

基于 DSM 的可中断负荷合同分析与建模

邱文锋, 唐捷, 张勇军

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 可中断负荷管理是一项有效的电力需求侧管理措施。通过对总缺电成本和中断补偿费用的目标函数进行优化, 分别建立了两种可操作的可中断负荷合同数学模型。算例仿真分析证明所提出的合同模型是切实可行的。研究成果有利于降低高峰时段的用电负荷, 避免或减少昂贵的旋转备用容量, 提高系统运行可靠性和经济性, 实现资源的优化配置和电力工业的可持续发展。

关键词: 电力市场; 电力需求侧管理; 可中断负荷管理; 合同建模

Analysis and modeling of interruptible load contract for demand side management

QIU Wen-feng, TANG Jie, ZHANG Yong-jun

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Interruptible Load Management (ILM) is one of the most efficient measures for power demand side management (DSM). By means of optimizing the objective function of the total outage costs and interruptible compensation charge, two operable mathematical models of interruptible load contracts are built respectively. Numerical simulation results show that the presented contract models are practicable and feasible, which are beneficial to reduce the peak load, avoid or cut down the expensive reserve capacity and enhance the reliability and economy of power system operation as well as realize the optimal arrangement of resources and the sustainable development of the power industry.

Key words: electricity market; demand side management; interruptible load management; modeling of contract

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)03-0027-05

0 引言

电力需求侧管理 DSM (Demand Side Management) 的实施目标之一就是引导电力用户适当减少高峰时期用电, 增加低谷时期用电, 从而达到削峰添谷, 改善负荷曲线的目的^[1]。随着全球电力工业市场化改革的逐步深入, DSM 作为一种负荷管理的有效手段在许多国家已越来越受到重视^[2]。

国内外的研究成果和实践经验表明, 可中断负荷管理 ILM (Interruptible Load Management) 是一项有效的 DSM 手段。它根据电网公司与各电力用户签订的可中断负荷合同, 允许公司在某个特定时期(如用电高峰期)按照合同规定的权限范围切除部分用户负荷, 并同时给予这些用户一定的缺电补偿, 从而缓解供电紧张状况, 避免或减少昂贵的旋转备用容量, 提高系统运行可靠性, 实现我国电力工业的可持续发展和全网资源的优化配置^[3]。合理的可中断负荷合同模型是 ILM 能否成功实施的关

键因素, 也是吸引电网公司和用户积极参与 ILM 的有效激励手段。

目前, 国内外专家学者对可中断负荷合同模型的研究已取得了一些成果。基于对用户具有线性缺电成本函数的假设, 文献[4]证明当用户参与 ILM 后获得的单位补偿支付等于其真实的单位缺电成本时, 该用户的期望利润最大。文献[5]则指出实际的用户缺电成本近似于负荷中断量的二次函数。文献[6]基于二次用户缺电成本函数的假设, 提出了一种能考虑用户最大可中断负荷限制的可中断负荷管理合同模型。文献[7]则基于离散型用户类型参数, 进一步建立了一种考虑供电公司风险偏好的激励型可中断负荷合同模型, 并用实例证明该模型可有效地激励电力用户披露其真实缺电成本信息。文献[8]利用停运表得到考虑负荷波动情况下的系统缺额容量, 采用需求侧报价来反映用户可接受的停电补偿, 并给出了可中断负荷的最优购买模型。在此基础上, 本文结合现行的可中断负荷合同深入分析了合同的

具体内容。通过对总缺电成本和中断补偿费用的目标函数进行优化,分别建立了两种可操作的可中断负荷合同数学模型。

1 可中断负荷合同内容

表 1 现行的可中断负荷合同具体内容

Tab. 1 Concrete contents of interruptible load contracts

名称	合同形式	提前通知时间	最小切除容量	中断持续时间/h	中断补偿费用
加州 ISO	一般合同	15min/30min	1MW	每次 2~8 每月<30	容量费用+实际调度的能量费用
纽约 ISO	一般合同	10min/30min	1MW/2MW	每次<1	1MW 负荷给予旋转备用市场价格 2MW 负荷给予日前市场电能价格 与中断次数无关的固定费用:
加拿大	月合同	1h	1MW	每次>4	每月 1MW 付 P(\$)
台湾 A 型	一般合同	1d/7d	5MW	每次=6	电能合同电价 5 折优惠
台湾 B 型	一般合同	1h/1d/4d	所有的工业负荷	每次<6 每年<100	依据提前通知时间而定

(1) 合同有效期

合同有效期是指按本合同规定的内容进行可中断负荷管理的有效时间期限。表 2 所示为加拿大、印度、希腊等国最大停电损失发生时间的统计数据。由表 2 可知,各个国家由于国民经济结构、季节气候、物价指数等因素的不同,一年中停电损失最大的月份(最坏月)各不相同,而一周中用户最不愿意停电的天(最坏天)基本相同。另外,最坏月和最坏天基本上集中在某一连续时段内。因此,从实际操作的角度出发,可将一年分为两个合同有效期,即把一年中的停电损失最坏月确定为一个合同有效期,并将其余月确定为另一个合同有效期,分别签订双边合同来实现 ILM。

表 2 最大停电损失发生时间统计

Tab. 2 Time statistics of maximal outage costs

国家	最坏月	最坏天	最坏时段
加拿大商业	11~3 月	周 5, 6	下午 1~5 点
加拿大工业	12~2 月	周 5	上午 9~12 点
印度	5~8 月	周 6	上午 9 点~晚上 9 点
希腊	6~11 月	-	-

(2) 提前通知时间

提前通知时间是指电网公司提前通知电力用户进行负荷中断管理的时间间隔。可中断负荷合同中所确定的提前通知时间的长短对用户的停电损失影响很大。一般来说,如果电网公司的停电提前通知时间越长,参与 ILM 的各电力用户就能有越充足的时间调整生产计划,相应的用户停电损失和电网公司支付给用户的中断补偿费用也就越低。相反,如果停电提前通知时间越短,用户的停电损失和电网公司支付的中断补偿费用就越高。表 3 所示为 1993 年加拿大和 1998 年希腊电力市场在不同的停电提

在电力市场条件下,电网公司通过与各符合中断条件的电力用户分别签订双边可中断负荷合同来实现 ILM。根据表 1 所示的美国、加拿大、台湾等国家和地区现行的可中断负荷合同可知^[9],该双边合同应包括以下内容:

前通知时间下所对应的停电损失减少率情况。必须注意的是,在实际系统运行过程中进行 ILM 的确切时间是与很多随机因素密切相关的,因此随着电力市场技术支持系统的不断发展与完善,中断负荷的提前通知时间应是逐步增长的。

表 3 提前通知时间与停电损失减少率的关系(%)

Tab. 3 Relations between advance notification periods and reduced rates of outage costs(%)

提前时间	<1h	1~4h	5~16h	17~24h	1~2d	≥3d
希腊	26.48	31.46	41.21	52.24	62.09	69.19
加拿大商业	25.70	37.80	48.90	53.40	57.70	64.80
加拿大工业	26.80	36.30	47.30	56.20	62.80	64.50

表 4 已知中断持续时间与停电损失减少率的关系

Tab. 4 Relations between known interruptible continuances and reduced rates of outage costs

时间	20min	1h	4h	8h	1d
停电损失减少率/(%)	24.04	37.30	53.51	69.47	75.65

(3) 中断持续时间

中断持续时间是指每次中断负荷的持续时间和一定时段内的总中断时间。可中断负荷合同中所确定的中断持续时间也是影响用户停电损失的一个重要参数,负荷中断时间越长,累计的用户停电损失也就越大。另外,表 4 所示为希腊电力市场在不同的已知中断持续时间下所对应的停电损失减少率情况。由表 4 可知,当电力用户已知中断持续时间时,即可据此来更有效地调整用电方式和改变生产计划,从而降低停电损失。因此,在可中断负荷合同中应将中断持续时间作为一项关键参数加以记载。

(4) 最小切除容量

最小切除容量是批准用户参与可中断负荷管理的准入门槛。也就是说,只有可供切除容量大于最

小切除容量的用户才有资格参与 ILM。最小切除容量可根据对电力市场内各个大用户的可供切除容量进行广泛调查统计综合确定。

(5) 负荷中断量

负荷中断量是指每次中断负荷的容量额度。用户的负荷中断量与实际负荷量之比被称为缺电比率 ε ，它与用户的停电损失也是密切相关的。因此，

缺电比率 $\varepsilon = \frac{P'}{P}$ 。其中， P' 和 P 分别表示负荷中

断量与实际负荷量。一般情况下，缺电比率越大，停电损失越高。即少量缺电时，用户可以调整生产方式，关掉次要用电设备或是取消次要生产工序；而大量缺电时，用户将缺乏调整手段，从而造成较大的停电损失。图 1 所示为某大工业用户缺电比率与停电损失的关系图，图中 c 为停电损失， ε 表示缺电比率。

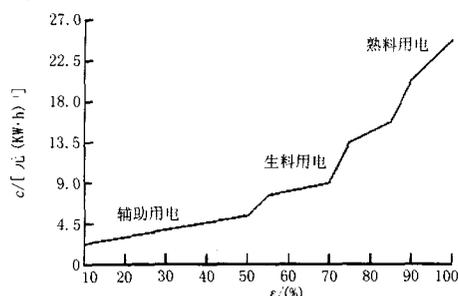


图 1 缺电比率与停电损失关系

Fig. 1 Relation between outage rate and outage cost

(6) 中断补偿费用

中断补偿费用是指电网公司由于中断用户的供电而支付给各电力用户的费用。这是可中断负荷管理的最关键部分，也是合同的核心。在电力市场条件下，每个参与 ILM 的用户负荷中断量和中断补偿费用可由用户结合自身的生产运营情况报价产生^[8]；也可设计合适的数学模型对中断负荷的分配和补偿支付进行优化^[6,7]。

(7) 执行方式：即规定合同生效后具体的应用方法及结算方式。

2 可中断负荷合同的数学模型

2.1 假设

(1) 假设电网公司与 M 个电力用户签订了可中断负荷合同，即有 M 个用户可参与 ILM；

(2) 假设可将合同有效期划分为 N 个时段 (以 1h 为单位)；

(3) 对于某一孤立电力系统而言，假设其在负荷高峰时段缺乏一定数量的调峰容量，即系统发电

容量不足以满足高峰时段的负荷需求。

2.2 目标函数 1

显然，只有保证在实施可中断负荷后并不损害参与各方的利益，ILM 才能得以顺利推行，而合理的中断补偿机制正是吸引电网公司和广大电力用户积极参与 ILM 的重要激励手段^[9,10]。根据文献[4]的论证，当用户参与 ILM 后获得的单位补偿支付等于其真实的单位缺电成本时，该用户的期望利润最大。因此，对电力用户的缺电成本，即可中断负荷成本进行研究是制定合理的中断补偿机制的前提和关键。影响用户缺电成本的因素是多方面的，主要包括用户类型、负荷中断量、提前通知时间、中断持续时间以及中断发生时间等。综合考虑以上因素后，可得到单位缺电成本的数学表达式如式 (1) 所示：

$$C(i, j) = f[\theta(i), P_c(i), T_p(i), T_c(i), T_h(j)] \quad (1)$$

式中： $C(i, j)$ 为用户 $i (i=1, \dots, M)$ 在时段 $j (j=1, \dots, N)$ 的单位缺电成本； $\theta(i)$ 为用户 i 的类型参数，是一个 $0 \sim 1$ 之间的连续变量，用于表示用户 i 的负荷中断意愿， $\theta(i)$ 取值越大，则用户 i 的边际缺电成本越高，意味着用户 i 越不愿意中断负荷^[6]； $P_c(i)$ 为用户 i 的负荷中断量； $T_p(i)$ 为用户 i 的中断提前通知时间； $T_c(i)$ 为用户 i 的中断持续时间； $T_h(j)$ 为中断发生时间。

当系统缺乏发电容量时，为保证供电可靠性，必须对一定数量的负荷进行 ILM。此时电网公司应根据用户缺电总成本最小原则确定每个参与用户的负荷中断量，因此可中断负荷的最优缺电成本目标函数如式 (2) 所示：

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_i(i, j) P_c(i, j) C(i, j) \quad (2)$$

式中： $S_i(i, j)$ 为用户 i 在时段 j 的状态变量，若此时电网公司选中用户 i 进行负荷中断，则 $S_i(i, j)$ 取值为 1，若未选中，则取值为 0； $P_c(i, j)$ 为用户 i 在时段 j 的负荷中断量； $C(i, j)$ 同式 (1)。

2.3 目标函数 2

第 2.2 节中所述目标函数 1 的最大优点是能确保在实施 ILM 后各电力用户的总缺电成本最小，但是影响缺电成本的因素很多，因此对其模型和确定方法进行更深入研究应是下一步工作的重要方向。

近年来，随着我国经济建设的飞速发展，电力供需矛盾日益突出，发电侧装机容量不足的问题将在今后一段时期内依然存在。因此，在我国现行电

力市场的 ILM 中, 电网公司调度部门利用负荷预测工具进行日负荷曲线预测后, 可结合发电曲线得出需要进行负荷中断的时段及其对应的容量缺额。然后根据各用户结合自身的生产运营情况申报的可中断容量及相应的中断补偿费用^[8], 按照类似发电竞价上网的“低价先调”原则合理购买可中断负荷, 并达到系统功率的平衡。其最优中断补偿费用目标函数如式 (3) 所示:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_i(i, j) P_c(i, j) \rho_c(i, j) \quad (3)$$

式中: $S_i(i, j)$ 、 $P_c(i, j)$ 同式 (2); $\rho_c(i, j)$ 为用户 i 在时段 j 为其负荷中断量申报的中断补偿电价。

2.4 约束条件

目标函数 1 和 2 的约束条件基本相同:

(1) 中断负荷平衡约束

在时段 j , 系统中被中断的负荷总量应该大于或等于系统容量缺额, 即:

$$\sum_{i=1}^M S_i(i, j) P_c(i, j) \geq P_s(j) \quad j=1, \dots, N \quad (4)$$

式中: $P_s(j)$ 表示时段 j 的系统容量缺额。

(2) 提前通知时间约束

电网公司提前通知电力用户进行负荷中断管理的时间间隔应该符合其可中断负荷合同中的相关规定, 即:

$$S_i(i, j-t) = 0 \quad t=1, \dots, T_p(i)-1, \\ i=1, \dots, M, \text{ 若 } S_i(i, j) = 0, S_i(i, j+1) = 1 \quad (5)$$

式中: $T_p(i)$ 为用户 i 的负荷中断提前通知时间。

(3) 中断持续时间约束

每次对用户 i 的停电持续时间应该符合其可中断负荷合同中的相关规定, 即:

$$S_i(i, j+t) = 1 \quad t=1, \dots, Te(i)-1, \\ i=1, \dots, M, \text{ 若 } S_i(i, j-1) = 0, S_i(i, j) = 1 \quad (6)$$

式中: $Te(i)$ 为用户 i 每次负荷中断的持续时间。

(4) 总中断时间约束

中断持续时间是指每次中断负荷的持续时间和一定时段内的总中断时间。

由第 1 节中关于中断持续时间的定义可知, 在可中断负荷合同中除了明确每次中断负荷的持续时间外, 还记载了一定时段内的总中断时间。因此, 在这段时间内对用户 i 的总停电时间也应该符合合同的相关规定, 即:

$$\sum_{j=1}^N S_i(i, j) \leq T_{e\max}(i) \quad i=1, \dots, M \quad (7)$$

式中: $T_{e\max}(i)$ 为一定时段内要求用户 i 的总中断时

间。

(5) 最小切除容量和最大可中断容量约束

用户 i 在某时段的负荷中断量应该大于用户 i 的可中断负荷合同中规定的最小切除容量, 小于该用户的最大可中断容量, 即:

$$P_{c\min}(i) \leq P_c(i, j) \leq P_{c\max}(i) \quad i=1, \dots, M, \\ \text{若 } S_i(i, j) = 1 \quad (8)$$

式中: $P_{c\min}(i)$ 和 $P_{c\max}(i)$ 分别为用户 i 的最小切除容量和最大可中断容量。

3 算例仿真

本节将以中断补偿费用为优化目标进行算例仿真。根据第 2.1 节中的假设, 某一孤立电力系统在负荷高峰时段将缺乏一定数量的调峰容量, 因此必须对系统内若干签订了可中断负荷合同的电力用户进行 ILM, 具体的实施步骤如下:

(1) 电网公司调度部门利用负荷预测工具进行日负荷曲线预测, 并结合既定的日发电曲线得出日负荷缺额曲线。根据该曲线即可求得需要进行 ILM 的时段及其对应的容量缺额。由于篇幅所限, 本文算例将仅对其中某一时段的容量缺额进行仿真, 假设该时段的容量缺额为 2400 kW。

表 5 完全可中断负荷管理方式下的计算结果

Tab.5 Calculation result of full interruptible load management

用户 编号	负荷中断量 /kW	中断补偿费用 /元·(kWh) ⁻¹	实际中断量 /kW	总补偿费用 /元
1	6000	0.84	6000	5040
2	3400	0.98	3400	3332
3	5300	1.09	5300	5777
4	4100	1.16	4100	4756
5	8200	1.22	5200	6344
合计	2700	—	2400	25249

(2) 综合考虑了第 3.4 节中的各约束条件后, 设系统内共有 5 个用户可参与该时段的 ILM, 其部分合同参数 (负荷中断量、中断补偿费用) 如表 5 所示, 表内数据按照中断补偿费用进行排序。

(3) 根据表 5, 电网公司在该时段应按照类似发电竞价上网的“低价先调”原则合理购买可中断容量, 并达到系统功率的平衡。如果此时不考虑孤立系统外的可供容量, 则完全可中断负荷管理方式下的计算结果如表 5 所示。在这种方式下, ILM 的总补偿费用为 25249 元。

(4) 如果该时段孤立系统外可供容量的最低报价为 1.19 元/kWh, 对应的容量为 10000 kW, 且其余报价均高于孤立系统内的最高中断补偿费用 1.22 元/kWh, 则可将这部分系统外容量等同视为一个可中

断用户,编号为6。因此,在保证系统安全稳定运行的前提下,最优可中断负荷管理方式下的计算结果如表6所示。在这种方式下,ILM的总补偿费用为25093元。

表6 最优可中断负荷管理方式下的计算结果
Tab.6 Calculation result of optimal interruptible load management

用户 编号	负荷中断量 /kW	中断补偿费用 /元·(kWh) ⁻¹	实际中断量 /kW	总补偿费用 /元
1	6000	0.84	6000	5040
2	3400	0.98	3400	3332
3	5300	1.09	5300	5777
4	4100	1.16	4100	4756
6	10000	1.19	5200	6188
5	8200	1.22	0	0
合计	12700	—	2400	25093

由表6可知,由于该时段系统外可供容量(即用户6)的价格低于用户5,按照“低价先调”的原则应优先购买用户6的容量,且在这种调度方式下可节约156元的中断补偿费用。因此,将补偿本系统内的可中断负荷与购买系统外的可供容量结合起来,有利于提高ILM的经济性。

4 结论

(1) 采用合理的可中断负荷合同模型有利于降低高峰时段的用电负荷,避免或减少昂贵的旋转备用容量,提高系统运行可靠性和经济性,实现资源的优化配置和电力工业的可持续发展。

(2) 本文深入分析了可中断负荷合同的具体内容,主要包括:合同有效期、提前通知时间、中断持续时间、最小切除容量、负荷中断量、中断补偿费用及执行方式等。

(3) 本文通过对总缺电成本和中断补偿费用的目标函数进行优化,分别建立了两种可操作的可中断负荷合同数学模型。

(4) 算例分析表明所提出的可中断负荷合同模型能调动电网公司和那些对供电可靠性要求不高的电力用户参与ILM的积极性,并可获得较好的经济效益。

参考文献

- [1] 唐捷,任震,胡秀珍.一种可操作的需求侧管理峰谷分时电价定价方法[J].电网技术,2005,29(22):71-75. TANG Jie, REN Zhen, HU Xiu-zhen. An Operable Peak-valley Time-of-use Tariff Setting Method for Demand Side Management[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 71-75.
- [2] 曾鸣.电力需求侧管理[M].北京:中国电力出版社,2001.

- [3] 刘昌,姚建刚,余虎,等.一种新型的电网输电阻塞管理模式[J].电网技术,2005,29(12):16-21. LIU Chang, YAO Jian-gang, YU Hu, et al. Research of a New Congestion Management Mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 16-21.
- [4] Gedra T W, Varaiya P P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 122-128.
- [5] Fahrioglu M, Alvarado F L. Designing Incentive Compatible Contracts for Effective Demand Management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1255-1260.
- [6] 方勇,张少华,李渝曾.一种激励相容的电力市场中断负荷管理合同模型[J].电力系统自动化,2003,27(14):23-26. FANG Yong, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng. An Incentive Compatible Contract for Interruptible Load Management in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 23-26.
- [7] 方勇,李渝曾.电力市场中激励性可中断负荷合同的建模与实施研究[J].电网技术,2004,28(17):41-46. FANG Yong, LI Yu-zeng. Modeling and Implementation of Incentive Interruptible Load Contracts in Electricity Markets[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 41-46.
- [8] 王建学,王锡凡,王秀丽.电力市场可中断负荷合同模型研究[J].中国电机工程学报,2005,25(9):11-16. WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. Study on Model of Interruptible Load Contract in Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 11-16.
- [9] 王建学,王锡凡,张显等.电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(2)——可中断负荷运营[J].电力自动化设备,2004,24(6):1-5. WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible Load Management in Power Market and Interim System Part 2 Operation of Interruptible Load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 1-5.
- [10] 张显,王锡凡,王建学,等.可中断电力合同中新型期权的定价.中国电机工程学报,2004,24(12):18-23. ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Pricing for Exotic Option of Interruptible Electricity Contracts[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 18-23.

收稿日期:2007-05-30

作者简介:

邱文峰(1964-),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力需求侧管理、电力系统可靠性; E-mail:qiuwf-gd@163.com

唐捷(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为电力需求侧管理、直流输电可靠性。