

基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估

刘国辉¹, 赵佳², 孙毅²

(1. 国网黑龙江省电力有限公司 鹤岗供电公司, 黑龙江 鹤岗 154100;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

Potential evaluation of demand response based on fuzzy optimization of set pair analysis

LIU Guo-hui¹, ZHAO Jia², SUN Yi²

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Hegang Power Company, Hegang 154100, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:以负荷聚合商为中间商的需求响应(demand response, DR)运营模式可以充分挖掘需求侧资源潜力,实现综合优化配置。针对该模式下需求响应潜力评估的问题,提出一种基于模糊优化集对分析理论的需求侧用户响应潜力评估方法。通过分析影响该模式下用户参与响应的因素,建立用户评估指标体系。在此基础上,对集对分析理论进行模糊优化,建立潜力评估的量化模型,实现对用户响应潜力的初步量化。通过模拟聚合商与用户之间的负荷分配仿真实验,验证该评估方法在提高聚合商削减负荷任务分配的准确性及任务完成率方面的有效性。

关键词:需求响应;潜力评估;模糊优化;集对分析;聚合商

Abstract: The demand-response business model with load aggregators as the middleman can fully exploit the potential of the demand-side resources and achieve the comprehensive optimization of power grid. Based on fuzzy set pair analysis, the potential evaluation method of demand response is proposed. By analyzing the influences of clients' response, the index system is established. Based on fuzzy set pair analysis, a model of potential assessment is established to achieve a preliminary quantification of user response potential. Through the load distribution simulation experiment between the aggregator and the user, the effectiveness of the evaluation method in improving the accuracy and task completion rate of the load reduction is verified.

Key words: demand response; potential assessment; fuzzy optimization; set pair analysis; aggregators

中图分类号:TM714;TM73 文献标志码:A

电力供需格局新变化推动了国内外电力行业市场改革^[1],电力系统逐步向供需双向互动的方向发展。我国售电市场改革建立了灵活的电价机制,鼓励用户响应市场的供需变化,实现科学用能、节约用能^[2]。在此环境下,出现了以负荷聚合商为中间商的需求响应运营模式^[3],有效整合了互联网、分布式发电、智能电网等新兴技术,充分发掘负荷的响应潜力,形成科学的用电方式,提高电网的效率。

需求响应将需求侧资源作为供应侧电能的替代资源加以利用,通过价格信号或激励机制来提高需求侧在电力系统平稳、可靠运行中的调节作用^[4],以容纳分布式能源随机接入电网,提高系统运行效率且更加低碳环保^[5]。近2年来,北京、江苏、上海、广东等地区开始了以负荷聚合商为中间商的需求响应运营模式试点。

需求响应潜力方面,文献[6]提出一种由智能电表数据驱动的实时需求响应潜力评估方法。文献[7]提出一种根据需求响应的潜力对消费者进行排名的模型评估方法。文献[8]验证了用户潜力会受到对应激励机制的影响。但现有文献对需求响应潜力的研究甚少,评估方法有待深入研究。

本文提出一种需求响应潜力评估方法,作为确定各用户削减负荷量的参考依据之一。通过建立影响用户响应的指标体系,应用模糊优化集对分析理论,实现对用户需求响应潜力的初步量化。算例仿真表明该评估方法能够有效提高聚合商削减负荷任务分配的准确性。

1 问题描述

图1描述了电网依托聚合商实现削峰填谷的业务流程。电网接近用电高峰(低谷)临界时,触发削峰(填谷)信号,电网控制中心检测到该信号后,向DR服务平台发布DR事件信息。依托DR服务平台,各聚合商服务中心与电网公司达成负荷削减任务合同,再向签约用户推送能否参与DR的事件信息,通过用户对该事件消息反馈的情况,来确定参与DR的用户,最后向参与的用户发布负荷削减任务。

收稿日期:2018-07-16;修回日期:2018-08-26

基金项目:国家自然科学基金委员会资助项目“可再生能源接入下的大规模负荷感知模型及调控策略研究”(51777068)

作者简介:刘国辉(1970),男,黑龙江绥化人,高级工程师,研究方向为电力营销与需求侧管理;赵佳(1992),女,山西壶关人,硕士研究生,研究方向为需求侧管理、需求响应等;孙毅(1972),男,辽宁朝阳人,博士,教授,研究方向为需求侧管理、电力系统自动化与信息化等。

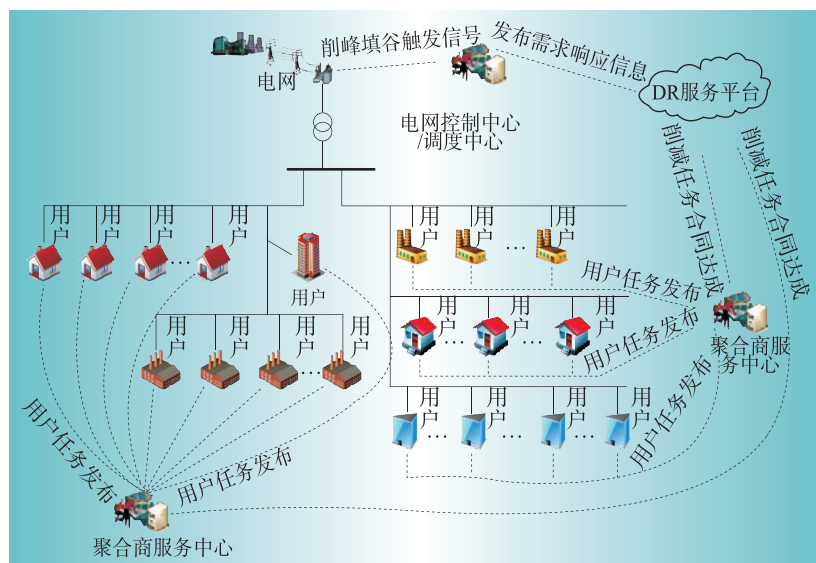


图1 以负荷聚合商为中间商的需求响应运营模式架构

确定各用户削减负荷量的精确性关系到聚合商整体削减任务的完成情况,因此,需要对用户的响应潜力进行评估。

2 基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估方法

2.1 建立评估指标体系

本文建立如图2所示的用户响应潜力评估指标体系,并利用三标度层次分析法^[9]确定指标的权重 $w=(w_1, w_2, \cdots, w_m)$, m 为指标个数。各项指标定义如下。

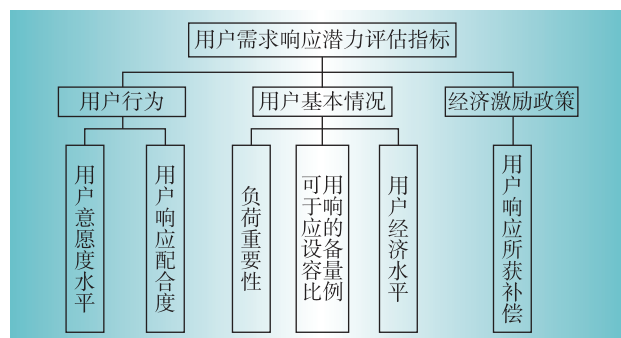


图2 用户响应潜力评估指标体系

用户意愿度水平:用户过去1年被安排参与削峰的次数 f ;用户响应配合度:用户过去1年参与削峰任务的完成率 cr ;负荷重要性:分为最关键负荷、关键负荷、重要负荷、一般负荷等,可利用专家打分法进行判断;可用于响应的设备容量比例:在响应时用户能够减少或停止使用的设备容量比例 p ,体现客户当前电能利用效率水平;用户经济水平:面对经济政策刺激时,用户的经济水平越高,其对补偿的重视程度有可能越低。同类用户可根据其电费水平 E 判断经济性,为后续计算方便,用户经济

水平与 E 为反相关; 用户响应所获补偿: 用户参与响应而获得的电力公司和政府给予的补偿 C 。

潜力评估结果可以用削减任务完成情况和聚合商收益情况等展现,但本文着重介绍评估方法模型,各类调度结果分析都是建立在潜力评估等级指标上的,因此,指标体系只设立1个评估结果。

2.2 模糊综合评估法

目前已存在一些潜力评估方法。其中,模糊综合评价法是以模糊数学隶属度理论为基础,将定性评价变为定量评价,可对受到多种因素限制的对象进行整体的评价。步骤如下。

(1) 建立评估矩阵

利用线性隶属函数客观计算各个2级指标对每1级评估等级标准的隶属度

$$\mu_m(x) = \begin{cases} 1 - \mu_{m-1}(x) & e_{(m-1)} < x < e_{(m)} \\ [e_{(m+1)} - x] / [e_{(m+1)} - e_{(m)}] & e_{(m)} < x < e_{(m+1)} \\ 0 & x \leq e_{(m-1)} \text{ 或 } x \geq e_{(m+1)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为评估指标对应的指标值; e 为评价等级标准; μ 为评估指标的隶属度。

(2) 建立1级各指标综合评价矩阵

将权重分配向量 A_i 与各评价矩阵 $U_i (i=1,2,3)$ 用合成算子合成相应的因素评价矩阵

$$B_i = A_i \circ U_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

用归一化后的 B_i 建立总评价矩阵 $B=[B_1, B_2, B_3]^T$ 。

(3) 建立用户响应潜力评估系统评价矩阵并进行归一化处理

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \circ \mathbf{B} \quad (3)$$

(4) 确定用户潜力总得分得出用户响应潜力等级

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} \times \mathbf{S}^T \quad (4)$$

式中: S^T 为各等级标准形成的矩阵。

2.3 模糊优化集对分析理论

针对图1所示模式下的需求侧用户响应潜力评估问题,提出一种基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估方法。集对分析评估理论的思想是将评估样本和评估等级看作1个集对,进行同、异、反的定量分析,用式(5)计算联系度

$$u = a + bI + cJ \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为同一度、差异度和对立度, 均非负, 且 $a+b+c=1$; I 为差异度系数, $I \in [-1, 1]$, 随着 I 接近 0, b 的不确定性随之增强; J 为对立系数, $J = -1$ 。

本文引入模糊优化集对分析理论,把评价样本与评价等级看作具有 m 个特性 (m 个评价指标) 的集对,分析评价样本与评价等级同、异、反的程度以及综合的联系度,再利用可变模糊集理论的差异度从事物“优”与“劣”两方面描述评估样本与评估等级的接近程度。通过联系度与差异度的相同本质将两者有机结合,确定评估等级。

2.4 潜力评估流程

上述方法具体实现步骤及说明如下。

步骤1:建立潜力评估等级标准。

建立潜力评估等级标准 $\{s_{kl}|k=1,2,\dots,n; l=1,2,\dots,m\}$, 用户对应于指标 l 的指标值记为 $\{x_l|l=1,2,\dots,m\}$, s_{kl} 为对于指标 l 、等级 k 的评估标准限值; n 为划分等级的数目; m 为指标数目。指标值的计算是将所有用户该指标最大值作为参照,归一化后再百分化。指标的等级为指标值落入的区间所对应的等级 k 。

步骤2:利用集对分析理论计算评估指标值与各评估等级的联系度。

将用户各指标值与对应等级看作具有 m 个特性的集对,考虑各指标的权重,从同、异、反3方面进行综合判断,方法如下。

设潜力评估指标 $1, 2, \dots, t_1$ 处在等级 k 中,则同一度 a 为

$$a = \sum_{l=1}^{t_1} w_l \quad (6)$$

式中: w_l 为第 l 个指标归一化后的权重。

设潜力评估指标 $t_1+1, t_1+2, \dots, t_2$ 处在与等级 k 不相邻的等级中,则对立度 c 为

$$c = \sum_{l=t_1+1}^{t_2} w_l \quad (7)$$

设潜力评估指标 $t_2+1, t_2+2, \dots, m$ 处在等级 k 相邻等级,则单指标 l 的差异度 $b_l = w_l, l = t_2+1, t_2+2, \dots, m$, 单指标 l 差异度系数为 I_l

$$I_l = \begin{cases} 1 - 2 \left| \frac{s_{k-1,l} - x_l}{s_{k-1,l} - s_{k-2,l}} \right| & x_l \in \text{grad}(k-1) \\ 1 - 2 \left| \frac{x_l - s_{k,l}}{s_{k+1,l} - s_{k,l}} \right| & x_l \in \text{grad}(k+1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_l \in \text{grad}(k-1)$, 表示指标 l 的指标值落入等级 $k-1$ 中; $x_l \in \text{grad}(k+1)$, 表示指标 l 的指标值落入等级 $k+1$ 中。

则联系度 u 为

$$u = a + \sum_{l=t_2+1}^m b_l \cdot I_l + c \cdot J \quad (9)$$

式中: m 为指标数目; J 为对立系数, J 取-1。

步骤3:根据联系度计算评估指标值与各评估等级的相对隶属度。

显然,联系度 $u \in [-1, 1]$ 。各用户与评价等级间的同一性越小,则 u 越接近于-1,用户越倾向于不隶属于评价等级 k ,同一性越大则相反。可见联系度 u 也是一种相对差异度。为进一步提高综合评价效果,此处进行模糊优化,利用联系度(即差异度)计算隶属度 v_k

$$v_k = (1 + u_k) / 2 \quad (10)$$

式中: u_k 为某指标相对于等级 k 的差异度,其值等于步骤2中的联系度 u 。

步骤4:计算用户响应潜力等级。

利用最大隶属度准则确定需求响应潜力的等级。为避免失真,此处使用特征值 h 来量化潜力评估结果, h 的计算公式为

$$h = \sum_{k=1}^n k \left(v_k / \sum_{k=1}^n v_k \right) \quad (11)$$

式中: k 为等级; n 为等级数目。

聚合商给用户 j 分配削减任务时,将所有等级 h_j 归一化,作为各用户被分配的削减任务占总任务的比例,各用户的削减任务为

$$TA_j = CA \left(h_j / \sum_{i=1}^u h_j \right) \quad (12)$$

式中: TA_j 为用户 j 的削减任务量; CA 为聚合商削减负荷合同量; u 为用户总数。

3 算例仿真分析

为验证本文评估方法的有效性,本文模拟仿真聚合商与用户之间的负荷削减过程,观察及对比聚合商负荷削减任务完成情况、收益等。

3.1 实验设置

3.1.1 参数设置

实验模拟某聚合商执行调控某区域电网用电高峰合同任务的过程,此次响应时间为 $T = 10 \text{ min}$,参与用户数10个,聚合商消减负荷合同量10 000 kW。

3.1.2 方法设置

本文环境下,用户优先考虑聚合商下发的任务量,再根据自身最大能力进行实际响应。

实验仿真方法对比算法设置为3种。均分法:将聚合商削减负荷量均分到各个用户;模糊综合评价法:采用模糊综合评价法评估用户潜力,根据潜力等级将聚合商削减负荷量分到各个用户;本文方法:采用本文方法评估用户潜力,根据潜力等级将聚合商削减负荷量分到各个用户。

3.2 潜力等级评估过程

(1) 模糊优化集对分析法

用户行为、用户基本情况、经济激励政策所对应的权重为 $(4/9, 1/3, 2/9)$ 。

评估等级标准为(0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~70, 70~80, 80~90, 90~100),共10个等级,若满足图2所述指标标准,则该指标值为90~100,若低于标准1个级别,指标值为80~90,以此类推。

模拟10个用户各评估指标的数值,根据上述方法得出各指标所属等级,如表1所示。

表1 用户响应潜力指标值

评价等级	用户行为		用户基本情况		经济激励政策	
	指标值	等级	指标值	等级	指标值	等级
用户1	89.750	9	90.889	10	89	9
用户2	58.375	6	58.444	6	59	6
用户3	51.750	6	56.111	6	48	5
用户4	96.125	10	90.778	10	94	10
用户5	79.000	8	84.778	9	80	9
用户6	46.375	5	55.222	6	42	5
用户7	74.625	8	80.556	9	75	8
用户8	41.375	5	49.667	5	41	5
用户9	69.000	7	67.222	7	69	7
用户10	85.875	9	81.111	9	87	9

根据表1,利用公式(6)—公式(11),计算出各用户最终的响应潜力等级,如表2所示。

表2 模糊优化集对分析法下用户响应潜力评估等级

用户编号	潜力等级	用户编号	潜力等级
用户1	9.463	用户6	5.338
用户2	6.321	用户7	8.100
用户3	6.017	用户8	4.830
用户4	9.672	用户9	7.311
用户5	8.506	用户10	8.989

(2) 模糊综合评估法

为避免不同方法造成的影响,此处也使用三标度层次分析法。因此,得出一级指标的权重 $A=(4/9,1/3,2/9)$,以及分指标相对于一级指标的权重,分别为 $A_1=(0.625,0.375)$, $A_2=(1/3,4/9,2/9)$, $A_3=1$ 。

为使2种方法更具可比性,设评估等级标准为(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100)。由模糊综合评价法得出的用户潜力等级如表3所示。

3.3 结果分析

3.3.1 削减任务完成情况分析

图3(a)为各方法下聚合商分配的任务量,从图3(a)中可知,模糊综合评价法和本文方法的任务分配量较为相似。

图3(b)为各方法下用户的实际消减量,从图3

表3 模糊综合评价法下用户响应潜力评估等级

用户编号	潜力等级	用户编号	潜力等级
用户1	90.33	用户6	48.35
用户2	58.28	用户7	76.69
用户3	52.37	用户8	44.06
用户4	94.08	用户9	68.41
用户5	81.48	用户10	84.54

(b)中可知,均分法下的实际削减量出现明显浮动,而其他2种方法的实际削减量波动程度与任务分配量基本一致。

图3(c)为各方法下用户未完成的消减量,从图3(c)中可知,均分法下有5个用户没有完成负荷削减任务,总削减任务完成率为94.58%;本文方法下有6个用户未完成削减任务,但未完成量较均分法明显减少,总任务完成率为95.74%;模糊综合评价法任务完成的整体情况与本文方法相似,但未完成量较大,其完成率94.62%,介于两者之间。同时也说明聚合商在分配任务前利用本文方法对用户的响应潜力进行评估能有效提升总任务的完成水平,模糊综合评价法略有不足,但优于均分法。

3种方法下用户未完成削减量方差分别为:均分

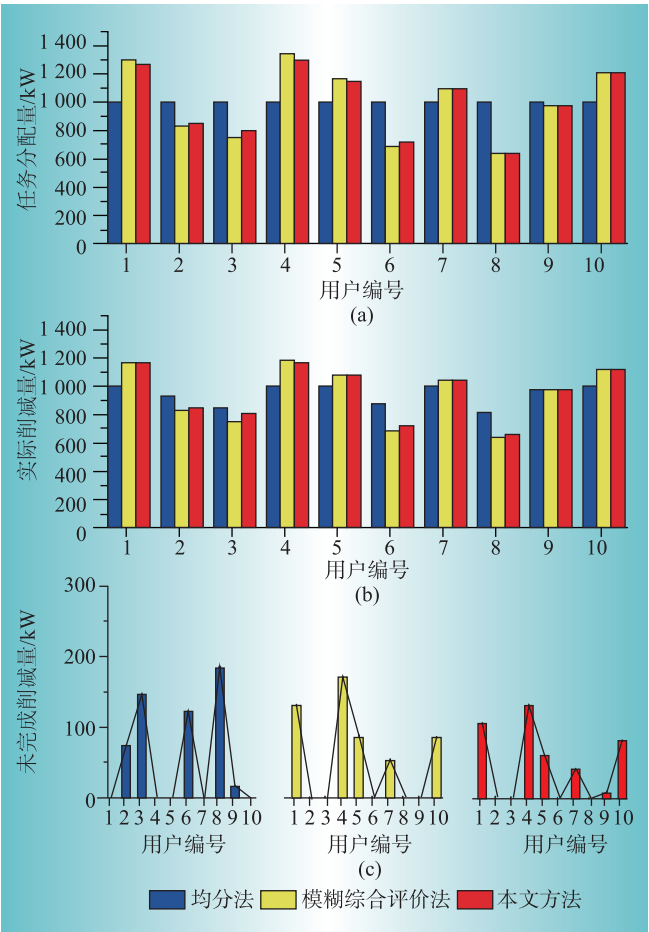


图3 各方法下削减任务完成情况

法 5 156 kW²;模糊综合评价法 4 663 kW²;本文方法 2 451 kW²,可看出本文方法的方差小于其余2种方法。

3.3.2 聚合商收益情况分析

聚合商的收益如图4所示,一般由电力公司的补贴、惩罚,以及削减成本3部分计算而得。

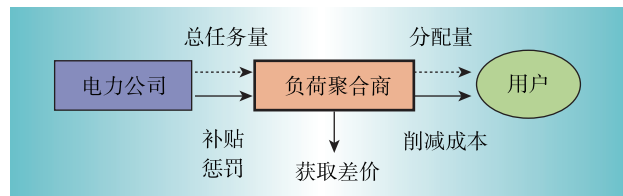


图4 负荷聚合商收益分析

对于聚合商获得的补贴和惩罚,根据文献[10],设调度计划最大偏差值 $\delta_{\max}=100$ kW,根据响应时长 $T=10$ min,设超出部分罚款为 $\gamma_f=0.7$ 元/kWh,在偏差范围内补偿为 $\gamma_c=0.392$ 元/kWh。本文根据文献[11]和国内某省的电价政策,制定了0.232元/kWh的用户侧补贴政策。3种方法下聚合商的收益情况为:均分法收益211.24元;模糊综合评价法收益214.27元;本文方法收益228.02元。本文方法收益最高,而模糊综合评价法的收益也高于均分法,说明对用户进行潜力评估能有效提高聚合商收益。

3.3.3 不同用户规模下削减任务完成率分析

图5为不同用户规模下聚合商在各方法下的总削减任务完成率情况。其中,任务总量根据用户规模成倍增长。

从图5中可知,本文方法下的总削减任务完成率基本保持在95.4%之上,均分法下的完成率始终最低,模糊综合评价法在用户规模变大时的完成率又低于以上2种方法,说明其仅适用于小规模用户。而不同的用户规模下本文方法均有较强的适用性及较高的任务完成水平。

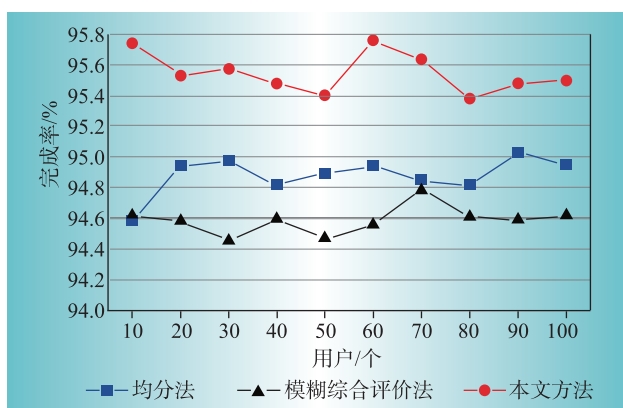


图5 各方法下不同用户规模总削减任务完成率

4 结束语

本文将模糊优化集对分析理论应用到用户需求响应的评估中,实现了对用户响应潜力的初步量

化,并将用户按等级划分,使聚合商在制定响应方案时,可按照用户潜力等级的高低分配不同的任务量,实现对用户潜力的充分挖掘及需求侧资源的综合优化配置。本文方法在响应完成情况、收益情况、不同用户规模下的完成情况方面都占有很大优势,具备较高的合理性、有效性及可行性。

在建立指标体系时,本文仅选取了与用户响应特性密切相关的核心指标,且计算指标权重时包含部分主观因素,因此还需对其进行进一步地完善。另外,可根据不同方案的侧重点,深入分析主要影响因素,调整评估体系的指标。D

参考文献:

- [1] 李丽. 国家发展改革委、国家能源局发布促进智能电网发展指导意见[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(4): 44.
- [2] 陈政, 王丽华, 曾鸣, 等. 国内外售电侧改革背景下的电力需求侧管理[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(3): 62-64.
- [3] Jacobsen R H, Gabioud D, Basso G, et al. SEMIAH: An aggregator framework for European demand response programs[C]// Euromicro Conference on Digital Systems Design. Funchal, Madeira, Portugal: IEEE, 2015: 470-477.
- [4] 赵洪山, 王莹莹, 陈松. 需求响应对配电网供电可靠性的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 49-55.
- [5] Yan H, Bin L, Chen S, et al. Future evolution of automated demand response system in smart grid for low-carbon economy[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2015, 3(1): 72-81.
- [6] Bai Y, Zhong H, Xia Q. Real-time demand response potential evaluation: a smart meter driven method[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, America, 2016.
- [7] Albert A, Rajagopal R. Finding the right consumers for thermal demand-response: an experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 564-572.
- [8] 王蓓蓓, 杨雪纯, 杨胜春. 基于中长期时间维度的需求响应潜力及效果的系统动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6 368-6 377.
- [9] 沈利兵, 黄大荣, 楚晓艳, 等. 基于三标度层次分析法的路网脆弱性影响因素研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(4): 54-59.
- [10] 高赐威, 李倩玉, 李扬, 等. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1 546-1 555.
- [11] Pourmousavi S A, Patrick S N, Nehrir M H. Real-time demand response through aggregate electric water heaters for load shifting and balancing wind generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 769-778.