# Optimization Method for User Demand Response Capability Considering the Potential of Load Aggregator Regulation

ZHU Dazhi*, FENG Zaixin, LIAN Xiaobin
(Information and Communication Branch of Hainan Power Grid, Haikou Hainan 570203, China)

**Abstract**: To flexibly adjust the load demands of different load aggregators and improve the demand response ability of the power system, an optimization method for user demand response capability considering the potential of load aggregator regulation is proposed. In this method, the variable frequency air conditioner in the load aggregator and the typical controllable single load of electric vehicles are taken as the analysis objects of regulation potential. The maximum adjustable reduction potential and maximum adjustable increase potential of variable frequency air conditioner and the regulation potential of charging and discharging of electric vehicles are calculated respectively. The maximization of the revenue and net profit of the load aggregator are taken as the objective function of the load aggregator user demand response capability optimization. At the same time, the constraints of the load aggregator user demand response capability optimization objective function are set from the initial cost of load reduction and transfer of the load aggregator, the end index of the load reduction and transfer contract, and the load reduction and transfer potential of the load aggregator. According to the constraints, the objective function of the load aggregator's user demand response ability optimization is solved, and the user demand response ability optimization is realized. The experimental results show that the proposed method can effectively calculate the load power of variable frequency air conditioner at different times and the adjusting potential of load aggregators in different regions, effectively reduce and transfer the controllable load of electric vehicles, effectively improve the total revenue and net profit of load aggregators, and has a good effect on optimizing the demand response capability of load aggregators.

**Key words**: load aggregator; regulating potential; user demand response; optimization method; variable frequency air conditioner; electric vehicle
**EEACC**: 7220; 8110B **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.032

# 考虑负荷聚合商调节潜力的用户需求响应能力优化方法

朱大智*, 冯在欣, 连晓斌
(海南电网有限责任公司信息通信分公司, 海南 海口 570203)

**摘 要**: 为灵活调节不同负荷聚合商负荷需求, 提升电力系统需求响应能力, 提出考虑负荷聚合商调节潜力的用户需求响应能力优化方法。该方法以负荷聚合商内变频空调和电动汽车典型可控单体负荷作为调节潜力分析对象, 分别计算变频空调最大可调减潜力与最大可调增潜力和电动汽车充电、放电调节潜力, 并以该两个负荷聚合商调节潜力为基础, 将负荷聚合商收益和净利润最大化作为负荷聚合商用户需求响应能力优化目标函数, 同时分别从负荷聚合商的负荷削减和转移初始成本、削减和转移合同结束指标、负荷聚合商负荷削减和转移潜力方面设置负荷聚合商用户需求响应能力优化目标函数约束条件, 依据该约束条件求解负荷聚合商用户需求响应能力优化目标函数后, 实现用户需求响应能力优化。实验表明: 该方法可有效计算不同时间变频空调负荷功率和不同区域负荷聚合商调节潜力, 并可有效实现电动汽车可控单体负荷削减和转移, 有效提升负荷聚合商总收益和净利润, 对负荷聚合商用户需求响应能力优化效果较好。

**关键词**: 负荷聚合商; 调节潜力; 用户需求响应; 优化方法; 变频空调; 电动汽车
**中图分类号**: TM73 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0924-06

在当今日益竞争激烈的市场环境中, 企业能否迅速而准确地响应用户需求, 已成为决定其生存与发展命运的关键因素[1-2]。用户需求响应能力不仅体现了企业的服务质量和市场竞争力, 更是企业创新能力和客户满意度的直接体现。因此, 优化用户需求响应能力成为了每个企业亟待解决的问题[3]。优化用户需求响应能力的目标在于提升企业的市场敏锐度、增强创新能力, 并实现快速响应和高效服务。这需要企业从多个方面入手, 包括加强市场研究、优化产品设计、提升服务质量、改进内部管理等

**收稿日期**: 2024-10-27 **修改日期**: 2024-12-11

方面。同时,还需要提升企业的数据处理能力和智能化水平[4],从而更好地满足用户需求。张晓东等[5]研究负荷聚合商优化调度策略,该方法从物理层面建立居民舒适度数学模型后,挖掘用户需求侧负荷可调度潜力,将负荷聚合商利益最大化作为目标,通过非合作博弈方法使负荷聚合商利益最大化,提升用户需求响应能力。建立居民舒适度数学模型可能涉及复杂的物理和环境因素,模型的准确性和实用性可能受到限制,导致该方法对用户需求响应能力优化效果欠佳。Hosseini 等[6]提出不同需求负荷模式三目标优化方法,该方法采集用户不同需求数据后,针对其负荷情况,使用人工智能算法挖掘不同负荷模式下的特征,依据该特征建立用户不同需求优化目标函数,通过求解该函数实现在不同负荷模式下的用户需求响应优化。人工智能算法的参数调整对优化结果有很大影响。如果参数调整不当,就可能导致算法无法有效地挖掘数据中的特征,从而影响优化效果。谭鸣骢等[7]提出需求响应双层优化方法,该方法通过挖掘负荷聚合商之间交易模式,明确不同负荷聚合商主体后,针对其需求响应,以负荷聚合商和配电系统运营商利润最大化作为需求响应优化双层目标函数,通过求解该目标函数后,实现用户需求响应优化。在明确不同负荷聚合商主体后,需要针对其需求响应提取关键特征。如果特征提取不准确,可能导致建立的优化模型无法准确反映实际情况,从而影响优化结果。王巍等[8]提出电力需求响应的聚合优化方法,该方法根据部分地区负荷聚合商需求响应交易情况,分析负荷聚合商日前邀约响应模式,考虑用户资源响应特征后,建立负荷聚合商和用户收益优化模型,通过该模型得到用户响应优化结果。仅通过部分地区的数据进行分析,可能无法全面反映整个市场的特征和趋势,导致模型的泛化能力受限,使该方法对用户需求响应优化效果不佳。

负荷聚合商通过聚合分散的小额用电负荷,形成规模化的总负荷,从而显著提升了其在电力市场中的调节潜力。这种潜力不仅能够帮助电力公司更有效地预测和调度电力供应,应对高峰负荷期的挑战[9-10],还能通过分级管理负荷,提高供电的灵活性和可靠性,为电力市场的健康发展和优化运营提供有力支持。在此考虑负荷聚合商调节潜力,提出考虑负荷聚合商调节潜力的用户需求响应能力优化方法,从而优化能源供应,确保用户能够在不同负荷模式下获得稳定、经济的电力服务。

## 1　用户需求响应能力优化方法

### 1.1　负荷聚合商调节潜力分析

负荷聚合商内包含不同类型的负荷需求,在对用户需求响应能力进行优化之前,需要在电力系统负荷调节约束范围内[11],针对不同负荷聚合商调节潜力,确定负荷集群的调节方案。负荷聚合商包括较多类型单体负荷[12-13],其中变频空调和电动汽车属于较为典型的可控单体负荷,在此以该两个可控单体负荷作为对象,分析其调节潜力。

#### 1.1.1　变频空调调节潜力

使用一阶等效热参数模型描述变频空调制冷量和当前室温关系,令 $T_{\text{in}}^{t}$ 表示 $t$ 时刻室内温度,$w^{t}$ 表示空调开启时室温,$Q^{t}$ 表示变频空调制冷量,则空调制冷量与室温关系公式为:

$$T_{\text{in}}^{t+1}=T_{\text{out}}^{t+1}-2w^{t}R-T_{\text{out}}^{t}-T_{\text{in}}^{t} \tag{1}$$

式中:$T_{\text{out}}^{t}$ 表示 $t$ 时刻的室外温度;$R$ 表示房间内等效热阻。

在已知变频空调设定温度与室外温度时,令短时间内室外温度为定值,变频空调在负荷状态下[14],室内温度与变频空调设定温度相同。设置用户温度需求范围为 $[T_{\min},T_{\max}]$,当室内温度接近用户温度需求最大值时,变频空调向上调节的温度区间就会缩小,因此令 $H_{\text{AC}}(T_{\text{in}})$ 表示变频空调温度可上调尺度,其计算公式为:

$$H_{\text{AC}}(T_{\text{in}})=\frac{T_{\max}-T_{\text{in}}}{T_{\max}-T_{\min}} \tag{2}$$

以式(2)为基础,建立变频空调运行功率和温度调节尺度关系 $\varphi_{\text{AC}}(T_{\text{in}})$,公式为:

$$\varphi_{\text{AC}}(T_{\text{in}})=\alpha H_{\text{AC}}(T_{\text{in}})+(\beta T_{\text{out}}+\gamma) \tag{3}$$

式中:$\alpha$、$\beta$ 为变频空调制冷调节参数;$\gamma$ 为变频空调制冷输入功率常系数。

以式(3)为基础,计算变频空调最大可调减潜力与最大可调增潜力,计算公式为:

$$\Delta\varphi_{\text{AC,down}}=\sum_{i=1}^{N}\varphi_{\text{AC},i}(T_{\max})-\sum_{i=1}^{N}\varphi_{\text{AC},i}(T_{\text{in}}) \tag{4}$$

$$\Delta\varphi_{\text{AC,up}}=\sum_{i=1}^{N}\varphi_{\text{AC},i}(T_{\min})-\sum_{i=1}^{N}\varphi_{\text{AC},i}(T_{\text{in}}) \tag{5}$$

式中:$N$ 表示区域内变频空调总数,$i\in N$。

利用上述公式,得到变频空调不同方向调节潜力数值。

#### 1.1.2　电动汽车调节潜力

负荷聚合商内电动汽车的负荷包括离网和在网两种状态,其中离网表示电动汽车放电状态,在网表示电动汽车充电状态。通常电动汽车在白天上班时

段为离网状态,早间与晚间为在网状态[15-16],考虑电动汽车用户用能需求,电动汽车是否参与负荷调节受其荷电状态阈值直接影响,为避免电动汽车在出行过程中受电能消耗影响,电动汽车荷电状态需要低于其荷电状态阈值,其荷电状态 $U_{\mathrm{OCth}}$ 与 $\widetilde{U}_{\mathrm{OCth}}$ 荷电状态阈值计算公式为:

$$U_{\mathrm{OCth}}=\frac{l}{L} \tag{6}$$

$$\widetilde{U}_{\mathrm{OCth}}=U_{\mathrm{OCth}}+\tau U_{\mathrm{OCth}} \tag{7}$$

式中:$L$ 表示电动汽车最大续航里程;$\tau$ 为电动汽车出行阈值度;$l$ 为电动汽车出行距离。

当电动汽车荷电状态超过其可接受出行状态阈值时,电动汽车负荷可进行放电调度,反之,电动汽车负荷则需要充电调度,其中电动汽车负荷充电调度时,其可调节潜力为正数[17],电动汽车负荷放电调度时,其可调节潜力为负数。令负荷聚合区域内,$t$ 时刻电动汽车数量为 $n_{\mathrm{EV}}$,电动汽车负荷的充电、放电可调节潜力计算公式为:

$$\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t)=\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{EV}}}\lambda_{\mathrm{cha}}^{i}(t) \tag{8}$$

$$\lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t)=\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{EV}}}\lambda_{\mathrm{dis}}^{i}(t) \tag{9}$$

式中:$\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t)$ 表示电动汽车负荷充电可调节潜力;$\lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t)$ 表示电动汽车负荷放电可调节潜力;$\lambda_{\mathrm{cha}}^{i}(t)$、$\lambda_{\mathrm{dis}}^{i}(t)$ 分别表示第 $i$ 辆电动汽车在网充电和放电可调节潜力。

经过上述过程,得到区域内负荷聚合商电动汽车可控单体负荷调节潜力数值。

### 1.2 基于负荷聚合商调节潜力的用户需求响应优化模型构建

考虑负荷聚合商中变频空调和电动汽车可控单体负荷调节潜力数值,对负荷聚合商需求侧响应进行优化,建立基于负荷聚合商调节潜力的用户需求响应优化模型。

在负荷聚合商中,变频空调和电动汽车为直接参与用户,还存在其他间接参与调度负荷需求的二类用户,如许多中小型企业、大多数居民用户等,其中中小型企业规模较小,其电力需求不够稳定[18-19],所以不直接参与电力零售市场,而大多数居民电力需求也较小且分散,也不直接参与电力零售交易,因此二类用户在电力系统中享受稳定的电力供应和相对统一的价格。为充分调度负荷聚合商用户需求响应潜力,令 $F_I$ 表示负荷聚合商中变频空调和电动汽车用户的总收益,$F_{II}$ 表示负荷聚合商中二类用户的总效益,将负荷聚合商的总收益最大作为用户侧需求响应能力优化的目标,其表达公式为:

$$\begin{cases}\max\ F_I=V_I[\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}},\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}}]\cdot\\ \quad[\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t),\lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t)]+V_{II}-C_G\\ \max\ F_{II}=V_I[\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}},\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}}]\cdot\\ \quad[\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t),\lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t)]+V_{II}-C_G-C_{II}\end{cases} \tag{10}$$

式中:$V_I$ 表示变频空调和电动汽车用户用电效益;$V_{II}$ 表示二类用户用电效益;$C_G$ 表示电力企业发电成本;$C_{II}$ 表示二类用户参与负荷需求响应的消耗成本。

负荷聚合商是电力市场负荷场景中参与市场投标的代表实体,负荷聚合商可在合同规定时段内调节其用电行为,电力市场中需要考虑负荷聚合商用户需求,制定投标策略,以实现自身利益的最大化。在实时电力市场内,通过负荷聚合商的合同规定时间和弹性容量来调节优化用户需求响应,在此以负荷聚合商用户自身利润最大化[20]作为用户需求侧响应能力优化目标函数。令 $\Gamma_t^{\mathrm{DR}}$ 表示电力市场负荷响应合同成本,$\Gamma$ 表示负荷聚合商利润,则负荷聚合商用户自身利润最大化作为用户需求侧响应能力优化目标函数公式如下:

$$\max\Gamma=\sum_{t\in N_T}A_tL_t^{\mathrm{DR}}-\sum_{t\in N_T}\Gamma_t^{\mathrm{DR}} \tag{11}$$

式中:$A_t$ 表示当前电力市场的交易电价;$N_T$ 表示负荷聚合商合同规定时间段总数;$L_t^{\mathrm{DR}}$ 表示负荷聚合商进行负荷需求响应时的投标合同容量。

式(10)、式(11)组成不同目标的用户侧需求响应能力优化目标函数,设置这两个目标函数的约束条件如下:

①负荷聚合商的负荷削减和转移初始成本约束

令负荷聚合商第 $r$ 个合同的负荷削减和负荷转移初始成本为 $o_r^{\mathrm{LC0}}$ 和 $o_r^{\mathrm{LS0}}$,$A_{rt}^{\mathrm{LC0}}$、$A_{rt}^{\mathrm{LS0}}$ 表示负荷聚合商负荷削减和转移时对应时间电力市场电价,则其约束条件公式为:

$$A_{rt}^{\mathrm{LC0}}\geqslant o_r^{\mathrm{LC0}}\zeta_{rt}^{\mathrm{LC}} \tag{12}$$

$$A_{rt}^{\mathrm{LC0}}\geqslant o_r^{\mathrm{LS0}}\zeta_{rt}^{\mathrm{LS}} \tag{13}$$

式中:$\zeta_{rt}^{\mathrm{LC}}$、$\zeta_{rt}^{\mathrm{LS}}$ 分别表示负荷聚合商负荷削减和转移的初始指标。

②削减和转移合同结束指标约束

令 $g_{rt}^{\mathrm{LC}}$、$g_{rt}^{\mathrm{LS}}$ 分别表示负荷聚合商负荷削减和转移合同结束指标,其约束公式如下:

$$\sum_{t=1}^{t+D_r^{\mathrm{LC,max}}-1}g_{rt}^{\mathrm{LC}}\geqslant\zeta_{rt}^{\mathrm{LC}} \tag{14}$$

$$\sum_{t=1}^{t+D_r^{\mathrm{LS,max}}-1}g_{rt}^{\mathrm{LS}}\geqslant\zeta_{rt}^{\mathrm{LS}} \tag{15}$$

式中:$D_r^{\mathrm{LC,max}}$、$D_r^{\mathrm{LS,max}}$ 分别为负荷聚合商负荷削减和

转移的时间上限。

③负荷聚合商负荷削减和转移潜力约束

令 $\varepsilon_r^{\mathrm{LC}}$、$\varepsilon_r^{\mathrm{LS}}$ 分别表示负荷聚合商中变频空调削减和转移潜力变量,其约束条件为:

$$\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}} \leqslant \varepsilon_r^{\mathrm{LS}} \leqslant \Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}} \tag{16}$$

$$\Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}} \leqslant \varepsilon_r^{\mathrm{LC}} \leqslant \Delta\varphi_{\mathrm{AC,down}} \tag{17}$$

式中:$\Delta$ 表示相应变量的增减。

令 $\gamma_r^{\mathrm{LC}}$、$\gamma_r^{\mathrm{LS}}$ 分别表示负荷聚合商中电动汽车削减和转移潜力变量,其约束条件为:

$$\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t) \leqslant \gamma_r^{\mathrm{LC}} \leqslant \lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t) \tag{18}$$

$$\lambda_{\mathrm{EV_cha}}(t) \leqslant \gamma_r^{\mathrm{LS}} \leqslant \lambda_{\mathrm{EV_dis}}(t) \tag{19}$$

依据式(12)~式(19)的约束条件,对基于负荷聚合商调节潜力的用户需求响应优化模型进行求解,得到满足不同约束条件的用户需求响应削减和转移结果。

## 2　实验

以某市作为实验对象,该市内负荷聚合商包括变频空调、电动汽车以及若干二类用户,使用本文方法对该市负荷聚合商的用户需求响应能力进行优化,以提升该市电力系统为负荷聚合商的服务能力。

使用本文方法分析负荷聚合商中电动汽车和变频空调的调节潜力,测试在不同时刻时,本文方法计算电动汽车和变频空调所需功率数值,结果如图 1 所示。

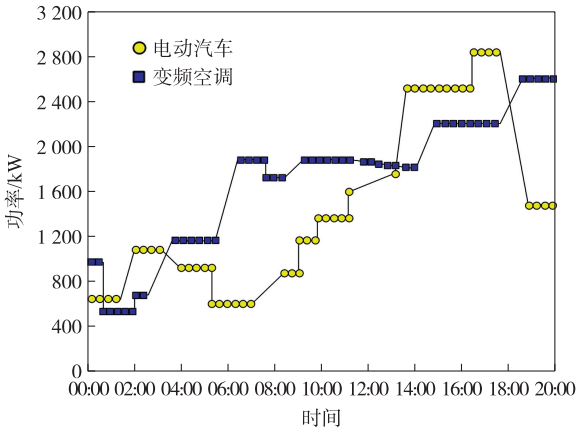


**图 1　电动汽车和变频空调负荷功率**

由图 1 可知,本文所采用的方法能够精确获取负荷聚合商内部电动汽车和变频空调在不同运行时段的实时负荷功率。电动汽车和变频空调作为负荷聚合商的内部设备,其在不同时间段的负荷变化会直接影响电力系统的供需平衡与稳定性,因此获取到电动汽车和变频空调的负荷功率,有利于负荷聚合商了解自身设备的用电规律和调节潜力,从而制定更合理的需求响应策略。

将该市划分为 3 个区域,分别标记为 A1、A2、A3,以该市负荷聚合商总可调节潜力作为指标,使用本文方法计算该市 3 个区域在不同时段时可调节潜力,结果如图 2 所示。

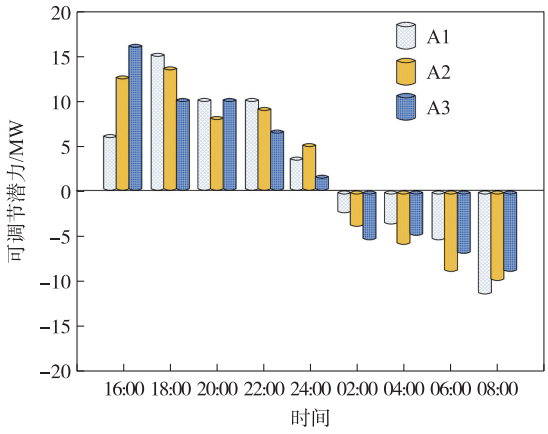


**图 2　不同区域负荷聚合商总可调节潜力**

由图 2 可知,使用本文方法可有效获得该市不同区域不同时间段负荷聚合商总可调节潜力,为负荷优化调节提供可靠的数据支持。基于总可调节潜力,负荷聚合商可以制定精准的削减和转移负荷的策略,优化调节用户侧负荷,减少电力损耗,提高能源利用效率,灵活应对电力系统中的各种突发状况,进而提高电力系统的运行效率与可靠性。通过优化负荷分配和制定有效的运营策略,负荷聚合商还能实现用户侧总收益和总利润的最大化,有助于满足用户对负荷的需求响应。

以负荷聚合商中的电动汽车可控单体负荷作为实验对象,使用本文方法对其负荷进行削减和转移处理,验证本文方法对用户侧需求响应的优化能力,测试结果如图 3 所示。

分析图 3 可知,电动汽车可控单体负荷实际需求量呈波谷形态,即在 0:00 到 04:00 和 14:00 到 16:00 之间时,电动汽车可控单体负荷需求量较高,在 04:00

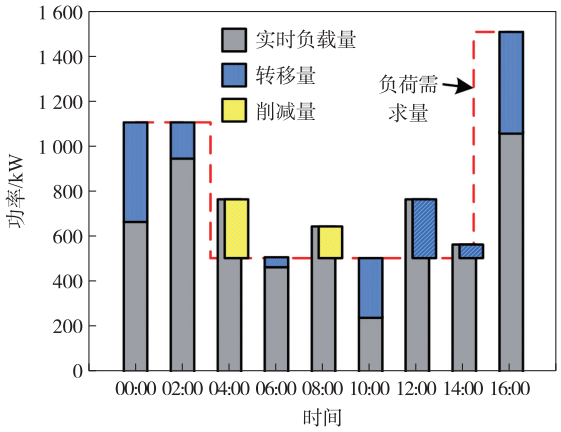


**图 3　电动汽车可控单体负荷削减转移结果**

到 14:00 之间时,电动汽车可控但其负荷需求量则较低,这种需求量的波动反映了用户侧负荷需求的不确定性,其原因在于大多数用户在 04:00 到 14:00 之间使用电动汽车满足出行需求,而在其他时段电动汽车则处于在网状态。在不同时间段,电动汽车可控但其实时负荷量较高或者较低时,采用本文方法能够削减和转移实时负荷量,使电动汽车可控单体实时负荷量能够满足其负荷需求量,即实现对用户侧需求响应能力的优化。采用本文方法优化用户侧需求响应能力,不仅提高电网的稳定性和经济性,还能提高用户的用电效率与满意度。

以不同时段时负荷聚合商的总收益和净利润作为衡量指标,测试本文方法对用户侧需求响应能力优化效果,测试结果如表 1 所示。

**表 1 负荷聚合商的总收益和净利润** 单位:元

| 时间 | 负荷聚合商净利润 | | 负荷聚合商总收益 | |
|---|---|---|---|---|
| | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 |
| 00:00 | 522 | 605 | 899 | 962 |
| 02:00 | 488 | 591 | 901 | 948 |
| 04:00 | 461 | 557 | 864 | 915 |
| 06:00 | 549 | 606 | 1 106 | 1 127 |
| 08:00 | 717 | 913 | 1 321 | 1 422 |
| 10:00 | 789 | 1 030 | 1 587 | 1 740 |
| 12:00 | 1 100 | 1 368 | 1 699 | 1 916 |
| 14:00 | 1 241 | 1 596 | 1 654 | 1 787 |
| 16:00 | 1 118 | 1 521 | 1 543 | 1 727 |
| 18:00 | 922 | 1 165 | 1 309 | 1 505 |
| 20:00 | 721 | 839 | 1 117 | 1 249 |
| 22:00 | 693 | 800 | 952 | 1 051 |

根据表 1 的数据,采用本文方法优化用户侧需求响应能力后,负荷聚合商净利润和负荷聚合商总收益两项指标均比优化前有所提高,说明本文方法的用户侧需求响应能力优化效果出色。

采用本文方法可有效计算电动汽车和变频空调在不同时间的负荷功率,有利于负荷聚合商掌握自身设备的用电规律和调节潜力,制定合理有效的削减和转移负荷策略,提升负荷聚合商在不同时段的净利润和总收益,优化用户侧需求响应能力的效果较好,对于提升整个能源系统的运行效率和经济效益具有积极作用。

## 3 结论

在探讨负荷聚合商调节潜力的背景下,优化用户需求响应能力的方法不仅关乎电力市场的稳定运行,更对实现智能电网和低碳社会的目标具有深远影响。随着可再生能源的逐步增加和电力市场的日益开放,负荷聚合商作为连接用户和电网的桥梁,其调节潜力的挖掘与利用显得尤为重要。通过优化用户需求响应能力,负荷聚合商能够更有效地平衡供需,减少能源浪费,同时为用户带来更为灵活、经济的用电体验。

**参考文献:**


[1] 李斌,夏琨,杨飞,等. 考虑负荷聚合商的互联孤岛微网频率控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(4):87-94,101.

[2] 张妍,冷媛,尚楠,等. 考虑碳排放需求响应及碳交易的电力系统双层优化调度[J]. 电力建设,2024,45(5):94-104.

[3] 许刚,郭子轩.考虑用户比价行为的综合需求响应低碳优化策略[J]. 电网技术,2024,48(3):1043-1054.

[4] 吴梦凯,施进平,王凯,等. 碳市场下计及电-氢储能的综合能源系统需求响应策略[J]. 现代电力,2023,40(6):947-956.

[5] 张晓东,艾欣,潘玺安. 考虑用户可调度潜力的负荷聚合商优化调度策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(1):28-37,47.

[6] Hosseini P,Nikbakht Naserabad S,Keshavarzzadeh A H. Artificial Intelligence-Based Tri-Objective Optimization of Different Demand Load Patterns on the Optimal Sizing of a Smart Educational Buildings[J]. International Journal of Energy Research,2022,46(15):21373-21396.

[7] 谭鸣骢,王玲玲,蒋传文,等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J]. 中国电力,2022,55(10):32-44.

[8] 王巍,袁泉,刘春晓,等. 日前邀约模式下电力需求响应的聚合优化模型与方法[J]. 南方电网技术,2023,17(11):51-60.

[9] 李鑫,林延平,刘长玺,等. 考虑广泛负荷聚合商无功调节优先权的调度决策模型[J]. 太阳能学报,2022,43(5):67-73.

[10] 范德金,张姝,王杨,等. 考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调度策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(17):133-142.

[11] 程松,周鑫,任景,等. 面向多级市场出清的负荷聚合商联合交易策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):158-167.

[12] 吴心弘,潘玲玲,王泽荣,等. 能量-备用多品种电力交易下空调负荷聚合商竞价策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(2):203-211.

[13] 陈卫东,郭敏,吴宁,等. 基于图像匹配的微电网负荷响应分布式电源波动控制方法[J]. 中国电力,2022,

55(3):57-63,73.
[14] 李明轩,齐步洋,贺大玮. 工业园区需求响应资源聚合优化配置方法[J]. 电网技术,2022,46(9):3543-3549.
[15] 孙培胜,陈堂贤,程陈,等. 基于时刻用电概率的空调负荷聚合建模与仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(8):488-494.
[16] 吴桐,惠红勋,张洪财. 商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控综述[J]. 中国电力,2023,56(7):1-11.
[17] 胡蓉,魏震波,郭毅,等. 现货市场下计及用户需求响应弹性差异的微电网优化运营分析[J]. 高电压技术,2022,48(4):1393-1402.
[18] 庞松岭,赵雨楠,毕克凡,等. 电动汽车聚合商参与需求响应定价策略及收益分配研究[J]. 电工电能新技术,2024,43(7):41-50.
[19] 贾海清,林延平,刘茹,等. 考虑需求侧无功不确定性的负荷聚合商运营优化模型[J]. 太阳能学报,2022,43(6):17-23.
[20] 韩秉乾,刘敏. 考虑负荷削减的居民区充电站分时电价设计[J]. 现代电力,2023,40(3):342-351.

**朱大智**(1995—),男,汉族,湖北省十堰市人,研究生,助理工程师,主要研究方向:信息化建设与规划,zhudz_233@163.com;

**连晓斌**(1999—),男,汉族,福建省泉州市,本科,主要研究方向:信息化建设与规划。

**冯在欣**(1995—),男,汉族,海南澄迈人,本科,助理工程师,主要研究方向:信息化建设与规划;