $j$  台发电机组的二次与一次成本系数。

第  $n$  个区域的电价可用逆需求函数表示如下

$$p_n (S_n) = \frac{D_n^0 - S_n}{\alpha_n} \quad (4)$$

式中:  $D_n^0$  为区域电价为 0 时的电力需求;  $\alpha_n$  为第  $n$  个区域的需求弹性且有  $\alpha_n > 0$ ;  $S_n$  为第  $n$  个区域的净消耗电力, 可由下式计算得到

$$S_n = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K_n^i} G_{i,n,j} - \sum_{w \in N} T_{n,w} \quad (5)$$

式中  $T_{n,w}$  表示从第  $n$  个区域传输到第  $w$  个区域的电力, 且有  $T_{n,w} = -T_{w,n}$ 。

### 1.2 约束条件

发电机出力约束为

$$G_{i,n,j \min} \leq G_{i,n,j} \leq G_{i,n,j \max} \quad (6)$$

式中  $G_{i,n,j \max}$ 、 $G_{i,n,j \min}$  分别为第  $i$  个发电公司在第  $n$  个区域中的第  $j$  台发电机组的出力上、下限。

第  $n$  个区域输出的电力总量不能大于该区域总产出水平, 即

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K_n^i} G_{i,n,j} \geq \sum_{w \in N} T_{n,w}, \quad n, w \in N \quad (7)$$

互联电网间的联络线约束为

$$-H_l \leq \sum_{n \in N} A_{l,n,w} T_{n,w} \leq H_l, \quad l \in L; n, w \in N \quad (8)$$

式中:  $H_l$  为第  $l$  条联络线的可用传输容量;  $L$  为互联电网间联络线集合;  $A_{l,n,w}$  为潮流分布系数集合。其他应计入的还包括节点电压上下限约束和线路功率极限约束等。

### 1.3 求解方法

由式(1)–(8)描述的互联电网多目标交易模型模型一般是利用基于沙普利值的合作博弈方法进行求解及效益分配<sup>[10]</sup>。

本文则利用计算流程如图 1 所示的方法对该模型进行求解, 其中, 框图 1—6 表示改进 NSGA-II 算法, 框图 7 表示基于基点和熵的多属性决策。图中,  $L[i]_d=0$  表示初始化同层个体距离;  $L=sort(L, m)$  表示对同层个体按第  $m$  个目标函数值升序排列;  $L[1]_d=L[N]_d=M$  表示给定一个大数  $M$  使得排序边缘上的个体具有选择优势;  $L[i]_d=L[i]_d+L[i+1]_d \cdot m - L[i-1]_d \cdot m$  表示对排列中间的个体计算适应度;  $L[i]_d \cdot m$  表示第  $i$  个个体的第  $m$  个目标函数值;  $i_{rank}$  和  $i_d$  分别表示个体  $i$  的非劣解等级和拥挤度;  $c_1$  和  $c_2$  表示父体  $x_1$  和  $x_2$  经交叉后生成的子个体;  $\beta$  为随机变量, 生成方式如下

$$\beta = \begin{cases} (2\mu)^{1/(\eta+1)}, & \mu \leq 0.5 \\ [2(1-\mu)]^{1/(\eta+1)}, & \mu > 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mu$  为均匀分布于区间(0,1)上的随机数;  $\eta$  为交叉参数。

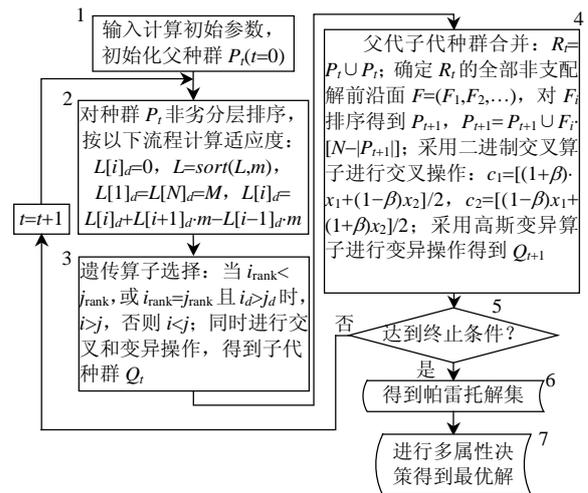


图 1 计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart

## 2 改进 NSGA-II 算法

NSGA-II 步骤为: 1) 对初始种群集  $P_t(t=0)$  进行非劣分层排序, 得出每个解的适应度即非支配水平, 如图 1 中框 2 所示。2) 进行双支联赛选择、

交叉和变异，生成子代种群，如图 1 中框 3 所示。  
3) 将子代种群与父代合并，对新种群进行非劣分层排序并进行交叉、变异操作，如图 1 中框 4 所示。  
4) 如果达到终止条件，则输出结果，否则返回 2)。

针对上述算法中可能出现的局部最优的情况，本文改进了 NSGA-II 的变异算子，即在框 4 中采用高斯变异算子给群体带来新的遗传基因以恢复由于选择算子的作用而失去的个体多样性。高斯变异来源于对生物界的观察结果，微变通常比宏变更频繁。个体 $(x_i, y_i)$ 在高斯变异算子下变为 $(x'_i, y'_i)$ ，具体为

$$\begin{cases} y'_i = y \exp(\tau'N(0,1) + \tau N(0,1)) \\ x'_i = x_i + y'_i N(0,1) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $N(0,1)$ 为期望值为 0，方差为 1 的正态分布随机变量； $\tau'$ 和 $\tau$ 是算子集参数，分别用于定义整体和个体步长，其中， $\tau' = (\sqrt{2n})^{-1}$ ， $n$  为变量个数， $\tau = (\sqrt{2\sqrt{m}})^{-1}$ ， $m$  为种群大小。

### 3 基于基点和熵的多属性决策方法

改进的 NSGA-II 求解多目标优化问题得到非劣解，还需利用多属性决策选取最优解。仅靠人工来完成在众多的帕雷托前沿中选择最优解，操作复杂且受主观影响大，合理性无法保证。考虑到改进 NSGA-II 算法得出的解集信息较丰富，本文利用基于基点和熵的多属性决策方法<sup>[15]</sup>，通过基点计算权系数，利用 Shannon 熵描述权系数的不确定性，建立指标权系数模型，在帕雷托解集中选择最优解，这种方法既保留基点有效性，又具有更高可靠性。

设有  $n$  个待选方案，每个方案有  $m$  个属性，可用矩阵表示为  $A=[a_{ij}]_{n \times m}$ 。当最优方案表示为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ ，且加入矩阵  $A$  的第  $n+1$  行后，将得到扩展矩阵  $\bar{A}_{(n+1) \times m}$ ，进一步对  $\bar{A}$  做如下规范化处理，获得记为  $B=[r_{ij}]_{n \times m}$  的矩阵，其中，

$$r_{ij} = a_j^{\max} - a_{ij} / (a_j^{\max} - \lambda_j), \quad i=1,2,\dots,n+1 \quad (11)$$

式中  $a_j^{\max} = \max\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}\}$  为第  $j$  个目标的最大值。

依据所有方案与最优方案的加权距离和最小及尽量消除各指标权系数不确定性的原则选取权系数，并根据 Jaynes 最大熵原理优化求解得到唯一属性权值

$$\delta = [s_1 / \sum_{j=1}^m s_j, s_2 / \sum_{j=1}^m s_j, \dots, s_m / \sum_{j=1}^m s_j]^T \quad (12)$$

式中： $s_j = \exp\{-[1 + (\mu \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})) / (1 - \mu)]\}$ ， $\varphi = 1, 2, \dots, m$ ； $\mu$  为多目标间平衡系数，且  $0 < \mu < 1$ 。各候

选方案综合评价值的集合为  $B \cdot \delta$ ，根据最大原则可以确定最佳方案。

### 4 算例分析

以 IEEE 30 系统为背景模拟互联电力市场，数据均来源于文献[13]。设互联电网中的 6 台发电机组分属于 3 个发电公司，市场需求弹性系数取  $0.5(\text{kW}^2 \cdot \text{h} \times 10^3 / \text{元})$ ，各机组成本数据如表 1 所示。

表 1 发电机组成本数据  
Tab. 1 Unit cost coefficients

发电公司	发电机组	最小(大)出力/MW	一次系数 $b_i/$ (元/MW·h)	二次系数 $a_i/$ (元/MW·h)
1	G1	0(80)	2	0.04
	G2	0(80)	1.75	0.035
	G3	0(50)	1	0.125
2	G4	0(55)	3.25	0.016 6
	G5	0(30)	3	0.05
	G6	0(40)	3	0.05

多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)是经典遗传算法在多目标优化问题中的应用，而 NSGA-II 算法通过引入非支配排序等级和拥挤距离 2 个指标表征个体适应度，避免了目标偏好性，能够找出使各目标函数能尽量达到最大(或最小)的最优解集。传统 NSGA-II 算法配排序等级和拥挤距离 2 个指标表征个体适应度，避免了目标偏好性，能够找出使各目标函数能尽量达到最大(或最小)的最优解集。传统 NSGA-II 算法采用非均匀变异算子，能使搜索最优解的过程更加集中在某一最有希望的区域，但容易陷入局部最优的情况，不利于多目标优化问题的求解；本文提出的基于高斯变异的改进 NSGA-II 给群体带来新的遗传基因以恢复由于选择算子的作用而失去的个体多样性，能有效避免局部最优的产生。MOGA、传统 NSGA-II 及本文提出的改进 NSGA-II 算法的交叉与变异概率均取 0.8 和 0.1，种群个体数为 100，最大遗传代数为 200。优化计算得到的帕雷托解空间如图 2 所示，得到的 10 组最优前沿解集如表 2 所示。通过将图 2(b)、2(c)与图 2(a)对比可以看出，本文采用的基于高斯变异算子得到的帕雷托解集具有较好的多样性，在三维空间中分布更均匀，有效降低了产生局部最优的概率，能够更好地解决互联电网交易优化的问题。以改进 NSGA-II 算法计算结果为例，从表 2 可以看出，优化后形成维数为  $10 \times 3$  的决策矩阵，按式(12)对决策矩阵进行规范化得到  $B_{10 \times 3}$ ，由式(13)可以求得属性权值  $\delta=[0.021, 0.275, 0.704]^T$ ，其中  $\mu$  取 0.5。最终决策向量  $B \cdot \delta$  为  $(0.212 \ 17, 0.388 \ 52, \dots, 0.602 \ 32, \dots, 0.495 \ 57, 0.366 \ 10)$ ，选择其中最大的

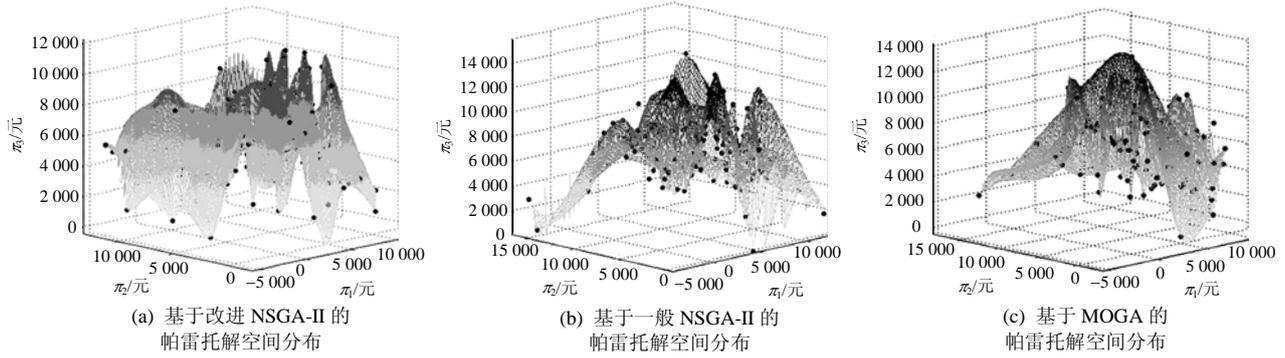


图 2 帕雷托解集分布对比图  
Fig. 2 Contrast distribution charts of Pareto set

表 2 优化后的帕雷托解集  
Tab. 2 The Pareto set after optimization

方法	参数	帕雷托解集									
		解 1	解 2	解 3	解 4	解 5	解 6	解 7	解 8	解 9	解 10
改进 NSGA-II 算法	$P_{G1}/MW$	42.28	21.64	42.24	51.67	43.09	28.22	39.07	53.23	50.24	31.81
	$P_{G2}/MW$	41.07	35.67	46.96	47.09	44.54	23.66	44.85	20.57	26.64	33.56
	$P_{G3}/MW$	31.39	36.34	25.64	20.69	34.24	28.92	41.23	28.51	21.94	24.67
	$P_{G4}/MW$	43.24	24.23	43.62	52.98	34.90	36.53	33.78	35.36	33.21	23.45
	$P_{G5}/MW$	21.55	29.89	10.73	10.07	26.89	22.30	27.89	28.18	16.36	18.22
	$P_{G6}/MW$	26.25	33.56	17.49	10.22	14.20	22.48	23.96	23.19	21.58	22.93
	$\pi_1/\text{元}$	3 541.17	2 880.53	2 852.45	4 080.23	4 843.05	3 610.66	4 436.70	3 780.38	4 269.78	4 520.30
	$\pi_2/\text{元}$	6 365.45	6 084.60	8 352.98	5 840.12	6 898.36	4 686.06	7 764.18	5 100.39	5 505.82	6 360.29
	$\pi_3/\text{元}$	7 524.15	8 738.64	7 667.09	6 317.65	7 059.44	8 569.03	5 826.20	8 155.06	7 617.11	6 279.14
	一般 NSGA-II 算法	$P_{G1}/MW$	32.75	30.00	20.81	22.95	49.48	21.23	42.00	50.94	21.54
$P_{G2}/MW$		47.80	44.96	24.61	19.11	43.02	29.87	41.51	31.98	49.97	31.65
$P_{G3}/MW$		30.06	25.33	37.35	29.04	17.53	33.32	23.49	21.33	36.61	37.39
$P_{G4}/MW$		33.16	42.08	30.74	33.07	29.56	28.50	31.55	39.00	26.77	18.92
$P_{G5}/MW$		16.32	22.25	17.96	17.44	10.13	29.74	25.18	16.26	19.16	22.72
$P_{G6}/MW$		24.78	18.41	12.86	22.04	17.03	19.96	12.35	14.92	22.07	29.64
$\pi_1/\text{元}$		2 953.06	2 500.91	2 483.90	3 197.20	4 609.81	2 891.95	4 789.42	4 892.98	4 608.07	2 187.13
$\pi_2/\text{元}$		6 330.41	6 012.38	4 317.81	7 374.89	5 685.48	6 970.62	6 705.03	5 966.11	7 132.68	7 269.29
$\pi_3/\text{元}$		7 300.57	7 576.32	8 173.39	5 757.51	6 711.87	8 446.09	6 824.73	6 675.42	5 699.86	7 227.39
MOGA 算法		$P_{G1}/MW$	21.78	40.31	27.79	44.36	43.34	22.21	34.69	36.88	38.35
	$P_{G2}/MW$	16.68	39.98	30.54	41.80	32.65	28.08	43.37	45.52	48.22	33.52
	$P_{G3}/MW$	33.71	32.06	31.52	27.91	35.94	37.94	27.83	22.37	21.59	23.55
	$P_{G4}/MW$	25.18	20.79	36.30	23.92	22.55	37.33	29.94	23.39	30.36	27.32
	$P_{G5}/MW$	15.58	19.77	17.43	20.05	26.52	18.32	26.25	14.41	20.77	13.64
	$P_{G6}/MW$	26.95	32.36	24.06	16.26	14.04	10.14	18.06	21.14	29.55	16.03
	$\pi_1/\text{元}$	4 238.87	2 259.30	4 082.31	4 516.26	4 508.42	3 484.88	4 696.98	3 485.83	4 287.03	3 978.06
	$\pi_2/\text{元}$	5 017.13	5 296.97	5 247.67	6 673.12	6 172.20	5 641.48	5 714.74	6 563.26	5 674.93	6 799.58
	$\pi_3/\text{元}$	6 592.78	8 407.48	6 275.16	6 817.35	6 804.37	7 322.74	6 615.69	7 919.33	5 814.31	6 569.97

第 5 个元素对应的解集为最优解，即发电分配方案为： $P_{G1}=43.09MW$ ， $P_{G2}=44.54MW$ ， $P_{G3}=34.24MW$ ， $P_{G4}=34.90MW$ ， $P_{G5}=26.89MW$ ， $P_{G6}=14.20MW$ 。

不同计算方法的最优解及迭代次数如表 3 所示，可以看出，改进 NSGA-II 算法得出的最优解更接近理论最优解，同时迭代次数最少，性能最好。

不同市场联盟下基于 Shapley 值的合作博弈方法得出的解与本文方法的结果对比如表 4 所示，其

表 3 不同计算方法结果对比  
Tab. 3 Comparison between different methods

计算方法	最优解/元	迭代次数
改进 NSGA-II	(4 843.05, 6 898.36, 7 059.44)	33
一般 NSGA-II	(4 789.42, 6 705.03, 6 824.73)	40
MOGA	(4 516.26, 6 673.12, 6 817.35)	76

中，合作博弈下的分配公式为

$$\phi_i(v) = \sum_{i \in S} \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} [v(S) - v(S - \{i\})] \quad (13)$$

表 4 与合作博弈方法结果对比( $\alpha=0.5$ )  
Tab. 4 Comparison with cooperative game ( $\alpha=0.5$ )

计算方法	获利情况/元	总利润/元	
合作博弈	公司 1 和 2 联盟	$\pi_{1,2}=7\ 914.99$ $\pi_3=7\ 776.02$	15 691.01
	公司 1 和 3 联盟	$\pi_{1,3}=7\ 836.26$ $\pi_2=7\ 776.02$	15 713.33
	公司 2 和 3 联盟	$\pi_{2,3}=7\ 925.80$ $\pi_1=7\ 788.85$	15 714.65
	所有公司都联盟	$\pi_{1,2,3}=17\ 665.02$	17 665.02
本文方法	$\pi_1=4\ 843.05$ $\pi_2=6\ 898.36$ $\pi_3=7\ 059.44$	18 800.85	

式中:  $S$  为合作对策局中人集合  $N=\{1,2,\dots,n\}$  的非空子集;  $v(S)$  为特征函数;  $|S|$  为集合  $S$  中元素的个数;  $\phi_i(v)$  为合作博弈中第  $i$  个局中人的分配值。

由表 3 可以看出, 在全部 3 个发电公司都联盟的市场环境下, 其合作博弈得出的总利润最高, 为 17 665.02 元; 而利用本文提出的多目标优化算法得到的总利润为 18 800.85 元, 较前者相比增加 1 135.83 元。可见, 采用本文方法能在互联电网优化交易问题中准确地得到更接近于最优解的交易分配方案。

## 5 结论

1) 本文提出的模型能较好地解决利润分配问题, 能为市场交易人员进行互联电网交易方案的选取提供指导。

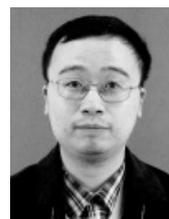
2) 本文提出的改进 NSGA-II 算法有效避免了局部最优的产生, 提高了优化运算的性能。

3) 本文方法的计算结果与基于 Shapley 值的合作博弈方法结果的对比显示, 本文方法的计算结果更优, 表明本文方法是有效的。

## 参考文献

- [1] 李清清, 周建中, 莫莉, 等. 基于序贯博弈模型的发电商竞价策略分析[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 85-89.  
Li Qingqing, Zhou Jianzhong, Mo Li, et al. Analysis on generators' bidding strategy based on sequential game model[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 85-89(in Chinese).
- [2] 陈星莺, 李华昌. 不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J]. 电力需求侧管理, 2006, 4(7): 12-15.  
Chen Xingying, Li Huachang. Optimal bidding strategies for distribution companies with incomplete information[J]. Power DSM, 2006, 4(7): 12-15(in Chinese).
- [3] 尚金成, 张兆峰, 韩刚. 区域电力市场竞价交易模型与交易机制的研究(一): 竞价交易模型及其机理、水电参与市场竞价的模式及电网安全校核机制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 7-14.  
Shang Jincheng, Zhang Zhaofeng, Han Gang. Study on transaction model and mechanism of competitive regional electricity market (part 1): transaction model and mechanism, participation mode for hydroelectricity participants and power system security checking mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 7-14(in Chinese).
- [4] 尚金成, 张兆峰, 韩刚. 区域电力市场竞价交易模型与交易机制的研究(二): 电价机制及其稳定制度、市场风险及其规避、结算机制与市场盈余公平分配模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 5-12.

- [5] Shang Jincheng, Zhang Zhaofeng, Han Gang. Study on transaction model and mechanism of competitive regional electricity market(part 2): pricing mechanism and stabilization system, market risk and evasion, settlement mechanism and market surplus allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 5-12(in Chinese).
- [6] 杨建华, 肖达强, 唐学军, 等. 华中电网区域电力市场电能交易撮合系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 90-94.  
Yang Jianhua, Xiao Daqiang, Tang Xuejun, et al. Design and implementation of electric matchmaking transaction system in china regional electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 90-94(in Chinese).
- [7] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 电力市场中大用户直购交易模式及算法研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 85-90.  
Chen Haoyong, Zhang Senlin, Zhang Yao. Research on transaction mode of direct power purchase by large consumers in electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 85-90(in Chinese).
- [8] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 区域电力市场下节能发电调度方式[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 16-22.  
Chen Haoyong, Zhang Senlin, Zhang Yao. Energy-saving power generation dispatching in regional electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 16-22(in Chinese).
- [9] 王建斌, 康勇, 谭忠富. 互联电力交易合同参数优化模型[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 30-32.  
Wang Jianbin, Kang Yong, Tan Zhongfu. Optimization model of interchange contract parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 30-32(in Chinese).
- [10] 潘炜, 谢开贵, 周家启. 基于最优潮流与合作博弈理论的互联电网经济效益分析[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 35-39.  
Pan Wei, Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. Economic effect analysis of interconnected power system based on optimal power flow and cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 35-39(in Chinese).
- [11] 马文斌, 唐德善, 陆琳. 基于合作博弈的互联电网电力交易优化分配模型[J]. 继电器, 2007, 35(11): 40-43.  
Ma Wenbin, Tang Deshan, Lu Lin. Optimal allocation model for electricity transaction in interconnected power network[J]. Relay, 2007, 35(11): 40-43(in Chinese).
- [12] Contreras J, Klusch M, Krawczyk J B. Numerical solutions to nash-cournot equilibria in coupled constraint electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 195-206.
- [13] Feng Zhao, Luh P B, Yan J H, et al. Bid cost minimization versus payment cost minimization: a game theoretic study of electricity auctions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 181-194.
- [14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 2(6): 182-197.
- [15] 陈皓勇, 胡斌, 叶荣. 计及气象灾害因素的电网规划方法[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 82-87.  
Chen Haoyong, Hu Bin, Ye Rong. Transmission network planning considering weather disaster[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 82-87(in Chinese).
- [16] Li Yuannian, Liu Sifeng, Fang Zhigeng. Study on the weight of evaluation index based on the rule of maximum entropy[C]// Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services. Nanjing, China: IEEE, 2007: 1347-1351.



刘继春

收稿日期: 2011-04-12。

作者简介:

刘继春(1975), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统经济性分析及电力市场, E-mail: scdxljc@gmail.com;

张鹏(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场;

吴磊(1979), 男, 博士, 美国 Clarkson 大学助理教授, 研究方向为电力市场研究。

(责任编辑 褚晓杰)