

主辅市场联合优化的模糊组合模型

杨光, 顾洁, 程浩忠

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Research on Fuzzy Combination Model for Joint Optimization of Primary and Ancillary Markets

YANG Guang, GU Jie, CHENG Haozhong

(School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: With the unceasing development and perfection of electric power deregulation, it is becoming research hot spot that how gencos can balance the relation between primary market and auxiliary service market and bid for in multi-market environment. A fuzzy combination model of joint optimization of genco's primary and auxiliary service market under multi-market condition is built, in which the factors such as costs, bidding price, capacity, revenue and risks are comprehensively taken into account, thus the original multi-objective programming is changed into single objective optimization problem. A certain actual system is used to verify the proposed model, and the verification results show that the proposed model is rational and available.

KEY WORDS: primary market; ancillary service market; joint optimization; fuzzy combination; bidding strategy; risk

摘要: 随着电力市场化的不断深入, 发电厂商如何在多市场条件下平衡主市场与辅助服务市场的关系进行投标已成为研究热点。建立了多市场条件下, 发电厂主辅市场联合优化的模糊组合模型, 综合考虑成本、报价、容量、收益和风险等因素, 将原来的多目标规划问题转化为单目标最优化问题。基于上述模型对某实际系统进行验证, 结果表明了该模型的合理性与实用性。

关键词: 主市场; 辅助服务市场; 联合优化; 模糊组合; 投标策略; 风险

0 引言

传统“发-输-供”捆绑式经营管理模式已无法适应各国电力工业发展新形势的需要, 自 20 世纪 80 年代起, 电力市场化改革工作在全球逐步开展。新的市场机制为发电厂提供了多种可供选择的市場, 既有利润较高、风险较高的市場, 又有利润较少、风险較低的市場。电能量主服务市場与辅助服务市場是电力市場的两大重要领域, 不少国家也在

主辅市場的构建运营方面开展了大量研究。我国部分电网也在电力监管部門的引导下, 在辅助服务的补偿和考核标准等方面开展了大量工作, 尝试进一步建立完善的辅助服务市場。随着辅助服务市場的逐渐完善, 对于发电厂而言, 除了可以在电能量主市場进行投标外, 还可以选择在辅助服务市場竞标, 以期获得更高的利润^[1-3]。

目前, 在发电厂根据市場规则制定投标策略以保障本企业的利润等研究领域, 国内外学者提出了多种不同的策略及模型, 主要有估计市場出清价方法、估计竞争对手行为的方法、基于博弈论的方法、计及风险的最优投标方法等^[4-5]。这些方法各有优劣, 其中估计市場出清价的方法需要大量历史数据进行复杂计算, 对电厂来说实用性不强; 估计竞争对手行为的方法往往利用正态分布函数描述竞争对手的投标行为, 将策略投标模型描述为随机优化问题, 并应用相关理论进行求解, 正态分布函数的形成以及理论上的严密性都有待进一步探讨; 基于博弈论的投标决策方法将发电商的竞争关系视为一个非完全信息的不合作博弈模型, 使用纳什均衡思想进行求解。这些方法对于市場竞争的考虑比较深入, 但对不确定事件(风险)的考虑不够, 不能很好地平衡投资收益与风险这对矛盾。目前大量文献中所描述的计及风险的投标决策方法往往考虑的市場结构过于单一, 不能很好地适用于电力市場主辅解捆的发展趋势^[6-9]。

考虑到在电力市場的运营及投标决策中, 既存在大量的不确定信息, 又蕴涵着风险与收益之间的矛盾, 本文运用模糊投资组合策略分析多市場条件下的发电厂投标问题, 综合考虑容量、成本、风险

和收益等因素,建立基于模糊组合优化理论的发电商主辅市场联合优化决策模型,将风险纳入目标函数中,以求得最优容量分配比例,同时综合平衡收益与风险,以较小的风险获得较大的投资收益。

1 模糊组合优化理论原理及其应用

1.1 模糊组合优化决策理论简介

Markowitz 于 1952 年提出了投资组合理论,为现代金融投资学的发展奠定了基础。在 Markowitz 均值-方差模型中,以方差为风险函数,在一定期望收益水平下求方差最小。模型中需要求出所有风险资产之间的协方差,这带来了计算上的困难。为此人们一直试图改进,其中比较著名的是 Sharpe 提出的资本资产定价模型。该模型把风险分为系统风险和非系统风险,把资产收益归结为系统风险补偿,建立了特殊的单指数模型,简化了模型的计算。

在以往诸多研究投资分析的模型中,往往以概率论方法来处理投资中的不确定性,却忽视了另一种不确定性,即模糊性。美国加利福尼亚大学自动控制专家 Zadeh 教授于 1965 年提出了模糊集理论,并于 1972 年提出了模糊决策理论和模糊规划理论,提供了一种研究模糊性问题的有效方法。该方法在各行业获得了广泛的应用^[10]。

在经典决策理论的数学模型中,约束条件是策略空间中的一个集合,而目标则通过效用函数从策略空间映射到另外某个空间,因此目标与约束的统一只能通过间接的方式来完成。但在模糊决策理论模式下,目标与约束是被定义在同一个策略空间的 2 个模糊子集,它们起相同的作用,使可以采用相对简便的方法把目标和约束联系在一起,既能实现目标,又能满足约束。

1.2 模糊组合优化决策的基本理论

1.2.1 模糊组合优化理论的基本概念

模糊组合决策模型是将决策理论与模糊数学基本理论及其方法有机结合后得到的一组综合优化模型,区别于以往的基于随机不确定性的均值方差模型、单指数模型、安全首要模型、多阶段投资组合模型等,它更适应于现实情况下面临的模糊不确定性情况^[11]。本文通过对电力市场中主辅市场联合优化问题特点进行分析,确定采用模糊组合优化理论进行主辅市场联合优化决策的建模与分析。

设 X 代表可能采用的全部策略集合^[10],模糊目标 G 为 X 上的一个模糊目标集合,其隶属函数 $U_G(x)$

反映了策略 x 相对于目标 G 所能达到的满意程度。模糊约束 C 为 X 上的一个模糊约束集合,其隶属函数 $U_C(x)$ 指出策略 x 符合约束条件的程度。模糊集对 D 为 G 和 C 的交集,即 $D=G \cap C, \forall x \in X, x$ 决策的隶属函数为

$$U_D(x) = \min[U_G(x), U_C(x)] \quad (1)$$

若有 n 个模糊目标和 m 个模糊约束,令 G_j 表示第 $j(j=1,2,\dots,n)$ 个目标, C_i 表示第 $i(i=1,2,\dots,m)$ 个约束。 G_j 和 C_i 都定义在策略空间 X 中,并具有相同的重要性,则模糊决策 D 将由全部目标和约束的交集构成,记为

$$D = (G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n) \cap (C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m) \quad (2)$$

$\forall x \in X, x$ 决策所具有的隶属函数对应可定义为

$$U_D(x) = \min[\min U_{G_n}(x), \min U_{C_n}(x)] \quad (3)$$

1.2.2 模糊组合优化理论的极大化原则

如果 $U_D(x)$ 在可能采用的全部策略集合 X 中有唯一最大值,若策略 x^* 对应的策略是唯一决策建议(极大化决策),则其隶属度^[11]为

$$U_D(x^*) = \max_{x \in X} \min[U_{G_1}(x), U_{G_2}(x), \dots, U_{G_n}(x), U_{C_1}(x), U_{C_2}(x), \dots, U_{C_m}(x)] \quad (4)$$

以上考虑的极小算子只考虑被综合对象的最差情形,这样的决策是悲观决策;反之,采用极大算子,决策则为乐观决策。为了反映出目标与目标、约束与约束以及目标与约束之间的相互作用,模糊决策分析中也常用乘积(交)或用代数和(并)来构建决策的隶属函数。

1.3 基于模糊决策理论的投标策略

考虑到发电商在进行投标决策时,一方面资源受限,如机组的可用容量,同时又必须计及市场风险的影响,因此本文把风险函数纳入到目标函数中,与收益函数进行组合优化,以使决策方案对不确定性的考虑更加充分和全面。

收益函数中同时包含了发电商在主市场与辅助服务市场(本文主要以 AGC 辅助服务为例)2 者的综合收益,优化结果能够为发电商提供如何统筹安排其在主辅市场资源的投放比例,以促使其收益的最大化,实现多市场的综合优化策略。

上述优化决策问题,本质上可视为不确定市场环境下的多市场优化决策问题,所以可以采纳模糊投资组合研究的相关成果,充分考虑不确定性(风险)的影响,更好地适应外部情况变化,如市场的供给、自然环境以及国家的政策导向等。

2 AGC 辅助服务成本分析

为了便于研究, 本文选取 AGC 辅助服务作为辅助服务市场的代表进行建模和分析。AGC 辅助服务对于提高系统运行的安全性和经济性都具有重要意义, 在构建包含 AGC 辅助服务和主市场综合投标决策时, 必须对 AGC 辅助服务成本等进行分析。目前来看, 电厂提供 AGC 辅助服务时, 其相关成本主要分为以下方面:

1) 设备成本。为了提供 AGC 服务, 发电商必需购置一系列设备, 其投资应包含在 AGC 服务成本中, 并能保证服务年限内回收投资, 可以按等年值法年分摊 AGC 的设备成本。

2) 机会成本。为跟踪负荷波动, AGC 机组某时段需预留调节容量, 因此会失去上调这部分容量参与主电力市场的机会, 导致发电商利润损失。该损失即为发电商提供 AGC 服务的机会成本。

3) 发电效率损失成本。电网中负荷是随机波动的, 参与 AGC 服务的机组一般不能在其最佳运行点运行, 还处于变工况状态, 机组的煤耗将高于稳定工况下的煤耗。进行 AGC 投标决策时, 发电效率的损失也应当予以考虑。

4) 运行成本。机组 AGC 的投入引起调节设备的非正常磨损和老化, 这增加了设备维护、检修和更换费用, 还可能造成机组的启停。其成本包括启停过程的燃料损失费、为运行和启停产生的维护成本、为运行和启停产生的设备使用寿命下降的损失。

联合决策时, 除了主市场的相关发电成本外, 还应计及上述 AGC 辅助服务的成本^[12]。

3 基于模糊组合优化理论的主市场与 AGC 辅助服务市场投标决策模型

3.1 主辅市场联合优化的收益和风险函数

由于发电机组的可用容量是有限的, 因此为了在多市场环境下获得尽可能大的市场收益, 发电商需根据综合市场环境及各市场的特点, 拟定联合优化投标策略。

本文建立模糊决策投标模型, 通过将模糊数学理论运用于发电厂的投标模型中, 充分考虑发电厂实际投标中的各种要素, 如市场电价、投标容量、风险估计、发电成本等, 平衡发电厂商在主市场和辅助市场上的投放容量, 对投标中的种种风险进行规避, 最终取得相对较大的收益。

假定主市场与辅助服市场完全解捆, 并且发电

商可以独立进行企业自身的投标决策, 其在主市场和 AGC 辅助服务市场上的成本函数、风险函数以及收益函数可以描述如下:

1) 主市场的发电成本可描述为 $C_z = aG_z^2 + bG_z + c$, 其中系数 a 、 b 、 c 随机组容量、特性等而定, 可通过最小二乘拟合的方式获得。

2) 主市场的收益可描述为 $Y_{zs} = \gamma(P_z G_z - C_z)$, 其中 P_z 为主市场报价, G_z 为发电厂在主市场上的投放容量, γ 为与电力市场总投放容量相关的模糊系数。

3) 辅助服务市场的收益可描述为 $Y_{fs} = P_f G_f - C_f$, 其中 P_f 为辅助服务市场报价, G_f 为辅助服务市场上的投放容量, C_f 为辅助服务成本。

4) 主市场的风险可描述为 $Y_{zf} = \alpha(G_z - G_{yz})^2$, 辅助服务市场可描述为 $Y_{ff} = \beta(G_f - G_{fy})^2$, 其中 G_{yz} 和 G_{fy} 分别为主市场与辅助服务市场的预测投放容量, α 与 β 体现发电厂商对于风险的偏好, 当其采取风险规避型策略时, α 与 β 取较小值, 相反则取较大值。

3.2 模型的非线性最优化实现

3.1 节中介绍的收益和风险函数中含有不确定系数, 投标决策中的市场负荷需求、可用机组情况、竞争对手状况等大量不确定信息都能影响它们的取值, 所以采用模糊理论对其处理后得到的模型才能更好地与实际情形相符。根据模糊决策理论^[10], 主市场收益函数的隶属函数可采用半梯形满意程度隶属函数(辅助服务市场收益函数对应的隶属函数表达形式与此类似), 具体描述如下:

$$Y_{zs}(x) = \begin{cases} 0, & Y_{zs} \leq Y_{z0} \\ \frac{Y_{zs} - Y_{z0}}{Y_{z1} - Y_{z0}}, & Y_{z0} \leq Y_{zs} \leq Y_{z1} \\ 1, & Y_{zs} > Y_{z1} \end{cases} \quad (5)$$

同理, 主市场风险函数的隶属函数(辅助服务市场风险函数对应的隶属函数表达形式与此类似)可以表示为

$$Y_{zf}(x) = \begin{cases} 1, & Y_{zf} \leq Y_{zf0} \\ \frac{Y_{zf0} - Y_{zf}}{Y_{zf1} - Y_{zf0}}, & Y_{zf0} \leq Y_{zf} \leq Y_{zf1} \\ 0, & Y_{zf} > Y_{zf1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Y_{z1} 和 Y_{z0} 代表了发电商对于收益与风险的充分满意期望; Y_{z0} 和 Y_{zf1} 代表了发电商对于收益与风险的必要满意期望, 它们可由专家打分或者根据过去经验确定。

按照 Bellman 和 Zadeh 的极大化原则，最佳决策的隶属度为

$$\lambda = \min[Y_{zs}(x), Y_{fs}(x), Y_{zf}(x), Y_{ff}(x)] \quad (7)$$

式(7)反映了发电厂商对这一决策的满意程度。

根据式(7)，最优化数学模型为

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \text{s.t.} \quad & Y_{zs}(x) \geq \lambda \\ & Y_{fs}(x) \geq \lambda \\ & Y_{zf}(x) \geq \lambda \\ & Y_{ff}(x) \geq \lambda \end{aligned}$$

主辅市场联合优化模型的目标函数为

$$\begin{aligned} J = & u(Y_{zs} + Y_{zf}) + (1-u)(Y_{fs} + Y_{ff}) = [uY_{zs} + (1-u)Y_{fs}] + \\ & [uY_{zf} + (1-u)Y_{ff}] = [\alpha(1-u) - u\gamma a]G_z^2 + \\ & \beta(1-u)G_f^2 + [u\gamma(P_z + b) - 2(1-u)\alpha G_{yz}]G_z + \\ & [uP_f - 2(1-u)\beta G_{yf}]G_f + u\gamma c + (1-u)\alpha G_{yz}^2 - \\ & uC_f + (1-u)\beta G_{yf}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)的约束条件为

$$\begin{cases} G_{z\min} \leq G_z \leq G_{z\max} \\ G_{f\min} \leq G_f \leq G_{f\max} \\ G_{\min} \leq G_z \leq G_{\max} - G_f \end{cases} \quad (9)$$

式(8)中： u 为投资者的风险偏好，根据不同发电商的风险承受能力以及对收益的期望度选取不同的值。运用模糊组合模型，最后的目标函数综合考虑了厂方的多市场收益与风险，将原来的多目标规划问题转化为单目标问题，简化了模型求解过程。

基于联合优化决策模型的相关问题求解流程如图 1 所示。

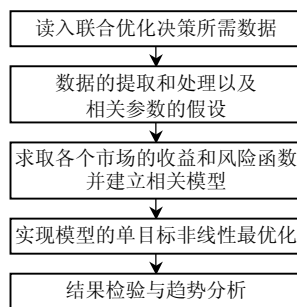


图 1 基于联合优化决策模型的相关问题求解流程

Fig. 1 Solution process of corelative problems based on joint optimization decision-making model

4 算例结果与分析

4.1 系统参数

对验证上述模型的正确性和有效性，本文基于该模型对某实际系统进行计算分析。以 2004—2005 年某市场的主辅市场数据为基础，本文对 2006 年 1 月该市场某发电商的主辅联合优化决策问

题进行计算分析。

该发电商的相关数据如表 1 所示。

由表 1 可知：

1) 电厂的总投放容量为 100 MW，主市场和辅助服务市场的预测投放容量 G_{yz} 和 G_{yf} 分别为 68.5 和 31.5 MW。

2) 根据历史数据，主市场电价 P_z 取 53.7 USD/(MW·h)，辅助服务市场电价 P_f 取 22.4 USD/(MW·h)。

3) 主市场发电成本 C_z 的系数 a 、 b 、 c 分别为 0.04、10、1800，辅助服务成本 C_f 可根据本文第 2 节计算得到。

4) u 取 0.7，风险系数 α 与 β 在本文的取值相等，其值为 2，即规避风险的决策倾向。当主市场的容量需求大于发电厂可能做出的投放容量时， γ 趋向于 1。

表 1 算例数据

Tab. 1 Example data

α	β	u	γ	a	b
2	2	0.7	1	0.04	10
c	P_z	P_f	G_{yz}	G_{yf}	—
1800	53.7	22.4	68.5	31.5	—

本文对多市场条件下发电厂商模糊组合投标模型进行分析，根据图 1，最终将问题转化为根据式(8)(9)求解关于 G_z 和 G_f 的非线性 2 次规划问题。计算得到的 G_z 和 G_f 分别为 64.7 和 35.3 MW，即为发电厂方的最优决策。与主市场和辅助服务市场的预测投放容量(68.5 和 31.5 MW)相比， G_z 和 G_f 误差较小，满足期望要求。

4.2 目标函数值随主市场报价的变化趋势

当电力主市场报价不断上升时，模型的目标函数数值呈现出图 2 所示的变化趋势。

由图 2 可知，随着报价的增加，模型中的目标函数值随之上升。这是由于整个模型中报价这一因素只对模型的收益部分产生影响，对模型的风险并没有任何影响，因而没有对主市场和辅助市场的最

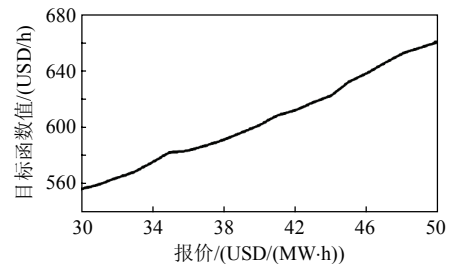


图 2 目标函数值随主市场报价的变化趋势

Fig. 2 The trend of the objective function value according to the market's price

终投放容量产生影响,单纯的投资收益增大会使整个目标函数值增大。

4.3 目标函数值随风险系数的变化趋势

对于模型来说,除了投资收益之外,最重要的参量就是发电厂商的风险偏好选择。在本文的模型中,关于模型风险的参量有 α 、 β 、 u 。由于 u 是关于主市场与辅助市场之间容量比例的风险参量,对于特定电厂,其值为定值。本文对 α 和 β 这2个风险参量变化时目标函数值的变化趋势进行分析,如图3所示。

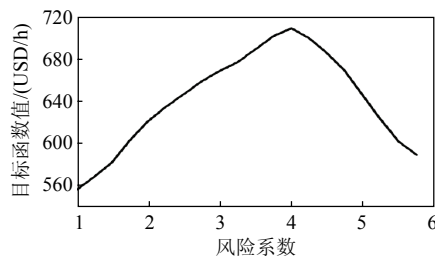


图3 目标函数值随风险系数的变化趋势
Fig. 3 The trend of the objective function value according to the risk factor

由图3可以看出,随着风险系数的增加,整个目标函数的最大值也不断变大,但当风险系数增大到一定值时,目标函数的最大值开始变小,并呈现明显的减小态势。分析可知:当风险系数增大时,即发电厂商对于收益的要求提高,初始阶段目标函数值增大时,适当增加风险可以使发电商的收益增大;但当风险系数过大时,由于其风险模糊隶属函数的关系,目标函数最大值不升反降,这也说明承受过大的风险并不能使发电厂商的实际收益更大。

4.4 主辅市场容量比随风险系数的变化趋势

除了目标函数值,发电厂在主市场和AGC辅助市场的容量投放比也是本文的主要研究对象。本文分析随着风险系数 α 和 β 的变化,发电厂在主市场和AGC辅助市场的容量投放比的变化趋势,如图4所示。

由图4可知,随着风险系数的增长,发电厂商

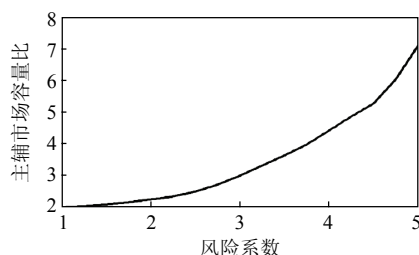


图4 主市场与AGC辅助市场容量比随风险系数的变化趋势

Fig. 4 The trend of the capacity ratio of primary and AGC market according to the risk factor

在主市场的容量投放比例呈现了快速增长的趋势,也就是说其愿意承受的风险越大,在主市场上投放的容量越大。由于按照本文给定的基础数据,发电商在主市场上投放的容量中标后得到的收益较大,而在辅助市场中得到的收益较小,所以如果基础数据发生变化,则得到的结果可能会有所不同。

由以上分析可以看出,风险系数的变化对于模型的优化计算结果影响显著,这也反映出发电商对于风险的不同承受能力在一定程度上左右了其在多市场条件下的投标策略。

5 结论

本文通过模糊组合优化理论,建立了多市场条件下发电厂的模糊组合决策模型,综合考虑了发电厂投标的发电成本、服务成本、市场报价、投放容量、策略收益、策略风险等重要因素,将原来的多目标规划问题转化为单目标最优化问题,简化了求解步骤和难度。

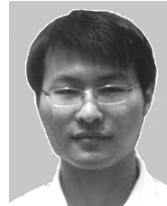
本文的主辅市场联合优化决策模型具有如下特点:1)兼顾了市场收益与风险,平衡决策出了发电商在主辅助市场上的最佳投放比例,验证了本文模型求取多目标函数最优解的可行性;2)描述了模型的目标函数和投标策略对于市场报价、风险系数等因素的变化趋势。

本文仅以AGC辅助服务的优化问题为代表,对主辅市场的联合优化进行了探讨,如何将模型拓展到更为普遍的 N 个市场的联合优化决策问题,还需要结合各辅助服务市场的具体特点进一步开展研究。

参考文献

- [1] Wen F S, David A K. Coordination of bidding strategies in energy and spinning reserve markets of competitive suppliers using a genetic algorithm[C]//2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, Washington, USA: IEEE, 2000.
- [2] Richter C W, Sheble G B. Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies of the competitive market place-power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 256-261.
- [3] Wen F S, David A K. Optimal bidding strategies of power suppliers and large consumers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2001, 23(1): 37-43.
- [4] 曾次玲, 张步涵. 浅析发电公司的竞价策略[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 49-53.
Zeng Ciling, Zhang Buhuan. A preliminary analysis on bidding strategy of power generation companies[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 49-53(in Chinese).
- [5] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 41-44.

- Gao Xin, Wang Xiuli, Lei Bing, et al. Research on bidding strategy for an independent power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 41-44(in Chinese).
- [6] 李春杰, 王鑫, 赵会茹, 等. 基于竞价成功概率的发电商报价策略的离散时间进化博弈模型[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 86-91.
- Li Chunjie, Wang Xin, Zhao Huiru, et al. A discrete time evolutionary game model of Gencos' bidding strategies based on the hit probability [J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 86-91(in Chinese).
- [7] 曾勇红, 王锡凡. 发电厂出力与报价均衡的随机博弈模型[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 7-10.
- Zeng Yonghong, Wang Xifan. Stochastic game model of active power bidding equilibrium of generation companies[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 7-10(in Chinese).
- [8] 潘虹, 陈奇志, 魏杰, 等. 基于博弈论的发电厂多代理报价系统[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 76-82.
- Pan Hong, Chen Qizhi, Wei Jie, et al. A power plant bidding system based on multi-agent and game theory[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 76-82(in Chinese).
- [9] 陶芬, 张步涵, 杨超. 考虑输电阻塞影响的发电商最优报价策略[J]. 电网技术, 2007, 31(16): 12-16.
- Tao Fen, Zhang Buhan, Yang Chao. Optimal bidding strategy of power generation company considering transmission congestion[J]. Power System Technology, 2007, 31(16): 12-16(in Chinese).
- [10] 贺仲雄. 模糊数学及其派生决策方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992: 1-30.
- [11] 房勇, 汪寿阳. 模糊投资组合优化: 理论与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 1-71.
- [12] 葛炬, 张粒子, 周小兵, 等. AGC机组参与电力市场辅助服务的探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 61-65.
- Ge Ju, Zhang Lizi, Zhou Xiaobing, et al. Discussion on AGC units participating ancillary services in electricity market[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 61-65(in Chinese).



杨光

收稿日期: 2010-07-12。

作者简介:

杨光(1983), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化规划与电力市场, E-mail: berserkyang@sjtu.edu.cn;

顾洁(1971), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统负荷预测、电力系统规划和电力市场技术支持及其监管;

程浩忠(1962), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与优化及电力市场、电能质量与电压稳定。

(责任编辑 杜宁)