

[峰谷电价]

模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策模型

文/俞文瑾

国网陕西省电力有限公司营销服务中心（计量中心）

针对供电方与用户矛盾较大的问题，提出了模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策模型。根据电力用户不同用电需求，模糊化处理峰谷时段数据，在平衡供电方和用户利益的基础上，确定模糊关联优化下的峰谷时段。通过减小峰谷时段电价，制定调整电价上下浮动比例的方案。

通过对电力需求侧的管理，指导电力用户合理用电，是解决电力供需紧张、维护电力市场稳定的一项重要措施。在电力管理过程中，峰谷分时电价自适应调整是电力需求侧调控中较为常见的一种方法。峰谷分时电价是指电力公司根据用户用电情况，将24 h的用电分为三个时段，分别是高峰时段、平段时段和低谷时段，并在每一时段设定不同的电价，激励电力用户合理安排用电时间，达到削峰填谷的目的。

峰谷分时电价问题已成为国内外学者关注的热点。文献[1]基于价格弹性矩阵提出峰谷分时电价自适应决策方法。该方法通过构建需求价格弹性矩阵，将刚性荷载和柔性荷载结合起来，设置不同时间段对其他时间段价格影响的权重，应用遗传算法求解决策矩阵。文献[2]基于需求响应提出峰谷分时电价自适应决策方法。该方法从考虑用户满意度出发，构建供电和用电方的收益目标函数，通过决策变量映射技术，将变量分配到博弈双方策略集合中，经过多轮博弈求解目标函数。以上方法在决策过程中受到多种影响因素制约，各个因素之间的评定结果存在一定模糊性，无法解决电价决策过程繁杂、供电方与用户矛盾较大的问题，获得的决策结果无法降低电价总值。为了在保证供电方获益的基础上降低电价，让用户收益，解决供电方与用户的

矛盾，构建了模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策模型。模糊化处理峰谷时段数据，基于供电方和用户利益的平衡目标，确定模糊关联优化下的峰谷时段；减小峰谷时段电价，制定调整电价上下浮动比例的方案；获取并分析频繁模糊模态集中的模态相似性，设计模糊综合决策集合挖掘算法；构建峰谷分时电价自适应决策模型，获得决策方案。

模糊关联优化下的峰谷时段的确定

根据电力用户不同用电需求，所需的用电负荷大不相同，由于电网日负荷曲线起伏不定，所以该曲线存在显著的峰谷性。利用模糊关联算法，根据峰谷数据特征划分峰谷期，从峰谷时段数据中选取最优的组合，调整不同时段的价格，达到最佳的削峰填谷效果。

为了确定峰谷时段，设置了以下两条规则：

- 1) 在负荷曲线上，最高峰点在峰值期间的概率为100%，在低谷时段的可能性为0。
- 2) 在负荷曲线上，最低谷点在低谷期间的概率为100%，在峰值时段的可能性为0。

基于这两条原则分析日负荷曲线，如图1所示。

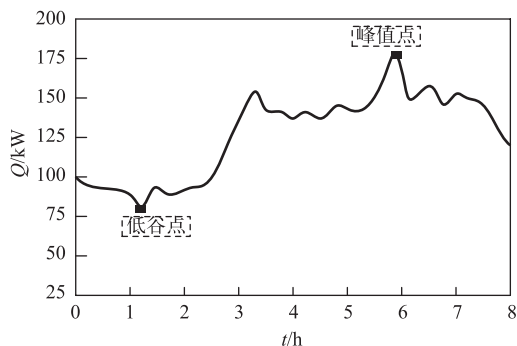


图1 日负荷曲线示意图

图1中，横坐标时间 t 是以小时为单位的，纵坐标电能 Q 是以kW为单位的。由图1可以清晰地看出一个低谷点和一个峰值点，这两个点是日负荷曲线的最小值和最大值。很明显，低谷点在最低点的可能性是100%，在最高点的可能性是0；峰值点在最高点的可能性是100%，在最低点的可能性是0，与所设置的两条规则一致。

模糊关联算法将模糊数学引入到关联规则中，得到模糊关联规则，用来处理数量型的数据。在模糊关联下经过模糊数学的处理可以发现，靠近低谷点和峰值点附近的点都有类似的特征。模糊关联下的模糊数学处理集合为：假设存在 n 种区分方式，每种都记作 f_i ，由此划分峰谷时段的集合

$$F = \{f_i, i=1, 2, \dots, i\} \quad (1)$$

在每种峰谷期划分阶段，利用模糊关联进行优化，从中选取最优的组合，即在此条件下，可以达到最佳的削峰填谷效果，从而最大程度地平衡了供电方和用户的利益。式（1）的集合就是峰谷时段划分的最优结果，这时的电价为相应的峰谷电价。根据以上原理，将24 h可以划分为：

- 1) 低谷点一定在谷期，其附近处于谷时段概率大的点初步归入低谷期。
- 2) 峰值点一定在峰期，其附近处于峰时段概率大的点初步归入高峰期。
- 3) 其他的点在初期归入平时段。

峰谷分时电价自适应决策模型

1. 决策模型流程设计

峰谷分时电价的决策模型可以通过假定检验来进行，假定峰谷分时电价差异更大的比率，并对此电价水平下的日负荷需求曲线进行分析。当用户的

电费费用变动很大时，通过减小峰谷时段电价来调整电价上下浮动比例，经过多次调整，得到最终符合目标的调整方案。设计模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策模型流程如图2所示。

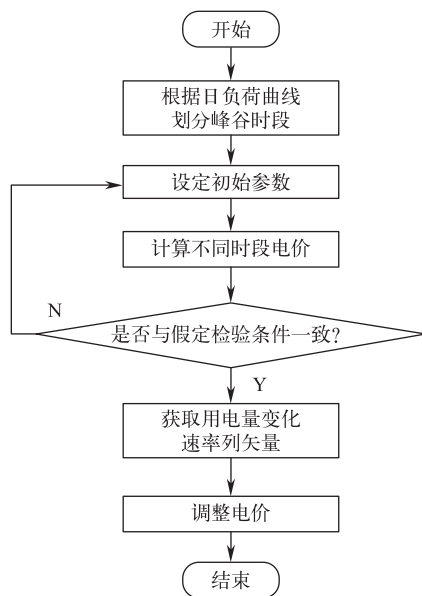


图2 模型决策流程

假设1：将一日中的电力负荷分布分成 T_1 、 T_2 和 T_3 三个时段，其中 T_1 是高峰时段， T_2 是平时时段， T_3 是低谷时段，合计24 h。

假设2：设 Y 为未进行峰谷分时调整前的电价， Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别为进行峰谷分时调整后的高峰、平时和低谷时段的电价，且高峰时段是在平时时段基础上上浮 λ_1 个点，低谷时段是在平时时段基础上下降 λ_2 个点。基于这些参数，计算峰谷分时调整后的高峰、低谷时段的电价，公式为

$$Y_1 = (1 + \lambda_1)Y_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = (1 - \lambda_2)Y_2 \quad (3)$$

假设3：实行峰谷分时调整后，用电需求发生了变化。利用电力需求弹性的变化值，得出了峰谷分时电价后一天内各时段的用电量变化速率的列矢量，从而得到峰谷分时电价实施后的用电量。

峰谷分时电价的设计主要是根据电力需求调整电价，平衡电力公司和用户利益。实行峰谷电价后，电力公司的权益不会因此而受损，用户使用的电价有所降低。实际情况是，在执行前和执行期间，为确保电力市场的整体用电量没有显著的变化，实际操作人员的利润可以承受2%的下降幅度。

2. 基于模糊关联优化下的模糊综合决策集合挖掘

在确定最终符合目标的调整方案后,为了获取模糊模态集合,提出了基于模糊关联优化下的模糊综合决策集合挖掘方法,以改善峰谷分时电价的适应性。

基于模糊关联优化下的模糊综合决策集合挖掘过程,具体步骤为:

1) 构造频繁模态。根据各模糊概念属性建立一种频繁模糊模态集合,对事务集合 D 进行存取,获得频繁模态。

2) 获取频繁模糊模态集合。根据 $k-1$ 频繁模糊模态集合 L_{k-1} 构造可能的 k 频繁模糊模态集合 C_k ,并将其存储到事务集合 D 中,对事务集合的支撑性进行计算,得到 k 频繁模糊模态集合 L_k 。

3) 分析集合中模态相似性。因为 k 频繁模糊模态 P 的 m 个子模态属于频繁模糊模式,所以 $k-1$ 频繁模糊模式中的项目按照属性的下标由大小顺序排列,故可能的 k 频繁模糊模式由两个 $k-1$ 频繁模糊模式构成,这两个模式只有最后一个模态是不同的。

设计的基于模糊关联优化下的模糊综合决策集合挖掘过程如图3所示。

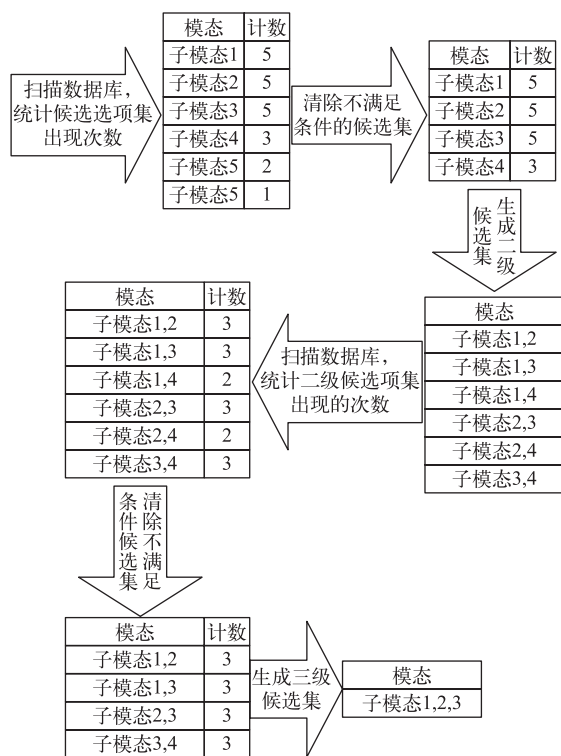


图3 基于模糊关联优化下的模糊综合决策集合挖掘过程

由图3可知,频繁模糊模式的挖掘算法所构造的频率模糊模型是由属性中的模糊概念构成的,使得峰谷电价具有较好的适应性。

3. 峰谷分时电价自适应决策模型构建

获取模糊模态集合后,在电力市场上引入发电厂商与销售商的竞争,使得电价能够体现供求关系,保证供电方与用户均能获益。在此基础上,结合自适应决策的整体目标,建立供求关系的定价模型。未进行峰谷分时调整前的电价为 Y ,24 h的总电能 Q_0 ,得到的供电方增益,用户电费为

$$D_0 = Y_0 Q_0 \quad (4)$$

进行峰谷分时调整后,得到的供电方增益,用户电费为

$$D_1 = Y_1 q_1 + Y_2 q_2 + Y_3 q_3 \quad (5)$$

式中, q_1 、 q_2 和 q_3 分别表示负荷电量。

实行峰谷分时调整后,设受到削峰填谷而节省的费用为 D_1 ,则供电方电价自适应调整的策略为 $D_1 \geq D_0 - D_i$;未实行峰谷分时调整,供电方电价自适应调整的策略为 $D_0 \geq D_1$ 。

总体而言,用户具有如下的消费心理:与常规和低谷电价相比,在高峰期的电费较高,降低了用电量;与常规和峰期的电价比较,在低谷期的电费要低,使用电量有所提高。峰谷分时调整后,日负荷曲线根据高峰、平时和低谷的负荷大小确定。

峰谷平时段电价为变量,利用多目标规划模型来均衡峰谷,使供电方和用户均达到最大化满意程度,从而使峰谷负荷降到最低。构建的峰谷分时电价自适应决策模型为

$$g = \min \left(\omega_1 \frac{\max q'}{\max q} + \omega_2 \frac{\max q' - \min q'}{\max q - \min q} \right) \quad (6)$$

式(6)中, $\max q$ 和 $\max q - \min q$ 分别表示未实行峰谷电价的负荷最大值和峰谷差值; $\max q'$ 和 $\max q' - \min q'$ 分别表示实行峰谷电价的负荷最大值和峰谷差值; ω_1 、 ω_2 分别表示未实行和实行的权值。 ω_1 、 ω_2 取值直接影响模型的决策结果,对于用电量较大的用户, ω_1 的取值更大;对于用电量较小的用户, ω_2 的取值更大,由此完成峰谷分时电价自适应决策。

算例

为了更好地验证构建的模糊关联优化下的峰谷

分时电价自适应决策模型有效性，以2019年1月1日—2020年12月31日某省某市的供电公司符合控制中心的实际数据进行分析。数据训练集、验证集以及测试集的划分比例为90%、5%与5%。采用Z-Score处理每类连续型数据。本文采用的硬件设备为小型GPU工作站，包含Intel Xeon GOLD 6135M处理器、64 GB内存和NVIDIA Geforce GTX 1080TI 11 GB显卡；采用Pytorch作为模糊挖掘算法框架。处理结果保存在 SQL Server数据库中。

统计调整前平均负荷变化情况见表1。

表1 调整前平均负荷变化情况

时间/h	实行前电荷/kW	原电荷/kW
2	19.0	20.0
4	19.2	21.3
6	20.4	23.5
8	25.1	23.4
10	25.0	23.5
12	22.8	22.0
14	22.4	21.9
16	23.0	22.7
18	24.1	23.3
20	25.1	23.7
22	22.1	20.5
24	18.3	22.4

根据当时电价，统计未实行峰谷分时调整前的电价为0.51元/（kW·h），由表1可知，电价总值为135.915元。

结合表1确定了划分的时段：峰时为8:00—12:00/16:00—20:00；平时为7:00—8:00/12:00—16:00/20:00—23:00；谷时为23:00—次日7:00。

分别使用基于价格弹性矩阵的峰谷分时电价自适应决策方法和基于需求响应的峰谷分时电价自适应决策方法，分析调整后的平均负荷变化情况见表2、表3。

由表2可知，使用基于价格弹性矩阵的峰谷分时电价自适应决策方法调整了电荷，但调整幅度不大，调整后的电价总值为136.833元。

由表3可知，使用基于需求响应的峰谷分时电价自适应决策方法，在用电不同时期大幅度调整了电荷，但在用电高峰期电荷依然较大，调整后的电价总值为138.516元。

表2 使用价格弹性矩阵方法获取的电价

时间/h	电荷/kW	电价/元
2	18.0	0.51
4	17.2	0.51
6	19.0	0.51
8	26.1	0.51
10	26.0	0.51
12	22.8	0.51
14	26.4	0.51
16	25.5	0.51
18	24.1	0.51
20	25.1	0.51
22	23.1	0.51
24	15.0	0.51

表3 使用需求响应方法获取的电价

时间/h	电荷/kW	电价/元
2	17.0	0.51
4	17.5	0.53
6	19.2	0.51
8	28.1	0.49
10	29.0	0.51
12	24.8	0.50
14	22.4	0.51
16	23.0	0.51
18	25.1	0.51
20	27.1	0.51
22	22.1	0.51
24	16.3	0.51

统计当时实行峰谷分时调整后的高峰、时段和低谷电价分别为0.65元/（kW·h）、0.40元/（kW·h）和0.25元/（kW·h），得到的使用模糊关联优化决策方法的电价见表4。

表4 使用模糊关联优化方法获取的电价

时间/h	电荷/kW	电价/元
2	11.0	0.25
4	10.1	0.25
6	12.3	0.25
8	26.0	0.65
10	28.0	0.65
12	25.0	0.65
14	22.4	0.40
16	24.5	0.65
18	27.5	0.65
20	28.0	0.65
22	22.1	0.40
24	10.0	0.25

由表4可知,使用模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策方法,调整后的电荷在峰时电荷量增加,在平时保持不变,在谷时电荷量减少,调整后的电价总值为132.00元。

将调整后的峰谷电价决策应用于该供电公司,随机选取1 000名用户进行满意度客户端线上调查,统计用户满意度结果见表5。

表5 实行峰谷电价决策前后用户满意度 (%)

用户满意度	调整前峰谷电价方案	调整后峰谷电价方案
用户满意度	0.793	0.924
电费支出满意度	0.712	0.896
综合满意度	0.752	0.908

由表5可知,将调整后的峰谷电价决策实际应用后,获得了更高的用户满意度,证明本文决策结果缓解了供电方与用户的矛盾。

结束语

构建的模糊关联优化下的峰谷分时电价自适应决策模型,充分考虑了削峰填谷的影响,兼顾了供货商与用户的利益,在电力市场上引入发电厂商与销售商的竞争,电价能够体现供求关系,保证供电方与用户均能获益。利用模糊多目标决策的方法,确定了最优的峰谷期电价定价方案,电价总值最小,通过对电网的削峰填谷,电网的运行更加高效、更加稳定。

(收稿日期:2022-08-15)

参考文献

- [1] 刘浩田,陈锦,朱熹,等.一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):116-123.
- [2] 胡鹏,艾欣,张朔,等.基于需求响应的分时电价主从博弈建模与仿真研究[J].电网技术,2020,44(2):585-592.
- [3] 初保驹,朱少林.新电改背景下阶梯分时电价模型优化研究[J].价格理论与实践,2020(2):43-46,174.
- [4] 岳红权,曹敏,张栋,等.计及需求响应的大用户购电决策优化模型[J].数学的实践与认识,2020,50(3):143-153.
- [5] 徐冰涵,孙云莲,易仕敏,等.考虑分时电价

- 的居民用户短期用电量分类预测及修正方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):144-151.
- [6] 张娜,张明理,宋坤,等.能量和调峰市场并存下灵活性热电企业日前产量决策模型[J].热力发电,2021,50(3):106-113.
- [7] 程曦,吴霜,王静怡,等.输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):116-123.
- [8] 肖白,崔涵淇,姜卓,等.基于有限理性用户选择行为的定制化电价套餐设计[J].电网技术,2021,45(3):1050-1058.
- [9] 夏依莎,刘俊勇,刘继春,等.奖惩机制下的互补发电系统中长期与日前嵌套鲁棒优化调度模型[J].电网技术,2021,45(10):3813-3822.
- [10] 杨昭,张钢,赵俊杰,等.基于变分模态分解和改进粒子群算法优化最小二乘支持向量机的短期电价预测[J].电气技术,2021,22(10):6.
- [11] 黄南天,包佳瑞琦,蔡国伟,等.多主体联合投资微电网源-储多策略有限理性决策演化博弈容量规划[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1212-1225,1412.
- [12] 李泽宏,曾杨超,周畅游,等.基于电力现货市场出清模拟的节点电价影响因素分析[J].电气技术,2020,21(5):7.
- [13] 岳菁鹏,胡志坚,陈纬楠.物联网环境下考虑多个利益主体的区域配电系统能量管理[J].电力自动化设备,2020,40(8):111-118.
- [14] 冷钊莹,陈中,邢强,等.基于负荷类型细分的负荷聚合商日前投标非合作博弈模型[J].电网与清洁能源,2020,36(5):17-28.
- [15] 周丹,戴慧雯,陆海清,等.多时间尺度需求侧响应模型及其电价定价策略[J].浙江工业大学学报,2020,48(1):40-46,96.
- [16] 黄靖茵,黄康乾,向德军,等.基于电力交易平台大数据的多区域电价预测研究[J].电气应用,2020,39(9):36-41.
- [17] 罗微,蔡莹,谭锡林,等.基于节点边际电价的市场过渡期日前出清策略[J].电气应用,2020,39(3):38-43.