

# 基于动态模拟的发电市场情景分析与机制研究

刘国跃<sup>1,2</sup>, 肖霖<sup>3</sup>, 曾鸣<sup>3</sup>, 徐鸿<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 华能国际电力股份有限公司, 北京 100031; 3. 华北电力大学工商管理学院, 北京 102206)

**摘要:** 发电容量投资的周期性波动不仅对于电力工业意味着巨大的浪费, 影响到输电项目的扩容规划和投资评价, 甚至还可能会危及系统的供电可靠性。通过建立发电侧市场的动态模拟模型, 选取发电侧市场的多种典型情景研究分析了单一能量机制和容量费用机制下发电投资和市场供需的周期性波动问题。进一步, 以容量费用机制为例分析并认为, 对于容量电价应当由政府还是市场制定的问题, 其核心在于政府或市场能否完全或者在一定程度上替代对方, 引导充裕的发电投资和稳定的市场供需。

**关键词:** 发电投资; 动态模拟; 单一能量机制; 容量费用机制

## The mechanism research and case study of electricity generation markets based on dynamic simulation

LIU Guo-yue<sup>1,2</sup>, XIAO Lin<sup>3</sup>, ZENG Ming<sup>3</sup>, XU Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Huaneng Power International, Inc., Beijing 100031, China;

3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The periodic fluctuation of generation investment brings gigantic cost to the electricity sector, complicates the transmission expansion planning and investment evaluation, and poses a threat to power system reliability. This paper builds a dynamic simulation model of generation capacity investment, and applies it to several cases to analyze the periodic fluctuation problem under mechanisms of energy-only market and capacity payment. Furthermore, this paper chooses the capacity payment mechanism as an example, and proves that whether the capacity price be made purely by market or government depends on the extent to which one could substitute the other in assuring generation investment adequacy and market capacity margin.

**Key words:** generation investment; dynamic simulation; energy-only market mechanism; capacity payment mechanism

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2008)24-0008-06

## 0 引言

自2007年开始,我国发电装机容量已经普遍出现过剩,但是在3年前,我国还处于“电荒”之中,大批发电项目正在上马,工业生产还需要实行错峰用电。发电投资的周期性波动不仅会减少发电侧的充裕度,降低系统的供电可靠性,也会影响到输电项目的扩容规划和投资决策<sup>[1,2]</sup>。在电力工业市场化的大背景下,如何采取适当的机制,以取代传统的垂直一体化管理模式并保障充足有序的发电容量投资就成为亟待研究的问题。考虑到现实环境的不完善性和电力区别于一般商品的特殊性,世界各国在电力市场改革中普遍采取了设置价格上限等方

式,虽然在一定程度上抑制发电商的市场力,保护广大用户的利益,但是却扭曲了价格信号,从而减少发电容量投资激励<sup>[3~5]</sup>。对此,各国学者研究提出了其它的容量机制,例如容量费用、容量要求、容量订购等机制,以进一步弥补价格上限等方式的局限性<sup>[1,2,6~8]</sup>。

事实上,电力工业引入市场机制正是为了改进传统的一体化管理模式,减少主观因素的影响,以自然竞争的方式提高经济效率。然而,对于市场机制的各种人为设计则是为了避免市场功能由于某些不完善因素而“失效”,这在某种程度上又回到了原行政干预和调控的思路中。虽然这一反复的过程恰好也印证了经济学理论在西方国家从早期“市场万能”到凯恩斯“宏观调控”的发展历程,但是具体对于电力市场设计而言,如何在市场竞争与政府

基金项目: 国家自然科学基金项目(70671041)

调控之间选择适当的平衡还有待于进一步的研究。因此, 就有必要研究发电投资的周期性波动现象, 并就适当的市场机制给出建议。

## 1 发电市场竞争原理

### 1.1 市场供需均衡

在发电环节已经解除管制的电力市场中, 发电企业通过竞价上网参与交易, 并按照价格从低到高的顺序依次成交。在不考虑发电企业竞价策略, 假设所有发电企业均按照边际成本报价, 并且忽略机组强迫停运等偶发因素的情况下, 市场内的总供给曲线在短期内几乎是不变的。然而从长期来看, 随着发电机组的新建和退役, 市场中的总供给曲线仍然会随市场总装机容量的波动而变化。

从市场需求的角度来看, 需求曲线是实时变化的, 因此对于不同时刻的负荷需求将会形成不同的市场供需均衡。根据市场中的总供给曲线和实时的总需求曲线, 可以得到市场在各个时刻的均衡价格, 并可以按照负荷持续曲线的顺序绘制价格持续曲线, 如图 1 所示。

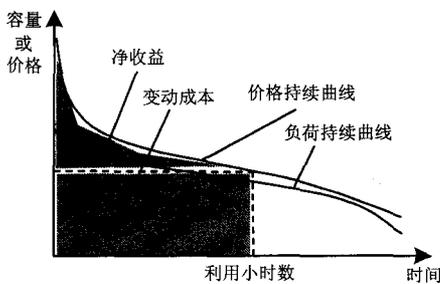


图 1 发电机组的成本与收益

Fig.1 Cost and revenue of the generator

对于需求曲线中的弹性因素, 本文假设在市场中供应充足, 也就是市场价格较低的情况下, 需求侧对价格是几乎没有弹性的<sup>[9-11]</sup>, 而当供需形势趋于紧张时, 市场价格升高将迫使需求弹性从 0 增加至某一有限的水平, 从而通过价格信号在一定程度上抑制负荷需求。在需求弹性的作用下, 需求侧可以对市场价格的变化做出有限的反应, 并通过与供应曲线的交互作用而反过来影响均衡价格, 因而更加接近真实的电力市场运行环境, 其中的均衡价格也更加接近实际情况。

### 1.2 发电投资决策

电力工业具有资金密集的特性, 市场中发电机组的固定成本通常是按照一定的服役年限分摊回收。机组的年固定成本和变动成本决定了机组的容量因子, 进而确定了机组在每年的利用小时数。从

图 1 可以看到, 在价格持续曲线下的总收益中除去变动成本后所余部分即为净收益。对于投资者而言, 只有当机组的净收益足以回收年固定成本时, 机组运行才不至于亏损。因此, 可以将剩余收益与机组的年固定成本的比值作为价格信号。如果当年的供应紧张, 则市场价格水平较高, 同时机组的年运行小时数也较高, 因而发电机组的总收益增加, 最终使得剩余收益增加, 而机组应当回收的年固定成本不变, 所以价格信号就会放大, 进一步激励投资者扩大投资规模, 反之亦然<sup>[12-14]</sup>。

## 2 发电市场典型情景的划分

### 2.1 理想情景与非理想情景

在理论上, 市场的调节作用完全可以引导资源的优化配置, 然而在实际环境中, 发电市场仍然存在诸多的不完善因素, 在一定程度上阻碍了市场功能的发挥。例如, 不适当的价格上限可能会扭曲了吸引投资的价格信号; 处于探索之中的各国电力工业改革尚未积累丰富的市场运行经验数据; 各种电力市场的结构和规则仍在不断调整和完善; 对交易和投资的监管政策和措施具有不可避免的不确定性等。各方面不完善因素的综合作用, 往往会导致投资者做出缩减规模以规避风险的投资决策, 进而影响到市场的运行。因此, 可以选取单一能量市场机制, 并将市场情景分为理想和理想两种状况研究分析。在理想情况下, 投资者对未来负荷需求的长期增长判断准确; 而在非理想情况下, 为了体现投资者减少投资回避风险的策略, 故假设对于未来市场需求预计持保守态度, 其所预测的负荷增长速率低于实际增长速率。以上两种情景的划分可以作为发电竞争动态模拟研究的基本情景, 以检验模型的正确性和有效性。

### 2.2 政府调控情景与市场竞争情景

为了研究机制设计中市场竞争与政府调控之间的平衡问题, 可以选取容量费用机制, 围绕其中容量价格的制定而展开。事实上, 容量费用机制与我国上网电价的两部制方案具有类似之处。根据《上网电价管理暂行办法》(以下简称《办法》), 建立区域竞争性电力市场并实行竞价上网后, 参与竞争的发电机组主要实行两部制上网电价。在关于容量价格如何制定的关键问题上, 《办法》指出容量电价由政府价格主管部门制定, 电量电价由市场竞争形成, 并且要求政府制定的容量电价水平保持相对稳定, 能够反映电力成本和市场供需状况, 有利于引导电源投资。在此基础上, 《办法》要求容量电价逐步过渡到由市场竞争确定。然而, 关于容量电价的这一

过渡如何完成, 以及在此过程当中需要注意的环节等问题仍然需要研究论证。

加州危机的爆发说明了单纯依靠单一能量市场来引导充裕的装机容量在实践中的局限性, 这正是由于一般的自由市场竞争在电力这一特殊商品中的应用并非万能。事实上, 市场中的发电机组不论是否被调用出力, 只要其能够保持可用状态, 就为市场增加了备用裕度, 提高了系统的供电可靠性。因此, 通过容量费用补偿的方法既可以体现机组容量对于改善发电侧充裕度的价值, 也能够减少发电机组固定成本回收的压力, 增加投资者在不确定性环境中的投资激励, 从而在一定程度上填补单一能量机制的缺陷。但是, 对于容量费用机制中的容量价格的制定问题, 仍然存在着广泛的争议。例如, 如果容量价格是由政府监管机构制定且在一段时间内保持相对稳定, 则由于政府审批的速度和效率等原因, 将难以根据最新的市场信息及时调整现行容量价格水平, 无法真实地反映瞬息万变的市场形势。在这样的情况下, 如果政府所制定的容量价格在长期内是正确的, 则能够排除市场内短期不稳定因素的影响, 有效指导投资者的长期投资行为; 但是, 如果政府所制定的容量价格偏离了最优水平, 则可能会对投资者的决策构成误导, 由此造成的结果甚至还不如由市场竞争所制定的容量价格。对此, 本文采用动态模拟的方法, 将两种定价方案下的发电侧市场情景加以比较分析。

### 3 模型结构及运算流程

#### 3.1 模型的基本原理和框架

模型的基本结构如图 2 所示。其中, 由于发电设备的建设周期较长, 因此供应曲线是按年更新的, 而由于一年中的市场需求随小时变化, 因此需求曲线是按小时更新的。将二者相结合, 即可得到一年中各个小时的市场均衡状态, 形成价格持续曲线。进一步, 依据该曲线, 可以计算发电机组在能量市场的年度收益。在年度收益中减去变动成本后, 所

余下的部分即为净收益。结合图 1 可知, 对于投资者而言, 如果净收益大于当年需要回收的固定成本, 则发电机组是盈利的, 而如果净收益不足以支付当年的固定成本则为亏损。

发电机组的损益状况直接影响到投资者对发电容量的投资激励。在本模型中, 假设机组损益对于投资决策具有如下影响关系

$$I_n = K_n \times \frac{R_{Net,n}}{C_f - P_{Capacity,n}} = K_n \times \frac{\int_0^{8760} (P_{t,n}^* - C_v) dt}{C_f - P_{Capacity,n}} \quad (1)$$

其中:  $K_n$  为在第  $n$  年预计 5 年后的负荷缺口, 由预测的负荷年增长率  $r_{Forecast}$  决定;  $P_{t,n}^*$  为第  $n$  年第  $t$  小时的均衡价格;  $P_{Capacity,n}$  为市场第  $n$  年的容量价格;  $C_v$  为机组的变动成本;  $C_f$  为机组的固定成本。在本模型中设置有峰荷、腰荷和基荷三类机组, 参数如表 1。为了简化, 假设投资者选择其中利润最高的机组类型进行投资。

表 1 不同类型发电机组的固定成本和变动成本

机组类型	年固定成本/ (\$/MW)	变动成本/ (\$/MWh)
峰荷机组	40 000	48
腰荷机组	60 000	28
基荷机组	12 5000	12

为了对不同机制的模拟结果进行有效的分析和比较, 本模型在每种情景下的动态模拟中都对市场设置了一个的负面冲击, 即假设在最初的 4 年内, 每年投产的发电容量是不足的, 使得市场中的发电容量出现短缺, 从而引发供需的振荡, 并分析不同情形下市场对这一冲击的反应情况。

模型运行以第 0 年作为开始。在第 0 年, 市场供需处于平衡, 投资者根据市场供需形势进行发电投资决策。各种市场情景的参数条件如表 2, 其中, 假设负荷实际年增速  $r = 1.025$ , 而非理想情况下的负荷预测年增速  $r_{Forecast} = 1.015 < r$ 。

表 2 各种模拟情景的参数条件

情景	机制类别	负荷预测	容量价格
		$r_{Forecast}$ (100%)	$P_{Capacity}$ / (\$/MW)
理想	单一能量机制	1.025	0
非理想	单一能量机制	1.015	0
政府调控	容量费用机制	1.015	50 000
市场竞争	容量费用机制	1.015	-

在前 4 年内, 市场供应逐渐趋于紧张, 能量市场价格也将上升, 为投资者带来越来越强烈的价格信号, 激励投资者做出更加积极的发电投资决策。而一旦发电投资出现过度, 则在 5 年后发电项目陆

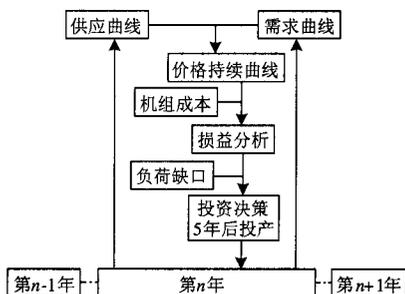


图 2 模型的基本运算流程

Fig.2 Calculation process of the model

续竣工投产时, 市场供应就将逐渐充裕, 市场价格就会下降, 减少投资者的投资激励。

### 3.2 容量费用机制在模型中的表述

容量费用对于投资决策的影响作用主要体现在机组年固定成本的回收方面。在单一能量机制的情形下, 机组只能完全依靠能量市场中的净收益来填补每年应当回收的固定成本, 而由于能量市场价格往往波动剧烈, 因此投资者需要面对相当的风险, 减少了投资的激励。在这样的情况下, 对发电机组实施容量费用补贴就相当于减少了机组每年应当从能量市场中回收的固定成本, 而且由于容量价格相对稳定, 从而能够帮助投资者在一定程度上规避能量市场价格波动所带来的风险。

对于政府调控和市场竞争两种情形, 本模型假设在政府主导制定容量价格的情形下, 容量价格为 50000\$/MW, 而在市场竞争定价的情形下, 容量价格围绕这一水平, 根据每年的供需状况而波动, 其中供需状况由当年的峰荷需求容量和发电装机容量决定。当市场出现供应短缺时, 容量价格高于政府制定的水平, 而当发电容量出现过剩时, 容量价格则低于政府制定的水平。其中, 假设容量价格与市场供需形势的具体关系为

$$P_{Capacity,n} = P_{Capacity,n}^* \times \frac{Q_{D,n}}{Q_{S,n}} \quad (2)$$

其中:  $Q_{S,n}$  为市场第  $n$  年的发电装机容量, 而  $Q_{D,n}$  则为市场第  $n$  年的峰荷需求容量。

## 4 动态模拟结果分析

### 4.1 理想与非理想情景的对比分析

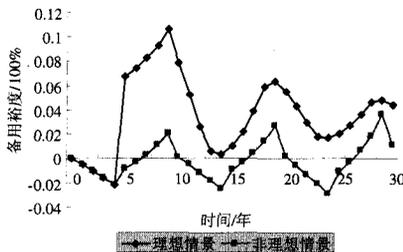


图3 单一能量机制下的市场备用裕度动态模拟

Fig.3 Dynamic simulation of capacity margin development under energy-only mechanism

根据已有的假设条件并通过前面建立的模型, 对理想和非理想状况下的发电侧市场情景进行动态模拟, 可以得到单一能量机制下两种情景的模拟结果如图3所示。由于采用了备用裕度的表示方式, 因此所得结果中已经去除了市场负荷的年增长趋势。由图3中可以看到, 在理想条件下, 投资者不

会因为受到不确定性的影响而采取保守的投资策略, 此时市场的调节作用得到充分的发挥。尽管市场在前5年中遭受了明显的负面冲击, 但是仅在1年的时间内就迅速得以恢复, 并能够在此后的时间内逐渐缓和甚至可能消除这一负面冲击所造成的供需波动, 备用裕度将最终稳定较高的水平上。然而, 在非理想的条件下, 市场供不应求的局面则需要3年的时间才得以勉强扭转, 甚至会在第11年和第21年再次出现发电容量不足的状况。同时, 最初的负面冲击所带来的影响却无法得到有效的抑制。随着时间的发展, 发电投资的波动会更加剧烈, 而且在供应紧张的年份, 发电容量的短缺也将更加严重。以上模拟和分析证实了在理想环境下实施单一能量机制即可实现最优, 而现实环境中的不确定性因素的作用则可能会导致市场出现振荡并偏离最优的状态。

### 4.2 政府调控与市场竞争情景的对比分析

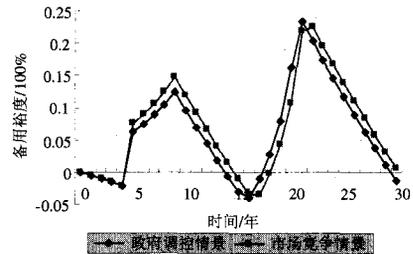


图4 容量费用机制下的市场备用裕度动态模拟

Fig.4 Dynamic simulation of capacity margin development under capacity payment mechanism

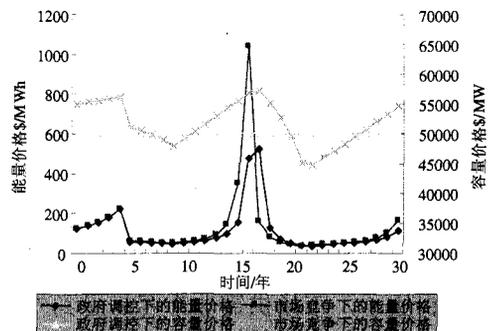


图5 容量费用机制下的价格动态模拟

Fig.5 Dynamic simulation of price development under capacity payment mechanism

从图4中可以看到, 不论是由政府还是市场制定容量价格, 实施容量机制都能够延长发电投资和市场供需的波动周期<sup>[15,16]</sup>。图5给出了两种情景下的能量市场价格, 可以看到通过市场竞争确定的容量价格有助于减少能量市场的价格波动, 但是如何控制容量价格波动所带来的风险又会成为新的问题。同时容量费用对机组固定成本的补贴也造成了

过度投资的激励,甚至在第 21 年附近市场备用裕度超过了 20%。此外,从图 4 中还可以看到,无论是由政府还是市场制定容量价格,都难以有效改善发电投资和市场供需的波动状况,以下就这两种情景展开具体的对比分析。

在市场定价的情景中,发电侧市场的盲目性和滞后性得以体现。对比图中政府调控和市场定价的曲线可以发现,在最初的 5 年中,由于受到负面的冲击,发电容量陷入短缺,此时市场定价下的容量价格将会高于政府制定的水平。在市场制定的较高容量价格的激励下,大量的发电投资项目开工建设,致使第 5 年至第 9 年内大量的发电项目建成投产,备用裕度甚至超过了政府定价的情景。这在造成市场发电容量过剩的同时,也导致市场制定的容量价格低于政府制定的水平,从而降低了对发电投资的激励作用。在随后的 5 年中,发电容量逐渐由过剩转为平衡,并在第 15 年至第 18 年再次出现短缺。在整个模拟时间段中,市场竞争定价情景下的发电容量变化趋势明显滞后于政府调控定价的情景。

#### 4.3 政府调控与市场竞争相结合的机制设计

市场机制本身带有一定的盲目性,这是因为市场中的各个主体都是着眼于自身的利益,而不必为市场的稳定和可靠承担任何责任。进而,由于市场成员仅是针对当前短期内的市场状况制定决策,因此市场的反应也就不可避免地具有滞后性。简单市场机制的以上弊端在与电力这一特殊商品相结合时,就可能会给市场的稳定和可靠带来非常严重的问题。

事实上,与其他的容量机制一样,容量费用机制的提出并不是为了使得简单的单一能量市场复杂化,而是为了纠正和弥补单一能量机制所固有的缺陷。考虑到人为干预措施中的机械性和主观性等问题,市场制定的容量价格固然比政府定价更加灵活,可以及时反映短期内最新的市场供需形势,但是正如模拟分析所示,市场供需非常容易受到外部冲击的扰动,而此时的容量价格将很难为投资者提供正确的长期投资信号。在这种情况下,如果政府调控制定的容量价格能够克服市场定价的不足,并且能够在复杂多变的不确定性环境中清晰、准确地指示未来长期内的市场发展动向,那么由政府制定容量价格必然比依靠市场更加高效。从实质上看,政府调控和市场竞争都是引导发电投资的手段而非目的,而单纯依靠市场或者单纯依靠政府都难以彻底解决发电投资和市场供需的周期性波动问题。因此,关于政府调控和市场竞争之间的平衡,其核心问题并不在于二者之间非此即彼的选择,而是在于二者

之间如何能够通过有效的机制设计而实现有机结合,以克服不确定性因素的影响,引导市场在长期内稳定健康发展。

## 5 结论

本文就发电侧的多种市场情景建立了动态模型,模拟分析了单一能量机制在理想和非理想状态下可能对发电投资和市场供需带来的影响作用。本文对容量费用机制下市场情景的模拟和分析表明,单纯依靠市场或政府中的任何一方来引导容量价格都可能会存在缺陷,因而如何在市场机制的设计中将二者的特点有机结合就成为尚待研究解决的问题。同时,本文所提出的发电容量动态模拟方法也为市场环境下游电商业化扩容投资等相关问题的研究提高了参考。基于本文所做的工作,还可以进一步将输电扩容投资问题与发电侧相联系,研究分析发电容量的动态变化对于输电建设项目商业化投资决策的影响作用。

### 参考文献

- [1] Creti A, Fabra N. Capacity Markets for Electricity, Berkeley (CA, USA): University of California Energy Institute, CSEM Working Paper 124, 2004.
- [2] Bidwell M, Henney A. Will Neta Ensure Generation Adequacy?[J]. Power UK, 2004, 22(4): 10-26.
- [3] 汪拥军, 文福拴, 孙东川. 电源过度投资的博弈分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 20-23.  
WANG Yong-jun, WEN Fu-shuan, SUN Dong-chuan. Analysis of Over-investment in Generation Capacity Based on Game Theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 20-23.
- [4] Vazquez C, Rivier M, Perez-Arriaga I J. A Market Approach to Long-term Security of Supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 349-357.
- [5] 臧宝锋, 胡汉辉, 庄伟钢. 我国发电装机波动性及其成因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(9): 46-50.  
ZANG Bao-feng, HU Han-hui, ZHUANG Wei-gang. Investment Cycles and Causality Analysis in Generation Capacity in China[J]. Electric Power, 2005, 38(9): 46-50.
- [6] de Vries L J, Hakvoort R A. The Question of Generation Adequacy in Liberalized Electricity Markets[A]. Proc. 26th IAEE International Conference[C]. Prague, Czech Republic: 2003
- [7] Oren S S. Capacity Payments and Supply Adequacy in Competitive Electricity Markets[A]. Proceedings of VII Symposium of Specialists in Electric Operational and

Expansion Planning[C]. Brazil: 2000.

[8] Hobbs B F, Inon J, Stoft S E. Installed Capacity Requirements and Price Caps: Oil on the Water, or Fuel on the Fire?[J]. The Electricity Journal, 2001, 14: 23-34.

[9] 丁伟, 李星梅. 电力市场中发电项目投资风险研究[J]. 现代电力, 2006, 23(3): 84-88.

DING Wei, LI Xing-mei. Research on Investment Risk of Electricity Generation Project in Electricity Market[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(3): 84-88.

[10] De Vries L J. Securing the Interest in Electricity Generation Market[D]. Amsterdam: Delft University of Technology, 2004.

[11] 臧宝锋, 胡汉辉, 王建兴. 电力市场条件下的发电投资均衡[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 41-44.

ZANG Bao-feng, HU Han-hui, WANG Jian-xing. Investment Equilibrium in Power Generation of Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 41-44.

[12] 马歆. 对中国电力投资中存在问题的思考[J]. 特区经济, 2006, 210(7): 35-36.

MA Xin. Thinking of the Problem in China Power Investment[J]. Special Zone Economy, 2006,210(7): 35-36.

[13] Doorman G. Capacity Subscription and Security of Supply in Deregulated Electricity Markets. SINTEF Energy Research, 2003.

[14] Jaffe A B, Felder F A. Should Electricity Markets have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

[15] Rochlin C. Resource Adequacy Requirement, Reserve Margin, and the Public Goods Argument[J]. The Electricity Journal, 2004, 17(3): 52-59.

[16] Jaffe A B, Felder F A. Should electricity Markets Have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

收稿日期: 2008-03-15; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

刘国跃(1962-), 男, 博士研究生, 研究方向为能源与电力经济. E-mail:junguoia@126.com

(上接第 3 页 continued from page 3)

的有效和先进性, 而在电缆长为数百公里甚至数千公里的特高压输电线路中, 由于故障波形长距离的运行、其衰减更为严重, 频率-相位解析法的优势则更为明显。

### 参考文献

[1] Sachse W, Pao Y H. On the determination of phase and group velocities of depressive waves in solid" [J].J. of Applied Physics, Vol. 49, pp. 4320-4327 (1978).

[2] Rokhlin S I, et al.. Real Time Study of Frequency Dependence of Attenuation and Velocity of Ultrasonic Waves During the Curing Reaction of Epoxy Resin[J]. J. of Acoustic Society of Am. , Vol. 79, pp. 1786-1793 (1986).

[3] 川田 昌武. 電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法 [J]. 電気学会論文誌, Vol.115, No.10, 1168-1173 頁, 1995 年.

[4] 犬塚 博 他: “電力ケーブル故障点探査における信号処理による精度改善” T.IEE Japan, Vol.120-B, No.11, 1416-1423 頁 2000.

收稿日期: 2008-11-05

作者简介:

王柏恒(1966-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事高压直流输电电控制系统方面的研究; E-mail:wangbaiheng@xjgc.com

姚致清(1960-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统保护与控制研究;

封晓东(1962-), 男, 高级工程师, 长期从事电网运行、检修及生产管理工作。

(上接第 7 页 continued from page 7)

FU Chen-zhao, JI Sheng-chang, et al. Study of Thermal Circuit Model for the Cable Ttransformer Coil Based on Finite Element Method[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 1-3.

[14] 曹惠玲, 王增强, 等. 坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 59-63.

CAO Hui-ling, WANG Zeng-qiang, et al. Numerical Computation of Temperature Distribution of Underground Cables and Soil with Combinatorial Coordinates[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2003, 18(3): 59-63

[15] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):

185-189.

LIANG Yong-chun, LI Yan-ming, CAI Jin-ai, et al. A New Method to Calculate the Steady-State Temperature Field and Ampacity of Underground Cable System[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2007, 22(8): 185-189.

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-10-06

作者简介:

徐元哲(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力设备故障诊断的研究; E-mail:xuyuanzhe@263.com

王乐天(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备故障诊断的研究。