

# 基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定

王 乐<sup>1</sup>, 余志伟<sup>2</sup>, 文福拴<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 香港理工大学 电机系, 中国香港特别行政区; 3. 华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

## A Chance-constrained Programming Approach to Determine Requirement of Optimal Spinning Reserve Capacity

WANG Le<sup>1</sup>, C.W. YU<sup>2</sup>, WEN Fu-shuan<sup>3</sup>(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China;  
3. College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** Under the premise of chance-constrained programming, when the consideration to reliability and economy of system operation should be given, how to consider the uncertainty factors such as the fault outage of generators and the error of load forecasting is researched so as to determine the optimal spinning reserve capacity that power system requires. Taking the purchase cost of minimized spinning reserve as objective as well as the secure requirement of power system as chance-constraint, a mathematical model to determine optimal spinning reserve capacity required by power system is constructed, and Monte Carlo simulation based genetic algorithm is adopted to solve the constructed model. Taking a power system containing 18 generating units for example the proposed model is illustrated.

**KEY WORDS:** electricity market; spinning reserve; chance-constrained programming; genetic algorithm; Monte Carlo simulation

**摘要:** 在机会约束规划的框架下, 研究了在兼顾系统运行的可靠性和经济性时, 如何考虑发电机组的故障停运和负荷预测误差等不确定性因素, 以便确定系统所需的最优旋转备用容量。在以最小化旋转备用的购买成本为目标、以系统的安全性要求为机会约束的条件下, 构造了确定系统所需的最优旋转备用容量的数学模型, 并采用基于蒙特卡洛仿真的遗传算法进行求解。最后以包含 18 台机组的电力系统为例对所提出的模型与方法进行了说明。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217905); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-04-0818); 香港政府研究资助局(RGC)资助项目(5215/03E)。

Project Supported by The National Basic Research Program(973 Program) (2004CB217905).

**关键词:** 电力市场; 旋转备用; 机会约束规划; 遗传算法; 蒙特卡洛仿真

## 0 引言

避免停电事故的发生是电力系统可靠性的最基本内涵。由于发电机组有可能发生意外故障, 且准确地预测负荷比较困难, 所以为了避免停电事故的发生, 需要维持一定的备用容量尤其是旋转备用容量。在传统的电力工业中, 发电、输电和配电环节都隶属于同一家电力公司, 备用容量的提供与调用是该公司内部事宜, 不会与他人的经济利益发生冲突, 原理上也比较简单。常用的确定系统所需备用容量的方法主要有: ①系统峰荷的固定比例(如 7%~10%); ②系统中的单机最大容量。这些方法非常简单, 在电力行业中也得到了广泛应用, 但从经济角度来讲一般不是最优的<sup>[1]</sup>。这些方法之所以能够长期得到应用, 除了简单和可靠之外, 还由于在传统的电力工业中政府或监管机构通常采用固定回报率方法对电力公司进行管制, 电力系统运营的经济性与电力公司的收益之间的关系并不密切, 因而经济性并没有受到充分重视。事实上, 这也是电力工业市场化改革的重要原因之一。

随着以厂网分离和发电侧产权多元化为主要特征的电力工业市场化改革的进行, 电力工业已分解为多个经济主体, 它们之间存在利益冲突, 因此传统的备用容量获取方法不再适用, 需要采用新的方法确定和获取备用容量, 以兼顾电力系统运行的可靠性、经济性以及市场主体之间的公平性。针对

电力市场环境下备用容量的确定和获取问题,学术界已做了较多的探索性的研究工作。文献[2]在计及系统运行约束的条件下,提出了根据系统实际运行情况调整运行备用要求,以便求出兼顾运行备用获取成本和系统可靠性水平的折衷方案。文献[3]在给定备用容量价格和失负荷成本的前提下,通过容量-可靠性之间的相关性分析确定最优运行备用容量及其价格,并以此为基础建立了一种监控市场势力有是否被滥用的机制。文献[4]以最大化系统的旋转备用效益为目标,提出了确定系统最佳开机台数和旋转备用容量在机组间的分配方法,其中旋转备用的效益通过电能不足期望值(expected energy not supplied, EENS)进行评估。文献[5]提出了一种基于保险理论的分散式备用容量获取方法,允许供电公司或大用户自己确定所需备用容量并从备用容量供应商(发电公司)直接购买,即通过采用具有奖惩机制的保险合同将停运损失转嫁给保险商从而诱导出最优备用容量,这是一种很有意义的探索。文献[6]讨论了机组故障、负荷变化和输电线路故障3种不确定性因素对备用需求的影响,指出了系统参与者所应承担的备用责任,并从各机组对系统运行风险的影响角度研究了如何在机组之间分配备用责任。文献[7]对电力需求价格弹性、系统可靠性、备用成本等因素与系统最优备用水平的关系进行了研究。文献[8]提出了综合考虑发电系统可靠性和旋转备用效益的机组最优组合模型和方法。文献[9]针对电力市场环境下的电网公司运营效益最大化问题,试图在备用容量费用和切负荷赔偿费用方面取得平衡,并在此基础上确定所需的最优事故备用容量。

尽管国内外针对电力市场环境下如何确定和获取系统所需备用容量问题已经做了较多研究,但到目前为止并不存在广泛认同的方法。在目前国际上实际运营的辅助服务市场中,备用容量需求的确定基本上沿用传统的思路,但在不同的电力市场所采用的具体方法不同<sup>[10]</sup>。例如 PJM(Pennsylvania-Jersey-Maryland)电力市场的备用容量需求就是以传统方法为基础,综合考虑负荷的历史数据(包括系统峰荷、负荷预测误差等)、机组数据(包括机组平均容量成本、机组强迫停运率等)以及区域间交易等因素,由调度员根据经验而确定。在获取备用容量方面,国际上目前实际运营的电力市场采用了多种不同的方法,在实践中逐步发现了这些方法所存在的问题,如美国加州电力市场曾采用顺序报价方

法,即发电公司针对不同质量的备用容量分别报价,独立系统调度机构(independent system operator, ISO)按照备用容量的质量由高到低依次获取。这种方法看似合理,但在实际运营中却出现了严重的“价格背离”问题<sup>[11]</sup>,即质量低的备用容量的价格常常高于质量高的备用容量的价格。美国新英格兰电力市场也出现过类似问题。为解决该问题,加州电力市场采用了“理性买卖算法”<sup>[12]</sup>。该算法的基本思想是针对系统对多种质量不同的备用容量的需求和低质量的备用容量能够被高质量的备用容量所替代等特点,在满足系统总的备用要求的情况下,寻找最小化其获取成本的方案。新英格兰根据该算法对其备用容量市场进行了改革。美国纽约电力市场中的备用容量市场一度出现发电公司严重滥用市场势力的问题,该问题直接导致了备用容量市场在2000年3月27日暂停运营,此后不久美国纽约电力市场对备用容量市场进行了改革。可见,国际上实际运营的电力市场在获取备用容量方面仍处于试验和摸索阶段,普遍认为应采用市场竞争的方法,即由发电公司申报可以提供的备用容量和相应价格,由市场运营机构(如ISO)按既定规约或规则获取备用容量。然而,在该方法具体实现方面仍存在很大争议。

由于备用容量主要用于解决发电机组随机强迫停运和负荷预测误差所引起的供电不足问题,而该问题具有随机特性,所以如何在兼顾系统运行的可靠性和经济性并计及发电机组的故障停运和负荷预测误差不确定性的情况下,确定系统所需的最优旋转备用容量仍是一个有待研究的重要问题。在此背景下,为确定系统中所需的最优旋转备用容量,本文建立了电力市场环境下计及发电机组强迫停运和负荷预测误差等不确定性因素,以最小化备用容量的获取成本为目标,以满足期望的可靠性水平为约束条件的模型,并采用近年来受到普遍关注的机会约束规划方法对其进行求解,该方法可以适当地描述和处理在备用容量的获取成本和系统可靠性要求之间的平衡。需要指出的是,虽然本文的研究工作是针对旋转备用的,但所构造的方法框架同样适用于解决其它类型备用容量的获取问题。

## 1 电力市场模式

下面针对国际上实际运营的电力市场所普遍采用的日前市场进行研究,且以1小时作为1个交易时段。假设日前电能市场与旋转备用市场独立运

作, 依次获取, 且都采用统一市场清算价格结算。机组组合由发电公司在报价时统筹考虑, 电力市场运营机构或 ISO 所采用的市场交易算法中不包括机组组合优化, 这与美国加州电力市场模式相同。发电公司首先在日前电能市场报价, 电力市场运营机构或 ISO 以此为基础确定列入调度计划的发电机组及其出力和各交易时段的市场清算电价。这样, 在电能市场中被调度发电但没有满负荷出力的发电机组的剩余容量以及水电机组都可以参加旋转备用市场, 但本文中只考虑火电机组。此外, 本文不考虑发电公司在电力市场中行使市场势力的情况, 即假设发电公司按边际成本报价。

假设旋转备用市场的报价包括 2 部分, 即备用容量报价和备用能量报价。旋转备用容量的选取按照容量报价从低到高进行, 并将最后被选中的容量段报价作为统一的容量清算价格。在系统实际运行时, 如果需要提供备用容量的发电机组提供出力, 则按这些机组的能量报价从低到高依次调用, 并按最后被选中的能量段报价作为统一的能量清算价格。

假定发电机组  $i$  的生产成本函数为  $C_i(q_i(t)) = a_i q_i^2(t) + b_i q_i(t) + c_i$ , 则可得其在日前电能市场的报价函数为

$$\begin{cases} P_{e,i}(q_i(t)) = 2a_i q_i(t) + b_i \\ q_i(t) \leq q_i(t) \leq \bar{q}_i(t) \\ i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N$  为系统内所有参与电能市场报价的机组数目;  $T=24$  为所研究的时段总数;  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  分别为生产成本函数系数;  $q_i(t)$  为机组  $i$  在时段  $t$  的出力;  $P_{e,i}(q_i(t))$  为机组  $i$  出力为  $q_i(t)$  时在时段  $t$  内的报价;  $\bar{q}_i(t)$  和  $q_i(t)$  分别为机组  $i$  在时段  $t$  的最大和最小申报出力。

电力市场运营机构或 ISO 根据上述发电公司的电能报价和各交易时段的负荷预测结果, 并计及由下式所表示的系统功率平衡约束, 可以得到日前电能市场中时段  $t$  的市场清算价格  $P_e(t)$  和发电机组  $i$  在时段  $t$  被选中的发电出力

$$\sum_{i=1}^N q_i'(t) = \bar{D}(t) \quad (t=1, 2, \dots, T)$$

式中  $\bar{D}(t)$  为已知的预测时段  $t$  的负荷。假设发电机组  $i$  在旋转备用市场的容量报价函数为

$$\begin{cases} P_{r,i}(r_i(t)) = m_i r_i(t) + n_i \quad (i=1, 2, \dots, N'; \quad t=1, 2, \dots, T) \\ 0 \leq r_i(t) \leq \min[\bar{r}_i, \bar{q}_i(t) - q_i'(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N'$  为参与旋转备用市场报价的发电机组的

数目;  $m_i$  和  $n_i$  分别为报价系数;  $r_i(t)$  为备用容量水平;  $P_{r,i}(r_i(t))$  为备用容量水平为  $r_i(t)$  时机组  $i$  在时段  $t$  内的报价;  $\bar{r}_i$  为发电机组  $i$  能够提供的旋转备用容量上限;  $\bar{q}_i(t) - q_i'(t)$  为发电机组  $i$  在日前电能市场的时段  $t$  中提供出力  $q_i'(t)$  之后的剩余容量。

与能量市场类似, 电力市场运营机构或 ISO 根据上述发电公司的旋转备用容量报价和各交易时段系统所需要的总的旋转备用容量  $D_r(t)$ , 计及由下式所表示的总的旋转备用容量约束, 可以得到时段  $t$  的旋转备用容量市场清算价格  $P_r(t)$  和发电机组  $i$  在时段  $t$  被选中的旋转备用容量  $r_i'(t)$ , 且存在

$$\sum_{i=1}^{N'} r_i'(t) = D_r(t) \quad (t=1, 2, \dots, T)$$

式中  $D_r(t)$  与发电机组的强迫停运率、负荷预测误差等因素有关, 是一个有待确定的量。假设发电机组  $i$  在旋转备用市场的能量报价函数为

$$\begin{cases} P_{re,i}(R_i(t)) = q_i(t)R_i(t) + b_i(t) \\ 0 \leq R_i(t) \leq r_i'(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $q_i(t)$  和  $b_i(t)$  为报价系数;  $P_{re,i}(R_i(t))$  为当机组  $i$  在时段  $t$  内实际被调用的发电出力为  $R_i(t)$  时的能量报价;  $R_i(t) \leq r_i'(t)$  表示发电机组申报的有功出力不能超出其被选中的旋转备用容量。

电力市场运营机构或 ISO 根据上述的发电公司在旋转备用市场的电能报价和各交易时段实际被调用的总的发电出力  $D_{re}(t)$  并计及由下式所表示的总的发电出力约束, 可得到时段  $t$  内旋转备用市场的电能清算价格  $P_{re}(t)$  和发电机组  $i$  在时段  $t$  实际被调度的发电出力  $R_i'(t)$ , 且存在

$$D_{re}(t) = \sum_{i=1}^{N'} R_i'(t)$$

如果旋转备用容量是由在电能市场中被调度发电但没有满负荷出力的发电机组的剩余容量构成, 且旋转备用市场的能量中的一部分是完全竞争时, 则可根据发电机组的生产成本及其在电能市场被调度的出力来确定报价系数

$$q_i(t) = a_i$$

$$b_i(t) = b_i + 2a_i q_i'(t)$$

需要指出的是, 日前电能市场中各时段的负荷  $\bar{D}(t)$  可由负荷预测得到。然而, 在旋转备用市场中, 所需获取的旋转备用容量  $D_r(t)$  和系统在运行时被实际调度的  $D_{re}(t)$  需要基于发电机组的强迫停运率和负荷预测误差等因素来确定(估计), 这是一个随机优化问题。

## 2 基于机会约束规划的备用容量获取模型

发电机组故障停运为随机事件, 负荷预测误差适于用随机变量来描述, 如何确定在满足安全约束的条件下使总的购买成本最低的最优旋转备用容量  $D_r(t)$  也是一个随机优化问题。要满足所有可能发生的情况下的系统安全性要求, 所需获取的旋转备用容量会相当大, 相应地成本会非常高。事实上某些极端情况发生的概率非常低, 这样, 就需要在安全性和经济性之间进行权衡。机会约束规划方法主要用于处理约束条件中包含随机变量且必须在观测到随机变量实现之前做出决策的问题<sup>[13]</sup>, 因此很适合解决上述随机优化问题。

在机会约束规划的框架下, 以最小化旋转备用容量获取成本和旋转备用容量中被实际调用的能量成本之和为目标, 允许所获取的备用容量在某些极端条件下不能满足系统备用容量要求约束, 但该约束被满足的概率需大于给定的置信度水平。日前电能市场和旋转备用市场是独立且按顺序清除的, 这样在用下述方法确定最优旋转备用容量之前, 日前电能市场的调度结果以及每台机组可以参与旋转备用市场的容量是已知的。

已知时段  $t$  的预测负荷为  $\bar{D}(t)$ , 则实际负荷  $D(t)$  可以表示为  $\bar{D}(t)$  和  $\Delta D(t)$  之和,  $\Delta D(t)$  为服从均值为 0、方差为  $s^2$  的正态分布的随机变量, 即

$$\begin{cases} D(t) = \bar{D}(t) + \Delta D(t) \\ \Delta D(t) \sim N(0, s^2) \end{cases} \quad (4)$$

在机会约束规划的框架下, 在满足安全约束的条件下, 确定以总的购买成本最小化为目标的最优旋转备用容量的数学模型为

$$\min E(D_r(t)) = \sum_{t=1}^T [P_r(t)D_r(t) + P_{re}(t)D_{re}(t)] \quad (5)$$

$$\text{s.t. } P \left[ \sum_{i=1}^N q'_i(t)d_i(t) + \sum_{i=1}^{N'} r'_i(t)d_i(t) \geq D(t) \right] \geq a \quad (6)$$

在式(5)中, 等式右边第 1 项表示旋转备用容量的获取成本, 第 2 项表示在系统实际运行时被调用的旋转备用容量的成本。在式(6)中,  $d_i(t)$  为发电机组  $i$  的状态变量, 它根据发电机组  $i$  在日前电能市场的时段  $t$  被调度的情况及其强迫停运率  $g_i$  来确定。如果发电机组  $i$  在日前电能市场的时段  $t$  没有被调度, 则  $d_i(t)=0$ ; 如果发电机组  $i$  在日前电能市场的时段  $t$  被调度, 则在确定  $d_i(t)$  时需要计及该机组的强迫停运率, 这可以通过 Monte-Carlo 随机模拟方法来

确定, 具体过程为: 随机产生一个  $[0,1]$  内均匀分布的伪随机数  $x_i$ , 若  $x_i \leq g_i$ , 则置  $d_i(t)=0$ , 即认为该机组在时段  $t$  故障停机; 否则置  $d_i(t)=1$ , 即该机组正常运行。在式(6)中, 不等式的左侧表示在计及发电机组的强迫停运率和负荷预测误差的情况下, 实际在线运行的发电机组的总出力与实际可调用的旋转备用总容量之和大于实际负荷的概率, 即所获取的备用容量满足系统安全运行要求的概率。不等式右侧的  $a$  为给定的、需要满足系统备用容量要求的置信度水平。从物理意义上讲, 可以把  $1-a$  粗略地看作日前电能市场的失负荷概率 (loss of load probability, LOLP) 所能允许的上限值。

发电机组  $i$  在时段  $t$  被选中的旋转备用容量中实际被调度的发电出力  $R'_i(t)$  应满足:

$$\text{当 } \sum_{i=1}^N q'_i(t)d_i(t) + \sum_{i=1}^{N'} r'_i(t)d_i(t) \geq D(t) \text{ 时, 有}$$

$$\sum_{i=1}^N q'_i(t)d_i(t) + \sum_{i=1}^{N'} R'_i(t)d_i(t) = D(t) \quad (7)$$

$$\text{当 } \sum_{i=1}^N q'_i(t)d_i(t) + \sum_{i=1}^{N'} r'_i(t)d_i(t) < D(t) \text{ 时, 有}$$

$$R'_i(t) = r'_i(t)d_i(t) \quad (8)$$

式(7)表示当系统中实际在线运行的发电机组的总出力与实际可调用的旋转备用总容量之和大于实际负荷时, 系统所获取的旋转备用容量满足系统运行要求, 此时  $R'_i(t)$  可以按照实际需求通过计算得到。式(8)表示当系统中实际在线运行的发电机组的总出力与实际可调用的旋转备用总容量之和小于实际负荷, 即系统获取的旋转备用容量不足时, 旋转备用容量中实际被调度的发电出力  $R'_i(t)$  就等于发电机组  $i$  在时段  $t$  中被选中的旋转备用容量。因为  $d_i(t)$  的状态是由 Monte-Carlo 随机模拟方法确定的, 所以  $R'_i(t)$  的状态也需要根据式(7)或式(8)采用同样方法来确定。

## 3 备用容量获取模型的求解方法

求解机会约束规划问题的最有效方法是将其转化为确定性等价保留来求解, 但这种方法只适用于一些特殊问题。对于由式(5)和式(6)所表示的机会约束规划问题则无法找到其确定性等价类, 因此只能采用其它方法来解决, 基于随机模拟的遗传算法为解决此类问题提供了一般的途径<sup>[13]</sup>。在由式(5)和式(6)所表示的机会约束规划问题中, 优化变量为  $D_r(t)$ 。此处采用的基于随机模拟的遗传算法求解过程与文献[14-15]中给出的方法类似, 因此不再详细

介绍。下面只介绍由式(6)表示的对于由遗传算法产生的一组  $D_r(t)$  ( $t=1,2,\dots,T$ ) 的机会约束校验过程。

(1) 置交易时段计数器  $t=0$ ，机会约束成立计数器，置  $T'=0$ 。

(2) 产生服从正态分布  $N(0,s^2)$  的随机数  $\Delta D(t)$ ，可得到时段  $t$  的实际负荷  $D(t)=\bar{D}(t)+\Delta D(t)$ 。

(3) 对于所有在日前能量市场被调度的机组，在  $[0,1]$  内产生均匀分布的伪随机数  $x_i$ 。若  $x_i \leq g_i$  则置  $d_i(t)=0$ ，即认为该机组在时段  $t$  停机；否则置  $d_i(t)=1$ ，即认为该机组在线运行。

(4) 如果  $\sum_{i=1}^N q_i'(t)d_i(t) + \sum_{i=1}^{N'} r_i'(t)d_i(t) \geq D(t)$ ，则置  $T'=T'+1$ 。

(5) 置  $t=t+1$ 。

(6) 如果  $t < T$ ，转步骤(2)，否则转步骤(7)。

(7) 如果  $T'/T \geq a$ ，则满足式(6)所表示的机会约束，否则即为不满足。

### 4 算例

下面以 1 个包含 18 台机组的电力系统为例说明本文所提出的方法。机组类型和相关数据如表 1 所示，所研究的某天 24h 的负荷预测数据列于表 2，此处不考虑发电公司行使市场势力的情况。假定燃油机组燃料成本为 6USD/Mbtu，燃煤机组燃料成本为 4USD/Mbtu。在日前电能市场中各机组的报价为其边际运行成本，据此可得在日前电能市场中各机组被调度的发电出力，如表 3 所示。此外，表 3 中还给出了各机组可参与旋转备用容量市场的发电剩余容量。假设各机组在旋转备用市场的容量报价系数如表 4 所示。

表 1 机组数据  
Tab. 1 Units' data

机组序号	额定容量/ MW	$a_i$	$b_i$	$\bar{r}_i$ (MW/min)	强迫 停运率
1-2 (燃油机组)	20	0.501 3	-5.551 8	2	0.10
3-7 (燃煤机组)	76	0.123 8	31.604 0	2	0.02
8-12 (燃油机组)	100	0.063 5	33.062 0	7	0.04
13-17 (燃煤机组)	155	0.018 8	30.778 0	3	0.04
18 (燃煤机组)	350	0.012 2	30.080 0	4	0.08

表 2 预测负荷  
Tab. 2 Forecasted loads

时段	负荷/MW	时段	负荷/MW	时段	负荷/MW
1	960	9	1305	17	1440
2	900	10	1425	18	1440
3	870	11	1485	19	1395
4	840	12	1500	20	1380
5	840	13	1485	21	1380
6	870	14	1500	22	1395
7	960	15	1500	23	1305
8	1140	16	1455	24	1080

表 3 日前电能市场的调度结果和可参与旋转备用容量市场的机组剩余容量

Tab. 3 Generation dispatch in day-ahead energy market and available capacities for spinning reserve market

机组 时段	1~2		3~7		8~12		13~17		18	
	选中 容量 /MW	剩余 容量 /MW	选中 容量 /MW	剩余 容量 /MW	选中 容量 /MW	剩余 容量 /MW	选中 容量 /MW	剩余 容量 /MW	选中 容量 /MW	剩余 容量 /MW
1	20	0	19	57	49	51	66	89	253	98
2	20	0	18	58	47	53	59	96	243	107
3	20	0	17	59	46	54	56	99	238	113
4	20	0	17	59	45	55	52	103	232	118
5	20	0	17	59	45	55	52	103	232	118
6	20	0	17	59	46	54	56	99	238	113
7	20	0	19	57	49	51	66	89	253	98
8	20	0	22	54	55	45	86	69	285	66
9	20	0	25	51	60	40	105	50	314	36
10	20	0	27	49	64	36	119	36	335	15
11	20	0	28	48	67	34	126	29	345	5
12	20	0	28	48	67	33	127	28	348	3
13	20	0	28	48	67	34	126	29	345	5
14	20	0	28	48	67	33	127	28	348	3
15	20	0	28	48	67	33	127	28	348	3
16	20	0	27	49	65	35	122	33	341	10
17	20	0	27	49	65	35	121	35	338	13
18	20	0	27	49	65	35	121	35	338	13
19	20	0	26	50	63	37	115	40	330	21
20	20	0	26	50	63	37	114	41	327	23
21	20	0	26	50	63	37	114	41	327	23
22	20	0	26	50	63	37	115	40	330	21
23	20	0	25	51	60	40	105	50	313	37
24	20	0	21	55	53	47	80	76	274	76

表 4 旋转备用市场容量报价系数

Tab. 4 Bidding coefficients of capacities in spinning reserve market

机组序号	$m_i$	$n_i$
1-2	0.4	2.0
3-7	0.2	1.0
8-12	0.5	2.0
13-17	0.3	1.5
18	0.4	1.6

对置信度取多种不同水平的情况进行计算的结果见表 5，表中给出了当置信度为 0.95 时各时段的旋转备用获取数量。表 6 中列出了置信度取 0.80、0.85、0.90、0.95 和 1.00 时的旋转备用获取成本(包括旋转备用容量获取成本和调用的能量成本)，以及对应于最优旋转备用获取容量的实际  $a$  值。

表 5 置信度为 0.95 时旋转备用的获取容量

Tab. 5 Spinning reserve capacity procured when  $a=0.95$

时段	旋转备用获取 容量/MW	时段	旋转备用获取 容量/MW	时段	旋转备用获取 容量/MW
1	252.2	9	314.8	17	335.7
2	252.2	10	327.0	18	342.6
3	197.1	11	311.0	19	332.8
4	221.0	12	341.1	20	341.1
5	237.4	13	332.8	21	327.0
6	246.3	14	341.1	22	327.0
7	255.0	15	335.9	23	317.5
8	274.0	16	345.2	24	295.7

表6 在不同的置信度水平下系统旋转备用的获取成本  
Tab. 6 Comparisons of spinning reserve procurement costs under different  $\alpha$ 's

给定的 $\alpha$ 值	旋转备用获取成本	实际的 $\alpha$ 值
0.80	6 759.3	0.833 3
0.85	8 034.7	0.875 0
0.90	9 478.5	0.916 7
0.95	11 021.4	0.958 3
1.00	14 117.8	1.000 0

由表6可以看出,随着给定的置信度水平的提高,旋转备用的获取成本逐渐增大。系统运行人员可以在系统可靠性水平和旋转备用获取成本之间进行平衡,以选取适当的置信度水平。

## 5 结语

本文提出了将机会约束规划方法应用于旋转备用容量的确定并建立了相应的数学模型,同时给出了基于随机模拟遗传算法的求解方法。在市场环境下存在的各种不确定因素都可以通过本文提出的方法得到灵活处理,各种约束也可以在给定的置信度水平下通过概率方法得到校验,且基于遗传算法的求解方法可以很好地获得全局最优解。需要指出的是,虽然本文的描述是针对日前能量市场中完全竞争的情况进行的,但所构造的模型和方法完全适用于分析一般的市场情形。在确定旋转备用容量时,如何计及输电线路约束和输电线路随机故障将是下一步的研究重点。

## 参考文献

- [1] Wang J X, Wang X F, Wu Y. Operating reserve model in power market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 223-229.
- [2] Tseng C L, Oren S S, Svoboda A, et al. Price-based adaptive spinning reserve requirements in power system scheduling[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(2): 137-145.
- [3] Yu C W, Zhao X S, Wen F S, et al. Pricing and procurement of operating reserves in competitive pool-based electricity markets [J]. Journal of Electric Power Systems Research, 2005, 73(1): 37-43.
- [4] 张国全, 王秀丽, 王锡凡. 电力市场中旋转备用的效益和成本分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 14-18.  
Zhang Guoquan, Wang Xiuli, Wang Xifan. Study on benefits and costs of spinning reserve capacity in power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 14-18(in Chinese).
- [5] Chan C Y, Chan T K, Ni Y X, et al. A decentralized approach for operating reserve procurement[C]. Proceeding of 6th International Conference on APSCOM, Hong Kong, 2003.
- [6] 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34.

- Meng Xiangxing, Han Xueshan. Discussion on reserve caused by uncertainty factors[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34(in Chinese).
- [7] 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 电力备用市场化运营需求研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 46-50.  
He Yongxiu, Huang Wenjie, Tan Zhongfu, et al. A study on demand of electricity reserve market in marketing operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 46-50(in Chinese).
  - [8] 杨榕俊, 丁明, 孙昕. 电力市场下综合考虑系统可靠性和旋转备用效益的机组组合[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 13-18.  
Yang Zijun, Ding Ming, Sun Xin. Unit commitment problem under the condition of electricity market considering system reliability and benefit from spinning reserve[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 13-18(in Chinese).
  - [9] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量[J]. 中国电机工程学报, 2004, 22(11): 54-58.  
Tan Lunnong, Zhang Baohui. Reserve capacity for accident in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 22(11): 54-58(in Chinese).
  - [10] 焦连伟, 文福拴, 祁达才, 等. 电力市场中辅助服务的获取与定价[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 1-6.  
Jiao Lianwei, Wen Fushuan, Qi Dacai, et al. Procurement and pricing of ancillary services in electricity markets[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 1-6(in Chinese).
  - [11] Oren S S. Design of ancillary service markets[C]. Proceedings of the 34th IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2001.
  - [12] Liu Y, Alaywan Z, Liu S, et al. A rational buyer's algorithm used for ancillary service procurement[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000.
  - [13] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
  - [14] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27.  
Yang Ning, Wen Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27(in Chinese).
  - [15] 马新顺, 文福拴, 刘建新. 构造发电公司最优报价策略的机会约束规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 35-39.  
Ma Xinsun, Wen Fushuan, Liu Jianxin. A chance constrained programming based approach for building optimal bidding strategies for generation companies with risk management[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 35-39(in Chinese).

收稿日期: 2006-07-07.

作者简介:

王乐(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场及电力系统信息化, Email: cnforget@hotmail.com;

余志伟(1952—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力市场、电价、电力经济和继电保护;

文福拴(1965—), 男, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力市场及电力系统故障诊断与系统恢复方面的研究工作。

(编辑 王金芝)