



# 第一章 绪论

## 1.1 引言

随着市场观点逐渐引入电力系统，系统对需求侧的观点也发生改变。用电方不再是物理意义上的负荷而是作为消费者的用户，中止这样的服务不是单纯拉闸限电而需要给予用户一定的补偿。系统运行是需要对用户侧的负荷特性、用电效益、停电意愿等因素加以考虑，这促使电力系统引入需求侧管理。

需求侧管理（**Demand Side Management, DSM**）又称需求方管理，是美国学者 **C.W.Gellings** 于 1981 年首次提出的用于电力公司工作计划、执行和监督的管理模式。其含义是，电力公司作为供应侧，采取有效的激励和诱导措施以及适宜的运作方式，与用户协力改变用电方式、提高终端用电效率，为减少电量消耗和电力需求，实现最低成本电力服务所进行的运营管理活动。

电力需求侧管理与传统的负荷管理不同，它不是电力部门单方面管理负荷，而是调动用户积极参与，并强调以优质服务满足用户的用电要求。改变用电方式，是将负荷从电网高峰时段削减或者转移到电网低谷时段，改变电力需求在时序上的分布从而有效地降低峰荷；提高用电效率是通过鼓励用户采用先进的技术和设备来达到。需求侧管理能取得的效益包括直接经济效益（如：缓解电源开发和电网建设带来的投资矛盾、降低用户的电费开支、减少燃料进口并抑制燃料价格的波动等）和间接效益（如：减少环境污染、促进节能产品市场的开发和发展、确保国民经济持续稳定地发展等）。它的内容主要可以概括为以下几个方面：

1. 负荷管理
2. 战略能源
3. 新用电服务项目
4. 电气化
5. 用户自备电源

本文研究的“可中断负荷管理”就是负荷管理的一个重要组成部分。

## 1.2 可中断负荷的概念

可中断负荷是指在电网高峰负荷时段或紧急状况下,用户负荷中可以中断的部分。可中断负荷通常通过经济合同(协议)实现。它由电力公司与用户签订,在系统峰值时和紧急状态下,用户按照合同(协议)规定中断和削减负荷,电力公司给予用户一定的经济补偿。若经济补偿适当则能激发各种类型用户在系统高峰时减少用电,从而改变负荷的低弹性,同时电力公司能回避市场风险,降低运营成本。

这个补偿是以电价的形式体现在用户成本中的。因此,实施可中断负荷管理的重要内容之一是设计合理的可中断负荷电价。一方面使用户感受到执行可中断负荷电价的吸引力,愿意按照合同(协议)要求削减或转移其高峰时的用电负荷;另一方面,使电力企业可以移峰填谷,提高电网负荷率,促进电网安全。

## 1.3 实施可中断负荷管理的意义

DSM 是对电力用户实行节电及负荷管理的一种管理模式,是综合资源计划(Integrated Resource Planning, IRP)的一部分。DSM 是 20 世纪 70 年代石油危机后发展起来的。它改变了电力工业过去单纯以增加供应满足需求的思路。IRP 把通过 DSM 节约的电力和电量也当作资源,对供应与需求两种资源的各种方案进行综合比较,寻求最优方案,取得最大的社会效益和经济效益。实施 DSM 可以使社会、电力公司、用户都受益。对社会而言,可以减少电力需求,从而减少发电资源的消耗和污染物的排放;可以调整能源消费结构,提高电气化水平,促进经济的可持续发展;可以促进用电设备的更新换代;可以增加大量的就业机会。对用户来说,可以减少电力消费,降低电费支出,企业可以降低生产成本,增强产品竞争力。对电力公司来说,可以提高发电设备利用率,降低发电成本及发电煤耗,推迟新电站建设,并减少电力建设投资。

美国、日本、加拿大、德国、法国、意大利等国实施 DSM 取得了巨大效益。美国制定了鼓励和规范 DSM 的法律法规和政策,投入大量资金,取得了巨大成效。仅 2000 年,美国为实施 DSM 投入 15.6 亿美元,节电 53.7TWh,削减高峰

负荷 22GW。2001 年，美国加利福尼亚州政府为缓解电力危机，实施新的电费补贴政策，如果用户 2001 年夏季用电量比上年同期减少 20%，这部分电量的收费返还给用户。2001 年，美国 40 个州用于家用电器和照明器具节能补贴的费用达 1.13 亿美元。

近年来，随着我国经济的快速发展和人民生活水平的提高，电力负荷特性也发生了很大的变化。“九五”以来，全国各地电网总体上都有一个共同的特点，即：年最大负荷、年最大峰谷差、年平均峰谷差逐年上升，电网平均负荷率和发电机组利用小时数呈整体下降趋势。由于高峰负荷的过快增长，从 2002 年夏季开始，我国约有 20 个省市陆续出现了高峰电力短缺状况，给经济发展和人民生活带来了负面影响。因此，在我国推行 DSM 也是十分必要的。

在这种情况下，新建扩建电厂受投资、建设周期、选址及环保等因素的制约不可能马上解决这些问题。更重要的是，这些高峰负荷时间较短，投资发电容量从长期运行的角度来看是很不经济的。可中断负荷管理正好是为电网调峰及电力负荷曲线的整型而提供的一项由用户参与的负荷管理措施，它是由电力公司与用户事先签订的可中断合同（协议），合同（协议）内容包括可中断的负荷量、中断的时间、可中断负荷的电价或补偿、提前通知的时间以及违约惩罚等，当电力系统处于负荷高峰紧张或事故状态时，由电力系统运行人员向各参与用户提出中断负荷并得到执行，从而很好的解决高峰时段负荷紧张问题，维护了电网供用电的安全性和可靠性。

可中断负荷特别适合那些可以放宽可靠性要求的工业、商业、服务业等“塑性负荷”。许多国家已广泛应用于冶金、水泥、造纸、纺织等工业用户，取得了显著的经济效益。用户愿意降低有限的用电可靠程度以换取较少的电费开支，用户的效益是电费节约与费用支出的差值，可中断负荷的潜力很大。通过可中断负荷管理措施使用户合理用电，降低单位用电成本。对一些工业负荷来说，可削减或转移其在系统高峰时的用电负荷，同时低谷电价在某种程度上可减少用户的费用支出。

可中断负荷管理集成了供电侧和用电侧两端的经济措施和技术手段。电力市场中的这种管理与传统的直接负荷控制相比，不仅在内涵上要丰富得多，其方法也更加灵活多变。它充分尊重市场环境下的公平原则，符合市场经济的客观要求。

通过与具体客观条件相适应的经济合同形式，建立一套合理的管理制度，形成带有用户反馈作用的良性闭环控制，以激励他们自愿地与调控部门合作，在负荷侧就地实现经济调度，达到双赢的目的。

## 1.4 本文的主要工作

本文首先针对需求侧管理、可中断负荷的概念、方法及电力系统中的应用的意义作了一个系统的阐述。之后对建立可中断负荷的最优多目标数学模型及补偿机制数学模型进行了探讨。接着，本文就可中断负荷管理合同的模式进行了研究，比较了各种模型的特点和适用场合，并运用本文建立的数学模型及合同模式，提出了适合杭州地区可中断负荷管理的模式。本文通过对杭州地区 40 家大用户的可中断负荷管理方面的调查，进一步运用上述结果进行模拟运算和分析，验证了杭州地区可中断负荷管理模式的正确性和可操作性，并利用决策树模型，对可中断负荷用户属性相关性进行了分析和研究，得出了初步结论。

本文的具体安排如下：

第一章：绪论，简要介绍了可中断负荷的概念及意义和本文的主要工作；

第二章：介绍需求侧管理及可中断负荷工作的相关知识，并对国内外在需求侧管理方面的研究现状做了描述；

第三章：可中断负荷管理的数学模型及成本效益分析，建立了多目标决策的可中断负荷的数学模型及对用户负荷中断的补偿机制函数，并对影响可中断负荷成本效益的有关因素做了详细的分析；

第四章：ILM(可中断负荷管理)模型分析，对各种 IML 管理模型进行了分析，比较了各中管理模型的优缺点和适用的场合，并对可中断负荷管理合同的内容做了阐述；

第五章：杭州市实施可中断负荷管理模型研究，根据杭州市电力负荷的特性和用户调查，选择了适合杭州市的可中断负荷管理模型。并运用第三章建立的数学模型，对数据进行了模拟运算和验证。

第六章：电力市场可中断用户属性研究，建立决策树数学模型，对可中断负

荷用户属性相关性进行了分析和研究，并做了用户仿真模拟运算，得出了初步结论。

## 第七章：总结和展望

## 第二章 电力需求侧管理与可中断负荷管理

20 世纪 70 年代的两次石油危机,使得如何合理科学地利用能源成为一个备受重视的课题。1973 年,美国首先提出能源需求侧管理这一新的课题,并发展成为最小成本规划和综合资源规划的问题。

当今,由于电能具有便于传输和分配,便于清洁地转化为多种其他形式的能量等优点,人们对电能的需求越来越大,电力发挥着越来越重要的作用。然而,电能的产生要消耗巨量的一次能源,主要发电形式火力发电消耗的都是不可再生的资源,产生的烟尘和  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  等有害气体对环境也有很大污染。如何科学地利用电能成为许多国家能源利用过程中的又一新课题,电力需求侧管理(DSM)应运而生。

### 2.1 电力需求侧管理(DSM)问题的几个基本概念

以下是有关电力需求侧管理的几个基本概念,它们是进行经济效益核算和方案比较的基础。

1. 电力需求侧管理:它是现代电力系统在电力市场条件下产生的用电管理模式,通过提高终端用电效率和优化用电方式,在完成同样用电功能的同时减少电力功率和电量消耗,实现低成本电力服务,达到节约能源和保护环境的目。它突破了传统的电力管理模式,改变了依靠单纯地扩大供应能力以满足日益增长的电力需要的方式,在更高层次上处理供应侧和需求侧的关系。
2. 可避免电量:由于实施了电力需求侧管理而避免的新增电量。包括终端和系统可避免两种。事实上就是节电量。
3. 可避免峰荷容量:由于实施了电力需求侧管理使电力系统避免新增的装机容量。在数值上等于发电端可避免的峰荷电力加上与其相适应的备用容量。
4. 可避免电量成本:由于实施电力需求侧管理,使电力系统避免的新增电量成本。其中也包括中断可避免电量成本。
5. 可避免峰荷容量成本:由于实施了电力需求侧管理,使电力系统避免的新增装机容量成本。

6. 单位节电成本：实施电力需求侧管理项目的标准寿命期内节约单位电量的支出费用。如：美国单位节电成本大约是 1.6 美分/kW.h，低于 4 美分/kW.h 的生产成本。
7. 单位避免峰荷容量成本：具有峰荷调整目标的电力需求侧管理技术项目，在标准寿命期内支出费用与可避免峰荷容量之比。如美国单位可避免峰荷容量成本大约是 30 美分/kW.h，大大低于 500 美分/kW.h 的投资成本。

## 2.2 实施电力需求侧管理对机制和环境支持的要求

电力需求侧管理是一项系统工程。涉及政府职能部门、电力公司、用户、项目中介机构和节能产品制造厂商。基本内容包括：调查资源、选择管理对象、设置管理目标、制定政策法规及标准、制定管理计划、选择管理手段、组织实施项目实施、评估项目实施效果等。做好以下几个方面是很必要的：

1. 政府要赋予电力公司办电和节电的双重智能。电力公司不仅要分摊办电效率，而且要分摊节电效率，改变单纯以售电收入衡量公司经济利益的做法，保证公司实施 DSM 节电的投资利润率不低于装机发电的投资利润率，提高电力公司推广需求侧管理的积极性。
2. 电力公司应更新工作概念，充分发挥实施电力需求侧管理的主体作用。必须按照供应侧与需求侧整体最小的准则制定电力发展计划，即电力最小成本计划，或综合资源规划，政府按照该准则审批该计划。
3. 推行合同能源管理。研究和制定电力部门和节电产品制造部门、经营部门及应用部门合作推广节电产品和设备的机制。
4. 逐步完善电价机制，使电能电价更加公正、合理。细分电力市场，对形成基荷、腰荷、峰荷的不同行业区别电价，从而形成不同的电价水平。

## 2.3 电力需求侧管理实施的技术支持

电力需求侧管理技术措施，基本可分为四类：

1. 提高终端设备效率：包括绿色照明技术、使用节能家电、大功率低频冶



炼技术、交流电动机调速运行技术、高效电动机、高效变压器的应用技术，控制电污染的滤波技术等。

2. 建筑节能设计和改造：包括新建筑物提高绝热保温标准和建筑物的门、窗、屋顶等部分加装绝热保温层。
3. 负荷控制技术：包括直接调控和简介调控。空调、热水器日负荷循环控制为直接调控，实行分时、分季电价，用经济手段调控峰谷负荷为简介调控。
4. 蓄热蓄冷技术：包括集中式或单元式陶瓷热存储装置、储热式和制冷式空调等。

从运行角度看，电力需求侧管理的某些手段在有些条件下可以作为电网运行的手段，把它作为一种在错峰、紧急减负荷、系统备用等情况下可以调度的资源。

表 2-1 电力需求侧管理与常规供应侧资源的比较

| 序号 | 类型          | 用途                | 特点                          | 举例                       |
|----|-------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1  | 来水过程确定的水力发电 | 描述不可调度的 DSM       | 能确定各时段所能节省的电量               | 高效照明措施                   |
| 2  | 火电发电厂       | 描述可根据需要而随时使用的 DSM | 投入运行的时间是不确定的，且出力是可变的        | 直接负荷控制                   |
| 3  | 能量受限电厂      | 描述总出力给定的 DSM      | 某时段内给定的总节电量，而此时期内各时段的出力可变   | 自备发电                     |
| 4  | 抽水蓄能电厂      | 描述改变用电时段的 DSM     | 将用电行为从高峰时段转向低谷时段，不产生节省电量的效益 | 分时电价<br>可中断负荷<br>蓄冷（热）系统 |

## 2.4 实施可中断负荷管理与可中断电价的作用

在国际上，可中断负荷是电力负荷管理的一项重要内容。其方法是通过电力

企业和用户之间签订合同（协议），通过电价激励机制，时限在系统负荷高峰时期或者紧急状态下，用户按照合同（协议）规定中断或削减负荷。实施可中断负荷措施的重要内容之一，是设计合理的可中断负荷电价。一方面使用户感受到执行可中断负荷电价的吸引力，并产生按合同（协议）要求削减或转移其在系统高峰时用电负荷的动力；另一方面使电力企业可以移峰填谷，提高电网的负荷率，促进电网安全，发电机组也能够经济稳定运行，降低运行成本。可中断负荷控制措施和可中断电价手段，在许多国家已经广泛应用于冶金、水泥、造纸、纺织等工业用户，并取得了较为显著的调荷效果，电力企业和用户都可以从中获益。如韩国采用全国 GDP/总用电量和某产业 GDP/该产业用电量，来估算停电损失，从而确定可中断负荷电价的宏观经济方法；香港地区利用已知信息，如以前的停电损失、通货膨胀率、税率等来预测以后停电损失确定可中断负荷电价的方法；中国台湾地区在 20 世纪 80 年代末、90 年代初实施了相关的可中断负荷控制，根据可避免成本理论确定给予用户优惠的负荷中断电价；英格兰—威尔士电力市场于 1995 年就率先采用需求侧报价 DSB（Demand Side Bidding）形式，大的工业用户可以在目前电能市场对削减的负荷容量进行报价。

可中断负荷参与市场时，市场的调度与一般的市场有所不同。如在北美电力可靠性委员会 NERC（North American Electric Council）制定的运行规则上，将可中断负荷明确地当作是一种事故备用；在美国加州电力市场上，可中断负荷可以直接参与日前和小时前的辅助服务市场，提供非旋转备用和替代备用，也可以直接参与实时平衡市场，提供补充能量服务（Supplemental Energy）；在纽约电力市场，可中断负荷同样可以参加非旋转备用和替代备用辅助服务市场。应该指出，研究可中断负荷参与市场报价，不仅对 ISO/PX（Independent System Operator/Power Exchange）有用，而且对售电商的购电策略、调度方式也有重要的指导意义。

实施可中断负荷管理的重要内容之一是设计可中断电价。设计这样的电价，要发挥价格杠杆作用，使得用户认为执行可中断电价对他们有利，按合同要求削减或转移其在系统高峰时的负荷，从而提高电能的社会效益。对电网公司而言，可以改善调峰形式，降低运行成本并减少电网投资建设成本。

## 2.5 可中断负荷主要研究的问题

可中断负荷实施是通过签订合同,按照合同条款履约实行的。因此,可中断负荷合同中的几个关键因素的确定就成了实施可中断负荷成败的关键。对用户来说,每个用户可中断的最大负荷是多少?不同运行状态下实际需要中断的负荷量、中断的时间确定、中断负荷的成本、提前通知时间等;对电力公司来说,除了系统安全需要的中断负荷外,还要考虑运行的经济性,如在电网高峰时段启用可中断负荷降低成本,可中断电价或给用户中断负荷补偿及由此支付的成本,用户才会愿意参与可中断负荷项目;而电力公司的补偿或可中断电价既要能吸引用户参与中断负荷项目,又要满足自身成本收益平衡,还要考虑不同地点负荷或负荷特性中断负荷的效果。

作为研究可中断负荷运作机理,这些问题从理论上归纳成以下几个方面:

1. 可中断负荷是怎样影响系统运行成本进而影响电价的?具体就是可中断负荷电价如何确定?怎样通过对用户的电费折扣,在用户的实用电量电费中体现出来?用户得到的长期收益是什么?该收益应体现在用户通过签订 ILM 合同,使参与 IML 的那部分电力容量费用得到削减。

2. 在实时的情况下,选择不同类型的可中断负荷受哪些因素的影响?主要考虑一下方面:

(1) 负荷中断的数量及提前通知时间——1 小时、1 天等;

(2) 负荷中断的持续时间——仅限于高峰时段的削减,负荷通过从高峰时段转移到非高峰时段进行较长期的削减;

(3) 负荷的特性及中断负荷的成本——低功率因素的负荷具有较低的中断成本(例如农业负荷),高功率因素的负荷中断的成本较高。

(4) 发电和网络特性——不同位置的负荷和发电资源,受限于发电输出(有功和无功)、爬坡率(ramp-rate)、电压、线路潮流等;

(5) 系统安全性——确保系统可以承受一些特定的预想事故,即预想事故引起的电压波动和线路潮流的范围不能超过某条线路、节点或发电机联合开断时的值。

3. 可中断负荷与其他调峰资源成本比较等。

## 2.6 需求侧管理在国内外研究和应用

### 2.6.1 国际上在该领域的研究和应用

美国是最早提出和实施电力需求侧管理的国家,实施过程中,前期效果并不明显,扩大试点范围和增加试点项目后,效果剧增。装机计划普遍推迟 2—5 年,综合经济效益每年提高约 6%,用户电费也有所下降。特别是节能型电力需求侧管理项目很受用户欢迎,被称为“Smart PDSM”。如美国 2000 年投资 15.6 亿美元,节电 537 亿度,减少高峰负荷 2200kW。2001 年美国加利福尼亚州出现的能源危机使每天美国许多州的电力公司认识到,解决能源危机应从需求侧寻求采取一些技术措施和经济措施减少用户在系统高峰时期的负荷需求。可中断负荷作为调峰的一个主要手段已经被美国几乎所有的电力公司采用,并且获得了相当大的经济效益和社会效益。据预测,未来几年,美国电力需求侧管理将减少社会电力需求 25,000MW,相当于同期新需求的 30%。

相对于美国电力公司的大型化和私有化,西欧电力公司结构和产权结构呈现出多样性,其实施电力需求侧管理的动机有的是出于环境考虑,有的是为了解决电力容量缺乏。电力需求侧管理项目也呈现出多样性,半数以上的项目在进行之中,效果有待进一步观察。

在东欧和非洲,由于技术和管理水平相对较低,资金来源缺乏,政治不稳定,电力需求侧管理受到一定限制。亚洲和拉美很多国家电力需求侧管理还在实施初级阶段。

加拿大也是继美国之后电力需求侧管理实施比较成功的国家之一,并已开始关注配电网的电力需求侧管理规划。表 2-2 是加拿大两个电力公司实施电力需求侧管理的有关情况。

表 2-2 加拿大两家电力公司实施电力需求侧管理的基本情况

| 公司名称    | 所有制形式 | 装机容量 /万 kW | 发电形式                       | DSM 投入资金          | 可避免电量 | 可避免峰荷    | 回收年限 | 相当于已建电源投资的比例 |
|---------|-------|------------|----------------------------|-------------------|-------|----------|------|--------------|
| 魁北克电力公司 | 国有控股  | 3600       | 水电 95%<br>火电 3%<br>核电 2%   | ¥6600 万/年<br>(加元) | 20 亿度 | 170 万 kW | 2.2  | 1/10         |
| 安大略电力公司 | 国有控股  | 2933       | 水电 25%<br>火电 10%<br>核电 65% | ¥5000 万/年<br>(加元) | 14 亿度 | 140 万 kW | 3.0  | 1/7          |

## 2.6.2 我国在该领域的研究和应用

我国在 20 世纪 90 年代引入了 DSM，国家计委、国家经贸委、科技部、国家电力公司以及大中型电力用户、有关科研机构、高等学校、社会团体做了大量的工作，开展多种形式的国际交流与合作，在区域电网和企业进行试点研究和工程示范。

在我国，可中断负荷管理和可中断电价研究工作刚刚起步，尚未见到相关成熟的研究资料及成果报道。由于我国工业用电一直占全社会用电量的 70% 以上，全国缺电局面尤其是缺峰荷电力现象已经持续 20 多年，更应该借鉴国外的成功经验，研究和实施符合我国实际的可中断负荷管理方式。

在我国推广各种 DSM 错、避峰措施已经到了非常紧迫的地步。挖掘削峰潜力具体可通过拉大峰谷价比、加大两部制电价中基本电价的比重、实施可中断负荷管理、推广冰蓄冷空调等蓄能设备以及拉限电等行政性避峰错峰措施。

目前，我国的 DSM 活动主要有：

- (1) 国家计委 DSM 试点示范项目：深圳电网 DSM 试点研究；
- (2) 国家经贸委 DSM 试点示范项目：与亚洲开发银行合作的“加强广东和浙江省电力部门需求侧管理”项目；
- (3) 国家电力公司的 DSM 活动：1995 年开始在华北、天津、福建、辽宁等电网 DSM 试点研究；1998 年成立 DSM 指导中心；1999 年年出版

《电力需求侧管理》杂志。

我国实施 **DSM** 的主要应用领域：

- (1) 移峰填谷。采取拉大峰谷电价差，实行可中断负荷电价，以及推广冰蓄冷空调、蓄热式电锅炉等措施，鼓励和引导用户避峰填谷。
- (2) 节能节电。推广高效照明器具和家用电器、高效电动机及变频调速、高效变压器等节能设备。
- (3) 能源替代。不少城市在城区禁止燃煤，发展蓄热式电锅炉，上海已开始发展燃气冷热电联产。这可以起到移峰填谷的作用，并减少电力需求。夏季是用电高峰期，而天然气则是低谷期，如发展燃气空调，既能削减电力高峰负荷，减少电力消费，又可以填补天然气季节性低谷。因此，能源替代也是 **DSM** 的一个重要领域。

## 第三章 可中断负荷管理的数学模型 及成本效益分析

可中断负荷是电力需求侧管理的一项重要内容。其方法是通过电力企业和用户签订合同（协议），通过电价激励，实现在系统峰值时和紧急状态下，用户按照合同（协议）规定中断和削减负荷。实施的重要内容之一是设计合理的可中断负荷电价；一方面使用户感受到执行可中断负荷电价的吸引力，愿意按合同（协议）要求削减或转移其高峰时的用电；另一方面使电力企业可以移峰填谷，提高电网负荷率，促进电网安全，降低运行成本。下面就建立一个多目标的可中断负荷数学模型及影响可中断负荷成本效益的因素进行论述。

### 3.1 可中断负荷的数学模型

在电力系统中，电力公司往往追求的不只是经济利益，还必须考虑到系统的安全可靠、电能质量、环境保护和生态平衡等一系列因素，因此可中断负荷管理的数学模型可以描述为一个多目标的决策模型。通过一个多目标的决策支持模型，把降低峰荷、增加电力公司收益和提高用户的用电舒适性这三个目标综合起来，找到一个折中的方案，使得从系统的角度来看，可中断负荷实施实际的负荷与计划的目标值相符，控制高峰负荷；低谷时利用可中断负荷的恢复“能量反弹”增加电力公司的负荷需求增加收入。而用户为保证自己的电力消费水平能满足舒适度要求，则必须知晓自身的必保负荷，也即本文所述的最低舒适度负荷门槛值。

#### 3.1.1 假设条件及符号含义

假设通过负荷预测电网各个节点的负荷可以预先知道；负荷控制时段覆盖整个高峰时段，包括因负荷控制产生的负荷反弹而造成新的高峰时段在内。为此把控制期分成  $n$  段相等的区间 ( $\Delta t = \Delta T/n$ )。

以下公式中的符号含义如下：

$i$ : 基本单位时间的序号 ( $i=1,2,\dots,n$ )

$j$ : 负荷组序号 ( $j=1,2,\dots,m$ )

$k$ : 可中断负荷管理措施或者方案序号 ( $k=1,2,\dots,q$ )

$\Delta T$ : 总的高峰负荷控制时段

$\Delta t$ : 单位控制时段, 以分钟计

$A_{jk}$ : 负荷组  $j$  实施可中断负荷措施  $k$  时, 在实行过程中未达到最低舒适度门槛值的总负荷数;

$B_{jk}$ : 负荷组  $j$  实施可中断负荷措施  $k$  时, 在实行过程中未能同时达到最低舒适度门槛值的最大负荷数;

$b_j$ : 负荷组  $j$  中允许同时达到最低舒适度门槛值的最大负荷数;

$X_i$ : 实施可中断负荷后时间段  $i$  内的系统平均负荷;

$c_{ijk}$ : 时段  $i$  内, 可中断负荷方案  $k$  应用到负荷组  $j$  后的负荷水平与之前的差值;

$D_{jk}$ : 不舒适度水平, 即  $A_{jk}$  和  $B_{jk}$  的函数;

$x_{jk}$ : 负荷组  $j$  实施可中断方案时,  $k$  时取 1, 否则为 0;

$L_i$ : 未实施可中断负荷方案时,  $i$  时间段内预测系统平均负荷;

$P$ : 未实施可中断负荷管理时预测的系统最大负荷;

$r$ : 表示削减的电网高峰负荷决策变量;

$R_{jk}$ : 实施可中断负荷方案  $k$  时, 与负荷组  $j$  相关的收益变量;

$m_{ij}$ : 电力公司在时间段  $i$  向负荷组  $j$  售电取得的单位净收益。

### 3.1.2 高峰负荷削减模型

在进行负荷管理后, 每单位时间内的负荷需求表示为:

$$X_i = \sum_j \sum_k (c_{ijk} x_{jk}) + L_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (3-1)$$

要减少高峰负荷就必须使高峰时每个时间段的最大负荷需求最小化, 即:

$$\text{MinMax}\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (3-2)$$



该目标可以用另外一种形式表达，即用预测的高峰负荷  $P$  与各时段控制的负荷  $X$  的差值来表示，最大化它们之间的差值，即削峰量：

$$\text{MaxMin}\{P - X_1, P - X_2, \dots, P - X_n, \} \quad (3-3)$$

这个目标的优化问题不是一个线性问题，但可以用代表电网峰荷削减量的决策变量  $r$  来进行转换，即上式可以写为：

$$\text{Max}(r)$$

st:

$$\begin{aligned} P - X_i - r &\geq 0 & i=1,2,\dots,n \\ r &\geq 0 \end{aligned} \quad (3-4)$$

### 3.1.3 电力公司收益模型

电力公司收益的优化等同于最大化采取可中断负荷方案的电力公司每个时段的售电收益之和。这样收益最大化可表示为：

$$\text{Max} \sum_j \sum_k (R_{jk} x_{jk}) \quad (3-5)$$

这里：

$$R_{jk} = \frac{\Delta t}{60} \sum_i c_{ij} m_{ij} \quad \text{表明电力公司对 } j \text{ 组负荷供电，在时段 } i \text{ 内售电收入}$$

之和。而  $x_{jk}$  则是有无实施  $k$  可中断负荷方案的标记，有则为 1，无则为 0。这样对  $j$  组负荷运用可中断负荷方案  $k$  在  $\Delta t$  内所得收益之和就是 (3-5) 式。

### 3.1.4 用户舒适度模型

用户舒适度指标是指用户能保持其生活工作质量的最低电力负荷指标，不取决于用户类型。如：热水器水温能保持某个水温所需的最少负荷就是舒适度的一个门槛值。同样空调，室内照明也都是如此。本文采用不舒适度这个指标来衡量。

应用可中断负荷管理策略带来的用户不舒适度,根据每个时段未达到最低舒适门限的负荷量来确定。在控制时段内,未达到的负荷量越少,说明服务质量(Quality of Service,QoS)越高,用户越满意。也即:

$$\text{Min} \sum_j \sum_k D_{jk} x_{jk} \quad (3-6)$$

$D_{jk}$  表示如下:

$$D_{jk} = \alpha_A A_{jk} + \alpha_B B_{jk} \quad (3-7)$$

式中:

$\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  分别为  $A_{jk}$  和  $B_{jk}$  的权系数。

模型约束:认为对于每一负荷组,至多允许实施一种可中断负荷管理措施或者方案:

$$\sum_k x_{jk} \leq 1 \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (3-8)$$

同时,未能同时达到最低舒适度的负荷数是有限的,因此存在一个最大值  $b_j$ ,而不考虑该情况下管理措施引起的更多的负荷数。

$$\sum B_{jk} x_{jk} \leq b_j \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (3-9)$$

综上所述,可中断负荷的多目标数学模型可归纳如下:

$$\text{Max}(r)$$

$$\text{Max} \sum_j \sum_k (R_{jk} x_{jk})$$

$$\text{Min} \sum_j \sum_k D_{jk} x_{jk}$$

约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} P - L_i - \sum_j \sum_k (c_{ij} x_{jk}) - r \geq 0 \quad (j=1,2,\dots,m) \\ \sum_k x_{jk} \leq 1 \quad (j=1,2,\dots,m) \\ \sum B_{jk} x_{jk} \leq b_j \quad (j=1,2,\dots,m) \\ x_{jk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,q) \\ r \geq 0 \end{array} \right. \quad (3-10)$$

### 3.2 可中断负荷的补偿机制数学模型

可中断负荷管理的一个重要内容就是中断负荷的分配和激励补偿问题。为了实现电力资源的有效利用,电力公司在确定中断负荷的分配时需要有关用户中断成本的真实信息。然而市场环境下,电力公司和用户之间存在信息的不对称,用户知道自己的真实停电成本特性,但电力公司对此却缺乏了解,这种情况会导致用户在参与可中断负荷管理时虚报其中断成本信息。下面利用确定中断阈值的办法可以较好地解决这个问题。

#### 3.2.1 计算单位负荷的购电成本

假设某电网有  $n$  个用户参与可中断负荷管理项目,考虑不同类型用户的补偿费不同,则系统购电成本为:

$$C_s = P_{mcp} Q + \lambda \sum_{i=1}^n L(i) B_c(i) \quad (3-11)$$

式中:  $P_{mcp}$  是系统边际电价;  $Q$  为系统发电上网电量;  $L(i)$  为用户中断的负荷;  $B_c(i)$  为某一类型用户负荷中断补偿费;  $\lambda$  是判别变量,有可中断负荷时为 1, 否则为 0。可以看出系统的购电成本分为两个部分: 一部分是无约束条件下

的购买电能成本；另一部分是调用可中断负荷的补偿成本。

系统单位购电成本  $C_{su}$  为：

$$C_{su} = (P_{mcp}Q + \lambda \sum_{i=1}^n L(i)B_c(i)) / Q \quad (3-12)$$

由上式可知当系统发电量  $Q$  一定时，如果高峰时容量短缺，系统就要调用可中断负荷，从而增加购电成本。

### 3.2.2 确定用户中断阈值和补偿费

假设某一用户  $i$  的利润  $W(i)$  为：

$$W(i) = \int_0^Q S(i)dQ - \int_0^Q C_{su}dQ - \int_0^Q C_0(i)dQ + \lambda \int_0^L B_c(i)dL \quad (3-13)$$

式中， $S(i)$ 表示第  $i$  个用户创造的单位容量社会效益。 $C_0(i)$ 为第  $i$  个用户单位电量引起的附加成本，包括人工成本、设备成本、材料消耗等； $B_c(i)$ 为第  $i$  个用户的停电补偿费用。上式由四个部分的组成：用电量  $Q$  带来的效益；购电量  $Q$  成本费用，附加成本费用，可中断负荷  $L$  的补偿费。用户  $i$  单位电量创造的利润  $W_u(i)$  为：

$$W_u(i) = \partial W(i) / \partial Q = S(i) - C_{su} - C_0(i) \quad (3-14)$$

在电力市场环境下，电价是变动的，在供电容量短缺的情况下，往往造成价格上升，从上式分析如果电价上涨，购电成本  $C_{su}$  增加， $W_u(i)$  就可能为 0 或者负值，作为理性消费用户应该选择停止用电。因此，这里就产生一个用户选择负荷中断的阈值电价，使  $W_u(i)=0$ ，由式 (3-14) 得到用户  $i$  的负荷中断阈值电价为：

$$P_{TM}(i) = W(i) - C_0(i) \quad (3-15)$$

由于不同的负荷效益不同，缺乏可比性。因此我们在负荷中断阈值电价去掉了负荷的附加成本  $C_0(i)$ 。负荷效益在相同的价格水平下，它可继续用电；而成

本高于或等于利润  $C_{su} \geq S(i)$  的负荷,  $W_u(i) \leq 0$ , 理性用户应选择中断负荷, 获得相应的补偿费用。

可中断负荷的补偿费  $B_c(i)$  为:

$$B_c(i) = \mu(P_{ITM}(i) - P_{mcp}) \quad (0 \leq \mu \leq 1) \quad (3-16)$$

式中  $\mu$  是一个常数, 用于调节补偿费比例。可以看出, 当  $\mu$  取 1 时, 负荷中断补偿费就是在系统边际电价为  $P_{mcp}$  时的利润。上式表明, 补偿费与负荷中断阈值电价紧密相关, 阈值电价越高, 补偿费越高; 这说明效益好, 成本低的负荷利润大, 负荷中断的阈值价格也高, 同时补偿费也高; 成本高利润低的负荷则反之, 将要优先中断负荷。这是符合市场规律的。

### 3.2.3 可中断负荷补偿机制数学模型

综上所述, 设系统目标函数为社会效益最大化, 则得:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n W_u(i) Q_i \quad (3-17)$$

st:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n Q_i &\leq Q \\ Q_i &\geq 0 \end{aligned}$$

式中:  $W_u(i)$  为用户  $i$  单位电量创造的利润;  $Q_i$  是与之对应的用电量。该式是一个典型的线性规划问题, 通过求解可获得最优负荷容量组合。

在实际运行中, 由电力公司通过程序计算, 在满足安全稳定性约束、社会效益最大化的条件下, 确定负荷中断阈值电价, 履行该价格的可中断负荷按照补偿费和相应的中断容量进行补偿。可中断负荷的中断阈值电价是供求关系决定的, 供电容量越紧张, 中断阈值价格越高, 切除的负荷越多。充分体现市场需求关系决定阈值价格, 并通过阈值电价调节市场供需关系的市场规律。

### 3.2.4 激励机制

可中断负荷实施要解决两大难题: 一是如何激励更多的可中断负荷参与系统

运营；二是如何让用户提出真实的补偿费信息。两个问题互相矛盾，补偿费低，不能激励负荷参与可中断服务；补偿费过高造成购电成本增加，电价不合理。而上述负荷中断阈值补偿函数法能有效地解决这个问题。举例说明：

设某用户可中断负荷，单位容量电能产生真实社会效益为¥100，其中：附加成本占¥60，而原材料、设备折旧、税金等占附加成本的80%（¥48）。系统非峰时段，购电成本¥18。此时该负荷的利润为：¥22，按公式（3-16）得补偿费也为¥22。在高峰电力供应紧张时，系统电价上升到¥21，此时该负荷利润减少为¥19。如果该用户申报一个合适的停电阈值价格，被系统切除，可以获得¥22的补偿。另外，从附加成本中节约¥48（不劳而获的额外收入），利润高于此时用电带来的利润。这种情况下，该用户只有负荷中断并获得补偿时利润最大，因此用户愿意积极参与可中断负荷调节，而且愿意申报一个合适的中断阈值电价。因此如果用户高报阈值电价，用户就需承担高价电费，获得利润低于补偿费；另一方面，如低报阈值电价，不仅会被优先停电，而且利润也相应减少。

### 3.3 可中断负荷的成本效益

可中断负荷的成本效益分析是可中断负荷管理研究的基础。通过系统地了解用户的停电成本组成和用电效益，可以制定合理的可中断负荷管理方案。停电成本就是停电给用户带来的损失，这与用户类型、提前通知时间、停电持续时间、停电发生时间、缺电比率等因素密切相关。相关数据通常可以通过用户调查的方式获得，调查结果已在一些系统中得到实际运用，比如英格兰电力市场中采用的**VOLL(Value of Lost Load)**指标就是临时停电造成的平均损失。而实施可中断负荷可以等效为增加了备用机组，这有助于提高系统可靠性，削弱电力市场中市场势力的影响，抑制价格尖峰，使系统更经济安全运行。本小节对可中断负荷的成本效益进行了综述，分析了提前通知时间、停电持续时间、停电发生时间、缺电比率等因素对可中断负荷成本的影响，并得到一些可供参考的结论。然后介绍了可中断负荷对提高可靠性，消除价格尖峰和减少运行费用的贡献。最后再小结了相关研究的问题。

### 3.3.1 可中斷負荷成本

可中斷負荷成本就是停電給用戶帶來的損失，即停電損失。停電損失的研究方法主要分為宏觀經濟方法和用戶調查法。

宏觀經濟方法比較粗糙，不能詳細描述停電對各產業和各用戶的實際影響程度，但在沒有進行用戶調查研究的國家和地區，該方法仍具有一定的指示意義。本文第二章曾提及韓國採用全國 GDP/總用電量和某產業 GDP/該產業用電量，來估算停電損失，從而確定可中斷負荷電價的宏觀經濟方法；香港地區利用已知信息，如以前的停電損失、通貨膨脹率、稅率等來預測以後停電損失確定可中斷負荷電價的方法。這些都是宏觀經濟方法的實際應用。

用戶調查法能夠較為真實地反應用戶的意願，並能詳細的得到各行業的信息以及中斷時間等因素帶來的影響，是現在國際上流行的一種方法。

對可中斷負荷成本影響較大的因素有：用戶類型、提前通知時間、停電持續時間、停電發生時間及缺電比率等。現在很多國家和地區都進行了用戶調查，作為可中斷負荷管理的重要依據。

#### 1. 提前通知時間

提前通知時間對用戶的停電損失影響很大，可中斷負荷運營中常常將提前通知時間作為一個重要參數加以規定。一般情況下，提前通知的時間越短，中斷負荷的補償就越高。表 3-1 給出 1998 年希臘和 1993 年加拿大有關調查結果。

分析表 3-1 的數據可以看出，停電前通知時間在 3 天之內給用戶造成的損失變化明顯，通知時間越長，減少的停電損失越大。超過三天減少的停電損失趨於恒定。這是由於提前通知時間長，用戶可以預先安排和調整生產計劃，造成的損失小；提前通知時間短，用戶不能及時調整工作計劃，停電損失率會很大！特別是當提前通知時間為零時，表示臨時停電，停電損失達到最大值。

表 3-1 有提前通知的停電損失的減少率（%）

| 用戶    | 提前通知時間 |       |       |        |       |       |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|       | <1h    | 1-4h  | 5-16h | 17-24h | 1-2d  | ≥3d   |
| 希臘    | 26.48  | 31.46 | 41.21 | 52.24  | 62.09 | 69.19 |
| 加拿大工業 | 25.70  | 37.80 | 48.90 | 53.40  | 57.70 | 64.80 |
| 加拿大商業 | 26.80  | 36.30 | 47.30 | 56.20  | 62.80 | 64.50 |

## 2. 停电持续时间

停电持续时间也是用户停电损失的一个重要参数,可中断负荷合同也常常需要对停电持续时间做出明确规定。这首先要对用户进行分类调查,如对工业、商业和居民用户分别进行停电持续时间对停电损失影响的调查,并把调查获得的结果进行归一化处理。损失的影响应与工业用户类似。需要指出,以上的调查结果都是基于用户事前不知道停电持续时间而得到的。而签订可中断负荷合同时,合同中常常规定的是停电持续时间或持续时间的上限,所以已知持续时间的停电损失对合同制定有更直接的指示意义,希腊调查结果见表 3-2。

表 3-2 已知持续停电时间的停电损失减少率 (%)

| 停电持续时间 | 20min | 1h    | 4h    | 8h    | 1d    |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 损失减少率  | 24.04 | 37.30 | 53.51 | 69.47 | 75.65 |

因为可以根据已知的持续时间制定生产计划、营业安排等,所以知道持续时间后可以进一步减少停电损失。

## 3. 停电发生时间

研究停电发生的时间对停电损失的影响也具有一定的指导意义。从统计结果(见表 3-3)来看,每个国家由于经济结构和气候等因素不同,一年停电损失最大的月份(最坏月)各不一样,但一周中,用户最不愿意停电的天(最坏天)和一天中最不愿意停电的时段(最坏时段)基本相同。

表 3-3 发生停电的最坏时间

| 国家    | 最坏月    | 最坏天   | 最坏时段          |
|-------|--------|-------|---------------|
| 加拿大商业 | 11-3 月 | 周五、周六 | 13: 00-17: 00 |
| 加拿大工业 | 12-2 月 | 周五    | 09: 00-12: 00 |
| 印度    | 5-8 月  | 周六    | 09: 00-21: 00 |

从表 3-3 可以看出,一周中用户最不愿意停电的日子是周五和周六;一天中最不愿意停电的时间是正常工作时间。不幸的是,用户最不愿意停电的时间与系



统最需要中断负荷的峰荷时段重合，这将在一定程度上抬高可中断负荷的补偿费。

#### 4. 缺电比率

缺电比率对停电损失的影响常常被忽略，其实两者密切相关。一般情况下，缺电比率越大，停电损失就越高。这是由于部分停电时，用户可以关掉次要电器或部分工序，而全部缺电时，别无选择，只能将全部用电负荷停止，因而停电损失较高。图 3-1 是某水泥厂缺电比率与停电损失的关系图。（图中：c 为停电损失， $\epsilon'$  为缺电比率）

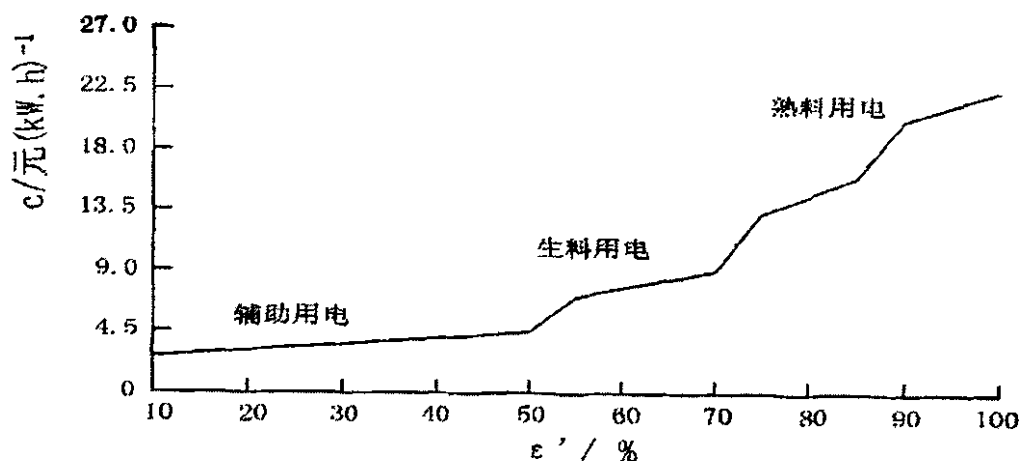


图 3-1 缺电比率与停电损失关系图

从图 3-1 可以看出，停电损失与缺电量不再是简单的一次线性关系，实际研究中通常采用二次曲线来进行模拟。研究基础就是架设停电损失与缺电量可以采用二次型模拟。公式如下：

$$c(\theta, x) = K_1 x^2 + K_2 x - K_2 \theta x \quad (3-18)$$

式中： $\theta$  表示用户类型； $K_1$ ， $K_2$  是常系数。

### 3.3.2 可中断负荷效益

可中断负荷的效益大小是一个有争议的问题，一种观点认为可中断负荷的实施具有一定的效益，但其经济效益不显著，不应该过高估价；另一种观点认为

可中断负荷在经济效益和可靠性方面贡献明显。虽然在可中断负荷效益的大小上有一些争议，但在实施可中断负荷可以提高系统性，带来一定的经济效益上却较为一致。下面对可中断负荷在可靠性贡献、削减价格尖峰和减少系统成本三个方面进行阐述。

### 1. 可中断负荷对可靠性的贡献

可中断负荷的实施能削减系统峰荷，相当于给系统增加备用机组，可大大提高系统的可靠性。可靠性的提高相当于系统向用户提供了更优质的电能，这使得电力用户以不高于原来的电价享受更好的服务。

### 2. 可中断负荷对削减价格尖峰的贡献

在电力市场中，实施可中断负荷可大大增加需求侧弹性，有利于市场运行，带来长期和短期的经济效益。短期经济效益是降低了电力市场中的价格尖峰，这可以用图 3-2 来说明。（图中：1 为供给曲线，2 为主要发电机故障时供给曲线，3 为峰荷时需求曲线，4 为可中断负荷的需求曲线，横坐标  $Q$  表示负荷容量）

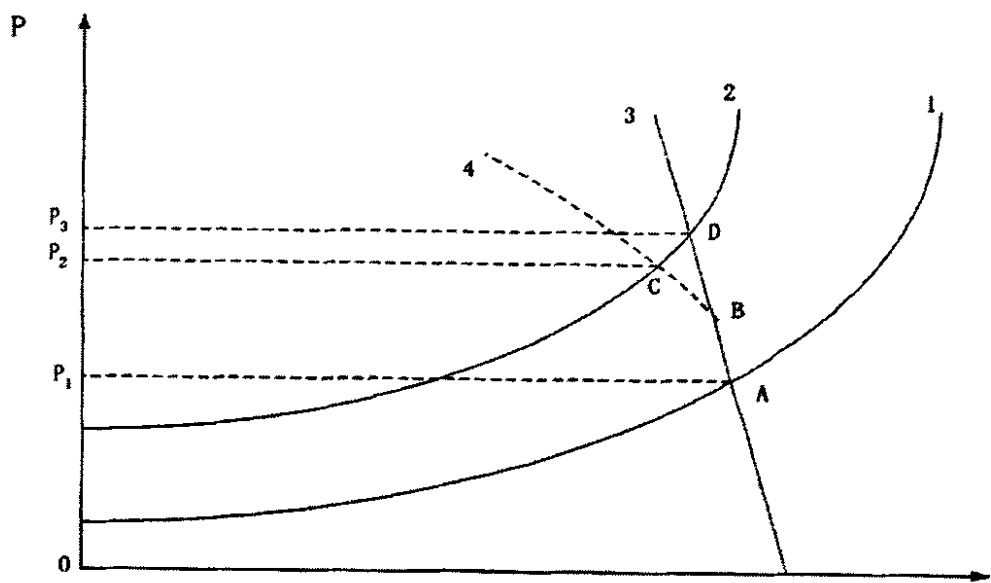


图 3-2 可中断负荷消除价格尖峰原理

从图 3-2 可以看到，正常情况下峰荷电价时供需曲线交点 A，对应的电价为  $p_1$ 。在发电机故障后，或者当一些发电厂商进行投机时，供给曲线将左移，此时如果没有可中断负荷，价格将飞速上涨，价格达到  $p_3$ 。该情况对应图中 D 点。

如果市场预先购入可中断负荷，则需求曲线弹性增大，如图 ABC 曲线所示。此时市场出清价  $p_2$  对应于 C 点。很明显， $p_2 < p_3$ ，即实施可中断负荷后削减了价格尖峰。而价格尖峰的减弱可以带来长期的经济效益，体现在降低平均电价，减少价格波动商。其效益可以用平均电价的减少值与双边合同电量的乘积估计。

### 3. 可中断负荷对减少系统成本的贡献

可中断负荷不仅可以直接节省运行费用，还可以减少发电机输配电设备的容量投资。即实施可中断负荷减少的成本既包括可避免运行成本，还包括可避免容量成本。

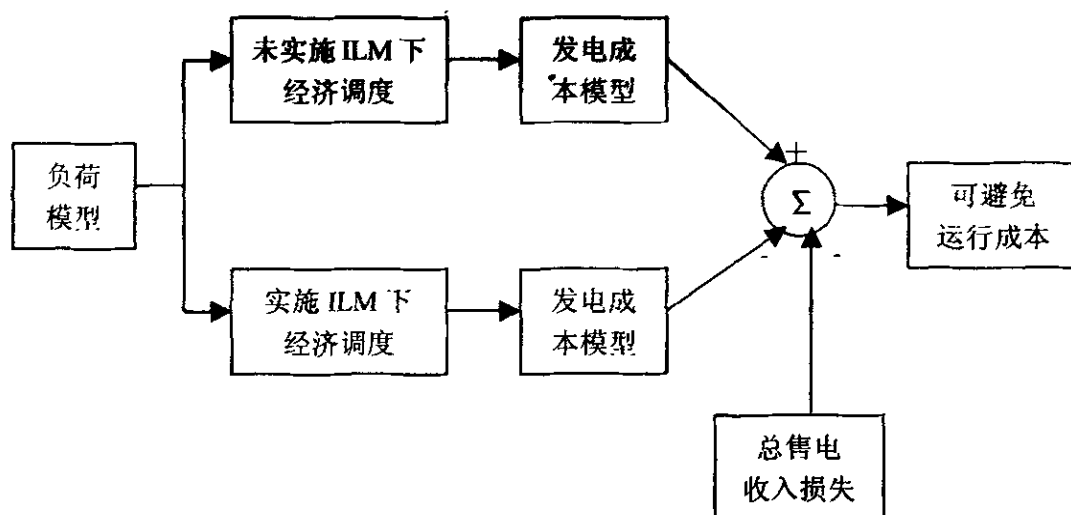


图 3-3 可避免成本运行成本的估算

从图 3-3 中可以看到，计算可中断负荷可避免成本主要示比较有可中断负荷和无可中断负荷两种情况的系统经济运行成本的差值，并计及总的售电收入的损失。可中断负荷可避免容量成本计算思路与可避免运行成本相似，主要不同点是采用系统规划成本而不是经济运行成本作比较。

## 3.4 本章小结

可中断负荷数学模型和成本效益分析是可中断负荷研究的基础，本章对可中断负荷管理的目标及需要解决的主要问题建立了优化数学模型。第二部分对多个国家和地区的停电损失和研究数据进行了汇总和分析，并讨论了实施可中断负荷

带来的效益，获得以下结论：

1. 中断负荷成本与提前通知时间在时间较长时成线性关系；
2. 单位时间中断负荷成本与停电持续时间成指数形式下降；
3. 中断负荷成本与缺电量通常可以采用二次型来近似模拟；
4. 可中断负荷的效益主要体现在对系统的可靠性贡献和经济效益两个方面。

## 第四章 可中斷負荷管理（ILM）模型分析

在電力市場中，各個參與成員的目的是追求自身利益的最大化。為獲得最大的利益，必須在遵循一定市場規則下做出最優化的決策，而且其決策行為必然受到其他成員的決策影響。市場就意味着風險，電力市場也不例外。電力市場下的 ILM 同樣存在着風險。可中斷負荷是指在電網高峰負荷時段，用戶負荷中可以中斷的部分，這也是 DSM 的重要內容。對於 ILM 的實施，電力公司是主導方，然而用戶有權選擇不參與或者不配合。如何調動用戶的主動性，積極和電力公司配合共同參與 ILM 等問題，首先需要解決可中斷機制設計和可中斷電價確定兩個關鍵問題，也就是要設計出科學合理的可中斷電價模型。

### 4.1 基於動態潮流优化的可中斷負荷管理模型

這種方法是在傳統的潮流优化模型里考慮可中斷負荷參與优化調度對於潮流优化的影響，用動態潮流优化考慮可中斷負荷的 DSM 模型，利用目標优化函數可以確定可中斷負荷的電價。為了能把動態潮流优化引用於 ILM，其建模過程考慮如下幾個問題：

- 1) 給予用戶的短期折扣，即用戶由於中斷負荷而得到補償；
- 2) 負荷持續的時間；
- 3) 負荷特性及負荷成本特性，其中涉及到各種不同功率因素的負荷削減成本；
- 4) 發電和網絡特性，包括電廠的發電成本及線路於不同負荷的網損；
- 5) 系統的安全性，發電機有功、無功以及電壓幅值不能超過或小于給定值；
- 6) 新建電廠的成本，假如我們不施行這種負荷管理方法，當用戶的電力需求越來越高時，我們必須新建電廠以滿足峰荷時的正常供電，如此就會帶來巨額新建電廠費用以及電廠運行維護費用。

除此之外，目前 ILM 分析還引入以下一些特性：

- 1) 不同功率因數和持續削減的負荷節点上可利用的可中斷負荷範圍考慮到

负荷削减对有功、无功潮流的等式进行修正；

- 2) 将网络约束和动态约束联系起来；
- 3) 计算给予用户实时电价折扣；
- 4) 计算从可中断负荷项目中获得的总利益；
- 5) 当可中断负荷的最优选择和电价折扣的问题解决了，就再确定从长远来看因为新建电厂的减少而带来的长期利益。

基于动态潮流优化模型，可中断负荷电价模型的目标函数将表示为：

系统运行总投资 = 电厂的有功出力成本 + 用户削减负荷成本 + 新建电厂建立成本 + 线路损耗成本 + 发电设备和无功补偿器的无功出力成本

上述可中断负荷电价模型是一个典型的非线性规划问题，即电力系统中的潮流优化问题。其中目标函数是网络系统的投资运行费用，而等式约束条件则为一组基本潮流约束等式，与普通的潮流等式不同的是，这种把可中断负荷削减也作为一种资源参与系统调度。这属于典型的需求侧管理模型。

从这种模型中，虽然可以根据优化目标得出可中断电价，但这种模型更为关注的是最优潮流，亦即，在确定了可中断价格以后，根据模型确定出的是在系统哪个节点上中断相应的负荷才保证会使系统的潮流最优。因此，在实际的可中断负荷管理中，特别是如何确定合理的可中断价格，这种模型存在局限性。

## 4.2 基于可避免成本理论的可中断负荷管理模型

运用可避免成本和可避免投资成本设计可中断优惠电价、确定用户电价折扣的数学模型流程如图 4-1，图 4-2 所示

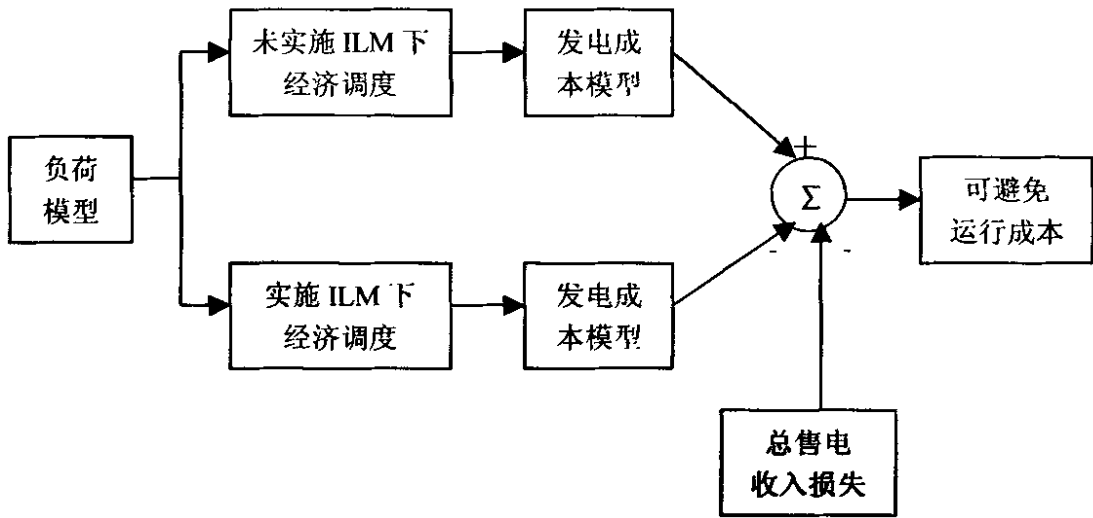


图 4-1：可避免运行成本估算

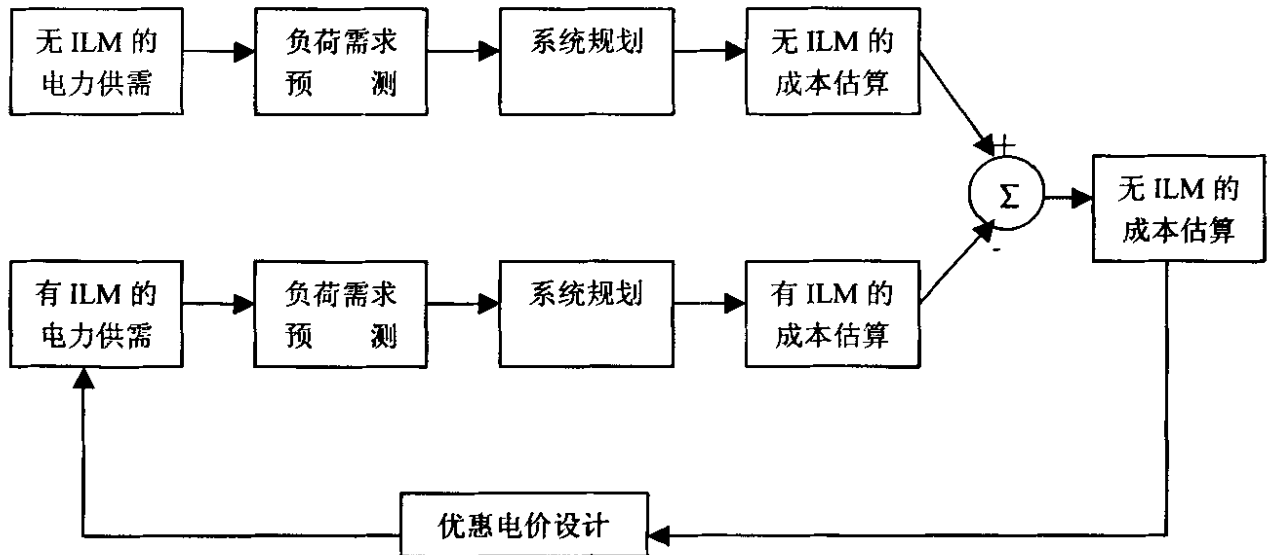


图 4-2：可避免投资成本估算

模型的數學表達式可以由下式確定：

電力公司給用戶 K 的每千瓦合理的優惠價格 = (可避免運行成本 × 負荷中斷時數 + 年可避免投資成本) × 用戶 K 實際中斷負荷與協議中斷負荷之比的效用因子

採用可避免運行成本和可避免投資成本設計可中斷優惠電價的方法，原理簡單清晰，容易被各方認可。但用這種方法確定的可中斷優惠電價要想被用戶接受，就必須反映用戶負荷中斷成本的真實性。因此，需要對與用戶有關的影響可中斷負荷成本的用戶類型、停電損失等因素做大量的調查統計與數據分析。目前的研究方法主要分為宏觀經濟方法和用戶調查方法。宏觀經濟方法比較粗糙，不能詳細地描述各因素對各產業和各用戶的實際影響程度；用戶調查發能較為真實地反映用戶的意願，並能詳細地得到各行業的信息以及各因素帶來的影響，是現在國際上比較流行的一種方法。但是，無論如何，明確影響可中斷負荷成本的主要因素和影響程度是至關重要的，要做到這一點在我國目前電力市場的條件下其工作量和工作難度是很大的。

### 4.3 備用輔助服務模式的可中斷負荷管理模型

隨着電力市場競爭逐步加劇，ISO 可支配的緊急備用資源越來越少，為了電網在負荷高峰期和緊急情況下的安全穩定運行，當前在許多國家的電力市場中，都已經或準備把 ILM 作為電網可提供的一項主要輔助服務，尤其是作為緊急備用服務。例如：在北美電力市場中，通過北美電力系統可靠性委員會(NERC)頒布相關條例，ILM 已作為電網積極備用服務的措施之一；澳大利亞電力市場中，同時將 ILM 作為頻率控制服務措施和電網負荷平衡服務措施；瑞典的電力市場中也將 ILM 作為一項輔助服務，但是到目前為止，瑞典尚未確定 ILM 輔助服務價格。因此，隨着我國電力市場改革的進一步深入，有觀點認為，ILM 在我國電力市場作為備用也是大勢所趨。

這種 ILM 措施主要以雙邊遠期合同為主的電力市場，對提供可中斷服務的用戶採用招標方式，設計可中斷負荷市場結構。ISO 與可中斷負荷服務的中標者簽訂可中斷負荷合同。這樣形成的合同是優化的。從理論上說，ISO 與報價



最低的用户签订的可中断负荷合同是最优的，但事实上并非如此。实际运行中，会出现例如输电拥堵、网损增加以及无功支持的需求增加，等等不利因素。例如，当有一个用户的可中断负荷服务投标价格低，但距离远，如果 ISO 选择它提供可中断负荷服务，那么可能增加电网潮流，产生不利的情况。

为了解决上述不利因素，这种模型中采用最优潮流方法（简称 OPF）来模拟分析可中断负荷的市场特性、用户投标设计方案、用户投标的地理位置因素以及最终确定的优化合同。

这种方法对电力市场下的系统优化运行具有一定的指导意义，因为其更注重的是在系统什么节点，中断多少负荷才是系统的最优运行方式，对一个各项条件很好的电力市场具有指示意义，在缺电或完全市场化的电力系统实际应用中存在一些偏差。

#### 4.4 基于远期合同的可中断负荷电价模型

这种方法是利用金融管理工具来进行风险规避，主要采用双边合同的方式，其中包括：电力差价合同（单边和双边）、灵活电力远期合同、电力期货即可选择远期合同（单边和双边）。

已经有越来越多的市场参与者认识到了电力市场中风险管理的重要性并积极采用合适的远期和期权等风险管理工具来回避或控制风险。在电力市场中，结合期权思想的可选择电力远期合同不仅能使参与者回避不利情况下的利益损失风险和保留有利情况下的获利机会，而且具有形式简单和易于操作等特点，因此得到了广泛的应用，如允许电力公司违约并拒绝接受独立发电商(Independent Power Producer, IPP)的供电或者中断对用户的供电等。

目前较为常见的 IPP 和电力公司之间的可选择远期合同是一种结合期权思想的可中断供电合同模型。在该模型中需要规定两个价格(即合同电价和中断电价)，当合同交货时电力公司根据其边际发电成本和中断价格的大小来决定是否需要中断 IPP 的供电。电力公司中断口 PP 的供电后给予其机会成本补偿并附以相应的信息补偿，若模型设计合理则双方均能从中获利。

这种方法实质上可以和前面所述的借助于金融工具的可中断负荷管理模型有一些类似之处，实际上在可中断负荷管理模型研究中可以划归为一类问题研究，只是在处理方法和侧重点上有所区别。

文献[33],[34]基于电力公司和 IPP 各自发电成本的不确定性提出了各自理性的合同定价模型，但没有给出双方在合同电价不一致时的仲裁方法。文献[35]提出了一种新的带有双边期权性质的电力远期合同的定价方法，在该方法中买卖双方可根据自身利益实时地转嫁市场风险。文献[36]采用蒙特卡罗模拟方法求解出复合电力期权的价格并提出了该期权在无套利条件下的定价方式。

#### 4.5 需求侧竞价的可中断负荷电价模型

这种可中断负荷成本模型是基于 POOL 模式下，用户利用自身的负荷可中断能力实施需求侧竞价（BSD）原理建立的。

分析对比 BSD 与系统调峰机组总调峰成本之间的关系可以看到，可中断负荷通过竞价参与发电计划后，会对系统的边际电价产生影响。在确保参与 DSB 用户削减的负荷在其他时段能够得到尽快回复的前提下，DSB 可以降低系统边际电价。DSB 用户停电的持续时间越短，其单位 DSB 成本越低，POOL 更愿意将 DSB 用户纳入发电计划安排中，取代系统发电成本较高的边际机组；当然，如果削减的负荷得不到回复，在电网的高峰负荷期间，很容易由于 DSB 用户的参与使得电网出现极高的尖峰价格。所以在安排用户参与发电竞价过程的同时，合理安排好用户在其他时段的用电计划也是很有必要的。另外，需求侧竞价避免了机组启动及空载运行成本，而且不受最低出力的限制，DSB 的竞争力还体现在其不受最低发电出力以及机组启停这一部分固定的费用的限制。

这种计算可中断负荷的方法简单、直接，在目前电力紧张的情况下，具有一定的实用性。但这种方法似乎对可中断电价的机理缺乏进一步的研究，缺乏坚定的理论依据，需要进一步充实。

#### 4.6 激励相容的可中断负荷管理模式

这是目前国内研究最多的一种方法。在可中断合约设计中,不同类型的用户具有不同的中断成本和中断能力,即每一位用户拥有的私人信息不同,而这些私人信息对于电力公司来说不是“共同知识”、即用户的“类型”是不可知的,需要用户自己上报。为达到利益的最优分配,电力公司必须根据用户上报的私人信息或者“类型”来给予相应的优惠。电力公司如何设计出一种激励合约,或博弈规则,以促使用户主动上报其真实类型,实现电力公司效用最大化,便是机制设计问题。

在信息经济学中,常将拥有私人信息的参与者称为“代理人”,不拥有私人信息的参与者称为“委托人”。该定义隐含的假定是,知情者的私人信息(行动或知识)影响不知情者的利益。在中断管理的激励合约设计中,电力公司是一个委托人,用户则为代理人。电力公司虽然可直接要求用户报告自己的类型(如中断成本和中断能力),用户可能不会报告真实情况,除非电力公司能够提供用户足够的激励(货币的或者非货币的)。提供激励是有成本的,因此电力公司面临着成本与收益的交替问题。

假设电力公司对用户的缺电成本特性具有一定的估计信息,在考虑用户最大可中断负荷限制的基础上,利用激励机制,该机制具有引导用户自愿披露真实信息的激励相容特性,设计出优化的可中断负荷管理合同模式。

这种模型与其他方法比较,适当改变优化目标就能适用于负荷中断分配的不同电网运行情况,如:

第一种可能是在紧急情况下,且可供利用的区外电力有限,为保证电网供电的安全可靠,必须中断一定数量的负荷,电力公司将决定每个可中断用户的负荷中断量,使得总的用户缺电成本最小;

第二种可能是电力公司可以按一定价格向区外售电的情况下,基于经济效益方面考虑,在区外售电价格较高时,充分利用本地区可中断用户的灵活性,来获取更多的经济利益,此时电力公司将决定每个可中断用户的负荷中断量,使得其总利润最大。

利用激励相容的原则,便可在诱导用户透露真实信息的基础上,得到用户和电力公司都比较满意的可中断负荷管理模型。这种模型的方法简单,直接,易于被用户和电力公司接受。因为在电力市场中,对用户来说,如果电能成本占产品

总成本的比例较大,在负荷高峰时期购电成本上升,可能造成经济效益下滑的风险;对于电力公司来讲,如果不能很好的预测高峰负荷的分布状况,合理确定可中断负荷管理方案,就可能面临巨大经济损失的风险。考虑用户利益,兼顾电力公司所面临的两种负荷中断可能性,选择最优的可中断负荷管理方案将是保证双方满意的解决矛盾的最佳方法。

激励机制的引入缓解了电力公司在负荷较重时中断供电的概率较小而导致总支出攀升的情况,即回避了其无法有效利用以一定代价购入的中断权利的现象。它诱导发电侧根据市场情况表现出较强的市场灵敏度和供应弹性,在电力公司合适的中断供电方案下双方均有获利的机会。

## 4.7 可中断负荷合同内容的确定

### 4.7.1 合同应包含的内容

可中断负荷合同应能反映可中断负荷的特性并应明确规定相关费用。参照现行市场中可中断负荷合同,合同内容应包括:

1. 合同有效期;
2. 提前通知时间;
3. 中断持续时间;
4. 负荷中断容量;
5. 补偿费用。

合同有效期限指按本合同内容进行可中断负荷管理的有效时间;提前通知时间和中断持续时间规定了该可中断负荷的基本特性;中断容量和补偿费用共同决定了购买费用。表 4-1 中给出了现行电力市场中的可中断负荷合同内容。

表 4-1 现行电力市场中的可中断负荷合同

| 国家(地区) | 合同形式 | 最小切除容量    | 持续时间              |
|--------|------|-----------|-------------------|
| 加州 ISO | 一般合同 | 1MW       | 每次 2-8h<br>每月<30h |
| 纽约 ISO | 一般合同 | 1MW 和 2MW | 每次<1h             |
| 加拿大    | 月合同  | 1MW       | 每次>4h             |

|        |      |        |                  |
|--------|------|--------|------------------|
| 台湾 A 型 | 一般合同 | 5MW    | 每次=6h            |
| 台湾 B 型 | 一般合同 | 所有工业负荷 | 每次<6h<br>每年<100h |

#### 4.7.2 停电持续时间的分类

签订可中断负荷合同时，需要规定停电持续时间。停电持续时间长度应该具有较强的代表性，其划分类型不能太多，种类太多就趋于复杂，不便推行。考虑我国实际情况，停电持续时间分为两类，包括停电持续时间为 4h 和 8h 两类。这样分类的原因在于：

- (1) 由于普遍采用 8h 工作制，4h 正好为一半。采用如上方案实施可中断负荷便于安排生产经营计划。
- (2) 从图 4-3 的我国和发达国家调查数据的拟合曲线中，可以看出 4h 是单位停电损失的一个转折点。
- (3) 持续时间只有 2 类的原因是：从表 4-1 中可以看出，现行市场中某个国家（地区）的可中断负荷合同中停电持续时间最多只有两种。
- (4) 采用固定的停电持续时间，是因为我国正处于电力市场改革初期，参照其他国家电力市场初期的做法，应该采用较为简单的模式。

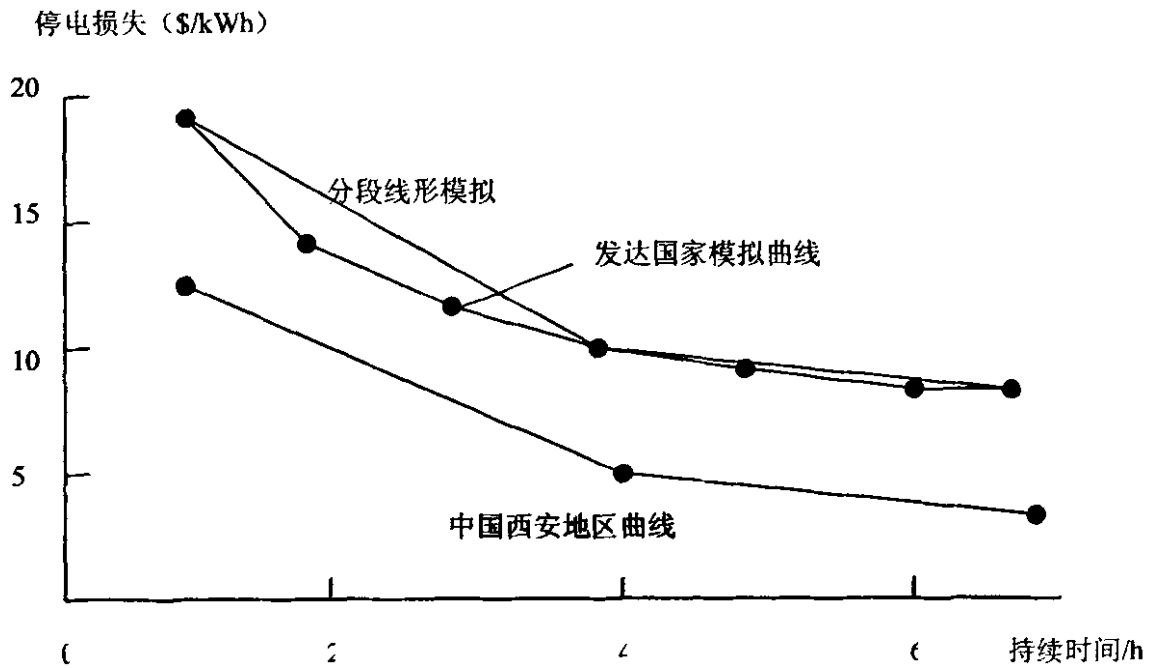


图 4-3: 停电损失与停电持续时间关系图

#### 4.7.3 合同的有效期和最小切除容量

为避免频繁签订合同给电力公司和用户带来的麻烦，合同有效期应该较长；由于电网电源建设、负荷需求变化等多种因素的影响，合同的有效期也不能过长。合同有效期建议为 6 个月，即半年一签。这样规定的原因是：

- (1) 从国外的统计结果可以看出（见表 4-2），每个国家由于经济结构和气候等因素不同，一年停电损失最大的月份（最坏月）各不一样。但一年中停电损失最大的情况基本集中在一段时间，可以签订合同确定这段时间内的可中断负荷管理，在其余时间另签合同；

表 4-2 最大停电损失发生的月份

| 加拿大商业 | 加拿大工业 | 印度  | 希腊   |
|-------|-------|-----|------|
| 11-3  | 12-2  | 5-8 | 6-11 |

- (2) 我国电力公司安排运行方式分为夏季方式（3 月-9 月）和冬季方

式（9月—次年3月），半年一签负荷这种方式。

可中断负荷管理主要面向大用户，从表 4-1 可以看出，只有大于某个给定容量（如：1MW）的用户才能参与。在我国这个门槛可以适当放低，这里将最小切除容量定为 0.5MW。

#### 4.7.4 可中断负荷合同类型

综合考虑停电持续时间、合同有效期和最小切除容量，表 4-3 给出我国可中断负荷合同的分类。

而合同中的负荷可中断容量以及可以得到的补偿费用可由用户报价得到。一般说来提前通知时间越短，补偿费用越高。

表 4-3 可中断负荷合同类型

| 类型     | 合同有效期/月 | 最小切除容量/MW | 中断持续时间/h |
|--------|---------|-----------|----------|
| 中国 A 型 | 6       | 0.5       | 每次=4     |
| 中国 B 型 | 6       | 0.5       | 每次=8     |

# 第五章 杭州市实施可中断负荷管理模型研究

## 5.1 引言

由于我国电力建设的相对滞后,近年来,“电荒”给我国经济建设和社会发展带来了巨大的负面影响。2003年全国共有22个省(市、自治区)出现了拉闸限电,而华东电网形式则尤为严峻。华东电网2002年电网最高用电负荷中的降温负荷为1600至1700万千瓦,超过统调装机容量的30%,用电最大峰谷差达到818万千瓦,而且2002—2004年夏季高峰时期全网连续出现大范围高温天气,系统负荷同时率超过0.992在高峰时段电力供应严重紧张的情况下,浙江作为华东地区经济发展较快的省份之一,电力供应紧张局面也十分严重,其中杭州市的情况尤为突出。

## 5.2 杭州地区电网运行现状

近几年来,杭州地区国民经济持续快速增长,电力需求旺盛,电力供应紧张局面日趋严重,一度缓和的供需矛盾日益凸现。进入新世纪来,全地区用电量年增长率连续保持在10%以上,并呈现出一下特点:

- 1) 用电量持续增长。据统计,2003年全社会用电量为230.79亿千瓦时,2004年达到256.88亿千瓦时,比上年增长11.3%。2005年全地区用电增速进一步加快,份全社会用电量为303.31亿千瓦时,同比增长18.1%。
- 2) 电力供需矛盾日益加剧。由于电源建设相对滞后,导致电力有效供给不足,供需缺口扩大。2005年上半年整点最高负荷达399.92万千瓦,出现在2005年6月22日22:00,同比增长了33.39%;非整点网供最大用电负荷405.84万千瓦,出现在6月27日21:20,比去年上半年最高负荷302.66万千瓦,净增了103.18万千瓦,创历史最高水平。杭州地区的由原来的季节性,时段性缺电转变为现在的持续性深度缺电。
- 3) 统调负荷逐年提高。2005年上半年全社会最高用电负荷达450万千瓦左右,网供平均最大负荷302万千瓦,同比增长了22.26%。



4) 全网负荷率急剧增高, 2004 年, 杭州地区电网负荷率在 95% 左右, 2005 年, 由于夏季高温天气有所缓解, 负荷率略有下降, 但也基本维持在 90% 以上。杭州地区 2004—2005 年上半年全网负荷率情况对比见下表:

|     | 2005 年 (%) | 2004 年 (%) |
|-----|------------|------------|
| 1 月 | 92         | 91.5       |
| 2 月 | 85.2       | 96.2       |
| 3 月 | 91.1       | 96.2       |
| 4 月 | 92.3       | 95.1       |
| 5 月 | 91.1       | 95.2       |
| 6 月 | 90.1       | 95.1       |

表 5-1. 杭州地区 2004—2005 年上半年全网负荷率情况

5) 拉电限电次数频繁。杭州电网 2005 年上半年累计拉电 11445 条次, 累计拉电负荷 2028.73 万千瓦, 累计损失电量 13435.82 万千瓦时, 其中日累计拉电条次超过 400 条的天数有 4 天, 其中最多的一天拉电 493 条次 (1 月 11 日)。上半年拉电最多的地区是萧山区, 拉电次数达到了 4681 条次。

造成杭州地区当前电力供求紧张矛盾的主要原因:

- 1) 电源建设速度未能及时跟上或适当超前于经济建设的发展速度;
- 2) 地方经济快速增长, 呈现出“高开局面, 高位平台, 高走态势”的喜人景象, 投资飙升、消费趋旺, 出口猛增, 三大需求拉动力持续增强;
- 3) 2003 年以来, 夏季出现持续高温少雨天气, 最高气温达到 38—39℃, 防暑降温 (空调) 负荷急剧上升, 加大了电力供应紧张局面;
- 4) 电价变化的影响。城乡用电同网同价后, 改善了农村投资环境, 拉动了农村用电消费, 其释放效应带动了用电快速增长。

由于电力供应增幅明显小于用电需求增幅, 夏季用电高峰时, 杭州地区电力供应出现缺口。自 2002 年以来, 杭州电网不得不采取包括高能耗企业停产、企业轮休和可转移、可中断、负荷管理控制及超供电能力紧急限电在内的用电错峰办法。2005 年, 全市基本完成对 315kVA 及以上工业、商业等用户电力负荷控制终端 9147 台, 可监视负荷 247 万千瓦左右, 可控负荷 117 万千瓦左右。据统计,

市区已投入负控装置超负荷自动跳闸 5320 户，日均压减负荷 9.3 万千瓦，累计压减负荷 46.9 万千瓦。在 2005 年夏季用电高峰期间，发挥了一定的作用。

为了保证电网安全稳定运行，合理配置电力资源，缓解高峰期用电进帐局面，实施负荷管理迫在眉睫。而以往夏季高温时杭州地区实施的用电错峰方案主要是一种依靠行政手段的措施，与市场环境下的经济调节存在差距。因此，探索符合杭州电网实际的负荷管理模型，特别是可中断负荷管理模型势在必行。

### 5.3 杭州市电网可中断负荷管理模型选择

从以上分析可以看出，杭州市电网缺电形式十分严重，特别是缺高峰电力的情况更加突出。为了缓解杭州电网电力供求紧张的矛盾，在加紧电源建设的同时，根据杭州电网这几年的负荷管理经验，实施可中断负荷管理是一种非常有效的方法。因此，需要设计符合杭州电网实际的、行之有效的可中断负荷管理方案。

根据对现有的可中断负荷管理模型分析，接合杭州电网实际情况，选择激励相容可中断负荷管理模型来进行研究。

首先，这种可中断负荷管理模型基本符合目前我国电力市场的现状。在我国电力系统由计划经济模式向市场模式转变的过渡期中，系统运行管理方式也必须由行政命令逐步转变为经济调控模式；

其次，杭州电网目前存在严重缺高峰电力的现状，急需一种行之有效的方法进行电网调峰，这种模式能够适应杭州电网的现状；

再者，由模型的设计思想可以看出，这种模型具有能适用于负荷中断分配的不同优化目标，兼顾用户和电力公司双方利益。如电力公司利润最大或用户缺电成本最小等，对以后的发展具有灵活性；

第四，杭州地区已于 1993 年起要求对所有工业用户实行峰谷分时电价，在此基础上，又于 2000 年起在居民用户范围内推行峰谷分时电价，目前已拥有居民峰谷电价用户 37.4 万，占到全部居民户数的 41.5%。峰谷分时电价的实施，其激励作用取得了很好的移峰填谷效果，总结了丰富的经验，进一步探索峰谷分时电价和可中断负荷电价的有机结合，既符合市场经济的客观要求，又具有很强的灵活性，使其在电力负荷调整中，扬长避短，发挥出更高的效果。

### 5.3.1 用户缺电成本函数的确定

参考第三章式 (3-18), 用户的缺电成本与负荷的中断量成二次函数关系, 设用户的缺电成本函数为:

$$C(x_i, \theta_i) = K_{1j}x_i^2 + K_{2j}x_i(1 - \theta_i) + K_{3j} \quad (5-1)$$

其中,  $i=1,2,\dots,N$  表示参与负荷中断的用户;

$j=1,2,\dots,m$  表示行业类型;

$K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, \dots$  为各行业缺电成本系数;

$\theta_i$  为用户的负荷中断能力。

$K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}$  根据历史的各类行业用户缺电成本调研数据, 利用统计学的方法确定 (显然  $K_{3j}=0$ )。

$\theta_i$  由用户类型、行业特点和用户负荷特性确定。

初步研究中, 根据已有的文献资料, 结合所选参与负荷中断的用户特点, 选取  $K_{1j}, K_{2j}$  分别为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{机械} & k_{11}=0.0005, \quad k_{21}=1.5 \\ \text{电子} & k_{12}=0.0002, \quad k_{22}=1.0 \\ \text{食品医药} & k_{13}=0.0004, \quad k_{23}=1.3 \\ \text{建材} & k_{14}=0.0001, \quad k_{24}=0.6 \\ \text{纺织} & k_{15}=0.0003, \quad k_{21}=1.2 \end{array} \right.$$

用户的中断能力对模型的优化会有一些影响, 为了简便计算, 初步估算结果, 我们忽略参与负荷中断用户的中断能力, 为了简化计算, 去  $\theta_i=0$ , 故设用户简化的缺电成本函数为:

$$C(x_i) = K_{1j}x_i^2 + K_{2j}x_i \quad (5-2)$$

其中:  $i=1,2,\dots,N; \quad j=1,2,\dots,6$

### 5.3.2 用户中断容量和补偿成本的确定

在考虑用户和电力公司双方利益的前提下,电力公司为保证电网供电的安全可靠,以总的用户缺电成本最小为优化目标,即:

$$\min_{x_i} \sum_{i=1}^N C(x_i) \quad (5-3)$$

$$\text{st:} \quad x_i \leq x_{i, \max} \quad i=1,2,\dots,N \quad (5-4)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = D \quad (5-5)$$

其中,  $D$  为需要中断的总负荷量;

$x_{i, \max}$  为用户的最大可中断负荷量。

此优化问题得一阶最优条件可表示为:

$$\frac{dC_i}{dx_i} = \mu - \lambda_i \quad i=1,2,\dots,N \quad (5-6)$$

其中,  $\mu$  为约束式 (5-5) 的拉格朗日乘子;

$\lambda_i$  为约束式 (5-4) 的拉格朗日乘子。

综合式 (5-2) 和式 (5-6) 可得:

$$2k_1x_i + k_2 = \mu - \lambda_i \quad i=1,2,\dots,N \quad (5-7)$$

为了充分体现激励作用和用户的利益,诱导用户积极配合电力公司参与负荷中断管理,我们把电力公司对用户的被中断负荷的补偿支付分为缺电成本补偿和对用户合理的让利补偿两个部分,即:

$$y_i(x_i) = C_i(x_i) + k_j x_i \quad i=1,2,\dots,N \quad (5-8)$$

其中,  $y_i(x_i)$  为电力公司对用户的被中断负荷的补偿支付;

$k_j$  为电力公司对参与负荷中断的用户合理让利补偿系数,由供电公司根据各类用户的历史数据,结合用户的缺电成本,以及用户对电力公司的效用等因素,分析对比得出。根据杭州电网的实际情况,以及五大行业对实行负荷中断的反应

度，在初步计算中我们取  $K_j$  如下：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{机械} & k_1=0.05 \\ \text{电子} & k_2=0.14 \\ \text{食品医药} & k_3=0.08 \\ \text{建材} & k_4=0.20 \\ \text{纺织} & k_5=0.11 \end{array} \right.$$

### 5.3.3 用户负荷中断方案的确定

目前，我国正处于电力市场的培育阶段。一般认为，对于向电力市场过渡期的电力系统，可中断负荷研究的侧重点有所不同。电力市场过渡期的特点是市场还处于探索阶段或者市场机制还不够完善；但有关供电观念已经开始转变，认为供电是一种服务。电力市场过渡期的可中断负荷管理主要是通过合同形式进行，合同内容与电力市场环境下合同类似。但是，由于没有形成有效的电力市场，电价信息未知或者不能完全真实反映电能成本的信息，过渡期的可中断负荷研究不能完全基于电价进行，中断条件主要应该根据可靠性指标进行。而该类负荷的定价不再是期权计算而是某类优化问题。

由上述分析知，电力公司根据用户缺电成本最小的优化目标，确定各用户可中断容量和可中断电价方案的原理框图如图 5-1 所示：

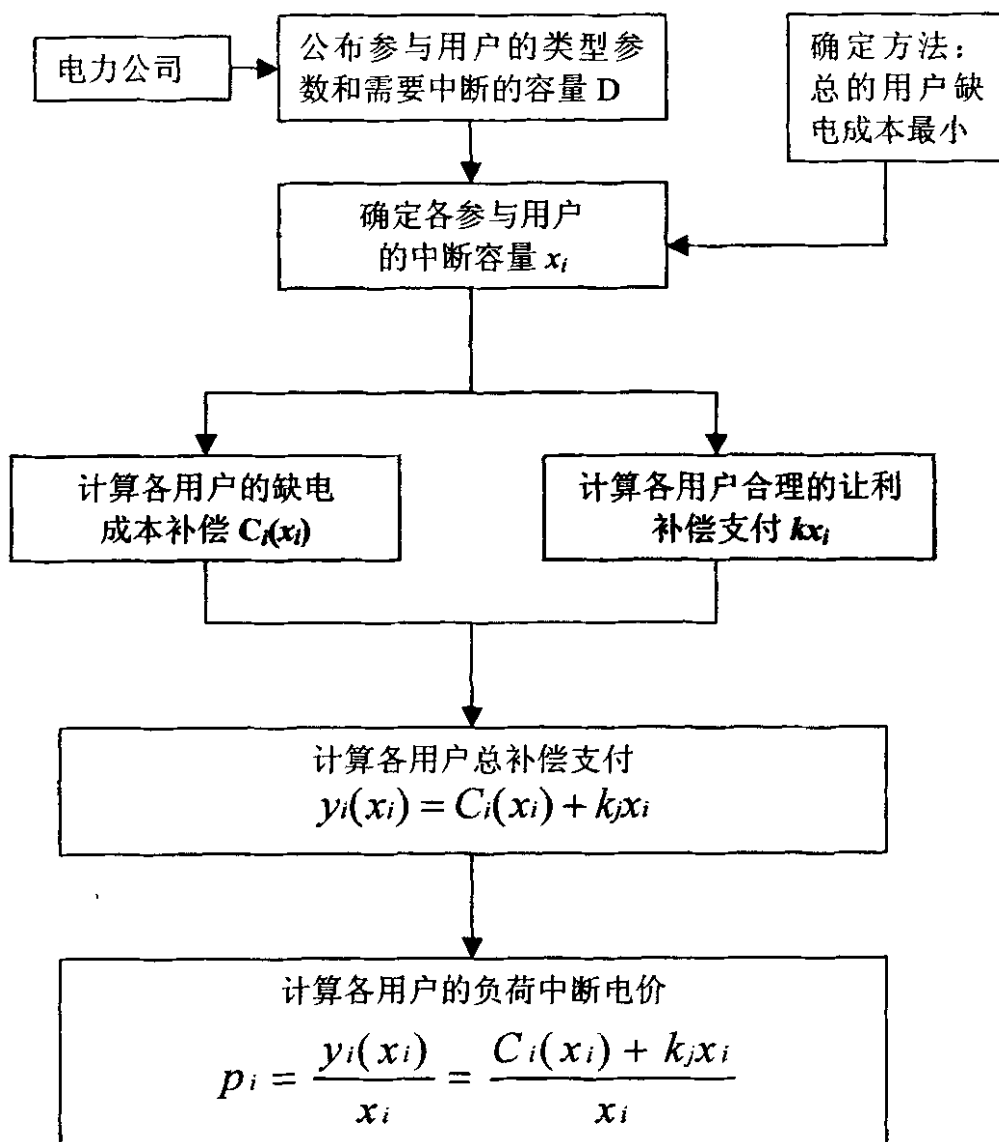


图 5-1 确定各用户可中断容量和可中断电价方案的原理框图

#### 5.4 激励相容的可中断负荷管理模型在杭州电网的仿真算例

以杭州电网为例，2005 年杭州市区全社会用电负荷需求为 550 万千瓦，电网最高供电负荷为 417 万千瓦，电力缺口在 140 万千瓦左右。选取最大错峰负荷的 10%、15%、20% 进行负荷中断调峰，用上述可中断负荷管理模型进行分析。

为此，我们特地选取了杭州市区 40 家用户的数据进行模拟计算（见表 5-2）

表 5-2 杭州市区参与负荷中断错峰模拟用户

| 序号 | 户名              | 行业   | 容量<br>(kVA) | 供电电压 |
|----|-----------------|------|-------------|------|
| 1  | 杭州顶正包材有限公司      | 机械   | 10000       | 10kV |
| 2  | 宏讯电子工业（杭州）有限公司  | 机械   | 12500       | 10kV |
| 3  | 杭州瑞裕实业有限公司      | 机械   | 1260        | 10kV |
| 4  | 标准工业集团杭州机械有限公司  | 机械   | 500         | 10kV |
| 5  | 杭州德意方向节有限公司     | 机械   | 1630        | 10kV |
| 6  | 杭州信江科技发展有限公司    | 机械   | 6300        | 35kV |
| 7  | 旭仕城医疗器械（杭州）有限公司 | 机械   | 2000        | 10kV |
| 8  | 杭州矢崎配件有限公司      | 机械   | 3500        | 10kV |
| 9  | 杭州横滨轮胎有限公司      | 机械   | 3000        | 10kV |
| 10 | 杭州矢崎配件有限公司      | 机械   | 2000        | 10kV |
| 11 | 杭州矢崎配件有限公司      | 机械   | 2850        | 10kV |
| 12 | 杭州爱科照明电路有限公司    | 机械   | 250         | 10kV |
| 13 | 杭州第二纺织机械有限公司    | 机械   | 360         | 10kV |
| 14 | 杭州东方轻工设备厂       | 机械   | 250         | 10kV |
| 15 | 杭州华丰印染厂         | 机械   | 1250        | 10kV |
| 16 | 杭州中粮美特容器        | 机械   | 240         | 10kV |
| 17 | 杭州钱江不锈钢制品厂      | 机械   | 250         | 10kV |
| 18 | 杭州华星带钢厂         | 机械   | 1600        | 10kV |
| 19 | 浙江印刷集团公司        | 机械   | 2500        | 10kV |
| 20 | 杭州宏华数码科技股份有限公司  | 电子   | 2000        | 10kV |
| 21 | 杭州杭鑫电子工业有限公司    | 电子   | 2500        | 10kV |
| 22 | 银江科技            | 电子   | 2000        | 10kV |
| 23 | 普天东方通信集团有限公司    | 电子   | 1800        | 10kV |
| 24 | 意都服饰            | 纺织   | 1250        | 10kV |
| 25 | 杭州美伦时装有限公司      | 纺织   | 315         | 10kV |
| 26 | 杭州喜得宝丝绸有限公司     | 纺织   | 1800        | 10kV |
| 27 | 浙江中财型材有限公司      | 建材   | 8550        | 10kV |
| 28 | 杭州朝阳橡胶有限公司      | 建材   | 12500       | 10kV |
| 29 | 杭州中策橡胶有限公司      | 建材   |             | 10kV |
| 30 | 杭州菱庆高新材料有限公司    | 建材   | 900         | 10kV |
| 31 | 杭州木材有限公司        | 建材   | 630         | 10kV |
| 32 | 达利（中国）有限公司      | 建材   | 1400        | 10kV |
| 33 | 杭州下沙生物科技有限公司    | 食品医药 | 1250        | 10kV |

|    |             |      |       |      |
|----|-------------|------|-------|------|
| 34 | 杭州顶津食品有限公司  | 食品医药 | 20500 | 35kV |
| 35 | 杭州顶益食品有限公司  | 食品医药 | 9650  | 10kV |
| 36 | 杭州卷烟厂       | 食品医药 | 11530 | 10kV |
| 37 | 洁康生物        | 食品医药 | 630   | 10kV |
| 38 | 正大青春宝药业有限公司 | 食品医药 | 7350  | 10kV |
| 39 | 杭州武林综合营业公司  | 食品医药 | 100   | 380V |
| 40 | 天城嘉苑        | 食品医药 | 800   | 10kV |

表 5-3 用户缺电成本最小化的负荷中断电价

| 企业<br>类型 | 缺电成本 |      |      | 让利补<br>偿系数 | 中断电价  |       |       |
|----------|------|------|------|------------|-------|-------|-------|
|          | 中断 1 | 中断 2 | 中断 3 |            | 中断 1  | 中断 2  | 中断 3  |
| 机械       | 1.75 | 1.85 | 2.0  | 0.05       | 1.838 | 1.943 | 2.100 |
| 电子       | 1.10 | 1.14 | 1.2  | 0.14       | 1.254 | 1.230 | 1.368 |
| 食品医药     | 1.50 | 1.7  | 1.7  | 0.08       | 1.620 | 1.706 | 1.836 |
| 建材       | 0.65 | 0.67 | 0.7  | 0.20       | 0.780 | 0.804 | 0.840 |
| 纺织       | 1.35 | 1.41 | 1.5  | 0.11       | 1.499 | 1.565 | 1.665 |

注：表 5-3 中的中断 1 指 1.4 万 kVA，中断 2 指 2.1 万 kVA，中断 3 指 2.8 万 kVA；

$$\text{中断电价} = (1 + k_i) \times \text{缺电成本电价 } C(x_i)$$

由上述结果可以看出，参与中断的行业都服从统一的规律，即：当电网需要中断的负荷越大，则中断电价就越高，这也负荷电网调峰运行的实际情况。进一步还可以得出，当需要中断的负荷大于参与中断用户的中断能力时，将会超出本方法的可行域。从电网运行的实际来讲，实施可中断负荷管理只是解决问题的一种辅助手段，并不是主要手段，只有符合一定的条件，它才能起到相应的作用，这是一项长期而艰巨的工作。

本研究过程经过了一定的简化，研究结果只是初步的分析，结论还不够精确，仅供参考。

我国正处于电力市场的过渡阶段，既有实行可中断负荷管理的迫切需要，同时也存在一些障碍：

1. 观念障碍。对用户的观念需要进行彻底转变，用电方不再是物理意义上的负



荷而是作为消费者的用户,中止这样的服务不是单纯的拉闸限电而需要给予用户一定的补偿。

2. 设备障碍。实行可中断负荷需要投入大量的通信和计量设备,这些设备投入需要大量的资金,不可能一步到位。在发达国家的电力市场,这些设备尚未能充分配置,在我国更需要逐步实施。在设备不完善的系统实行可中断负荷,需要采用简单实用化的管理方法。

3. 机制障碍。现行的电力企业考核制度主要考虑企业的售电量、利税。售电量是电力企业经营业绩的重要指标。而可中断负荷项目以削减用电量为目的,这将显著影响电力企业的售电量,并且在技术、经济和市场因素中的不确定性也使实施可中断负荷要承担很大的风险。

可中断负荷电价政策是一项复杂的系统工程,必须配套实施。建议国家有关部门加快电价机制改革,对可中断负荷电价及其相应的机制引起高度重视,在制定新的电价机制中能充分考虑。其基本原则应是接合电力体制改革实际,统筹兼顾,利益共享,责任共担。目前应组织专业人员进行专题研究,试点试验,其研究成果尽快纳入新的电价体系中。同时加强领导和开展协作,加大投入,尽快从理论研究过渡到政策出台。

## 第六章 电力市场可中断负荷用户属性研究

### 6.1 决策树模型介绍

我们采用基于信息熵进行属性相关分析的方法,以决策树归纳学习方法为例进行介绍。首先根据一组给定数据行或训练数据对象(其类别属性已知),来构造一棵决策树,然后利用决策树就可对未知类别数据对象进行分类。本方法利用了一个称为信息增益的参量来对属性(在归纳学习中的)重要性进行评估。具有最大信息增益被认为是当前数据集中具有最大分辨能力的属性。利用该属性构造决策树的一个结点,并在该结点对其所代表属性的所有取值进行测试,以获得(决策树)该结点的各个分支。这些分支将(该结点)原有数据集分为若干子数据集,若一个结点所包含的数据行均为同一类别,那么该结点就是决策树的叶结点(无需继续进行分支)并被标为相应的类别。这一决策树构造过程不断重复,直到所有结点均无需继续进行分支为止。

### 6.2 决策树数学模型的建立

设  $S$  代表一组训练样本数据集(每个对象的类别已知),共有  $m$  个不同类别,这样  $S$  包含  $s_i$  个  $C_i$ ,  $i \in [1, \dots, m]$ ,任何一个对象属于  $C_i$  的概率为  $s_i / s$ ,这里  $s$  为集合  $S$  中所有样本总数。一个决策树可用于对数据对象进行分类,因此决策树可以看成是  $C_i$  的一个信息源,为产生相应信息需要的信息熵为:

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = - \sum_{i=1}^m \frac{s_i}{s} \log_2 \frac{s_i}{s} \quad (6-1)$$

若属性  $A$  可以取得值为  $\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$ ,且该属性用作决策树的一个结点时,它将会把对应的数据集分为  $v$  份,即  $\{S_1, S_2, \dots, S_v\}$ ,其中,  $S_j$  包含属性  $A$  取同一值  $a_j$  的数据行;  $S_j$  包含  $S_{ij}$  个  $C_i$  数据对象。根据属性  $A$  的取值对当前数据集进行划分所获得的信息就称为属性  $A$  的熵。它的计算公式如下:

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{mj}}{s} I(s_{1j}, \dots, s_{mj}) \quad (6-2)$$

因此，通过选择属性 A 并进行决策树分支而获得的信息增益可由以下公式计算：

$$Gain(A) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (6-3)$$

根据 S 集合中数据对象来计算每个属性 Gain (A) 值，从中选择值最大的属性作为决策树根结点，并根据该属性的取值个数将初始数据集划分为 v 份，即通过不断对每个新产生的数据子集循环进行上述操作，直到产生所有叶结点（其上数据均为同一类别）为止，至此就获得一个决策树。

### 6.3 决策树模型在杭州地区用户的仿真算例

此次属性相关分析以“是否愿意出让负荷而获得电费补偿”为分析对象，对抽样用户分别考察“行业”、“生产性质”、“企业性质”、“容量”、“对有序用电期间供电可靠率是否满意”、“是否愿意提高电价获得高供电可靠率”、“电价每上涨 1%，产品成本上涨百分比”七个属性与分析对象的相关性。以下是分析过程和结果。

假设 C1 对应“不愿意出让负荷而获得电费补偿”（其中包含 19 个用户），C2 对应“愿意出让负荷而获得电费补偿”（其中包含 16 个用户）。为了计算每个属性的信息增益，需要首先利用公式 2.1 计算对当前数据进行分类所需要的信息量：

$$I(S1, S2) = I(19, 16) = 0.9947$$

然后分别计算上述七个属性的信息熵：

#### 1. 行业（机械、冶金、纺织、建材、食品医药、商业）

$$\text{机械：} S_{11}=12, S_{21}=9, I(S_{11}, S_{21}) = 0.9852$$

$$\text{冶金：} S_{12}=1, S_{22}=0, I(S_{12}, S_{22}) = 0$$

$$\text{纺织：} S_{13}=1, S_{23}=2, I(S_{13}, S_{23}) = 0.9183$$

$$\text{建材：} S_{14}=2, S_{24}=2, I(S_{14}, S_{24}) = -2$$

$$\text{食品医药：} S_{15}=3, S_{25}=1, I(S_{15}, S_{25}) = 0.8113$$

商业:  $S_{16}=1, S_{26}=1, I(S_{16}, S_{26}) = -2$

$E(\text{行业}) = 0.4197$  (见公式 2.2)

$\text{Gain}(\text{行业}) = 0.9947 - 0.4197 = 0.5750$  (见公式 2.3)

2. 生产性质 (连续, 断续)

连续:  $S_{11}=4, S_{21}=0, I(S_{11}, S_{21}) = 0$

断续:  $S_{12}=15, S_{22}=16, I(S_{12}, S_{22}) = 0.9992$

$E(\text{生产性质}) = 0.8850$       信息增益:  $\text{Gain}(\text{生产性质}) = 0.1097$

3. 企业性质

民营:  $S_{11}=8, S_{21}=7, I(S_{11}, S_{21}) = 0.9968$

国有:  $S_{12}=3, S_{22}=9, I(S_{12}, S_{22}) = 0.8113$

外资(台):  $S_{13}=2, S_{23}=0, I(S_{13}, S_{23}) = 0$

外资(日):  $S_{14}=6, S_{24}=0, I(S_{14}, S_{24}) = 0$

$E(\text{企业性质}) = 0.7054$        $\text{Gain}(\text{企业性质}) = 0.2893$

4. 容量 (1000 以下, 1000~2000, 2000~5000, 5000~10000, 10000 以上)

1000 以下:  $S_{11}=3, S_{21}=9, I(S_{11}, S_{21}) = 0.8113$

1000~2000:  $S_{12}=6, S_{22}=5, I(S_{12}, S_{22}) = 0.994$

2000~5000:  $S_{13}=3, S_{23}=1, I(S_{13}, S_{23}) = 0.8113$

5000~10000:  $S_{14}=2, S_{24}=1, I(S_{14}, S_{24}) = 0.9183$

10000 以上:  $S_{15}=5, S_{25}=0, I(S_{15}, S_{25}) = 0$

$E(\text{容量}) = 0.7620$        $\text{Gain}(\text{容量}) = 0.2327$

5. 对有序用电期间供电可靠率是否满意

满意:  $S_{11}=16, S_{21}=11, I(S_{11}, S_{21}) = 0.9751$

不满意:  $S_{12}=3, S_{22}=5, I(S_{12}, S_{22}) = 0.9544$

$E = 0.9704$        $\text{Gain} = 0.0243$

6. 是否愿意提高电价获得高供电可靠率

是:  $S_{11}=10, S_{21}=1, I(S_{11}, S_{21}) = 0.4395$

否:  $S_{12}=9, S_{22}=15, I(S_{12}, S_{22}) = 0.9544$

$E = 0.7926$        $\text{Gain} = 0.2021$

7. 电价每上涨 1%, 产品成本上涨百分比

1%~3%:  $S_{11}=11, S_{21}=5, I(S_{11}, S_{21})=0.8960$

3%~5%:  $S_{12}=4, S_{22}=8, I(S_{12}, S_{22})=0.9183$

5%~7%:  $S_{13}=3, S_{23}=2, I(S_{13}, S_{23})=0.9710$

7%~10%:  $S_{14}=1, S_{24}=1, I(S_{14}, S_{24})=-2$

$E=0.7489$        $Gain=0.2458$

综上：假设属性相关阈值为 0.2，则“生产性质”及“对有序用电期间可靠率是否满意”属于弱相关，被排除掉。“用户是否愿意实施可中断负荷”与下列属性相关性由大到小排列依次为：

行业 > 企业性质 > 电价与成本关系 > 容量 > 是否愿意提高电价获得高供电可靠率

## 6.4 仿真结论

本章讨论了决策树及相关数学模型的建立，并以“用户是否愿意实施可中断负荷”为分析对象进行了用户实际数据的仿真计算。根据计算结果，得出了用户属性在实施可中断负荷管理意愿方面的相关性。本研究过程经过了一定的简化，研究结果只是初步的分析，结论还不够精确，仅供参考。

用户对可中断负荷管理的响应是可中断负荷管理实施中的关键因素，建立合理的用户响应模型才能正确地设计可中断负荷管理方案。基于此，本文论述并分析了用户属性对可中断负荷管理的影响，今后仍需继续对用户响应这一问题进行深入研究，细化对用户的分类及响应的类型，从而建立一整套科学、合理的可中断负荷管理方案。

## 第七章 总结和展望

### 7.1 本文内容总结

可中断负荷是电力负荷管理的一项重要内容。我国近几年正处于经济快速发展, 电力严重短缺的状况, 因此进行可中断负荷的研究有着很大的现实意义。可中断负荷管理是由电力企业和用户签订合同, 通过电价激励, 实现在系统峰值时或紧急状态下, 用户按合同规定中断或削减负荷, 从而降低电力公司的运营成本, 保障系统的安全。实施可中断负荷管理的重要内容之一就是设计合理的可中断负荷电价。

本文的主要工作如下:

1. 建立了可中断负荷的多目标数学模型。从高峰时负荷的中断/削减量、增加电力公司的收入和提高用户的舒适度水平三个目标, 利用线性规划法(把非线性的负荷转化成线性)得到用户满足这三个目标的最优负荷削减量。其中用户的舒适度是以能满足用户要求的最低负荷为门槛值, 避免了考虑用户负荷类型。在可中断负荷数学模型中, 还就用户的中断负荷成本补偿建立了补偿函数模型。该模型能诱导用户报告真实的负荷中断成本, 从而有利于电力公司制定合理的补偿费用标准, 激励用户参与可中断负荷项目。

2. 对可中断负荷的成本效益进行了分析。采用了国外的有关负荷中断的一些数据, 分析得出了以下结论:

- (1) 中断负荷成本与提前通知时间在时间较长时成线性关系;
- (2) 单位时间中断负荷成本与停电持续时间成指数形式下降;
- (3) 中断负荷成本与缺电量通常可以采用二次型来近似模拟;
- (4) 可中断负荷的效益主要体现在对系统的可靠性贡献和经济效益两个方面。

3. 对可中断负荷管理模式进行了研究, 分析了基于动态潮流优化、基于可避免成本理论、备用辅助服务模式、基于远期合同、需求侧竞价、激励相容等六种可中断负荷管理模型, 比较了各自的优缺点和适用情况。

4. 分析了杭州市电网电力负荷的特性, 并根据先前建立的数学模型和可中断管理模式, 对杭州市可中断负荷管理模式进行了研究和分析。提出了适合杭州市电网负荷特性的可中断负荷管理模型(激励相容可中断负荷管理模型), 并通过对杭州市典型用户调查数据的仿真模拟运算, 验证了该模型的正确性和可操作性。

5. 对可中断负荷管理中用户属性的相关性进行了研究, 采用基于信息熵进行属性相关分析的方法建立了决策树数学模型, 并运用此模型, 以“用户是否愿意实施可中断负荷”为分析对象进行了用户实际数据的相关性分析和仿真计算, 得出了初步结论。用户对可中断负荷管理的响应是可中断负荷管理实施中的关键因素, 建立合理的用户响应模型才能正确地设计可中断负荷管理方案。基于本章的分析方法, 今后可以对用户响应这一问题进行深入研究, 细化对用户的分类及响应的类型, 从而建立一整套科学、合理的可中断负荷管理方案。

## 7. 2 进一步的工作

本文在可中断负荷管理上做了一些研究, 特别是对杭州市可中断负荷管理做了一些理论上的探索, 相信对我市利用可中断负荷管理优化网络资源, 缓解电力紧缺的局面有所帮助。但对中断负荷的成本效益分析方法还需进一步优化, 把评价系统可靠性的一些指标接合起来, 做更精确的评估。因为这是可中断负荷管理的基础。

可中断负荷措施的补偿费用与电价的模型紧密相关, 因此在电价模型及可中断负荷的定价方面还可以进行一系统的理论研究。此外, 应确定不同用户类型所选择的可中断负荷措施及负荷中断标准, 不同行业用电特性不同, DSM 措施起到的效果不同。目前, 美国等 DSM 起步较早的国家已经有了一套完善的需求管理系统, 能够根据用户的类别和负荷特性给出最佳的实施方案。我国的 DSM 工作起步较晚, 还没有充分重视行业生产特性和用电特性的差异, 各项措施执行后也没有对用户响应进行评估分析从而加以改进, 错峰、避峰潜力还应充分挖掘。

在实时电价模型中, 把机组组合的约束条件在模型中体现出来才能更负荷电网运行的实际; 从电力市场化的发展看, 可中断负荷合同的远期交易中, 确定电

价的部分也应纳入到模型中去。进一步研究电力市场和电力系统的规律,在不影响电力系统稳定性的前提下,建立基于电力需求侧管理的分行业、分时段、分地区的灵活电价机制,使电价尽量反映成本和市场规律。这对系统调峰和电力的经济分配是至关重要的。

对于电源来说,电网也是需求侧,因此可以把电力需求侧管理扩展到电网建设中来,把可中断负荷、柔性交流输电系统接合起来。我国的城网和农网改造也是实施电力需求侧的具体内容之一,但还有很多工作要做。

另外,把可中断负荷作为独立的资源参与电力系统的备用竞价等都是进一步研究的方向。



## 参考文献

- [1] 谭亲跃, 王少荣, 程时杰, 电力需求侧管理 (PDSM) 综述, 继电器, 2005 (17)
- [2] 王建学, 王锡凡, 王秀丽, 电力市场可中断负荷合同模型研究, 中国电机工程学报, 2005 (9)
- [3] 于凤武, 可中断负荷与可中断负荷电价, 中国电力企业管理, 2004-1
- [4] C.W.Gellings, Intergrating load management into utility planning, IEEE Trans. on Power System, Vol. PAS-104, 1985(8):2079~2085
- [5] S.A.Smith, A linear programming model for real-time pricing of electric power service, Operations Research, Vol.41, 1993(3):470~483
- [6] C.S.Chen, J.T.Leu, Interruptible load control for Taiwan Power Company, IEEE Trans. on Power System, Vol.5, 1990(2):460~465
- [7] Kankar Bhattacharya, Math H.J.Bollen, Jaap E. Daalder, Real time optimal interruptible tariff mechanism incorporating utility-customer interactions, IEEE Trans. on Power System Vol.15, 2000(2):715~720
- [8] G. Strbac, E.D.Farmer, B.J.Cory, Framework for the incorporation of demand-side in a competitive electricity market, IEEE Proc-Genr. Transm. Distrib, 1996(5)
- [9] Mural Fabrioglu, Fernando L.Alvarado, Designing cost effective demand management contracts using game theory, Proceedings of the IEEE PES Winter Meeting, 1999(1):427~432
- [10] Mural Fabrioglu, Fernando L.Alvarado, Using utility information to calibrate customer demand management behavior models, IEEE Trans. on Power System Vol.16, 2001(2):317~322
- [11] A.P. Sanghvi, Flexible strategies for load/demand management using dynamic pricing, IEEE Trans. on Power System Vol.4, 1989(1):83~93
- [12] R.D.Tabors, F.C.Schweppe, M.C.Caramanis, Utility experience with real time rates, IEEE Trans. on Power System Vol.4, 1989(2):463~471
- [13] Goran Strbac, Daniel Kirschen. Assessing Competiviness of Demand-Side Bidding. IEEE Transacitonson Power Systems, Vol.14, No.1, February 1999
- [14] T.W.Gedra, P.P.Varaiya, Market and pricing for interruptible electric power, IEEE Trans. on Power System Vol.8, 1993(1):122~128
- [15] Chen C S, Hwang J C, Tzeng Y M et al. Determination of customer load characteristics by load survey system at Taipower. IEEE Tran on PD, 1996, 11(3)
- [16] M.R.Mcrae, R.M.Scheer, B.A.Smith, Integrating load management programs into utility operations and planning with a load reduction forecasting system, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.104 1985(6):1321~1325
- [17] 国家电力调度通信中心 美国电力市场与调度运行 中国电力出版社 2002
- [18] 叶泽 电力竞争 中国电力出版社 2004
- [19] 国家电网公司 中国电力企业联合会 中国电力市场分析与研究 中国电力出版社 2003
- [20] 任震 邝新武 黄雯莹 可中断负荷措施的成本效益分析 电网技术 2006-7
- [21] 任震 邝新武 黄雯莹 电力市场可中断电价的设计 华南理工大学学报 2006 (4)
- [22] 尚金成 黄永皓 夏清 电力市场理论研究与应 中国电力出版社 2002
- [23] 王锡凡 王秀丽 陈皓勇 电力市场基础 西安交通大学出版社 2003
- [24] 王学军 刘建安 白起翔 电力市场营销学 中国水利水电出版社 2000
- [25] 王治华 李博 李杨 电力市场下的可中断负荷管理及其方法 中国电力 2003-6
- [26] 钟清 任震 朱然 可中断负荷管理及其用户响应问题研究 广东电力 2005-3

- [27]吴志坚 美国部分州可中断负荷合同 电力需求侧管理 2005-7
- [28]赵俏姿 段献忠 陈海焱 批发竞争市场可中断负荷定价分析 华东电力 2006 (3)
- [29]田靖涛 电力市场下引入可中断负荷的研究 吉林电力 2006-1
- [30]肖涛 张少华 独立发电商与电力公司之间的激励性可中断供电合同模型 电网技术 2006-2
- [31]刘昌 姚建刚 基于可中断负荷的新型输电阻塞调度研究 中国电力 2005-9
- [32]潘益华 辛洁晴 程浩忠 熊虎岗 缺电形式下不同行业需求侧管理措施的选择 华东电力 2005-1
- [33]David A K. Modeling risk in energy contracts with investor owned generation[J].IEEE Proc.Pt\_C,Gt&D,1994,[4](1):75-80
- [34] David A K. Risk modeling in energy contracts between host utilities and BOT plant investor [J].IEEE Trans.on Energy Conversion,1996,11(2):359-365
- [35]Chung T S,Zhang S H,Yu C W,et al. Electricity market risk management using forward contracts with bilateral options[J].IEEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution.2003,150(5):588-594
- [36]张显,王锡凡,王建学,等.可中断电力合同中新型期权的定价[J].中国电机工程学报,2004,24(12):18-23
- [37]曾鸣,电力需求侧管理,中国电力出版社,2001
- [38]曾鸣,电力需求侧管理的激励机制及其应用,中国电力出版社,2002
- [39]朱明,数据挖掘,中国科学技术大学出版社,2002
- [40]刘同明,数据挖掘技术及其应用,国防工业出版社,2001

## 作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 杭州市缺电指数预报系统的研究      《电力需求侧管理》      (2004.10)
- [2] 可中断负荷管理模型研究            《浙江电力》            (2006.8)
- [3] 基于新技术的居民集抄系统          《电力需求侧管理》      (2007.1)
- [4] 电力市场可中断负荷用户属性研究    《华东电力》            (2007.1)
- [5] 杭州市（地区）负荷特性分析及预报系统的研究  
    获 中国电力企业联合会供电分会 2005 年度经营管理论文三等奖

## 致谢

本论文的工作是在导师黄民翔教授的悉心指导下完成的。研究生入学以来，深受导师在学习、生活各方面给予的指导、关心和帮助。黄老师严谨求实的治学态度，虚怀若谷的为人品格无时无刻在激励着我，必将使我终身受益，在此表示最崇高的敬意和由衷的感激。

在本论文完成之际，我要向我的导师致以最诚挚的谢意。同样也感谢母校几年来的培养，给我提供了良好的学习研究环境。

感谢张圣楠同学在论文工作期间所给予的巨大帮助和支持，同学间相互的团结、友爱和互助是我取得现有成果的保证。

还要感谢我的家人以及所有关心我的人，他们的理解和支持使我具有了克服一切困难的勇气和决心。