

# 发电权交易的阻塞风险规避模型

艾东平, 鲍海, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 发电权撮合交易中常常通过取消或削减发电商的交易来满足系统的安全约束, 这将给发电商带来损失, 如何体现发电商的交易需求、降低发电商的交易风险是发电权交易研究的一个重要课题。借鉴金融输电权规避市场风险的思想, 将一种新型金融输电权引入发电权撮合交易模型, 以规避因阻塞使得发电商计划交易量不能完成的风险。根据模型特点采用遗传算法求解, 不但可以保证撮合结果的最优性, 而且算法可以体现出金融输电权对交易调度的指向作用, 激励发电权交易双方合理报价, 确保市场交易公平性。并探讨了该模型下的发电权交易结算方案和实施步骤。采用 IEEE39 节点系统对提出的方法进行了验证。

**关键词:** 电力市场; 发电权交易; 金融输电权; 风险规避

## Congestion risk hedging model for generation rights trade

AI Dong-ping, BAO Hai, YANG Yi-han

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In generation rights trade, some transactions have to be cut or canceled to meet the system security constraint, which will bring losses to the generation companies. How to reflect the trade demand of generation companies and reduce the trade risks is an important subject in research of generation rights trade. In electricity market, financial transmission right is an effective tool for avoiding market risks. This paper, based on the characteristics of generation rights trade, introduces a new financial transmission right to the generation right matchmaking model. In this model, the traders who purchase transmission rights will enjoy the priority right to trade and gain the compensation when the trades are cut or canceled. The calculation by Genetic Algorithm not only guarantees the optimality of solutions, but also materializes the effect of transmission right on the generation rights trade, restrains the speculation and guarantees the fair trade. Furthermore, the settlement scheme and implementing steps of generation rights trade are also discussed. Lastly, IEEE39-bus system is used to verify the proposed method.

**Key words:** electricity market; generation rights trade; FTR; risk hedging

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0007-08

## 0 引言

发电权交易是指以市场方式实现发电机组、发电厂之间电量替代的交易行为, 也称为替代发电交易<sup>[1]</sup>。

目前, 众多学者针对发电权交易提出了撮合交易<sup>[2-12]</sup>, 双边交易<sup>[13]</sup>, 期权交易<sup>[14]</sup>, 委托代理交易<sup>[15]</sup>等交易模式。由于撮合交易不但可以形成明确的买卖对应关系, 而且可以制定灵活的价格机制<sup>[16]</sup>, 因此得到现阶段发电权交易市场的认同和应用<sup>[1,2-12]</sup>。但在考虑系统安全约束时, 交易中心在撮合发电权交易时常常需要削减或取消某些交易以维护系统的安全, 使得某些发电商无法完成计划交易量, 这就可能给那些依靠发电权交易来避免发电机

组因燃料不足、非计划停运等原因不能履行发电合同风险<sup>[2-3]</sup>的发电商带来损失。因此, 需要寻求一种新的调度管理方式以体现不同发电权交易商的交易需求, 降低发电权交易商的交易风险, 为发电商提供一个公平竞争的交易环境。

电力市场中, 金融输电权作为规避市场风险的工具得到广泛研究与应用, 本文借鉴这种思想, 引入了一种新型金融输电权, 用以规避线路阻塞使得申报的交易量不能完成的风险。参与发电权交易的发电商可以根据自己的需要向交易中心购买该输电权获得优先交易的权利, 当计划交易因上述原因不能完成时还可以得到补偿以降低损失。在此基础上, 建立了引入金融输电权的发电权撮合交易模型, 根据模型特点采用遗传算法进行求解, 并探讨了该模

型下发电权交易的执行步骤和结算方案。本文提出的方法充分发挥了金融工具对发电权交易调度的指向作用，符合市场竞争的原则，是发电权交易管理模式的有益尝试和探索。

### 1 金融输电权的阻塞风险规避

金融输电权 (FTR) 的概念首先由 Hogan 教授提出<sup>[17]</sup>，其实质是一种规避价格波动风险的工具；文献[18-19]提出的新型金融输电权属于风险管理理论中的风险控制技术，是针对阻塞发生的不确定性，将风险单位进行分散的一种风险控制方法，通过增加风险单位的数量将特定的风险在更大的样本空间里进行分散，以此减少单个风险单位的损失，是一种更纯粹的规避阻塞风险的工具。尽管上述 FTR 的形式不同，但其最终目的都是用来规避交易市场中存在的金融风险。对于发电权交易市场中存在的因线路阻塞导致的发电商计划交易量不能完成的风险同样可以通过设置输电权的方法进行规避。

对于系统中可能出现的阻塞情况，交易中心可以将整个网络中的所有支路赋予相应输电权，放在远期市场拍卖，交易者可以根据自己的判断决定购买哪些支路的输电权和购买价格，交易中心将这些输电权按交易商所给的价格在交易商中分配。购买了输电权的发电商将获得优先安排交易和获得补偿的权利。

交易中心将上述资金投入发电权交易基金池，一部份平衡交易中心的补偿费用，一部分作为下一阶段输电权交易的补偿基金。如果某一交易商的计划交易量在该时段完全实现，则买入的输电权自动无效。

在交易时段如果某个购买了金融输电权的交易商未能完全实现其计划交易量，则交易中心将对该交易商支付补偿费用。由于交易中心必须保证基金池中的基金在某一底线之上，因此有

$$X + \sum_{t \in N} \sum_{i \in n} q_{t,i} - (\sum_{a \in U} \sum_{j \in l} q_{a,j}) \cdot \alpha \geq Y \quad (1)$$

此处  $\alpha$  为加权补偿因子，根据式(1)有

$$1 \leq \alpha \leq \frac{X + \sum_{t \in N} \sum_{i \in n} q_{t,i} - Y}{\sum_{a \in U} \sum_{j \in l} q_{a,j}} \quad (2)$$

其中： $X$  为上一时段交易后基金池中的存留基金； $Y$  为基金池中存留基金的最低保证值； $q_{t,i}$  为交易商  $i$  购买支路  $i$  输电权的费用； $N$  为购买金融输电权的发电商集合； $U$  为  $N$  中因系统发生阻塞而未完成计划交易量的发电商集合； $n$  为被赋予输电权的支路集合； $l$  为该时段发生阻塞的支路集合<sup>[16-17]</sup>。

$\alpha$  的具体数值由交易中心确定，设置不应太小，否则会打击交易商购买输电权的积极性，根据式 (2)，本文对  $\alpha$  的取值规定为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{X + \sum_{t \in N} \sum_{i \in n} q_{t,i} - Y}{\sum_{a \in U} \sum_{j \in l} q_{a,j}} & U \neq \phi \\ 0 & U = \phi \end{cases} \quad (3)$$

对需要补偿的发电商来讲，其未完成的发电量不尽相同，如果按照相同的补偿因子补偿，则体现不出交易量完成情况的差别，因此应以各个发电商的实际交易情况对  $\alpha$  进行修正，本文采用式(4)进行修正：

$$\beta_a = \frac{Q_a - P_a}{Q_a} \cdot \alpha \quad (4)$$

其中： $Q_a$  为发电商  $a$  申报的计划交易量； $P_a$  为实际完成的交易量，则发电商  $a$  因申报的计划交易量未完全实现而获得的补偿金为  $q_a \beta_a$ ，其中  $q_a = \sum_{i \in \Omega} q_{a,i}$ ， $\Omega$  为发电商  $a$  购买了输电权的阻塞线路集合。从修正补偿因子  $\beta_a$  可以看出，发电商申报的交易量未完成的越多，获得的补偿越多。

上述金融输电权实质上是对文献[16-17]提出的金融输电权应用范围的扩展和改进，是一种用来规避因线路阻塞导致发电商计划交易量不能完成风险的金融工具。

### 2 引入金融输电权的发电权交易模型

设发电权交易市场中  $m$  个发电权卖方， $n$  个发电权买方，机组集合分别为  $G_S$  和  $G_B$ ，交易双方的报价分别为  $b_{S_i}$  和  $b_{B_j}$ ，申报交易量分别为  $P_{S_i}$  和  $P_{B_j}$ 。设双方交易量为  $P_{ij}$ ，其单位交易成本为  $c_{ij}$ 。发电权交易基金池中的基金额为  $C_p$ ，购买金融输电权的交易商集合为  $M$ 。

如果以效用最大为目标组织撮合交易，则引入金融输电权的调度模型可以表示为：

$$\max H = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{S-i} - b_{B-j} - c_{ij}) P_{ij} + \lambda (C_p - \sum_{t \in M} q_t \cdot \beta_t) \quad (5)$$

约束条件可以表示为：

a. 机组总出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_i^0 - \sum_{j \in G_b} P_{ij} + \sum_{j \in G_s} P_{ij} \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

式中： $P_i^{\min}$ ， $P_i^{\max}$ ， $P_i^0$  分别为发电机  $i$  的出力下限、

上限和初始出力。

b. 支路有功潮流约束

$$P_l \leq P_l^{\max} \quad (7)$$

c. 撮合交易约束

发电权交易的合理存在是因为交易双方的价格差在补偿交易成本后仍然有富裕<sup>[13]</sup>, 因此有

$$\begin{cases} P_{ij} \geq 0 & b_{S_i} - b_{B_j} - c_{ij} \geq 0 \\ P_{ij} = 0 & b_{S_i} - b_{B_j} - c_{ij} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

d. 发电权交易双方交易功率约束

对于发电权卖方  $i$ , 总出让功率不应超出申报量  $P_{S_i}$ 。因此有

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} \leq P_{S_i} \quad (9)$$

对于发电权买方  $j$ , 总受让功率不应超出申报量  $P_{B_j}$ 。因此有

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} \leq P_{B_j} \quad (10)$$

式(5)表示在优先满足购买输电权的发电商交易的情况下, 该时段的撮合交易的总效用最大。方程等号右侧第一项因式表示以撮合方式组织的发电权交易的社会效用; 第二项表示因不能完成申报交易量而补偿给购买输电权的交易商后剩余的资金, 是输电权交易的效用。其中  $\lambda$  为一适当大数, 目的是保证购买输电权的发电商的交易优先履行。

### 3 结算方式

对于可能出现的优化结果, 本文给出如下结算方案。

1) 对于已完成的撮合交易, 可将社会效用平均分配给交易双方, 成交价格为双方报价的均值。

$$b_{ij} = \frac{b_{S_i} + b_{B_j}}{2}$$

2) 对于因系统阻塞而未能完成的计划交易电量, 发电商  $i$  将根据购买的输电权获得补偿金  $q_i \cdot \beta_i$ 。对于能够完成计划交易量的发电商, 其购买的输电权将自动失效, 购买输电权的资金将充入发电权交易基金池作为下一次发电权交易的存留基金。

### 4 引入金融输电权的发电权交易管理步骤

经过上述分析, 可以看出本文提出的发电权交易管理方法的具体实施步骤可分为以下几步。

1) 发电商申报计划发电权交易量和交易价格,

并根据自身需要购买金融输电权以规避线路阻塞造成计划不能完成的风险。该输电权可由交易中心在远期市场组织拍卖。

2) 交易中心根据参与发电权交易的发电企业申报的交易量、交易价格以及各个发电商购买金融输电权的情况进行协调调度, 确定在安全约束条件下的交易匹配及其交易量。

3) 交易中心根据撮合交易后确定的补偿因子, 按照当初交易商购买金融性输电权的价格对不能完成计划交易量的发电商给予补偿, 对发电权交易进行结算。

## 5 基于遗传算法的发电权交易模型求解

### 5.1 发电权撮合交易模型解的特点

对含有非线性约束的发电权交易模型的求解可以描述为在发电权交易的解空间中寻找这样一个解  $Q_{\text{best}}$ , 使得它落在以约束条件为边界的区域内并符合目标函数的要求。该解空间可表示成为

$$B = \{Q(k) | Q(k) = (T_{[k]}^{(1)}, T_{[k]}^{(2)}, \dots, T_{[k]}^{(l)}, \dots, T_{[k]}^{(n)}), k = 1, \dots, m\}$$

其中:  $m$  是满足约束条件的解的个数;  $n$  为解  $Q(k)$  中包含的交易对个数;  $T_{[k]}^{(l)} = T(P_{ij}, i, j)$  为解  $Q(k)$  中的一个交易对, 解空间的边界根据约束条件确定,  $P_{ij}$  为交易功率,  $i, j$  分别为发电权出让方和受让方编号。

常用的发电权交易多是按照“高低匹配”原则进行撮合交易, 这种方法是在简化的网络模型下将交易对  $T(P_{ij}, i, j)$  逐个加入系统并进行安全校核, 放弃不能通过安全校核的交易。文献[8-9]指出, 在考虑系统安全约束的情况下, “高低匹配”的撮合交易所得到的结果未必是满足目标函数的最优解。出现这一现象的原因主要是由于真实的电力系统是一个耦合、非线性的动态系统, 某一时刻系统的运行状态受该时刻及之前加入的交易共同决定, 这种撮合交易模式具有的交易时序性使得潮流状态随着交易的加入不断变化, 每一个交易的加入与调整都将改变已加入的交易对系统的作用, 并且这种影响同样是耦合、非线性的, 因此只有当所有交易对以及各个交易对应的交易量确定之后才能准确的判断系统是否发生阻塞。反映在解算中即不再着眼于单一一个交易  $T^{(i)}(i=1, 2, \dots, n)$  上, 而是着眼于由交易对构成的解  $Q$  上, 求解过程中需要并行处理  $Q$  中  $n$  个变量。

此外, 从式(3)、(4)可以看出, 由于线路阻塞而不能完成发电权计划交易量的发电商集合只有在所有交易确定之后才能确定, 补偿因子是随着调

度结果动态变化的,这样就增加了模型求解的复杂程度。鉴于上述原因,本文拟采用遗传算法对模型进行求解。

### 5.2 遗传算法 (GA) 简介

遗传算法是一种基于自然选择和基因遗传学原理的一种群体寻优的搜索算法,搜索过程既不受优化函数连续性的约束也没有优化函数导数必须存在的要求,非常适合复杂函数的求解。遗传算法具有很高的并行性,因而具有显著的求解效率,其基本思想简单,运行方式和实现步骤规范,便于具体使用,是目前理论上比较成熟的一种智能优化算法<sup>[20-23]</sup>。

### 5.3 遗传算法的收敛性

采用随机理论可以证明<sup>[20]</sup>,标准遗传算法并不能保证全局最优收敛,但在一定约束条件下,经过改进的遗传算法可以实现这一点。其收敛性可用如下定义和定理描述<sup>[21]</sup>。

定义:对初始群体,以比例法进行选择操作,以概率  $p_c \in [0,1]$  进行交换操作,以概率  $p_m \in (0,1)$  进行变异操作的群体寻优算法称为标准遗传算法。

定理 1:具有定义所述参数,且在选择操作后保持当前最优值的遗传算法,最终能收敛到全局最优解。

定理 2:具有定义所述参数,且在选择操作前保持当前最优值的遗传算法,最终能收敛到全局最优解。

从上述定理可见,选择操作前或者后保留当前最优值的遗传算法能够保证收敛至全局最优解。

### 5.4 染色体编码

采用撮合方式组织发电权交易,可将买卖双方的交易功率形成交易矩阵

$$P_{BS} = \begin{matrix} & P_{B,1} & \cdots & P_{B,j} & \cdots & P_{B,n} \\ \begin{matrix} P_{S,1} \\ \vdots \\ P_{S,i} \\ \vdots \\ P_{S,m} \end{matrix} & \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1j} & \cdots & P_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{i1} & \cdots & P_{ij} & \cdots & P_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mj} & \cdots & P_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

撮合交易的交易结果都可以用式 (11) 矩阵形式表示,因此发电权交易解空间内的每一个解都可以在交易矩阵形成的空间内找到,即发电权交易解空间包含于交易矩阵形成的空间。因此,基于交易矩阵进行的编码符合 GA 算法的编码规范<sup>[21]</sup>。 $P_{BS}$  对应为 GA 编码空间的一个染色体,而矩阵中的元

素  $P_{ij}$  即为染色体上的基因。当最优解  $P_{BS}^{best}$  求得后,交易的匹配对  $T(P_{ij}, i, j)$  即可获得。

交易完成后,发电权卖方机组  $i$  的出力变化量为

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (12)$$

发电权买方机组  $j$  的出力变化量为

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^m P_{ij} \quad (13)$$

对于撮合交易,只有在买卖双方报价差经交易成本修正后为正才有意义,因此,进行编码前需要判断哪些交易可行。由于发电权交易双方报价和交易成本可以在撮合交易前获得,因此可以获得由交易成本修正的交易福利矩阵  $F_{BS}$ 。

$$F_{BS} = \begin{pmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1j} & \cdots & f_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i1} & \cdots & f_{ij} & \cdots & f_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mj} & \cdots & f_{mn} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中,  $f_{ij} = b_{S_i} - b_{B_j} - c_{ij}$ 。通过福利矩阵可以判断哪些交易具有可行性,对于  $f_{ij} \leq 0$  的交易不予编码。因此染色体中基因个数  $R \leq m \cdot n$  个。

因为  $P_{ij}$  在定义域范围内是连续的且为实数,因此本文采用实数编码,同二进制编码相比,节省了编码串的长度,同时解码更为简便。

### 5.5 适应度函数

由于初始化和优化后得到的每个个体不一定满足约束条件,需经过潮流计算校核个体的可行性。为此本文取适应度函数为

$$\min H = \frac{1}{F} + M = \frac{1}{F} + \sum_{l=1}^m \alpha_l \cdot L_l \quad (15)$$

其中:  $F$  为目标函数;  $M$  为惩罚函数;  $\alpha_l$  为相应的惩罚系数;  $L_l$  为约束条件;  $m$  为约束条件个数。

在各种约束条件中,违背线路潮流约束会带来系统安全问题,因此可以适当将  $\alpha_l$  设为大数以便使个体尽量不违背约束条件。

### 5.6 遗传算法求解交易模型的公平性分析

由于  $f_{ij} = b_{S_i} - b_{B_j} - c_{ij}$ , 因此式 (5) 也可以写为

$$\max H = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} P_{ij} + \lambda(C_p - \sum_{t \in M} q_t \cdot \beta_t) \quad (16)$$

从数学意义上讲, 式(16)中,  $f_{ij}$  可理解为待求变量  $P_{ij}$  的权重系数, GA 算法求解的是自变量具有不同权重系数的目标函数。从发电权买方市场看, 在发电权卖方报价一定时, 发电权买方报价越低, 权重越大; 从发电权卖方市场看, 在发电权买方报价一定时, 发电权卖方报价越高, 权重越大, 因此, 出让报价较高和受让报价较低的机组间必定具有较大的权重, 解算过程中社会效用将优先分配给这样的机组, 而故意压低出让报价和抬高受让报价的投机行为<sup>[9]</sup>将不利于发电商获得大的交易权重, 不利于促成己方交易。所以, 采用 GA 算法求解交易模型一方面可以维护发电权市场交易的公平性, 另一方面可以激励发电权交易双方合理报价, 在一定程度上抑制了投机行为, 有利于市场的有序竞争。

### 5.7 算法流程

基于遗传算法的发电权交易调度模型求解流程可如图 1 所示。

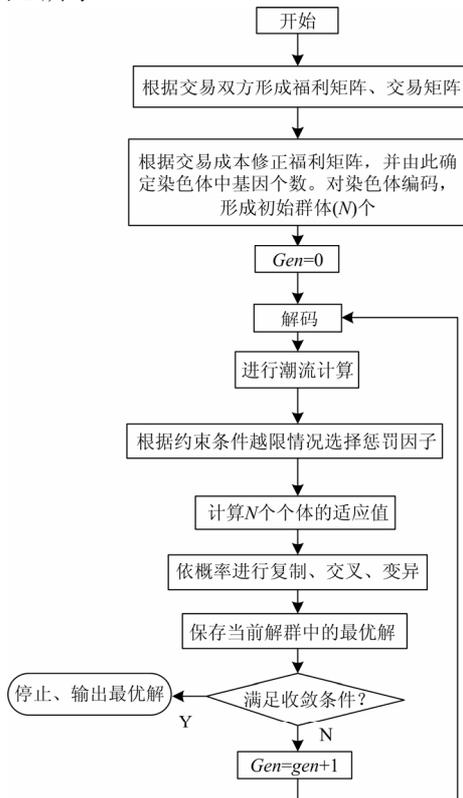


图 1 发电权交易算法流程图  
Fig.1 Flow chart of GRT algorithm

## 6 算例分析

以 IEEE39 节点系统为例, 采用 Matlab 进行仿真分析。设 30, 35, 36, 39 节点的发电机为发电权买方, 32, 33, 34, 37, 38 节点发电机为发电权卖方, 31 节点发电机作为平衡机不参与发电权交易。

设线路最大容量为 700 MW。表 1 为发电权购入(或出售)的范围和报价, 假定受让机组申报量等于其最大出力与初始发电出力的差值。

表 1 发电权交易方申报数据

序号	节点	初始出力/MW	最大出力/MW	最小出力/MW	出让出力/MW	出让报价/(元/kWh)	受让报价/(元/kWh)
1	30	200	500	100	-	-	0.302
2	32	700	780	300	300	0.422	-
3	33	650	760	500	130	0.361	-
4	34	500	610	100	300	0.372	-
5	35	650	780	0	-	-	0.345
6	36	450	1000	400	-	-	0.265
7	37	540	650	200	300	0.348	-
8	38	800	1000	300	350	0.320	-
9	39	800	1200	500	-	-	0.123

表 2、表 3 分别列出了在不引入输电权时不计线路约束情况 (A)、计及线路约束情况 (B) 的发电权交易调度结果; 如果交易中心对 21、22 节点间的线路设置输电权, 33、37 节点的发电商购买了该线路的输电权, 购买金额分别为 3 000 元和 5 000 元, 则在计及线路约束情况下考虑输电权 (C) 的发电权撮合交易结果列于表 4。

上述情况下发电权交易后各个机组出力变化结果列于表 5。

表 2 不计线路约束情况下发电权交易结果

Tab.2 Results of generation right trades without line constraints

出让机组	受让机组	交易量/MW	交易效用/(元/h)
32	30	81.8	11 108.44
32	35	66.5	4 821.25
32	36	148.4	22 126.44
32	39	3.3	1 081.08
33	30	33	3 003
33	35	2.1	58.17
33	36	27.1	2 823.82
33	39	67.8	19 167.06
34	30	1.5	149.55
34	35	7.5	273
34	36	222.2	25 086.38
34	39	68.8	20 055.2
37	30	29.1	2 325.09
37	35	10.5	174.3
37	36	1.9	176.89
37	39	258.5	70 234.45
38	30	154.6	10 126.3
38	35	43.4	95.48
38	36	150.4	11 836.48
38	39	1.6	411.68
总计		1 380	205 134.1

表 3 计及线路约束时不考虑输电权的发电权交易结果

Tab.3 Results of generation right trades considering line constraints without financial transmission rights

出让机组	受让机组	交易量/MW	交易效用/(元/h)
32	30	11.5	1 561.7
32	35	0.3	21.75
32	36	262.1	39 079.11
32	39	17.0	5 569.2
33	30	17.6	1 601.6
33	35	0	0
33	36	23.9	2 490.38
33	39	5.5	1 554.85
34	30	9.7	967.09
34	35	0	0
34	36	3.1	349.99
34	39	287	83 660.5
37	30	7.6	607.24
37	35	0.1	1.66
37	36	3.1	288.61
37	39	60.5	16 437.85
38	30	253.6	16 610.8
38	35	0.1	0.22
38	36	1.1	86.57
38	39	30.0	7 719
总计		993.8	178 608.1

表 4 计及线路约束时考虑输电权后发电权交易结果

Tab.4 Results of generation right trades considering line constraints and financial transmission rights

出让机组	受让机组	交易量/MW	交易效用/(元/h)
32	30	1.1	149.38
32	35	1.4	101.5
32	36	19.6	2 922.36
32	39	239.8	78 558.48
33	30	3.9	354.9
33	35	12.7	351.79
33	36	34.0	3542.8
33	39	77.4	21 880.98
34	30	1.3	129.61
34	35	1.8	65.52
34	36	187.9	21 213.91
34	39	67.4	19 647.1
37	30	260.3	20 797.97
37	35	6.1	101.26
37	36	22.8	2 122.68
37	39	10.8	2 934.36
38	30	33.2	2 174.6
38	35	0.2	0.44
38	36	2.2	173.14
38	39	4.7	1 209.31
总计		988.6	178 432.1

表 5 发电权交易后各个机组出力变化

Tab.5 Outputs of each generator unit after trades

算例	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	300	-300	-130	-300	130	550	-300	-350	400
B	300	-290.9	-47	-299.8	0.5	293.3	-71.3	-284.8	400
C	299.8	-261.9	-128	-258.4	22.2	266.5	-300	-40.3	400

观察表 5 统计情况可以看出:

1) 当系统不考虑安全约束(A)时,所有参与发电权交易的发电商的计划交易量都可以完成。但线路 21-22 上的有功潮流达到 921 MW,超出了线路容量,因此,不能按此交易结果进行调度。

2) 考虑线路容量约束(B)后,大部分发电商的交易量得到削减,很多发电商无法完成计划交易量。

3) 在考虑系统安全约束情况下,33,37 节点的发电商通过购买金融性输电权获得了优先交易的权利,同未购买输电权(B)时相比,其交易量分别增加了 81 MW 和 228.7 MW,这体现了金融输电权对发电权交易调度的指向作用。

由于 37 节点的发电商计划交易量完全得到交易,因此只有 33 节点的发电商需要补偿,此时加权补偿因子  $\alpha = 16$ ,其中补偿金额为

$$3000 \times 16 \times \frac{130 - 128}{130} = 738$$

若采用匹配交易模式对该模型进行求解(D),考虑金融输电权的引入,需要在优先撮合购买输电权的发电商交易后按照报价的高低进行匹配撮合,撮合过程中放弃不能通过安全校核的交易。计算结果如表 6、表 7 所示。

表 6 考虑金融输电权的匹配撮合交易结果

Tab.6 Match results of generation right trades considering financial transmission rights

出让机组	受让机组	交易量/MW	交易效用/(元/h)
32	30	300	40 740
33	36	30	3 126
33	39	100	28 270
34	35	130	2 652
37	39	300	44 190
总计		860	118 978

表 7 发电权交易后各个机组出力变化

Tab.7 Outputs of each generator unit after trades

算例	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D	300	-300	-130	-130	130	30	-300	0	400

从表 6、表 7 所列结果可见,购买金融输电权

的发电商 33 和 37 全部完成了交易,但与遗传算法获得的计算结果 (C) 相比,其整体成交量和交易效用均低于采用遗传算法获得的结果。这说明对于以效用最大为目标函数的发电权交易来说,采用匹配的求解方法并未获得目标函数的最优解。

## 7 结论

本文引入并改进了一种新型金融性输电权,用来规避因线路阻塞导致发电商无法完成计划交易电量的风险。发电权交易商可以根据需要通过购买该输电权获得优先交易的权利,并对未能完成的交易获得补偿。

建立了引入金融性输电权的发电权撮合交易模型,该模型充分体现了购买输电权的发电商的交易需求。

应用遗传算法进行求解可以避免撮合交易时序性对模型优化结果的影响。由于计算完全基于系统潮流,且选择操作前或后保留当前最优值的遗传算法能收敛至最优解,因此保证了求解结果的最优性和可行性。算法能够体现金融输电权对撮合交易起到的指向作用,并且可以激励发电权交易双方合理报价,有助于提高交易的公平性。

本文提出的方法便于操作和实施,是发电权交易管理模式的有益尝试和探索。

## 参考文献

- [1] 谢毅. 依法合规开展发电权交易[N]. 中国电力报, 2008.
- [2] 许荣, 赵岩, 李磊, 等. 基于节能降耗的发电权交易效益分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25 (6) : 150-153. XU Rong, ZHAO Yan, LI Lei, et al. Profits analysis of generation right transaction based on energy consumption saving[J]. Water Resources and Power, 2007, 25 (6) : 150-153.
- [3] 黎灿兵, 康重庆, 夏清, 等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6) : 13-18. LI Can-bing, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Generation rights trade and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6) : 13-18.
- [4] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 基于水火电置换的发电权调节市场[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5) : 131-136. WANG Yan-ling, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Adjusting market of generation right based on hydro-thermal exchange[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (5) : 131-136.
- [5] WANG Yan-ling, ZHANG Li-zi. Design trading market of generation rights[C]. //IPEC. Singapore: 2005.
- [6] 陈启鑫, 康重庆, 程旭东, 等. 考虑阻塞管理的发电权交易模型及其网络流算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34) : 106-111. CHEN Qi-xin, KANG Chong-qing, CHENG Xu-dong, et al. Generation rights trade model and its network flow algorithm considering congestion management[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (34) : 106-111.
- [7] 肖建, 文福拴. 发电权交易的阻塞调度[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (18) : 24-29. XIAO Jian, WEN Fu-shuan. Congestion dispatch for generation rights trade[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (18) : 24-29.
- [8] 尚金成. 基于节能减排的发电权交易理论及应用 (一) 发电权交易理论[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (12) : 46-52. SHANG Jin-cheng. Generation right exchange theory and its applications based on energy-saving and emission reducing, part one: generation right exchange theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (12) : 46-52.
- [9] 尚金成, 何洋. 基于节能减排的发电权交易理论及应用 (二) 发电权交易分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13) : 37-42. SHANG Jin-cheng, HE Yang. Generation right exchange theory and its applications based on energy-saving and emission reducing, part two: generation right exchange analysis and applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (13) : 37-42.
- [10] 陈赞, 严正. 考虑节能减排与网络约束的发电权交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12) : 52-57. CHEN Yun, YAN Zheng. Generation rights trade model based on energy-saving emission-reducing and network constraint[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (12) : 52-57.
- [11] 李啸虎, 李磊, 赵岩, 等. 考虑非计划停运及检修的发电权多目标优化交易[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (13) : 35-39, 45. LI Xiao-hu, LI Lei, ZHAO Yan, et al. Multi-objective optimized trade of generation rights considering non-plan outage and repair[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (13) : 35-39, 45.
- [12] 王雁凌, 程倩. 基于节能降耗的发电权交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (18) : 28-32. WANG Yan-ling, CHENG Qian. Generation rights trade model based on energy conservation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (18) : 28-32.
- [13] 张森林. 水电参与电力市场竞争若干问题的研究: (二) [J]. 水电能源科学, 2006, 24 (3) : 62-65, 78. ZHANG Sen-lin. Research on how hydropower participates in electricity market: part II[J]. Water Resources and Power, 2006, 24 (3) : 62-65, 78.

- [14] 姚建刚, 周启亮, 张佳启, 等. 基于期权理论的发电权交易模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21): 76-81.  
YAO Jian-gang, ZHOU Qi-liang, ZHANG Jia-qi, et al. Generation rights trade mode based on option theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21): 76-81.
- [15] 莫莉, 周建中, 李清清, 等. 基于委托代理模型的发电权交易模式[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (2): 30-34.  
MO Li, ZHOU Jian-zhong, LI Qing-qing, et al. Mechanism of generation-rights trades based on principal-agent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (2): 30-34.
- [16] 夏清, 孙正运. 考虑交易成本的区域市场撮合交易模型[J]. 电网技术, 2005, 29 (17): 1-4.  
XIA Qing, SUN Zheng-yun. Application of high-low match methods to regional electricity market considering transaction costs[J]. Power System Technology, 2005, 29 (17): 1-4.
- [17] Hogan W W. Contract networks for electric power transmission[S]. Harvard University, 1992.
- [18] 李丽颖, 彭建春, 江辉, 等. 一种综合阻塞成本分摊与金融输电权的阻塞管理方法[J]. 继电器, 2005, 33 (3): 1-5.  
LI Li-ying, PENG Jian-chun, JIANG Hui, et al. A congestion management method integrating the allocation of congestion costs with financial transmission rights[J]. Relay, 2005, 33 (3): 1-5.
- [19] 李丽颖, 彭建春, 张喜铭. 一种改进型金融输电权与基金池相结合的阻塞风险规避方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 33 (3): 1-5.  
LI Li-ying, PENG Jian-chun, ZHANG Xi-ming. Method combining improved financial transmission rights with fund pool for hedging congestion risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 33 (3): 1-5.
- [20] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 239-283.
- [22] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 1-61.
- [23] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 104-122.

收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2010-08-23

作者简介:

艾东平 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dongping19810127@126.com

鲍海 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制;

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

(上接第6页 continued from page 6)

- [14] 周荣林, 刘明波. 协调电压控制问题的准稳态模型及其间接动态优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 6-13.  
ZHOU Rong-lin, LIU Ming-bo. Quasi-steady-state model of coordinated voltage control problem and its indirect dynamic optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 6-13.
- [15] 苗峰显, 郭志忠. 灵敏度方法在电力系统分析与控制中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(15): 72-76.  
MIAO Feng-xian, GUO Zhi-zhong. A survey of sensitivity technique and its application in power systems analysis and control[J]. Relay, 2007, 35(15): 72-76.
- [16] 林舜江, 刘明波, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.  
LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo, et al. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.

收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-07-09

作者简介:

刘水平 (1977-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: liushuiping2000@yahoo.com.cn

刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制;

谢敏 (1978-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统规划、运行与控制。