

# 基于均值-方差模型的柔性资源投资组合策略

杨 斌<sup>1</sup>, 沈宏伟<sup>2</sup>, 张昊纬<sup>1</sup>, 杨永标<sup>2</sup>, 陈 楚<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏南京 210029; 2. 南京南瑞集团有限公司, 江苏南京 211106)

## Portfolio Method of Demand Response Resource Based on Mean-variance Theory

YANG Bin<sup>1</sup>, SHEN Hongwei<sup>2</sup>, ZHANG Haowei<sup>1</sup>, YANG Yongbiao<sup>2</sup>, CHEN Chu<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210029, China; 2. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

**摘 要:** 随着需求响应在电力市场中深度应用, 负荷聚合商作为新的参与主体在市场平衡中发挥着调峰错峰、提供需求侧备用的重要作用。然而, 针对负荷聚合商柔性资源风险管理方法方面的研究尚有不足。因此, 提出一种基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合策略。该方法能够基于一定的预期收益, 优化得到最小化风险的柔性资源投资组合方法。通过分析算例, 证实了该方法与基线方法相比能够有效降低投资风险, 提高负荷聚合商的经济效益。

**关键词:** 需求响应; 负荷聚合商; 均值-方差模型; 最小化风险; 投资组合方法

**Abstract:** With the deep application of demand response in the power market, load aggregators, as a new participant, play an important role in electric market recruiting demand response resources and participating in demand management. However, research on risk management portfolio methods of load aggregators has not been studied fully. In this paper, a portfolio method of demand response resource based on mean-variance theory is proposed to assist load aggregators to generate the minimum risk portfolio for a certain expected return. The case study shows that the proposed method can be used to reduce the investment risk compared with the base-line method.

**Keywords:** demand response; load aggregator; mean-variance theory; minimum risk; portfolio method

## 0 引 言

随着人们对生活质量的提高愈加重视, 空调、热水器等季节性短时负荷不断增多, 加剧了电网运行负担。仅依靠新建发电备用来满足短时的负荷高峰将会极大地降低电网经济效益, 并对生态环境造

成不可逆的负面影响。因此, 包括我国在内的多个国家通过不断发展需求响应技术, 开放需求侧响应市场来缓解负荷高峰期时电网的运行压力, 提高电网稳定性和经济性。

随着需求侧响应市场的开放, 负荷聚合商作为新的参与主体参与到“源-网-荷”互动当中。通过与电力用户签订合同, 负荷聚合商能够集成用户手中的柔性资源, 与电网需求管理中心磋商制定柔性资源响应策略, 从而达到削减高峰负荷, 平滑用电曲线的目的。由于需求侧响应市场在国内仍处于起步阶段, 目前仍缺少在需求响应资源经济、高效管理方面的研究。面对特性迥异的各类柔性负荷, 如何合理分配需求响应资源以创造最大化的响应收益和最小化的投资风险, 是促进需求响应发展所亟待解决的难题。

均值-方差风险理论作为一种资产投资组合的指导性理论, 被广泛运用于各个生产领域的资源管理方面。该理论针对不同资产的投资风险性, 基于一定的预期收益最小化资产投资的总风险, 并提出资产组合效应, 即在设计资产投资组合的过程中, 不同资产预期回报间的相互系数能够降低投资风险。此前, 均值-方差风险模型广泛应用于金融领域, 帮助投资者进行投资决策。该理论最早由 Bar-Lev 和 Katz 运用于电力领域, 用以设计最小化不可再生能源投入的多能源发电优化方法<sup>[1]</sup>。Awerbuch 与 Berger 在文献 [2] 中对均值-方差模型在欧盟多能源发电优化发展中的应用进行了评估, 并阐述了不同发电能源的资产组合效应。文献 [3] 结合风电研究了基于均值-方差理论的发电侧无功优化方法, 同时考虑无功优化控制策略的经济性与风险性。文献 [4] 中, 均值-方差理论被用于设计发电自调度优化模型, 以收益最大化和风险最小化

基金项目: 国家电网公司 2017 年科技项目 (SGJS0000 YXJS1700314)

为多目标获得帕累托前沿。

此外，目前国内外已有部分以经济性为目标的柔性资源优化管理方面的研究。文献 [5] 从负荷聚合商的角度，研究了需求响应资源管理对降低电价波动引起的投资风险的重要性。文献 [6] 将需求响应资源作为虚拟电厂，提出一种考虑风险调整资本收益率的经济型虚拟电厂模型。文献 [7] 从零售商角度提出了考虑电价敏感型用户的市场投标方法。文献 [8] 提出基于用户的需求价格弹性模型研究用户响应行为与电价的相互关系。文献 [9] 针对可平移负荷提出了考虑分时电价的主动配电网柔性负荷调度模型，兼顾用户舒适度与经济性指标。文献 [10] 则提出了一种考虑实时电价的电动汽车充放电优化策略，以实现充放电量合理分布，减少电动汽车运行成本。

综上所述，目前在需求响应资源管理方面已有不少成果，但仍欠缺需求响应资源参与调控的预期回报率与风险性方面的研究。

因此，本文提出一种基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合方法。该方法能够基于一定的预期收益，量化需求响应管理的风险性，优化得到最低风险的柔性资源投资组合方法，从而指导负荷聚合商投资需求响应服务，扩大需求响应市场效益，增强市场活力。通过分析算例，证实了相比于基线方法，该方法在保持预期回报率的同时能够有效降低投资风险。

## 1 基于均值-方差风险理论的柔性资源预期回报率与风险量化模型

负荷聚合商在参与响应过程中需要对种类多样、特性丰富的需求响应资源进行协调控制，由于不同负荷资源的响应特性，如响应容量、响应持续时间、响应速度等，各不相同，其参与响应所创造的经济效益和造成的风险也有所不同。在需求响应合同中，市场价格是决定响应补偿和欠响应惩罚金额的重要因素，因此电价是负荷聚合商预期回报率的关键影响因子。由于电价受负荷、燃料价格等多种因素影响，本文应用几何布朗运动模型<sup>[1]</sup>对电价进行描述：

$$dv = \mu v dt + \delta v dt \quad (1)$$

式中： $v$  表示市场价格； $\mu$  表示电价偏移百分比； $\delta$  表示电价波动百分比； $\mu$  和  $\delta$  为常数，可以通过历

史电价数据的拟合分析得到。

此外，用户响应行为会影响负荷聚合商的综合响应程度，进而影响其投资收益。本文采用用户参与率描述用户响应行为，具体定义如下：

$$\alpha_{s,i} = U_{s,i,d}(t)/U_{s,i}(t) \quad (2)$$

式中， $\alpha_{s,i}$  表示在响应事件  $s$  中用户  $i$  的参与率； $U_{s,i,d}(t)$  表示在响应事件  $s$  中用户  $i$  在  $t$  时刻削减的容量； $U_{s,i}(t)$  表示在响应事件  $s$  中用户  $i$  的需求总容量。

在实际生产与生活中，用户响应行为受到多种因素影响，如温度、湿度、生产安排、行业行为习惯等，但随着分时电价与关键峰荷电价政策的发展推进，峰谷电价差值不断增大，不同行业用户的响应行为都将受到实时电价信息的影响，因此电价是决定用户响应成本的重要因素。综上所述，本文假设用户参与率为与实时电价线性相关的变量，具体定义如下：

$$\alpha_i(t) = a_i v(t) + b_i \quad (3)$$

式中： $\alpha_i(t)$  表示用户  $i$  在  $t$  时刻的需求响应参与率； $a_i$ 、 $b_i$  为常数，通过将  $\alpha_{s,i}$  和历史电价信息进行线性回归分析可以得到  $a_i$ 、 $b_i$  的值。

对于负荷聚合商，其参与响应的预期收入主要由市场补偿和用户惩罚金组成。市场补偿为电网支付给负荷聚合商投资指导电力用户参与需求响应的激励补偿。用户惩罚金由未能达到合同规定削减容量要求的用户上交，具体金额由负荷聚合商与用户签订的需求响应合同决定，公式化表达如下所示：

$$\text{预期收入} = \text{市场补偿} + \text{用户惩罚金}$$

负荷聚合商的需求响应预期成本则主要由激励用户成本与市场惩罚成本组成。激励用户成本为合同中规定的用于激励用户响应的总补偿金额。市场惩罚成本为用户未能完成合同规定响应任务导致负荷聚合商未能完成市场规定响应容量时所上交的惩罚金，其公式化表达如下所示：

$$\text{预期成本} = \text{激励用户成本} + \text{市场惩罚成本}$$

根据负荷聚合商参与响应的预期收入和预期成本，定义负荷聚合商投资组织用户  $i$  参与需求响应所获得的预期回报率  $\eta_i$  为

$$\eta_i = [RC_i(P_{s,i}) + RP_i(P_{s,i}) - CC_i(P_{s,i}) - CP_i(P_{s,i})] / [CC_i(P_{s,i}) + CP_i(P_{s,i})] \quad (4)$$

$$RC_i(P_i) = v \times \min(P_i, P_{\text{alloc},i} \times 1.2) \quad (5)$$

$$RP_i(P_i) = p_i \times \max(P_{\text{alloc},i} - P_i, 0) \quad (6)$$

$$CC_i(P_i) = \lambda_i \times \min(P_i, P_{\text{alloc},i}) \quad (7)$$

$$CP_i(P_i) = \lambda_i \times \min(P_{\text{alloc},i} - P_i, 0) \quad (8)$$

式中:  $P_i = P_{\text{alloc},i} \times \alpha_i$ , 表示用户  $i$  的实际负荷削减量, 其中  $P_{\text{alloc},i}$  表示合同规定的用户  $i$  的负荷削减量,  $\alpha_i$  表示用户  $i$  的参与率;  $RC_i(P_i)$  表示用户  $i$  参与需求响应给负荷聚合商带来的市场补偿, 当负荷响应容量低于  $P_{\text{alloc},i}$  的 120% 时,  $RC_i(P_i)$  随着  $P_i$  线性增长, 超过 120% 部分没有额外的激励补偿;  $RP_i(P_i)$  表示用户  $i$  参与需求响应未能完成规定削减任务所要上交的惩罚金, 与响应缺额  $P_{\text{alloc},i} - P_i$  有关, 其中  $p_i$  表示合同规定的单位容量惩罚金额;  $CC_i(P_i)$  表示负荷聚合商支付给用户  $i$  的响应激励补偿;  $CP_i(P_i)$  表示用户  $i$  未完成合同规定的负荷削减任务时, 负荷聚合商应交给独立系统运营商的处罚金;  $\lambda_i$  为合同规定的用户  $i$  单位响应容量激励补偿数额。基于上述模型, 利用蒙特卡洛方法能够计算出负荷聚合商投资用户  $i$  参与需求响应的预期回报率及其方差, 即负荷聚合商投资用户  $i$  参与需求响应的预期投资风险。

## 2 基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合策略

上节提出针对负荷聚合商投资单个用户参与响应的预期回报率与风险量化方法, 而负荷聚合商对数目众多的柔性资源多采用分组控制策略, 每组为一个柔性资源负荷簇。本节将在前文基础上提出针对目标预期回报的柔性资源风险最小化组合方法, 利用该方法可求解出负荷聚合商投资风险最小化的不同用户响应容量的构成比例。

基于均值-方差风险模型, 预期回报率与预期风险为负荷聚合商投资单个用户的预期回报和风险的加权和, 权重因子及其规定的负荷削减量在整体负荷削减目标中所占的比例。公式化表达如下:

$$\eta_k = \sum_{i=1}^n \omega_i \eta_i \quad (9)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i \omega_j c v_{ij} \quad (10)$$

式中:  $\eta_k$  表示负荷簇  $k$  的预期回报率;  $\omega_i$  表示用户  $i$  在合同中规定的削减量占整个投资方案削减量的比例;  $\sigma_k^2$  为负荷簇  $k$  的预期回报率的方差即预期风险;  $c v_{ij}$  为用户  $i, j$  预期回报率的协方差。

在分组控制策略中, 每个用户都必须属于某个负荷簇, 且负荷簇的最大削减容量需满足负荷聚合

商规定。结合上述约束, 建立针对目标预期回报的柔性资源风险最小化组合策略:

$$\min \sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \quad (11)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \omega_j c v_{ij} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^n \epsilon_{ik} \geq K \quad (14)$$

$$d_{\min} \leq \sum_{i=1}^n \epsilon_{ik} d_i \leq d_{\max}, k = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$E_{\min} \leq \sum_{i=1}^n \epsilon_{ik} d_i \tau_i \leq E_{\max}, k = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \eta_i = \eta_{\text{target}} \quad (17)$$

式中:  $\sigma_i^2$  表示组合方法  $i$  的预期风险;  $N$  为负荷簇数目;  $n$  为用户总数;  $\epsilon_{ik}$  为 0-1 变量, 当用户  $i$  在负荷簇  $k$  中为 1, 反之为 0;  $K$  表示负荷簇中用户数目的最小值;  $d_i$  表示用户  $i$  的最大削减容量;  $d_{\min}$  和  $d_{\max}$  分别表示负荷簇负荷削减量的下限和上限;  $\tau_i$  表示用户  $i$  的最长响应时间;  $E_{\min}$  和  $E_{\max}$  分别表示负荷簇的最小削减电量和最大削减电量,  $\eta_{\text{target}}$  为目标预期回报率。

将式(1)~(3)得到的预测电价信息和预期用户参与率带入上述模型, 求解得到预期风险最小的组合方法  $\epsilon_{ik}$ ,  $\omega_i$ 。本文提出的基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合策略流程图如图 1 所示。

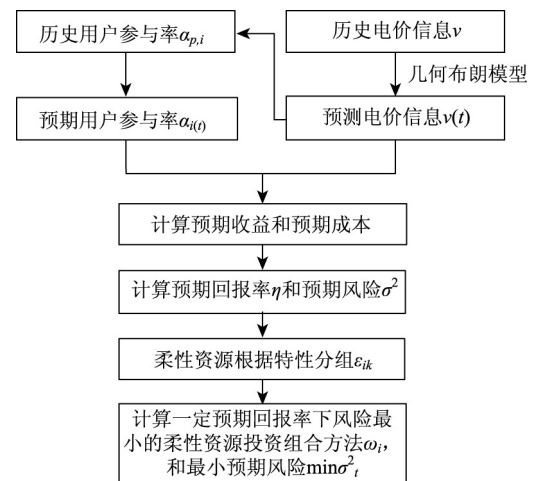


图 1 基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合策略流程图

Fig 1 Algorithm of demand response resources allocation method based on mean-variance portfolio theory

3 仿真与结果分析

以表 1 中所示 12 种不同类型用户为例，应用本文基于均值-方差响应模型的柔性资源投资组合策略进行仿真分析。不同类型负荷的预期回报率，风险和参与率可由第 1 节提出的模型计算得出，预期回报率和风险如图 2 所示，不同用户的平均历史参与率及其标准偏差如表 1 所示。

表 1 用户类型及其负荷特性与响应参与率  
Table 1 Type, load characteristics and participation rate of different users

| 序号 | 名称    | 容量/MW | 柔性负荷占比/% | 平均参与率/% | 参与率标准偏差/% |
|----|-------|-------|----------|---------|-----------|
| 1  | 钢厂    | 225   | 81       | 112     | 41        |
| 2  | 水泥厂 1 | 40    | 73       | 80      | 39        |
| 3  | 水泥厂 2 | 50    | 73       | 84      | 34        |
| 4  | 化工厂 1 | 135   | 82       | 133     | 61        |
| 5  | 化工厂 2 | 150   | 82       | 127     | 41        |
| 6  | 造纸厂   | 8     | 87       | 104     | 53        |
| 7  | 电子厂   | 30    | 83       | 94      | 41        |
| 8  | 商场    | 0.4   | 53       | 110     | 29        |
| 9  | 铁厂    | 132.3 | 81       | 109     | 32        |
| 10 | 机械厂   | 27    | 64       | 123     | 54        |
| 11 | 废物处理厂 | 0.67  | 77       | 97      | 27        |
| 12 | 大型酒店  | 0.52  | 65       | 120     | 45        |

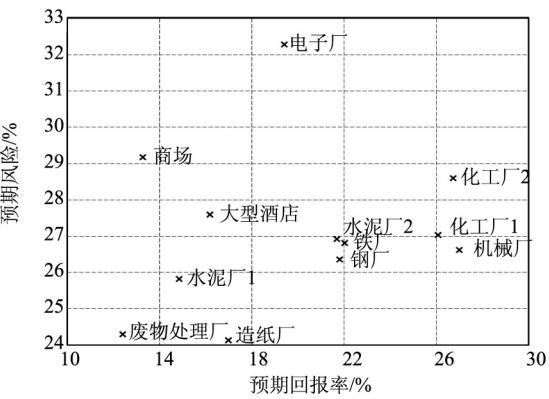


图 2 不同用户投资风险与预期回报率示意图  
Fig. 2 Expected returns and risks of different consumers

在本例中，将 12 个用户分为 A、B 两组，每组由 6 个用户组成，每组的负荷簇组合方法由基于均值-方差响应模型的柔性资源投资组合策略制定。考虑到不同用户负荷的响应特性有所差异，在分组过程中应保证负荷类型的多样性。

为验证所提出策略的有效性，将优化结果与基线方法进行比较。在基线方法中，用户组合只考虑

是否满足负荷削减要求，不考虑投资风险高低，优化结果用 A'、B' 表示。预期回报率与风险对比如图 3 所示。

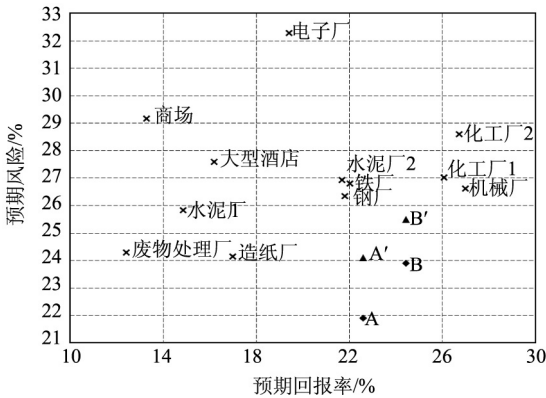


图 3 基线法与均值-方差法投资组合预期风险对比示意图  
Fig. 3 Expected returns and risks of base-line method and mean-variance portfolio method

从图 3 可以看出，通过基线方法组合用户，A' 组预期回报率为 22.6%，B' 组的预期回报率为 24.4%，A' 组的投资风险为 24.1%，B' 组的投资风险为 25.5%。而运用基于均值-方差响应模型的柔性资源投资组合策略，A 组的预期回报率为 22.6%，B 组的预期回报率为 24.4%，A 组的投资风险为 21.9%，B 组的投资风险为 23.9%。在目标回报率相同的情况下，A 组和 B 组的投资风险在原来的基础上分别下降 9.1% 和 5.2%。使用基线法和均值-方差法，AB 两组中不同用户的负荷削减容量占比分配结果如表 2 所示。

表 2 投资组合中不同用户负荷削减贡献占比  
Table 2 Composition ratio of consumers in each portfolios %

| 组别 | 名称    | 基线法占比 | 均值-方差法占比 |
|----|-------|-------|----------|
| A  | 钢厂    | 10    | 19       |
|    | 水泥厂 1 | 5     | 5        |
|    | 化工厂 1 | 60    | 45       |
|    | 造纸厂   | 8     | 8        |
|    | 电子厂   | 12    | 15       |
|    | 商场    | 5     | 8        |
| B  | 铁厂    | 15    | 14       |
|    | 水泥厂 2 | 5     | 5        |
|    | 化工厂 2 | 18    | 20       |
|    | 机械厂   | 58    | 46       |
|    | 废物处理厂 | 0     | 3        |
|    | 大型酒店  | 4     | 12       |

通过对比表2中基线法和均值-方差法得出的不同用户负荷削减容量占比数据可以发现,通过提高小容量用户在负荷削减任务中的贡献,可以在保持预期回报率不变的情况下有效降低投资风险。

## 4 结 论

本文提出基于均值-方差风险模型的柔性资源投资组合策略。该策略基于均值-方差风险模型,利用用户参与率和电价信息,计算得出负荷聚合商投资指导用户参与需求响应的预期回报率和预期风险,再以目标预期回报率,求得最小化的柔性资源投资组合方案及合同规定的不同用户负荷削减量在总削减目标中应占有的比重。通过算例分析比较相同预期回报率下,基线法和本文策略的柔性资源投资组合方案的预期风险,证实本文所提出的柔性资源投资组合策略可以在保证预期回报率的基础上,有效降低负荷聚合商的投资风险。风险降低与提高小容量用户的负荷削减贡献有关。该方法能够增强负荷聚合商参与需求响应的盈利能力,提高其参与响应的积极性。下一步研究重点在于如何结合数量众多、分布广泛的分散式居民负荷进行协调控制并优化组合策略。

## 参 考 文 献

- [1] MARKOWITZ H. Portfolio Selection [J]. Journal of Finance, 1952, 7(1): 77-91.
- [2] DAN B L, KATZ S. A portfolio approach to fossil fuel procurement in the electric utility industry [J]. Journal of Finance, 1976, 31(3): 933-947.
- [3] 朱晓伟,刘三明,李莹,等. 均值-方差模型在风电并网系统无功优化中的应用 [J]. 广东电力, 2016, 29(2): 76-79.  
ZHU Xiaowei, LIU Sanming, LI Ying, et al. Application of mean-variance model in reactive power optimization of wind power grid-connection system [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 76-79.
- [4] 丁涛,柏瑞,孙宏斌,等. 基于鲁棒均值-方差优化的发电自调度算法及鲁棒代价分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 319-326.  
DING Tao, BAI Rui, SUN Hongbin, et al. Robust mean-variance optimization for self-scheduling of thermal producer and its price of robustness [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 319-326.
- [5] 高赐威,李倩玉,李慧星,等. 基于负荷聚合商务的需求响应资源整合方法与运营机制 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.  
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [6] 刘扬洋,蒋传文,谭胜敏,等. 考虑风险调整资本收益率阈值约束的虚拟电厂优化调度策略 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4617-4626.  
LIU Yangyang, JIANG Chuanwen, TAN Shengmin, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering risk adjusted return on capital constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4617-4626.
- [7] SAEZ-GALLEGO J, MORALES J M, ZUGNO M, et al. A data-driven bidding model for a cluster of price-responsive consumers of electricity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5001-5011.
- [8] 黄海新,邓丽,文峰,等. 基于实时电价的用户用电响应行为研究 [J]. 电力建设, 2016, 37(2): 63-68.  
HUANG Haixin, DENG Li, WEN Feng, et al. Customer response behavior based on real-time pricing [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 63-68.
- [9] 孙建军,张世泽,曾梦迪,等. 考虑分时电价的主动配电网柔性负荷多目标优化控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 401-412.  
SUN Jianjun, ZHANG Shize, ZENG Mengdi, et al. Multi-objective optimal control for flexible load in active distribution network considering time-of-use tariff [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 401-412.
- [10] 李明洋,邹斌. 电动汽车充放电决策模型及电价的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2015(15): 75-81.  
LI Mingyang, ZOU Bin. Charging and discharging decision making model of electric vehicles and influence analysis of electricity price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(15): 75-81.

收稿日期: 2018-09-11

作者简介:

杨 斌(1977—),男,高级工程师,研究方向为电力营销及电力需求侧管理, E-mail: seu\_zhkh@163.com。

(责任编辑: 杨秋霞)