

基于动态仿真和云模型的发电竞争参数设计研究

曾鸣, 甘德一, 崔拓伟, 田廓

(华北电力大学工商管理学院, 北京 102206)

摘要: 针对不确定性环境下的发电竞争市场参数设计问题, 提出采用云模型拓展和描述市场需求长期增长率的模糊性, 并基于发电容量动态仿真原理, 对于需求增长率云模型中的各个云滴进行发电容量增长趋势模拟仿真, 然后从可靠性和经济性的角度采用不同指标对仿真结果进行云模型展示和分析。算例表明该方法可以在不确定性环境下, 充分考虑各种市场情形的影响作用, 对发电竞争参数设计的若干备择方案进行对比分析, 并为市场参数设计提供参考。

关键词: 动态仿真; 云模型; 能量价格上限; 容量价格

Research on parameter design of competitive generation markets based on dynamic simulation and cloud model

ZENG Ming, GAN De-yi, CUI Tuo-wei, TIAN Kuo

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Parameters of a competitive generation market are designed under uncertainties. This paper uses the cloud model to expand and describe the fuzziness of the long term growth rate of market demand. Based on the dynamic simulation of generation investment, the generation capacity development is simulated according to each drop of the demand growth cloud, and the simulation result is displayed and analyzed from views of reliability and economy. Case study shows that such method takes various market scenarios under uncertainties into consideration to contrast and analyze alternative parameter settings of market competition, and it can provide references for market parameter design.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.70671041).

Key words: dynamic simulation; cloud model; energy price cap; capacity price

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0007-05

0 引言

在发电竞争市场中, 设置能量价格上限的目的是为了抑制发电商的市场力, 控制价格的波动范围, 保护用户的利益。但是, 价格上限对价格信号的扭曲作用也会在一定程度上抑制其对发电容量投资的合理激励, 因而可能导致发电容量投资不足。对此, 就需要采取适当的容量机制等其他措施来弥补价格上限在实际应用中的局限性。目前, 常见的容量机制主要包括容量费用、容量要求、容量订购等机制, 其中, 容量费用机制由于其较好的操作性和适应性而倍受关注^[1-3]。但是, 对于容量费用机制中的核心问题——容量价格的确定方法, 以及在容量费用机制下如何设置发电竞争市场中的能量价格上限等问题, 却仍然存在着广泛的争议^[4,5]。因此, 就有必要在长期发展变化的环境下, 充分考虑市场需求增长

的不确定性因素, 分析研究发电竞争的能量价格上限和容量价格等参数设计对于引导发电投资和促进市场发展的影响作用。

在针对电力市场的仿真问题中, 考虑到当前的电力工业改革仍在试探中前进, 在电力市场竞争尚未完全放开的背景下, 市场的供需两侧具有清晰明确的相互作用关系, 因而可以在参考系统动力学理论的基础上, 适当简化主体之间过细的作用环节和联系, 通过动态模拟的方法进行研究^[6-8]。进一步, 对于未来市场需求增长率等指标的不确定性, 可以将其作为模糊数来处理^[9,10]。但是, 模糊数的隶属函数一旦表达成精确数值, 则在概念定义、不确定性推理等过程中就不再具有模糊性。对此, 文献[11]在传统模糊理论和概率统计基础上提出了用于定性定量转换的云模型, 把模糊性和随机性有机结合起来, 实现了定性概念与其定量表示之间的不确定性转换。本文采用动态仿真模型研究发电竞争中的能

量价格上限和容量价格，并通过云模型描述电力需求长期增长中的不确定性对于市场模拟的影响作用，在现有研究成果中尚无前例。

1 发电投资动态仿真的原理

模型仿真大体上可以分为动态推演环节和动态决策环节。其中，动态推演主要是指根据当年现有各方面情况，例如投建项目、在建项目、装机容量、负荷需求等变量，随着时间的发展演变得到未来所发生的相应变化；动态决策则主要是指根据现有决策信息，例如负荷持续曲线、装机容量、市场价格、负荷预测、在建项目等，做出当年发电项目投建决策的过程。

1.1 仿真模型的动态推演

发电投资的动态仿真是以年为时间单位连续滚动运行。其中，负荷需求的增长、发电容量的投建等变量都是以年计算，而负荷持续曲线、年发电量、机组收益和购电费用等是以小时计算。模型假设发电项目建设周期为5年，第 n 年系统负荷持续曲线 $D_n(t)$ 的年增长率为 r ，因而在当年的发电投建决策中需要考虑到系统在5年后的负荷持续曲线 $D_{n+5}(t)$ ，即

$$D_{n+5}(t) = D_n(t) \cdot (1+r)^5 \quad (1)$$

当年投建的发电项目将在5年后建成投产。假设系统内第 n 年投建的发电容量为 $I_{Final,n}$ ，第 $n+4$ 年的发电装机容量为 S_{n+4} ，有

$$S_{n+5} = S_{n+4} + I_{Final,n} \quad (2)$$

为了考察发电容量承受冲击的能力，模型假设投资者从第1年起开始决策，但是在第1年至第4年之间每年的建成发电容量都略低于负荷需求的增长，从而对发电容量形成冲击。对于不同的能量价格上限和容量价格，同样的冲击会导致不同的仿真结果，从而反映出能量价格上限和容量价格等关键参数设置方案下的发电容量承受并化解冲击的能力。

1.2 仿真模型的动态决策

模型中假设存在三种不同的电源类型，分别代表峰荷、腰荷和基荷机组。不同类型机组具有不同的年单位容量固定成本 $C_{f,unit}$ 和单位电量变动成本 $C_{v,unit}$ ，因而在发电竞争中具有不同的总收益 $R_{Total,unit,n}$ ，从而产生不同的价格因子 $P_{Factor,unit,n}$ ，即市场价格对于投资决策的影响程度。根据经济调度的原则和负荷持续曲线，可以得到各类机组的年运行小时数 $t_{Oper,unit,n}$ 。由于电力系统中的负荷需求可以近似视为刚性，因此市场价格 $P_{t,n}$ 由当年的供给

函数决定。

本模型主要关注于发电竞争市场中的价格上限和容量价格的设置对于市场的影响作用，因此将发电机组的总收益和价格因子表示如下：

$$R_{Total,unit,n} = P_{Cap} \cdot t_{Cap,n} + \int_{t_{Cap,n}}^{t_{Oper,unit,n}} P_{t,n} dt \quad (3)$$

$$P_{Factor,unit,n} = \frac{(P_{Cap} - C_{v,unit}) \cdot t_{Cap,n} + \int_{t_{Cap,n}}^{t_{Oper,unit,n}} (P_{t,n} - C_{v,unit}) dt}{C_{f,unit} - P_{Capacity}} \quad (4)$$

其中： $P_{Capacity}$ 即为发电机组年单位容量的容量价格； P_{Cap} 即为发电机组的能量竞争市场价格上限； $t_{Cap,n}$ 即为 P_{Cap} 在价格持续曲线上所对应的运行小时数。

基于以上数据信息及第 n 年的供给曲线 S_n 和预测的第 $n+5$ 年需求曲线 $D_{Forecast,n}$ ，可以得出第 n 年的发电项目初步投建容量 $I_{Rough,n}$ 为

$$I_{Rough,n} = P_{Factor,unit,n} \cdot (D_{Forecast,n+5}(0) - S_n) \quad (5)$$

考虑到前几年已经动工的在建项目，则第 n 年的发电项目最终投建容量 $I_{Final,n}$ 为

$$I_{Final,n} = I_{Rough,n} - I_{Final,n-1} - I_{Final,n-2} - I_{Final,n-3} - I_{Final,n-4} \quad (6)$$

2 长期市场需求不确定性的云模型体现

2.1 云理论的基本概念

在模糊集中，各元素的隶属度用 $[0, 1]$ 中的一个实数来描述它隶属于模糊集的程度。但是，用 $[0, 1]$ 之间一个精确数来客观地描述对象的隶属度其实是很困难的。若采用统计的方法来确定隶属度，往往会导致过高的成本并且可操作性受到实际条件限制；若借助于主观取值的方法确定隶属度，又难免会出现专家意见不够全面等问题。对此，云理论及其相关模型在传统模糊理论和概率统计基础上，可以将模糊性与随机性相结合，实现了不确定概念与定量数值之间的自然转换，从而更加科学客观地描述不确定环境下的隶属度特性^[11]。

设 U 是一个用精确数值量表示的论域，关于论域 U 上的模糊集 A ，对于任意一个论域中的元素 $x \in U$ ，都存在一个有稳定倾向的随机数 $y \in [0, 1]$ ，叫做 x 对 A 的隶属度，则隶属度在论域上的分布称为隶属云，简称为云。云由许多云滴组成，云的整体形状反映了定性概念的重要特性，云滴则是对定性概念的定量描述，云滴的产生过程，表示定性概念和定量值之间的不确定性映射。

隶属云隐含了三次正态分布规律，记作 $N^3(E_x, E_n, H_e)$ ，其中 E_x (Expected Value), E_n (Entropy),

H_e (Hyper Entropy)分别称为正态云的期望值、熵、超熵, 是用来表征正态云的三个数字特征, 简记为 $A=U(E_x, E_n, H_e)$, 反映了定性知识的定量特性。

期望值 E_x : 是概念在论域的中心值。它最能代表定性概念的值, 它隶属度为 1, 即 100% 隶属于这个定性概念。

熵 E_n : 是定性概念模糊度的度量。它反映了在论域中可被这个概念所接受的数值范围, 体现了定性概念亦此亦彼的裕度。熵越大, 概念所接受的数值范围也越大, 概念越模糊。

超熵 H_e : 是熵 E_n 的熵。它反映了云滴的离散程度。超熵 H_e 越大, 云滴的离散程度越大, 某一点的隶属度的随机性越大, 云的厚度越大。

2.2 长期需求增长的不确定性及其云模型体现

在对发电投资进行动态模拟的过程中, 市场需求的年增长率是影响模拟结果的重要因素之一。由于受到多种不确定因素的作用, 未来市场需求的年增长率无法以精确数值准确度量。对此, 决策者可以选取多种不同的假设情景, 在每种情景中考虑一种典型的不确定状况, 分别确定对应市场情景下的年增长率, 并对每种情景赋以一定的隶属度, 以此构成需求增长率的模糊数表达。若将 n 个情景视为 n 个状态, 则状态 i 中的需求增长率为 x_i , 对应的隶属度为 y_i 。

正态隶属云能够揭示自然和社会科学中大量模糊概念的隶属云所遵循的基本规律, 已有研究证明具有普遍适用性^[12]。因此可以根据已有的 x_i 和 y_i , 可以得到隶属云的数字特征, 其中

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

剔除 $y > 0.999$ 的云滴, 剩下 m 个云滴 (缺一个标点?)

$$E_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|x_i - E_x|}{\sqrt{-2 \ln y_i}} \quad (8)$$

$$H_e = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(\frac{|x_i - E_x|}{\sqrt{-2 \ln y_i}} - E_n \right)^2} \quad (9)$$

根据云的数字特征 $[E_x, E_n, H_e]$, 可以生成任意多个云滴组成的正态云。对于一维正态云, 云发生器的具体算法如下。

(1) 生成以 E_x 为期望值, E_n 为标准差的正态随机数 x ;

(2) 生成以 E_n 为期望值, H_e 为标准差的正态随机数 E_n' ;

(3) 计算 $y = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n'^2}}$, 即 x 的隶属度;

(4) 使 (x, y) 形成合乎条件的一个云滴;

(5) 重复步骤(1)~(4)直至产生要求数目的云滴。

至此, 决策者可以根据有限的假设情景得到隶属云的数字特征, 并通过云发生器生成符合该特征的隶属云, 进而将未来市场需求增长率的隶属度从有限的状态拓展到全面的描述。

3 基于可靠性和经济性的仿真评价指标体系

仿真评价主要是选取相应指标, 对于不同能量价格上限和容量价格, 就动态仿真中的发电容量增长变化做出评价, 主要包括可靠性和经济性两个方面。对于可靠性主要是选择从系统长期状态下的年平均发电容量不足率 S_{Under} , 以及由此导致的年平均缺电小时数 H_{Short} 加以考察; 而对于经济性则是以系统的年平均发电容量冗余率 S_{Over} , 以及年单位电量购电成本 C_{Gen} 作为主要评价指标。将发电容量不足率和冗余率分别列入可靠性指标和经济性指标, 是因为发电容量不足将直接危及系统可靠性, 而发电容量的冗余则反映了过度的发电投资, 将会给整个社会带来巨大的资源浪费。上述各项指标分别定义如下:

$$S_{\text{Under}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(\max \left(0, \frac{D_{i,1} - S_i}{D_{i,1}} \right) \right) \quad (10)$$

$$H_{\text{Short}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (D_i^{-1}(q)), \quad q = \min(S_i, D_i) \quad (11)$$

$$S_{\text{Over}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left(\max \left(0, \frac{S_i - D_{i,1}}{D_{i,1}} \right) \right) \quad (12)$$

$$C_{\text{Gen}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T C_{\text{Gen},i} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{i,t} \cdot D_{i,t}}{\sum_{i=1}^{8760} D_{i,t}} \quad (13)$$

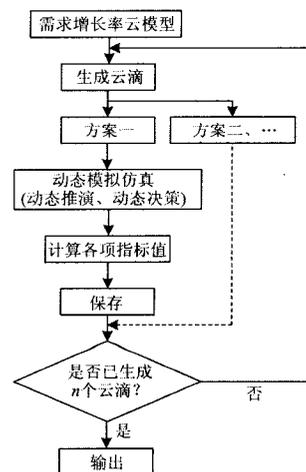


图 1 整体算法流程

Fig.1 Main calculation flow

其中： T 即为评价指标体系所考察的时间段。发电项目建设周期通常较长，因此评价的时间跨度不宜过短，但是如果时间跨度过长又缺乏实际意义，因为长达几十年的时间内，发电市场的客观环境将会发生很大的改变。在本文中，假设 $T=30$ 。

4 算例分析

假设通过典型市场情景分析可以列举实际需求增长率的隶属度分布如下。

表 1 典型市场情景下的实际需求增长率及隶属度

Tab. 1 Actual demand growth rate and membership in typical market scenarios

	实际需求增长率	隶属度
情形一	2.3%	0.1
情形二	2.4%	0.6
情形三	2.5%	1
情形四	2.6%	0.6
情形五	2.7%	0.1

可以求得实际需求增长率服从云模型 $[0.025, 0.001, 0.00007]$ ，如图 2 所示。

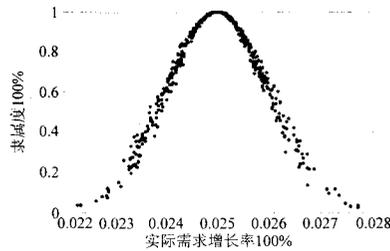


图 2 实际增长率云模型

Fig.2 Cloud model of the actual growth rate

基于前面所讨论，在投资者预测的未来负荷需求低于真实水平情形下，采用本文所提出的 4 项动态评价指标，就可以较为全面的考察特定发电竞争参数方案下的市场发展走势。取 $r_{Forecast}=2\%$ ，运行发电容量动态仿真模型，即可得到 4 项指标的变化情况，如图 3 所示。

表 2 市场参数备择方案

Tab.2 Alternative solutions of market parameters

	能量价格上限	容量价格
方案一	\$2000/MWh	\$10000/MW·年
方案二	\$2000/MWh	\$30000/MW·年
方案三	\$6000/MWh	\$10000/MW·年
方案四	\$6000/MWh	\$30000/MW·年

从图 3 中的年平均发电容量冗余率散点图中可以看到，云理论及其相关模型可以对有限的抽样状

态加以扩展，从而有助于全面考虑各种不确定性因素的影响。同时，隶属云的分布形态也清晰地描述了在不确定性影响下，需求增长率所具有的模糊性，以及其隶属度的随机性。对于云的中心靠近期望较近的数值，云层较薄，隶属度较高且取值较为确定；对于云的两端偏离中心期望较远的数值，云层较薄，隶属度较低且取值也较为确定；然而对于云的中心和两端之间的数值，云层较厚，隶属度在较大范围内分布且较难确定。由此可见，云理论及其模型比单纯的模糊数更能准确客观地反映电力市场长期需求增长率的不确定性质。

此外，从图 3 中还可以看到，无论提高能量价格上限还是容量价格，都会增强发电容量的投资激励，从而推动投资者的发电投资决策，减少发电容量短缺所带来的供电可靠性降低的负面影响。但是在发电容量增长的同时，也容易导致发电容量的过度投资和用户侧过高的购电费用，尤其是在能量价格上限和容量价格均设置较高的情况下^[13]。

结合图 3 可以从各项指标对所列举的四个方案加以考察。方案一选择了较低的能量价格上限和容量价格，因而抑制了投资激励，发电容量基本不存在过剩，并且购电成本也最低，但是该方案将导致严重的发电容量短缺和较高的年缺电小时数。方案四具有较高的能量价格上限和容量价格，能够有效激励发电投资，降低年缺电小时数，但是会导致发电容量的过度投资和浪费，同时购电成本也最高。在可靠性指标方面，具有相同容量价格的方案二和方案四较为接近。例如在年平均缺电小时数指标中，二者云模型重叠区域的隶属度为 60%，而在年平均发电容量不足率指标中，二者云模型重叠区域的隶属度达到了 85%，因而方案二和方案四体现了较好的可靠性。方案二和方案三的参数设计体现了对方案一和方案四的折中，因而在各项指标上的表现较为均衡。具体而言，方案二在可靠性方面明显优于方案三，并且二者在经济性方面也非常接近，例如在年平均发电容量冗余率指标中，方案二略高于方案三，而在年单位电量购电成本指标中，二者云模型几乎完全重合。因此，综合各项指标的对比分析表明，与其他备择方案相比，方案二具有很好的可靠性和较好的经济性。

以上述指标体系为基础，结合适当的综合评价方法，对 4 项指标进行相应的归一化处理并赋予各自的权重，即可在全局范围内搜索所有满足综合评价要求的发电竞争参数协调方案。

5 结论

能量价格上限和容量价格是发电侧竞争性市场设计中所需要考虑的主要参数。本文通过云模型定量描述了发电竞争市场中需求的长期增长率的不确定性,并将云模型与发电投资动态仿真相结合,采

用基于可靠性与经济性的模拟结果评价指标体系,在不确定性市场环境下研究分析了市场外部条件对于发电竞争参数设计的影响作用,对比了不同的参数设计方案各自所具有的优越性及局限性。

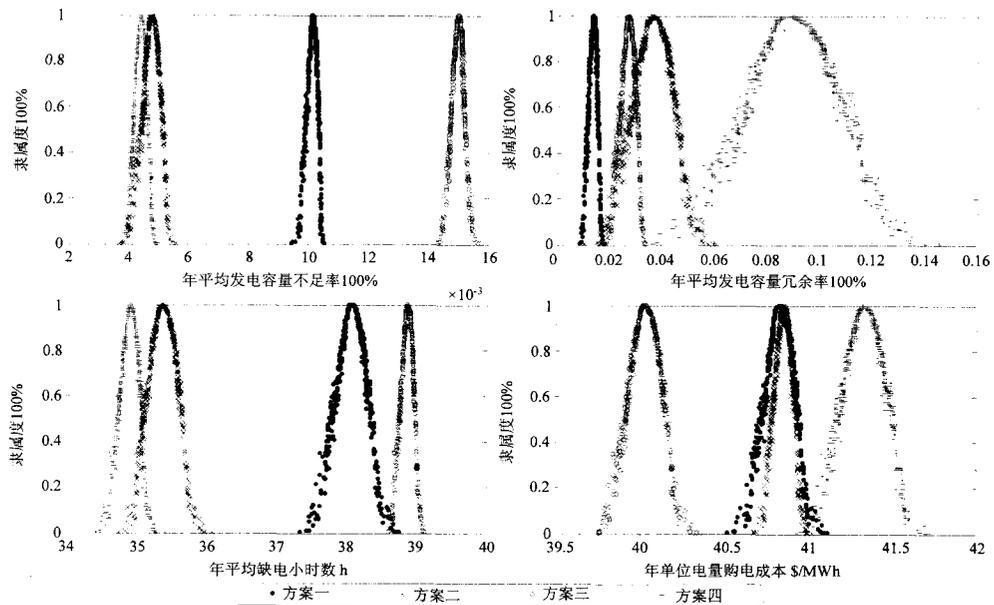


图3 不同备择方案下的市场仿真动态仿真结果

Fig.3 Dynamic simulation results under various alternatives of market parameters settings

基于本文研究提出的发电竞争参数设计方法,可以在下一步的工作中研究如何将当前考虑的不确定性从长期需求增长率推广到其他市场要素。在本文的基础上,还可以进一步将输电扩容投资问题与发电侧相联系,研究分析发电竞争关键指标的变化对于输电建设项目投资决策和评价的影响作用。

参考文献

- [1] Oren S S. Capacity Payments and Supply Adequacy in Competitive Electricity Markets[A]. in: Proceedings of VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning[C]. Brazil: 2000.
- [2] de Vries L J, Hakvoort R A. The Question of Generation Adequacy in Liberalized Electricity Markets[A]. in: Proc 26th IAAE International Conference[C]. Prague(Czech Republic): 2003.
- [3] Creti A, Fabra N. Capacity Markets for Electricity, Berkeley (CA, USA): University of California Energy Institute, CSEM Working Paper 124, 2004.
- [4] Fraser H, Lo Passo F. Developing a Capacity Payment Mechanism in Italy[J]. The Electricity Journal, 2003, 16(9): 54-58.
- [5] Borenstein S. The Trouble with Electricity Markets: Understanding California's Restructuring Disaster[J]. Journal of Economic Perspectives, 2002, 16(1): 191-211.
- [6] Ford A. Cycles in Competitive Electricity Markets: a Simulation Study of the Western United States[J]. Energy Policy, 1999, 27(11): 637-658.
- [7] 黄健柏, 黄向宇, 邵留国, 等. 基于系统动力学的峰谷分时电价模型与仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 18-23.
HUANG Jian-bo, HUANG Xiang-yu, SHAO Liu-guo, et al. Peak and Valley Time Price Model and Simulation Based on System Dynamics, Part One Model Establishment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 18-23.
- [8] 黄健柏, 邵留国, 张仕璟. 两部制电价与发电容量投资的系统动力学分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 21-27.
HUANG Jian-bo, SHAO Liu-guo, ZHANG Shi-jing. Analysis of Two-part Electricity Price and Generation Capacity Investment Based on System Dynamics[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 19(2): 21-27.
- [9] Martin O, Oliver M. Investment Under Uncertainty-does Competition Matter?[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2007, 31(3): 994-1014.

(下转第 17 页 continued on page 17)

- GU He-rong, YANG Zi-long, ZOU Wei-yang. Research on Hysteresis-band Current Tracking Control of Grid-connected Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9):108-112(in Chinese).
- [2] Ortiz-Rivera E I, Peng F Z. Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet[J]. IEEE, 2005.
- [3] 赵争鸣, 刘建政, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. PV Power Generation and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [4] Altas I H, Sharaf A M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment[J]. IEEE, 2007.
- [5] Lee J H, Bae H S, Cho B H. Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size[J]. EPE-PEMC, 2006:603-607.
- [6] Pandey A. Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance[J]. IEEE, 2006: 4387-4391.
- [7] Sera D, Kerekes T. Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions[J]. EPE-PEMC, 2006: 1614-1619.
- [8] Soeren Baekhoej Kjaer. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 4(5):1292-1306.
- [9] Sachin Jain. A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems with Maximum Power Point Tracking[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(5):1928-1940.
- [10] Soeren Baekhoej Kjaer. Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – a Review[J]. IEEE, 2002:782-788.
- [11] Bode G H, Holmes D G. Implementation of Three Level Hysteresis Current Control for a Single Phase Voltage Source Inverter[J]. IEEE, 2000:33-38.
- [12] Jog A N, Apte N G. An Adaptive Hysteresis Band Current Controlled Shunt Active Power Filter[J]. IEEE, 2007.
- [13] 杨旭. 一种新的准固定频率滞环PWM电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2003, (3):25-29.
YANG Xu. A New Quasi-constant Frequency Hysteresis PWM Current Control Method[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2003, (3):25-29.
- [14] Karshenas H R. Basic Criteria in Designing LCL Filters for Grid Connected Converters[J]. IEEE ISIE, 2006:1996-2000.
- [15] Ciobotaru M, Kerekes T. PV Inverter Simulation Using MATLAB/Simulink Graphical Environment and PLECS Blockset[J]. IEEE, 2006: 5313-5318.
- [16] Aslain Ovono Zué. Simulation and Stability Analysis of a 100 kW Grid Connected LCL Photovoltaic Inverter for Industry[J]. IEEE, 2006:1-6.

收稿日期: 2008-11-02; 修回日期: 2009-01-13

作者简介:

戴训江(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为分布式发电技术的研究; E-mail: xinjiang_wolf@yahoo.com.cn

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事并网型风力发电系统的研究与控制。

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [10] Wijnia Y C, Herder P M, Neufville R D. Options for Real Options: Dealing with Uncertainty in Investment Decisions for Electricity Networks[A]. in: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics[C]. 2005.3682-3688.
- [11] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership Clouds and Membership Cloud Generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6):15-20.
- [12] 李德毅, 刘常显. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI De-yi, LIU Chang-yu. Study on the Universality of the Normal Cloud Model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8):28-34.
- [13] Vazquez C, Rivier M, Perez-Arriaga I J. A Market Approach to Long-term Security of Supply[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 349-357.

收稿日期: 2008-11-23; 修回日期: 2009-02-12

作者简介:

曾鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力技术经济; E-mail: zengmingbj@vip.sina.com

甘德一(1954-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场交易机制设计与评价;

崔拓伟(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力技术经济。