

基于熵权—灰色关联变权重的 有序用电决策方法

唐夏菲, 殷旭锋, 刘镔志, 潘 轩, 李雪芹, 彭雪莹

(长沙理工大学湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心, 湖南 长沙 410004)

摘 要:当前,季节性、时段性电力供需矛盾日益凸显,通过错峰、错峰、限电等措施开展的有序用电在一定程度上能够缓解电力供需紧张局势,更好地保障电力系统的平稳运行。在此背景下,提出一种基于熵权—灰色关联变权重的有序用电决策方法。首先,克服单一权重对异常指标不能灵敏反应的缺陷,将信息熵与灰色关联度相结合引入可变权重,对用户参与有序用电的潜力进行综合评估,以此确定企业参与有序用电优先级。然后,为避免传统人为编排有序用电方案导致收益损失,提出有序用电辅助决策方法,并基于 MATLAB 仿真模拟用户错峰、错峰等操作。最后,以长沙市黑石线 2020 年迎峰度夏运行方案为例验证决策方法的准确性与有效性。仿真结果表明,所提出的基于信息熵—灰色关联变权重的有序用电辅助决策方法,能够有效缓解高峰期电网调峰压力,具有一定的经济性与工程实践价值。

关 键 词:信息熵;灰色关联度;变权重;有序用电辅助决策方法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.018 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2022)05-0164-10

The decision-making method of orderly power consumption based on variable weights given by the entropy weight-grey relation

TANG Xiafei, YIN Xufeng, LIU Louzhi, PAN Xuan, LI Xueqin, PENG Xueying

(Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Nowadays, the contradiction in the seasonal and periodic power supply and demand is gradually dominant. The orderly use of electricity via avoiding peak and shifting peak can alleviate the contradiction, delay the construction of transmission and distribution facilities and confirm the safe operation of the power system. Under the background, a decision-making method of orderly Power consumption is proposed with weight given by the entropy weight-grey relation. Firstly, since the constant weight is insensitive to abnormal indicators, the information entropy is combined with the grey correlation degree to decide the weight. After that, the potential is comprehensively evaluated for users participating in the orderly power consumption so as to determine the priority of enterprises to participate in orderly power consumption. Then, in order to reduce the profit loss of traditional orderly power consumption scheme by the manual decision, an auxiliary decision-making method of orderly power consumption is proposed to simulate the peak

收稿日期:2021-04-04;修回日期:2021-12-01

基金项目:湖南省自然科学基金(2020JJ5585,2020JJ5777);长沙理工大学专业硕士研究生“实践创新与创业能力提升计划”(SJCX201951)

通信作者:殷旭锋(1995—),男,硕士,主要从事电力系统优化研究;E-mail:2473500718@qq.com

avoidance and peak staggering of users. In the end, the operation scheme of the Changsha Heishi line in summer 2020 is simulated as an example. It is shown that the proposed method can alleviate the peak load regulation pressure of the power grid during the peak time and it has good economic and practical value in engineering.

Key words: information entropy; gray correlation degree; variable weight; decision-making method of orderly power consumption

当前中国正处于社会经济发展大变革、大调整时期,社会整体用电量呈现不断地攀升的趋势,季节性、阶段性电力供需矛盾现象尤为凸显^[1-3]。在电力出现供应不足、电力系统出现供电突发状况时,通过错峰、错峰、限电等措施开展的有序用电工作,一定程度上能够缓解电力供需紧张、保障电力系统的平稳运行^[4-6]。

有序用电方案的制定主要采取等级划分方法,根据用户所属变电站或者线路,将负荷缺口进行粗略分组,在公平性前提下确保各组错峰量的差值在合理范围内。当地区出现负荷缺口时,在有效的部门管控下,用户依据错峰量进行轮休。这种方案在一定程度上保障了电力系统的平稳运行,但其一刀切的轮休方式较为单一,错峰量也常常偏大,对电网运营收益造成损失的同时降低了用户用电满意度^[7-8]。

目前,对有序用电的研究主要集中于参与有序用电用户的负荷特性分析和调控潜力的评估,对有序用电方案制定与编排上的研究涉及较少。在用户负荷调控价值评估方面:通过对用户价值的分析和定义,建立了基于潜在价值、当前价值和贡献价值 3 个方面的评价指标体系,并从这 3 个角度对用户负荷特性进行聚类分析^[9-10]。文献[11]分别从不同方面分析用户参与有序用电综合潜力,考虑经济、环保以及用户生产特性等因素建立指标体系,运用不同方法实现最终的价值评估;文献[12]综合考虑用户的参与意愿,提出了包括二次分组机制、补控机制、补偿机制在内的负荷调控机制,解决了传统负荷调控中存在的用户参与公平性、是否具有参与意愿等问题;文献[13]针对用户有序用电中排序评价时存在的不同数据信息形式问题,采用了一种基于混合占优的混合多属性决策方法,在考虑主客观综合赋权的基础上,通过计算加权贴近度对参

与有序用电的用户进行排序,并未对具体的错峰方式作深入研究;文献[14-15]分别针对大用户的有序用电方案和有序用电序位建立了相应的指标体系,但均未提及具体的调控手段;文献[16]提出了基于改进灰靶—前景理论的负荷调控潜力量化方法,得到各用户的检修、轮休、错时和错峰潜力,对于实际中如何进行错峰操作并未说明。

综上所述,针对参与有序用电企业负荷调控潜力以及用户有序用电辅助方案制定研究不足,提出将信息熵与灰色关联度结合,引入变权重的方法应用于企业参与有序用电潜力的综合评估,从而确定参与有序用电的优先级。通过有序用电辅助决策方法实现企业错峰操作,得到错峰企业具体数据,包括错峰具体时刻、错峰负荷比例等相关信息,为人为编排有序用电方案提供相应指导。该方法能够有效调整用电结构,缓解高峰期电力供应压力。

1 信息熵与灰色关联度权重的确定

1.1 信息熵权重确定

信息熵能够客观反映不同指标对事件决策所包含的信息量,从而根据信息量的多与少确定不同指标权重的大小。熵值与指标所提供信息量具有相反关系,当某个指标的熵值越大,其权重会越小,对最终决策影响将会越小^[17]。

设有 n 个用户 m 项指标构成的评价矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$,首先对不同指标原始数据进行归一化,其方法方法如下。

正向指标归一化方式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

负向指标归一化方式为

$$y_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值; y_{ij} 为第 i 个企业对应的第 j 个指标归一化后值; x_{ij} 为第 i 个企业对应的第 j 个原始指标数据值。

定义标准化为

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (3)$$

式中 p_{ij} 为标准化指标数据; n 为企业用户个数; y_{ij} 为第 i 个企业对应的第 j 个指标归一化后值。

各评价指标的信息熵为

$$E_j = -\frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (4)$$

式中 p_{ij} 为标准化指标数据; m 为指标个数。

各评价指标的信息熵权重为

$$\alpha_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (5)$$

式中 E_j 为评价指标的信息熵。

1.2 灰色关联度权重确定

由于行业特性、生产时间、规模差异性较大,参与有序用电用户指标数据不能满足某种典型概率分布。因此,传统分析方法(样本数据量的要求大,以及样本数据需满足典型概率分布)已不再适用。灰色关联分析能够克服其他分析方法存在的不足^[18]。本文以每个指标为数据序列进行灰色关联分析。

1) 首先将文 1.1 得到的标准化处理后的评估量化值 y_{ij} 作为比较数列,本文解决问题为综合评估相关问题,参考数列的确定可以选取每个指标中所有子序列中的最佳值组成的新序列 $(x(1), x(2), \dots, x(m))$ 确定。

2) 计算灰色关联系数。

$$\epsilon_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|\hat{x}(j) - y_{ij}| + \rho \Delta_{\max}} \quad (6)$$

其中, $\hat{x}(j)$ 为参考数列标准化处理后的数值, $\Delta_{\min} = \min_{i=1}^n \min_{j=1}^m |\hat{x}(j) - y_{ij}|$ 为两级最小差, $\Delta_{\max} = \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m |\hat{x}(j) - y_{ij}|$ 为两级最大差, ρ 为分辨系数,通常取值为 0.5。

3) 根据上述结果可得比较数列和参考数列之间关联度。

$$\gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_{ij} \quad (7)$$

式中 n 为评估用户个数; ϵ_{ij} 为灰色关联系数。

4) 最终灰色关联度权重如下:

$$\beta_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{j=1}^m \gamma_j} \quad (8)$$

式中 n 为评估企业用户的个数; γ_j 为比较数列和参考数列之间关联度。

2 基于熵权—灰色关联变权重评估方法

2.1 用户参与有序用电潜力评估指标

企业用户由于受到规模、生产工艺等影响,不同用户的用电负荷特性存在较大差异。为了实现用户参与有序用电调控潜力量化评估,本文参考国家发展和改革委员会发布的《有序用电工作指南》中关于参与有序用电能力的用户分类依据,充分考虑用户企业规模、调控能力以及社会效益,构建了图 1 所示企业有序用电潜力评估指标体系。

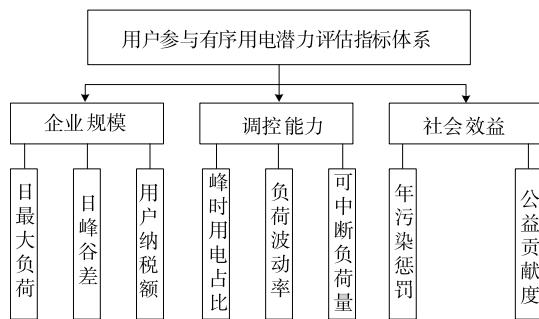


图 1 企业有序用电潜力评估指标体系

Figure 1 Evaluation index system of orderly power utilization potential of enterprises

其中日最大负荷 A_1 、日峰谷差 A_2 、用户纳税额 A_3 (正向指标) 反映参与有序用电企业生产规模的大小,其值越大,表明用户参与有序用电能力强;峰时用电占比 B_1 、可中断负荷 B_3 (正向指标)、负荷波动率 B_2 (负向指标) 反映企业参与有序用电调控能力,峰时用电占比、可中断负荷越大,企业错峰能力越强,负荷波动率越小,用户错峰能力越

强;年污染惩罚成本 C_1 (正向指标) 反应用户对环境的保护程度,公益贡献度 C_2 指用户参与社会公益事业支出费用(负向指标)越小,越优先参与有序用电。

2.2 用户潜力变权重评估方法

通过文 1.1、1.2 计算所得信息熵权重和灰色关联度权重,利用下式可以计算不同指标的综合权重。

$$\varphi_j = \theta_1 \alpha_j + \theta_2 \beta_j \quad (9)$$

式中 φ_j 为第 j 个指标的综合权重; θ_1 、 θ_2 分别为信息熵权重与灰色关联度权重对应的权重系数,满足 $\theta_1 + \theta_2 = 1$ 。本文考虑将信息熵权重与灰色关联度权重结合应用于有序用电调控潜力评估。因此,为确保公平性,本文中权重系数 θ_1 、 θ_2 取值均为 0.5。

上述计算所得的综合权重为常权重,其值不会随指标值的变化而变化。因此,当指标值出现较大异常时,最终的评估结果不会造成明显影响。本文参考文献提出的均衡系数变权重计算方法^[19-20],能够很好地避免常权重的缺点。利用变权重理论将信息熵权重与灰色关联度权重结合,避免仅依靠单一权重评估缺陷,更加符合实际情况的需求,同时变权重能够很好地把异常指标值的影响纳入到综合评价中。计算公式如下:

$$\zeta_j = \frac{\varphi_j V_j^{\psi-1}}{\sum_{j=1}^m \varphi_j V_j^{\psi-1}} \quad (10)$$

式中 φ_j 为第 j 个指标的综合权重; ζ_j 为第 j 指标的变权重; V_j 为第 j 指标; ψ 为均衡系数,其取值范围为 $[0, 1]$,其值越小,表示对相应状态量关注越高,本文取值 0.2 ^[21]

最后,利用下式得到不同用户参与有序用电潜力的评估得分。

$$\omega = \sum_{j=1}^m \zeta_j V_j \quad (11)$$

3 用户有序用电辅助决策方法

传统有序用电错峰方案中人为主观性强、操作简单的“整体性”、“一刀切”无计划拉闸限电管理方式,一方面降低了用户的用电满意度,另一方面,

降低了电网运营效益。对于电网公司而言,目前主要依赖专家,人为制定有序用电方案。本文针对传统有序用电编制与实施存在不足,提出了基于 Matlab 的企业有序用电辅助决策方法,为电网制定有序用电提供相应的指导与参考,该方法的相关模块说明如图 2 所示。

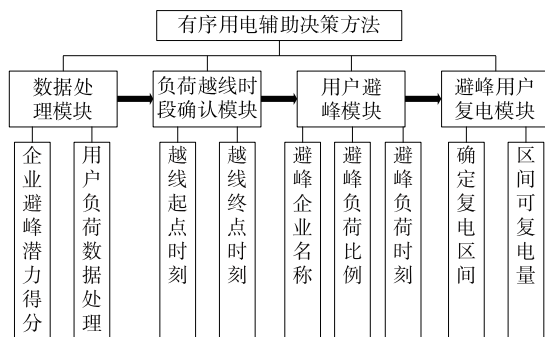


图 2 有序用电辅助决策方法功能模块说明

Figure 2 Diagram of sequential electricity assisted decision making method

数据预处理模块读取线路专变、公变负荷数据,形成日负荷曲线,依据变权重的综合评估得分实现用户参与有序用电等级排序。负荷越线时段确认模块调用 CrossoverFunction(基于 C 语言编写的 function 函数,根据前时刻负荷值小于负荷限额值,后时刻负荷值大于负荷限额值确定越线起点时刻,相反为越线终点时刻,两两组对确定出越线时间段)确定需要错峰区间。用户错峰模块调用 Cut-loadFunction 实现用户错峰操作。错峰用户复电模块根据负荷限额与负荷低谷时段负荷量的差值确定时段可复负荷量,有序用电决策者根据错峰量与可复负荷量大小确定相应的错峰方案。

最终基于信息熵—灰色关联变权重的有序用电辅助决策方法实现流程如图 3 所示,详细实现步骤如下所述。

1) 读取企业用户初始指标数据,构建指标矩阵 \mathbf{X} ,对指标数据标准化、归一化处理,计算指标信息熵权重。选取指标参考优值构成参考数列,通过文 2.2 计算方法,计算灰色关联系数以及灰色关联度权重,同时采用线性插值计算企业不同指标得分情况。

2) 通过文 2.2 计算方法,计算指标综合权重与

变权重,依据步骤1)中不同用户不同指标得分与变权重得到各用户参与有序用电潜力的评估得分。

3)在数据预处理模块中,读取线路专变与公变企业负荷数据,形成线路日负荷曲线。同时,根据步骤2)得到的有序用电企业避峰潜力评估得分,划分企业参与有序用电等级,以此确定参与有序用电的优先级。

4)在负荷越线时段确认模块中,通过输入线路负荷限额 W ,调用 CrossoverFunction 函数确定需要避峰区间。

5)依据用户参与有序用电等级排序,调用 CutdownFunction(主要功能实现为图3中虚线框图内容,首先对第一个越线时段进行避峰操作。同等级用户按照相同避峰比例进行避峰,初始避峰量的比例为0.01,同等级用户避峰负荷量累加值为 Q_1 ,当负荷累加值大于负荷差额 P (时刻负荷值与负荷限额 W 差值)后,退出比例循环环节,得到企业在第一个避峰区间的避峰比例、避峰时间等相关信息。后续避峰区间按照上述相同原则进行)操作实现避峰操作。

6)避峰用户复电模块确定负荷低谷时段参与避峰用户的可复电量,依据避峰量与可复电量大小,完成用户在低谷时段复电操作。

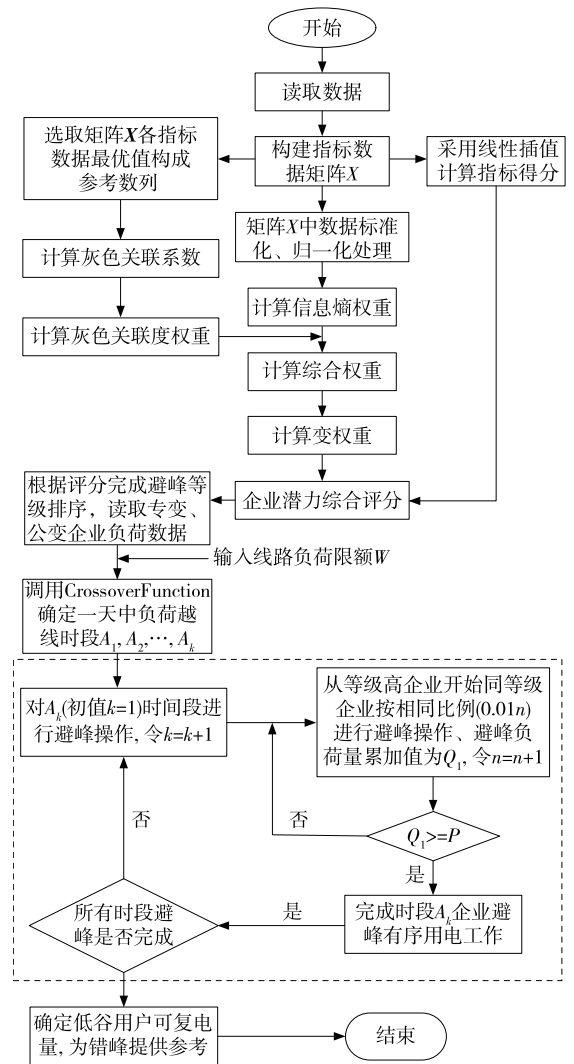


图3 有序用电辅助决策方法实现流程

Figure 3 The flow chart is realized by the orderly electricity decision-making method

4 算例分析

4.1 潜力评估算例分析

算例选取长沙市2020年黑石线10 kV线路用户的相关信息,采用本文所提出的方法对相关用户

进行参与有序用电潜力的评估,选取专变7个用户的数据进行算例分析,用户初始指标数据见表1所示。

表1 用户初始指标数据

Table 1 Enterprise related index data

用户	A_1/kW	$A_2/\%$	$A_3/\text{万元}$	$B_1/\%$	$B_2/\%$	B_3/kW	$C_1/\text{万元}$	$C_2/\text{万元}$
1	3 010	2 974	406	0.95	1.08	968	30	86
2	3 108	2 869	468	0.96	1.12	953	29	65
3	271	229	98	0.74	0.51	37	2	12
4	3 250	2 931	375	0.93	1.24	546	24	94
5	140	133	12	0.73	0.87	28	0	10
6	143	121	167	0.67	0.64	24	4	47
7	646	252	32	0.56	0.14	16	0	24

为防止指标得分出现过低情况,设定正向指标最大值得分 100,最小值得分 60,负向指标相反,中间指标采用线性插值计算得分。例如,在日负荷最大值指标例中,用户 4 指标值最大,其得分为 100,用户 5 指标值最小,其得分为 60,其他用户指标得分采用线性插值计算,各指标的得分如表 2 所示。

运用式(5)、(8)、(9)、(10)不同指标权重计算方法,得到指标不同权重如表 3 所示。

表 2 用户相关指标得分

Table 2 Enterprise related index data

用户	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂
1	96.9	100.0	65.4	99.5	65.8	100.0	96.9	63.8
2	98.2	98.5	60.0	100.0	64.4	99.4	100.0	73.9
3	61.7	61.5	92.5	78.1	86.6	60.9	62.5	99.0
4	100.0	99.4	68.2	97.1	60.0	82.3	89.5	60.0
5	60.0	60.2	100.0	77.3	73.5	60.5	60.0	100.0
6	60.1	60.0	86.4	71.1	81.8	60.3	64.9	82.4
7	66.5	61.8	98.2	60.0	100.0	60.0	60.0	93.3

表 3 各指标不同权重计算结果

Table 3 Calculation results of different weights for each index

指标	信息熵权重	灰色关联度权重	综合权重	变权重
A ₁	0.152 0	0.841 3	0.496 7	0.183 2
A ₂	0.171 9	0.421 4	0.296 7	0.107 4
A ₃	0.120 4	0.401 2	0.260 8	0.092 5
B ₁	0.060 9	0.766 0	0.413 4	0.130 9
B ₂	0.153 0	0.379 7	0.266 2	0.087 9
B ₃	0.287 2	0.573 4	0.430 3	0.141 2
C ₁	0.462 1	0.392 5	0.427 3	0.139 6
C ₂	0.054 9	0.684 3	0.369 6	0.117 3

由表 3 所得结果可知,在信息熵权重中,年惩罚成本、可中断负荷量、日峰谷差指标对最终评估结果的影响程度位列前 3 位;考虑指标数列与参考数列关联程度所得灰色关联度权重中,对最终结果影响较大指标分别为日最大负荷、峰时用电占比、公益贡献度;变权重结果表明,日最大负荷、可中断负荷量、峰时用电占比对最终权重结果影响较大,且 5 个指标数据最终权重差距较小。单一从信息熵权重或者灰色关联度权重进行综合评估存在不同指标权重的差异性,为避免该差异性,通过引

入变权重的综合评估方法,使得企业参与有序用电潜力的评估结果更加公平合理,避免传统专家赋权的主观性。利用所得不同指标变权重得到各个企业用户最终评估得分如表 4 所示,得分越高,表征其参与有序用电能力越强。考虑缺失数据的处理以及计算精度误差,将得分 60 到 100 的用户以 5 为间隔划分参与有序用电等级,得分越高、等级也越高,不同用户等级情况如表 4 所示。

表 4 用户有序用电潜力综合评估结果

Table 4 Comprehensive assessment results of orderly power utilization potential of enterprises

用户	得分	等级
1	92.6	二级
2	93.2	二级
3	74.3	六级
4	87.2	三级
5	65.9	七级
6	69.6	七级
7	68.4	七级

4.2 有序用电辅助决策方法算例分析

本文选取长沙市 2020 年黑石线 10 kV 线路一天的负荷数据(每 15 min 采集一次)进行分析。用户评估等级越高,参与有序用电避峰能力强,优先参与有序用电。根据文 4.1 算例结果,用户 1、2 优先参与有序用电。有序用电方案可根据当地实际情况进行预警等级细分,方案等级对应不同预警信号如表 5 所示。

表 5 等级预警信号

Table 5 Warning signal for different grades

方案等级	负荷	负荷限额/kW
一级(特别严重)	20%~25%	10 137.5~10 813.6
二级(严重)	15%~20%	10 813.6~11 489.5
三级(较重)	10%~15%	11 489.5~12 165.3
四级(一般)	5%~10%	12 165.3~12 841.2

经有序用电辅助决策方法(输入为地区线路负荷限额 W)得到不同方案预警等级下有序用电避峰结果如图 4 所示。以有序用电负荷缺额 20%为例进行相关分析,避峰时间如表 6 所示。

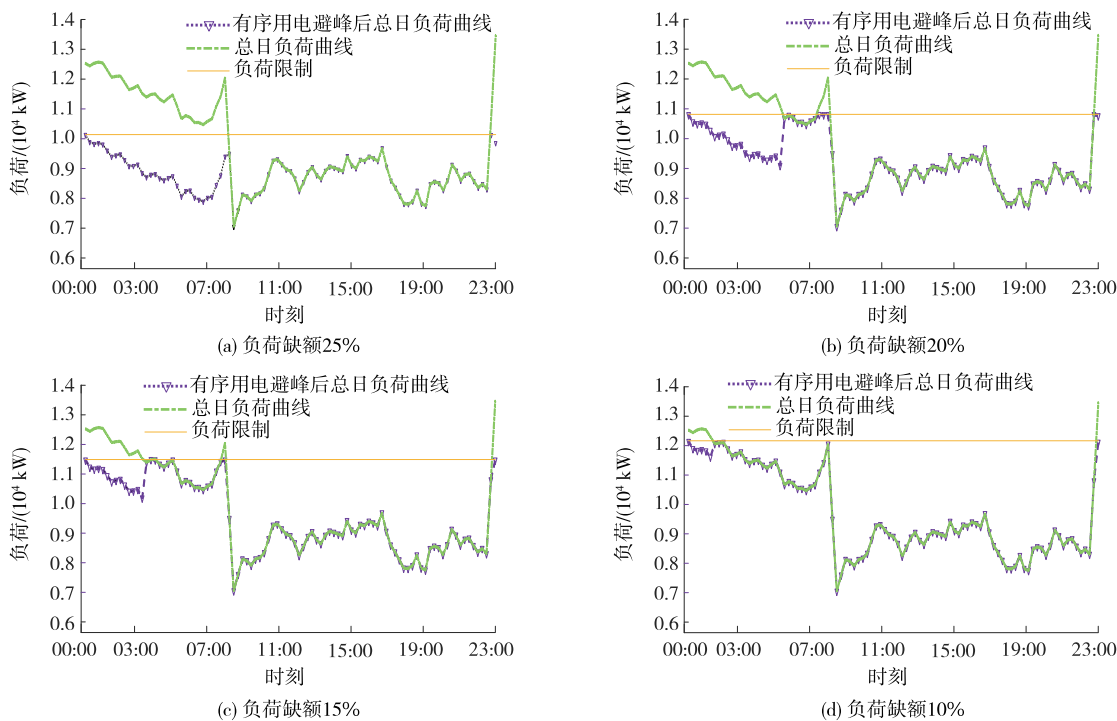


图 4 有序用电不同负荷缺额等级下错峰图

Figure 4 Peak avoidance map of the orderly power consumption with different notch levels

表 6 有序用电负荷缺额 20% 错峰时间

Table 6 Schedule of 20% staggered peak avoidance for orderly power utilization gap

错峰时间	错峰比例	用户
00:45	0.30	1
00:45	0.30	2
07:45	0.05	1
07:45	0.05	2
08:00	0.11	1
08:00	0.11	2
08:15	0.23	1
08:15	0.23	2
23:45	0.46	1
23:45	0.46	2
24:00	0.47	1
24:00	0.47	2

由图 4 可知,以负荷用电缺额 20% 为例进行结果分析,该缺额下存在 3 个负荷越线时间段,在完成有序用电错峰操作前,经有序用电辅助决策方法得到越线时间段分别为 00:45—05:30、07:45—08:15、23:45—24:00。由表 6 可知,第 1 个越线时段只需进行 1 次错峰操作,其错峰电量占用户负

时刻电量的比例为 0.3;第 2 个越线时段需进行 3 次错峰操作,其错峰电量占用户负荷时刻电量比例分别为 0.05、0.11、0.23。由于用户生产特性以及设备频繁启停对使用寿命造成折损,可以考虑在负荷越线时段起始时刻,按照最大比例 0.23 进行错峰操作;第 3 个越线时段需进行 2 次错峰操作,其错峰电量占用户负荷时刻电量的比例分别为 0.46、0.47,考虑上述相同因素,在负荷越线时段起始时刻,可按照最大比例 0.47 进行错峰操作。线路用户错峰负荷与用户在负荷低谷时期可复电负荷量对比如图 5 所示。

负荷缺额为 25% 时(如图 5a 所示),用户 1 与用户 2(其生产时间为 23:30 到次日 07:30),在 00:15—8:30 错峰负荷总量为 2 443.6 kW,两家用户需错峰量 1 221.8 kW,约占用户总负荷一半,在负荷低谷时,可复电负荷量少。为确保电网安全稳定以及企业生产,该负荷缺口下,只进行错峰操作;负荷缺额为 20% 时(如图 5b 所示),负荷出现 3 个越线时间段,用户 1 与用户 2 在 00:45—05:30 错峰负荷总量为 1 782 kW,每个用户需错峰量 891 kW,约占用户总负荷三分之一。两家用户稳定生产时,其负荷功率维持在 2 950~3 020 kW 之间,因此负

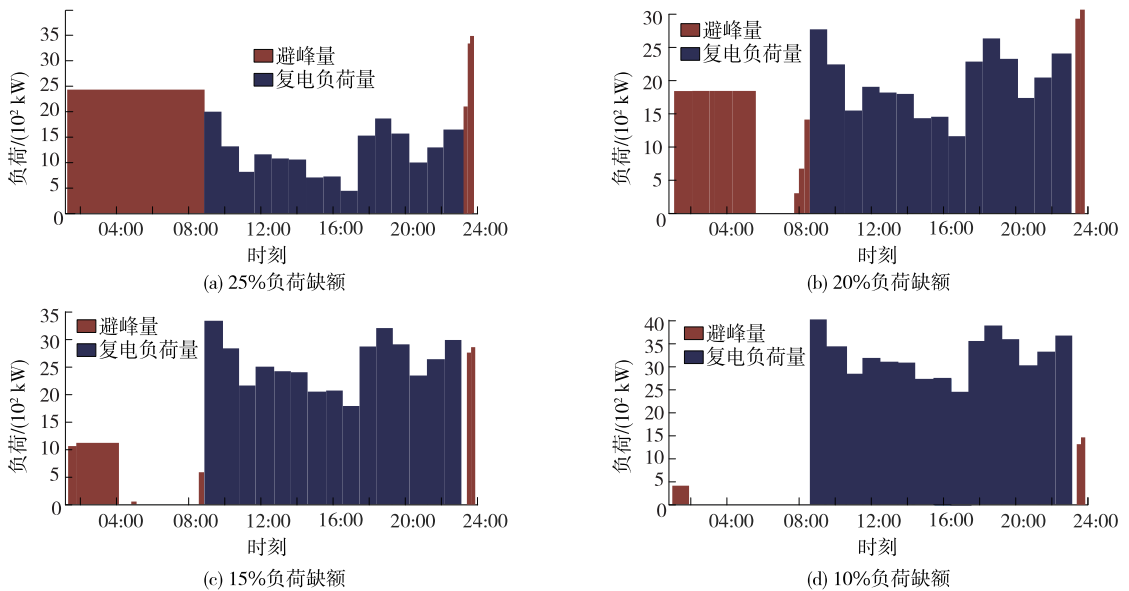


图 5 用户避峰负荷量与复电负荷量对比

Figure 5 Comparison diagram of user peak load avoidance and load recovery

荷低谷时期不能实现负荷完全转移,其有效方案为用户 1 或用户 2 生产时间延缓 1 h,00:00—08:00 企业停产三分之一生产线,在负荷低谷时期可安排已停产的生产线进行生产操作;负荷缺额为 15% 时(如图 5c 所示),负荷出现 4 次越线时间段,用户 1 和用户 2 在 00:15—03:30 避峰负荷总量为 1 072.8 kW,每个用户需参与避峰量 536.4 kW,负荷低谷时期不能实现负荷转移、连续性生产操作;负荷缺额为 10% 时(如图 5d 所示),负荷出现 2 次越线时间段,用户 1 和用户 2 在 00:15—01:00 避峰负荷总量为 417.2 kW,每个用户需避峰量为 208.6 kW。2 次避峰负荷量较低,在负荷低谷时期,可转移负荷量满足企业正常生产要求,其有效方案为用户 1 或用户 2 生产时间延缓 2 h。本文对负荷缺额在 25%、10% 情况下传统“一刀切”有序用电方案与有序用电辅助决策方法方案进行对比,如图 6 所示。

由图 6 可知,在负荷缺额达到 25% 时,传统依据专家经验中,为保证电网整体安全性,采取“一刀切”实现避峰操作,将用户 1 全线停产经营。有序用电辅助决策方法给出两家用户各停产一半的参考方案。负荷缺额为 10% 时,每个用户需避峰量为 208.6 kW,在负荷低谷时期,可转移负荷量满足企业正常生产要求,有序用电辅助决策方法给出的方案为用户 1 或用户 2 生产时间延缓 2 h,最终实现完全错峰用电,使得企业全天不停产,同时保障了电网运行收益。

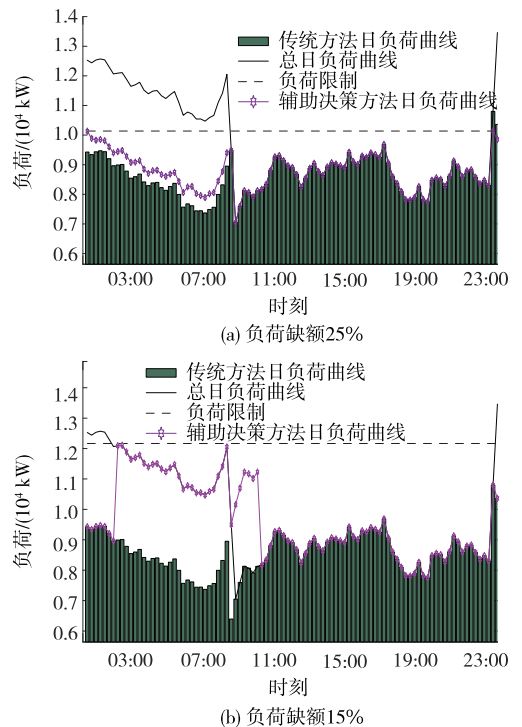


图 6 有序用电方案对比

Figure 6 Comparison diagram of ordered electricity scheme

5 结语

有序用电能够有效调整用电结构,缓解系统高峰时期电力供应压力。本文从参与有序用电企业调控价值评估、有序用电方案的辅助决策两方面进

行研究,得到如下结论。

1)信息熵利用客观数据提供的信息确定指标权重,同时利用灰色关联度对于样本数据以及规律性不明显指标进行评估决策,最终通过变权重实现指标综合赋权,避免人为主观性影响,使得综合评估结果更加全面合理。

2)通过有序用电辅助决策方法不同功能模块,仿真模拟企业有序用电操作,得到避峰企业具体数据,包括避峰具体时刻、避峰负荷比例等相关信息。为人工编排有序用电方案提供指导与参考。

3)对用户是否具有参与意愿未进行深入考虑,下阶段研究可以考虑结合大数据技术实现市场调节下用户侧与电网间友好互动,更好地实现电力供需矛盾下有序用电方案制定。

参考文献:

[1] 徐青山,杨辰星,颜庆国,等.计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J].电网技术,2016,40(1):156-163.
XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo, et al. strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):156-163.

[2] 国家发展改革委员会.有序用电管理办法(发改运行(2011)832)[EB/OL].http://sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2011tz/t20110428_408768.html,2011-04-21.

[3] 王卫平.如何科学合理地实施有序用电[J].电力需求侧管理,2012,14(3):38-39.
WANG Weiping.How to implement order power utilization scientifically and reasonably[J].Power Demand Side Management,2012,14(3):38-39.

[4] 陈俊全,张明明,王科,等.精细化有序用电管理的框架设计[J].能源工程,2014(2):57-63.
CHEN Junquan,ZHANG Mingming,WANG Ke, et al. Framework design of meticulous orderly power consumption management[J]. Energy Engineering, 2014(2):57-63.

[5] 陆婷婷,高赐威,苏卫华,等.有序用电避峰预案优化编制方法研究[J].电网技术,2014,38(9):2315-2321.
LU Tingting,GAO Ciwei,SU Weihua, et al.Research on drafting of optimal peak averting planning for ordered

power utilization[J].Power System Technology,2014,38(9):2315-2321.

[6] 彭勃,邱一苇,陈俊全,等.计及网络约束的有序用电综合决策方法[J].电网技术,2015,39(3):797-803.
PENG Bo, QIU Yiwei, CHEN Junquan, et al. A comprehensive decision method for orderly power utilization considering network constraints[J]. Power System Technology,2015,39(3):797-803.

[7] 陈海燕,刘新才.有序用电工作的精细化管理过程[J].电力需求侧管理,2010,12(3):30-33.
CHEN Haiyan,LIU Xincan.Fine management process of orderly power utilization work[J].Power Demand Side Management,2010,12(3):30-33.

[8] MURATORI M, RIZZONI G. Residential demand response: dynamic energy management and time-varying electricity pricing[J].IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(2):1108-1117.

[9] CHICCO G. Overview and performance assessment of the clustering methods for electrical load pattern grouping [J].Energy.2012,42(1):68-80.

[10] 王永明,陈宇星,殷自力,等.基于大数据分析的电力用户行为画像构建方法研究[J].高压电器,2022,58(10):173-179+187.
WANG Yongming,CHEN Yuxing, YIN Zili, et al. Research on construction method of power user behavior portrait based on big data analysis[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(10):173-179+187.

[11] 董安有,邢通,陈梦影,等.尖峰时段工业用户用电序位评价指标体系与模型[J].现代电力,2013,30(6):73-79.
DONG Anyou,XING Tong,CHENG Mengying, et al. Evaluation index system and model of orderly power utilization for industrial users in peak hours[J].Modern Electric Power,2013,30(6):73-79.

[12] 程维杰,程韧俐,徐洲,等.基于隐枚举法的快速分级切负荷优化方法[J].智慧电力,2021,49(5):63-68.
CHENG Weijie,CHENG Renli,XU Zhou, et al. Fast hierarchical load shedding optimal method based on implicit enumeration method[J].Smart Power,2021,49(5):63-68.

[13] 杨梓莹,姚李孝.梯级水库等效蓄能在风电消纳中的应用[J].电网与清洁能源,2021,37(6):134-138.
YANG Xinying, YAO Lixiao. Application of cascade reservoir equivalent energy storage in wind power ac-

- commodation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6):134-138.
- [14] 陈旭,杨柳,杨振刚,等.住宅小区电动汽车有序充电潜力评估[J].电力系统保护与控制,2020,48(2):122-128.
CHEN Xu, YANG Liu, YANG Zhengang, et al. Assessment of orderly charging potential of electric vehicles in residential areas[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2):122-128.
- [15] 王宏,魏晓强,李兵.考虑风电协议外送的调峰型电采暖虚拟电厂优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):135-144.
WANG Hong, WEI Xiaoqiang, LI Bing. Optimal configuration method of electric heating in a virtual power plant with peak load regulation considering a wind power delivery protocol[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19):135-144.
- [16] 徐青山,丁一帆,颜庆国,等.大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6791-6800.
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6791-6800.
- [17] 张旭,徐永海,刘子腾,等.考虑系统侧谐波电压波动的光伏接入点谐波发射水平评估方法[J].中国电力,2021,54(3):109-116.
ZHANG Xu, XU Yonghai, LIU Ziteng, et al. A method for assessing harmonic emission level of photovoltaic access point considering system-side harmonic voltage fluctuations[J]. Electric Power, 2021, 54(3):109-116.
- [18] 张磐,汪宇倩,姜宁,等.基于改进灰色关联度的配电网调控水平评价指标筛选方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(11):64-69.
ZHANG Pan, WANG Yuqian, JIANG Ning, et al. Screening method for evaluation indicators of distribution network control level based on improved grey correlation degree[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(11):64-69.
- [19] 朱彦名,徐潇源,严正,等.面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2):176-187.
- [20] 向思阳,蔡泽祥,刘平,等.基于 AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):69-76.
XIANG Siyang, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of low carbon operation of distribution network based on AHP-Anti-Entropy method [J]. Journal of Power Science and Technology, 2019, 34(4):69-76.
- [21] 戴志辉,刘媛,邱小强,等.基于变权重模糊综合评判法的保护装置状态评价[J].电测与仪表,2021,58(4):150-157.
DAI Zhihui, LIU Yuan, QIU Xiaoqiang, et al. Condition evaluation approach of protective devices based on fuzzy comprehensive evaluation with variable weight [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4):150-157.