

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201487

“负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略

吴志强, 高岩, 王波

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 社会福利最大化下的实时电价定价机制未考虑电力系统各主体的利益独立性, 无法实现电力系统各主体的收益效用均衡, 另一方面可能造成用户负载峰谷的产生或者转移。将“负载-效用”两级均衡融入智能电网实时电价的定价优化, 建立了实时电价定价策略的两级均衡模型。基于电网系统各主体的收益效用函数推导出采购电价与实时电价的定价机制, 并在定价机制的基础上, 设计了基于多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解算法。最后, 数值仿真实验表明了两级均衡模型下的实时电价定价机制更能保证电网系统各参与方的收益效用均衡, 也使得用户负载更加均衡。

关键词: 智能电网; 实时电价; 负载均衡; 效用均衡; 两级均衡模型; 多目标遗传算法

Real-time pricing strategy for the smart grid under "load-utility" two-level balance

WU Zhiqiang, GAO Yan, WANG Bo

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A real-time pricing mechanism under the maximization of social welfare does not consider the benefit independence of the power system entities, so it cannot achieve the benefit and utility balance of the power system entities. On the other hand, it may cause the generation or transfer of user load peaks and valleys. In this paper, a two-stage equilibrium model of real-time pricing strategy is established by integrating "load-utility" two-stage equilibrium into the real-time pricing optimization of the smart grid. Based on the revenue utility function of the main body of the power grid system, the pricing mechanism of the purchase electricity price and the real-time electricity price is derived, and on the basis of the pricing mechanism, this paper designs an algorithm based on a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). Finally, a simulation shows that the real-time electricity price pricing mechanism under the two-level equilibrium model can better ensure the fairness of the benefits of the participants in the grid system, and make the user load more balanced.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 72071130).

Key words: smart grid; real-time pricing; load balance; utility balance; two-level balance model; multi-objective genetic algorithm

0 引言

随着可持续发展理念与能源互联网技术的深度融合, 以数字化信息网络系统为基础的智能电网可以为电力市场化的持续推进以及用户用电需求的不断满足提供有效保障, 进而确保社会和经济的可持续发展^[1-2]。然而, 日益增长的电力需求以及新能源的大规模并网, 为电力系统引入了较强的不确定性以及复杂性, 这给电力系统的安全运行、稳定高效

发展带来了巨大挑战^[3-4]。以价格响应为核心的电力需求响应, 通过价格响应对电力价格做出实时调整, 进而引导用户节约、高效用电, 这对电力系统现有挑战的有效解决有着重要意义^[5-7]。另一方面, 基于价格响应的电力需求响应不仅可以影响可再生能源和传统能源的投资水平, 还能够在充分利用现有电力生产资源的基础上满足不同用户的电力需求, 在促进电力系统持续稳定发展的同时, 可以促进电力系统的供给平衡^[8]。

当前, 电力需求响应下的价格定价机制主要包括分时电价、自适应电价、尖峰电价以及实时电价

(Real-time price, RTP)等^[9-10]。实时电价在考虑电力系统运行和基本投资的情况下,在极短的时间内可以向用户提供电能的边际成本^[3,11]。由于其可以对电能需求进行实时反馈,因此被广泛认为是最有前途的需求响应方法,也是电力系统最为理想的定价机制^[9,12]。目前,国内外关于实时电价的定价策略研究主要集中于两个方面,一方面从电力市场化的角度出发,基于博弈优化等方法实现市场定价^[12-18],另一方面,从社会福利的角度出发,通过将电能作为公共产品,采用使得社会福利最大的定价机制,解决此类问题的方法主要是通过最优化理论求解社会福利最大化模型^[3,19-25]。

社会福利最大化模型通过将电力作为资源变量以谋求社会福利最大化,然而此类模型将电力供应商、电网公司以及用户当成了利益统一体,虽然求解此类模型使得社会福利最大化,然而智能电网中的各主体收益效用存在较大差异,这不利于电力系统的稳定高效运作^[26-27]。基于博弈优化的电力市场定价虽然可以更好地兼顾各方的利益平衡,然而当前的博弈研究仅仅从供需平衡的角度进行博弈分析,并未考虑供应侧各主体的利益独立性,这造成了电力供应商与电网公司之间依旧存在较大的收益差异^[28]。

根据电价《定价办法(20版)》的增加条款内容,新的定价方法中也强调了收入平衡调整机制的内容^[29-30]。效用均衡是指通过合理的电价定价机制以实现电网参与者的利益合理分配,进而实现电网系统的健康稳定运行。虽然基于区块链的智能合约可以实现合理的电力供应链利益分配^[31],然而实时电价下的效用均衡研究有待进一步研究。

值得注意的是,无论是社会福利最大化模型还是博弈定价模型都未考虑用户负载的均衡优化。负载均衡优化指通过合理的电价定价使得各时刻下的用户用电趋于平稳均衡。随着电力市场与碳市场的联系日益紧密,均衡负载对于可再生能源的发电能力有着重要影响^[32]。虽然实时电价的定价机制鼓励市场主体错峰用电以达到削峰填谷的目的,然而根据文献研究发现,实时价格调控下的高峰期用电量减少,但由于低谷期的低电价导致用电量增加,从而形成新的高峰期,另一方面,上述研究的作用更多的是偏向削峰,可能使得谷底用电率依然低下,这对于电力系统的稳定运行有着不良影响^[33]。

由上述分析可知,将效用均衡、负载均衡纳入实时电价的定价优化,这对于维持电力系统的可持续稳定发展有着重要意义。因此,本文在社会福利最大化模型的基础上,将“负载-效用”两级均衡融

入智能电网实时电价的定价优化,建立了实时电价定价策略的“负载-效用”两级均衡模型,在满足均衡目标下给出了基于多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解方法,最后通过数值仿真验证了均衡模型的合理性、可行性以及优越性。

1 智能电网主体模型

智能电网作为建立在数字化信息网络系统上的新兴电网系统,具有能源转换效率高、电能利用率高、供电质量可靠等优点,通常包含有发电公司、电网公司和用户3个系统主体,结构上包括有多种发电系统、配电系统、储能设备以及智能电表等硬件设备^[1-2,34]。在实际情况中,用户根据自身需求进行电力消费,电网公司根据用户用电量制定需求侧的实时电价来引导用户合理用电,并根据所有用户总的用电量按照相应的采购价格向电力供应商采购电力,电力供应商按照采购要求进行电力生产,并根据实际电力供应量调节采购价格以保证自身的收益。

本文考虑由一个电力供应商、电网公司以及若干用户组成的智能电力系统,智能电网系统中,根据用户的用电特征将用户用电时间划分 t 个时间间隙, $T(t \in T)$ 表示所有用户用电的所有时间间隙集合。假设系统中存在着 N 个用电用户,对于 $\forall i \in N$, x_i^t 表示用户 i 在时间间隙 t 内的电力消费量。一般情况下,定义电力供应商在时间间隙 t 内的电力生产量为 L_t ,则为避免电力供给不足, $\sum_{i=1}^N x_i^t = L_t$ 。

1.1 用户主体模型

用户主体作为智能电网系统的需求主体,是系统的服务终端,其满足程度与对应时间间隙内的电力消费量密切相关,而根据微观经济学,电力用户的用电行为可以用确定的效用函数来表示^[19]。根据实际情况,每一时间间隙 t 内用户的用电效用应该满足:1)非递减性;2)边际效用递减^[33]。因此,采用二次函数 $U(x_i^t, w_i)$ 表示用户 i 在间隙 t 的用电消费效用函数,如式(1)所示。

$$U(x_i^t, w_i) = \begin{cases} w_i x_i^t - \frac{a}{2} (x_i^t)^2 & 0 \leq x_i^t \leq \frac{w_i}{a} \\ \frac{w_i^2}{2a} & x_i^t > \frac{w_i}{a} \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_i 表示时间间隙 t 内的用电意愿参数; a 为常数。

根据 t 时间间隙的用户效用函数,可获得用户 i 在间隙 t 时的用电消费收益 $W(x_i^t, w_i)$,如式(2)所示。

$$W(x_t^i, w_t) = U(x_t^i, w_t) - p^t x_t^i \quad (2)$$

式中, p^t 表示间隙 t 时的实时电价。

则所有时间间隙内所有用户的电力消费收益效用, 也是用户主体模型的目标函数, 如式(3)所示。

$$\text{Max } R_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N W(x_t^i, w_t) \quad (3)$$

1.2 电网公司主体模型

电网公司是智能电网系统中连接供应端与需求端的中间主体, 其根据需求端的用电需求来制定实时电价是维持电力系统供需平衡的重要手段, 也是电网公司的收益来源。因此, 根据各时间间隙 t 内部用户的用电量以及相应的电力价格, 间隙 t 时的电力公司收益函数 $R_{gc}(x_t^i, p^t, p_b^t)$ 计算如式(4)所示。

$$R_{gc}(x_t^i, p^t, p_b^t) = (p^t - p_b^t) \sum_{i=1}^N x_t^i \quad (4)$$

式中, p_b^t 表示间隙 t 时的单位电力采购价格。

则所有时间间隙内电网公司主体的收益效用 R_{gc} , 也是电网公司主体模型的目标函数, 如式(5)所示。

$$\text{Max } R_{gc} = \sum_{t=1}^T R_{gc}(x_t^i, p^t, p_b^t) \quad (5)$$

1.3 电力供应商主体模型

电力供应商是智能电网系统的供应端, 是进行电力生产与电力供给的终端。用 $C(L_t)$ 表示时间间隙 t 内生产 L_t kWh 电力时的生产成本, 根据研究表示, 电力生产成本函数在供给能力范围内是随供应电力递增的凸函数形式^[35], 因此生产成本 $C(L_t)$ 计算形式如式(6)所示。

$$C(L_t) = a_t(L_t)^2 + b_t L_t + c_t \quad (6)$$

式中, a_t 、 b_t 以及 c_t 为发电成本参数, $a_t > 0$, $b_t \geq 0$, $c_t \geq 0$ 。

电力供应商根据电网公司的采购电量, 通过制定相应的采购价格来获得收益, 因此间隙 t 时的电力供应商收益函数 $R_{sc}(x_t^i, p_b^t)$ 如式(7)所示。

$$R_{sc}(x_t^i, p_b^t) = p_b^t \sum_{i=1}^N x_t^i - C(L_t) \quad (7)$$

则所有时间间隙内电力供应商主体的收益效用 R_{sc} , 也是电力供应商主体模型的目标函数, 如式(8)所示。

$$\text{Max } R_{sc} = \sum_{t=1}^T R_{sc}(x_t^i, p_b^t) \quad (8)$$

1.4 社会福利最大化模型

文献[19]在电网系统各主体收益效用的基础上

建立了社会福利最大化模型, 通过求解该模型可以获得用户所有时间间隙内的最优用电, 并通过设计求解相应的拉格朗日乘子即可获得相应的实时电价, 因此被广泛应用于智能电网的实时电价定价研究, 其模型如式(9)所示。

$$\text{Max } F(x_t^i, p^t) = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N U(x_t^i, w_t) - C(L_t) \right) \quad (9)$$

$$\text{st. } p^t \geq 0, x_t^i \geq 0, \sum_{i=1}^N x_t^i \leq L_t$$

由式(9)可知, 社会福利最大化下只能使得用户效用最大化, 生产成本最小化, 却无法保证电网系统中的各主体收益效用均衡。由于电网公司以及电力供应商的收益与电力采购价格息息相关, 不同采购价格下电网公司以及电力供应商的收益存在较大差异, 如图1和图2所示, 然而求解式(9)只能获得社会总效用最大时最优电力消费量以及相应的实时电价, 无法求解出相应的实时采购电价, 这就导致了供需两端会存在较大的收益效用差异, 长久以往, 对电网的稳定持续发展不利。另一方面, 基于社会福利最大化模型的用户最优电力消费在时间维度上

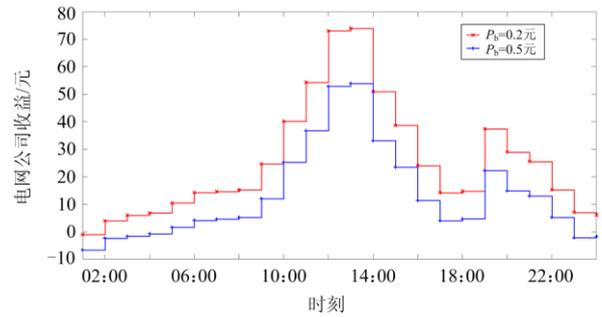


图1 不同采购电价下电网公司收益效用

Fig. 1 Income utility of power grid companies under different purchase prices

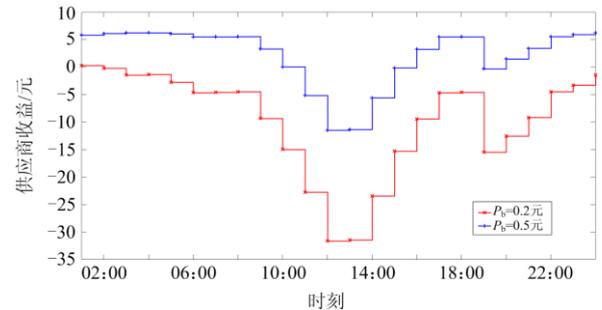


图2 不同采购电价下电力供应商收益效用

Fig. 2 Income utility of power suppliers under different purchase price

可能会跟实时电价出现同步的波动,进而造成用电低谷转变为用电高峰,这对电力系统的可持续发展提出了新的挑战。

2 “负载-效用”两级均衡模型

由上述可知,基于社会福利最大化模型的实时电价定价机制虽然可以使得社会福利最大化,却无法实现电力系统的负载均衡以及智能电网各主体之间的效用均衡。从实际意义的角度,将效用均衡、负载均衡纳入实时电价的定价优化,这对于维持电力系统的可持续稳定发展有着重要意义。因此,本节在社会福利最大化模型的基础上,建立了实时电价定价策略的“负载-效用”两级均衡模型,并在满足均衡目标下给出基于多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解方法。

2.1 负载均衡

削峰填谷是需求侧管理的一个重要目标,实时电价作为需求侧管理价格响应的重要手段,基于实时电价引导用户合理用电进而实现电力系统的削峰填谷,这对实现电力系统的供需平衡稳定有着重要意义^[3-4,6,11-12,19,33,36]。负载均衡对于配电网故障分配^[34]、负荷转供^[36]、电网运行的经济性与安全性^[37-38]以及电网调度^[39]有着重要影响,因此,将负载均衡纳入实时电价的定价优化,这对电力系统的稳定发展具有实际意义。

定义 $E_C = [E_C^1, E_C^2, \dots, E_C^T]$ 为所有时间间隙内的用户电力负载,不难得出 $E_C^t = \sum_{i=1}^N x_i^t$, 其中 $t=1,2,\dots,T$ 。基于电力负载对电力系统稳定性的重要影响,本文将负载均衡作为电网系统实时电价的定价目标之一,这对于电价的定价合理性以及电网系统的稳定性有着重要意义,其中,负载均衡目标的实现如式(10)所示。

$$\text{Min } E_V = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_C^t - \bar{E}_C)^2 \quad (10)$$

式中, $t=1,2,\dots,T$, E_V 表示所有时间间隙内的用户电力负载方差; $E_C^t \in E_C$; \bar{E}_C 表示所有时间间隙内的用户电力负载的均值, $\bar{E}_C = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T E_C^t$ 。

2.2 效用均衡

平等、公正是社会主义核心价值观的主要内容,在智能电网发展的过程中,强调电力系统中各主体收益的公平性对于电力系统的稳定健康发展有着重要的理论和实践意义^[26-28,40-41]。鉴于社会福利最大模型中电网系统各主体间的效用收益存在差异,本

文将各主体的效用均衡纳入实时电价的定价优化。

定义 $R_V = [R_V^1, R_V^2, \dots, R_V^T]$ 为所有时间间隙内的各主体的平均收益效用序列,其中 R_V^t 表示间隙 t 时的平均收益效用,如式(11)所示。

$$R_V^t = \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^N U(x_i^t, w_i) - C(L_t) \right) \quad (11)$$

基于平均收益效用序列,可求得各主体的效用偏差序列 $R_V = [R_V^1, R_V^2, \dots, R_V^T]$, 其中 R_V^t 表示间隙 t 时的效用偏差,如式(12)所示。

$$R_V^t = \frac{1}{3} \left((W(x_i^t, w_i) - R_V^t)^2 + (R_{sc}(x_i^t, p_i^t, p_b^t) - R_V^t)^2 + (R_{sc}(x_i^t, p_i^t) - R_V^t)^2 \right) \quad (12)$$

基于效用偏差序列,效用均衡目标函数定义如式(13)所示。

$$\text{Min } E_R = \sum_{t=1}^T R_V^t \quad (13)$$

式中, $t=1,2,\dots,T$, 表示所有时间间隙内的效用偏差。

2.3 模型求解

不难发现,上述模型是个 NP-难问题,这是由于“负载-效用”两级均衡模型本质是多目标模型,模型的各目标之间通过决策变量相互联系、相互制约,单目标下的目标优化是以其他目标的劣化为代价的,尤其是在均衡目标制约下,电力系统各主体的目标效用之间相互制约。因此为求解此均衡模型,本文首先基于电网系统各主体的收益效用函数推导出采购电价与实时电价的定价机制,随后在这种定价机制的基础上,设计了多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解算法,其中两电价的定价机制如下所示。

1) 采购电价定价。由电力供应商主体模型可知,电力供应商间隙 t 时的最优电力生产量 $L_t = \sum_{i=1}^N x_i^t$, 则间隙 t 时的电力供应商收益函数 $R_{sc}(x_i^t, p_b^t)$ 是关于电力生产量 L_t 的二次函数,开口向下,因此为使得间隙 t 时的电力供应商收益最大,采购电价的定价机制为 $p_b^t = 2aL_t = 2a \sum_{i=1}^N x_i^t$ 。

2) 实时电价定价。根据用户主体模型对实时电价进行分析,假设间隙 t 时的各用户无差异,则将需求侧的用户主体简化成一类,基于平均用户电力消费进行实时电价的定价,有利于平衡用户间的用电效用。根据间隙 t 时的用户用电消费收益 $W(x_i^t, w_i)$ 不难发现,为使得平均电力消费下的用户用电消费收

益最大, 实时电价的定价机制为 $p^t = w_t - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^t$ 。

3) 实时电价的调整。为了保证间隙 t 时的电网公司主体的收益, 根据电网公司主体模型中电力公司收益函数 $R_{gc}(x_i^t, p^t, p_b^t)$, 采购电价与实时电价应该满足: $p^t \geq p_b^t$ 。然而基于社会福利的上述两种电价定价机制, 为追求社会福利的最大化, 可能会导致某些间隙 t 时会出现 $p^t < p_b^t$ 的情况, 进而使得这些间隙 t 下电网公司主体的收益是亏损的, 这就导致了电网公司主体与用户主体之间的收益效用存在较大差距。因此, 从效用均衡性的角度出发, 对实时电价作出调整, 进而使得电网公司与用户主体之间的收益差距降低, 其调整机制如下: 当 $p^t < p_b^t$ 时, $p^t = p_b^t + 0.5$ 。

基于上述定价机制, 本文设计了基于多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解算法用于求解所构建的“负载-效用”两级均衡模型, 求解算法流程如下: 1) 生成初始用户电力消费量种群, 并基于初始化种群进行实时电价与采购电价的定价; 2) 根据初始化种群以及电力定价计算个体函数目标值, 根据个体函数目标值进行非支配排序; 3) 非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉、变异三个基本操作得到第一代子代种群; 4) 合并父代种群与子代种群, 进行快速非支配排序以及拥挤度计算, 根据非支配关系以及个体拥挤度生成父代种群; 5) 通过遗传算法迭代操作产生新的子代种群; 6) 迭代操作, 直至满足终止条件。

3 模型仿真

为验证均衡模型的合理性以及有效性, 本文基于 Matlab 2016a 软件进行模型仿真, 其中相关参数设置如下: 时间间隙 T 根据 24 h 划分 24 个时间间隙, 电力用户 N 为 5, 常数 a 为 0.5, 发电成本参数 a_i 为 0.01, b_i 与 c_i 为 0。根据用户用电行为特征, 用电意愿 w_i 根据不同时间间隙选取不同的值, 其中: 01:00—06:00 为用户休息时间, 用电活跃度较低, 是用电低谷, 用电意愿较低, $w_i = rand(2,4)$; 07:00—18:00 为用户日常生活区间段, 用户用电活跃度较高, 是用电高峰, 用电意愿较高, $w_i = rand(4,8)$; 19:00—24:00, 活跃度又有所下降, 因此用电意愿有所下降, $w_i = rand(3,6)$ 。

进一步地, 为了验证均衡模型的定价合理性以及优越性, 将均衡模型同式(9)提出的社会福利最大化模型进行比较, 分别对所有时间间隙内两种模型

进行仿真分析。24 h 各时间间隙下的实时电价变化对比如图 3 所示。不难看出, 社会福利最大化模型与两级均衡模型下的实时电价均利用了用户用电价格弹性, 然而两级均衡模型的实时电价定价较之社会福利最大化模型更加充分利用了用户用电对价格的弹性, 通过将用电高峰下的实时电价定价较高, 而用电低谷下的实时电价定价较低, 进而激励用户将高峰负载负荷转移到用电低谷, 引导用户合理用电。

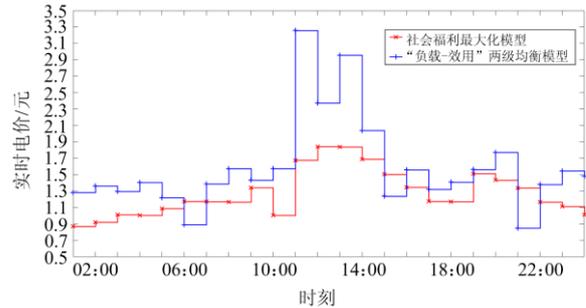


图 3 24 h 的实时电价图

Fig. 3 Real-time price of 24 hours

各时间间隙下的总用电负荷变化如图 4 所示, 可以看出, 通过将负载均衡纳入实时电价的定价优化, 两级均衡模型下用户用电负载的峰谷差较之社会福利最大化模型有着更低的峰谷差(其中两级均衡模型下的用户用电负载最大峰谷差为 32.49 kWh, 社会福利最大化模型下的用户用电负载最大峰谷差为 48.56 kWh), 同时所有时间间隙内两级均衡模型下用户用电负载方差也明显低于社会福利最大化模型下用户用电负载方差, 这也就意味着两级均衡模型下用户用电负载更加均衡稳定, 这对于电力系统的稳定发展更有意义。

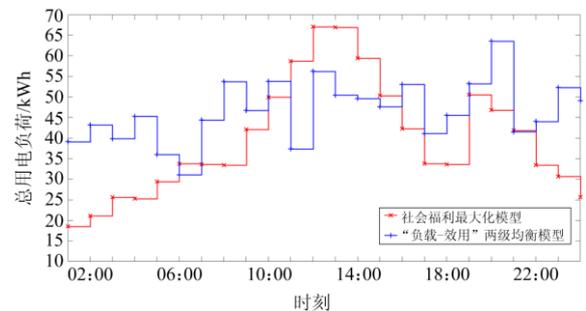


图 4 24 h 的总用电负荷变化图

Fig. 4 Variation of total power load in 24 hours

图 5 为 24 h 下各时间间隙下的采购电价变化图, 图 6—图 8 分别为 24 h 各时间间隙下电网公司的收益效用、电力供应商的收益效用以及用户用电

的收益效用变化图。不难看出，通过不同间隙下的采购电价合理定价，保证了电网公司的收益效用。进一步地，由图 6—图 8 可知，通过将效用均衡目标纳入实时电价的定价优化，两级均衡模型下电网公司、电力供应商以及用户之间的收益效用差距较之社会福利最大化模型有着明显降低，均衡了电力系统中的各主体收益效用。

上述结果分析表明了均衡模型结果的合理性，而为了验证所提的均衡模型的有效性，将社会福利最大化模型的仿真结果与均衡模型的仿真结果进行对比，表 1 给出了两模型的指标对比，图 9 为两模

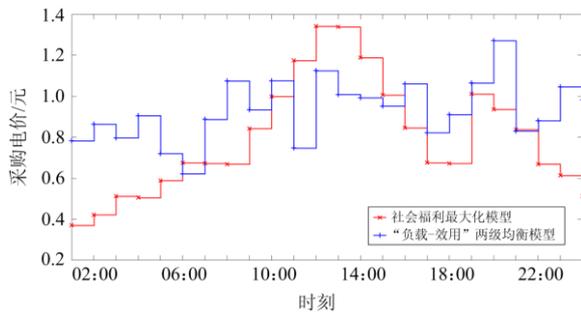


图 5 24 h 的采购电价图
Fig. 5 Purchase price of 24 hours

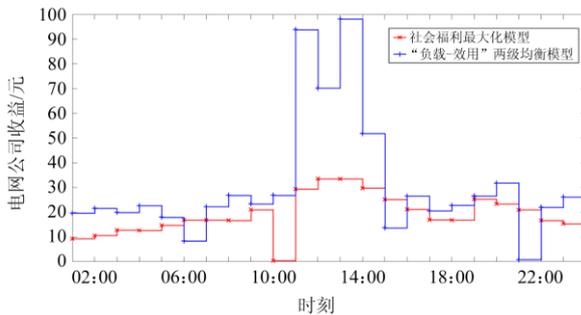


图 6 电网公司的收益效用图
Fig. 6 Utility of a grid company's revenue

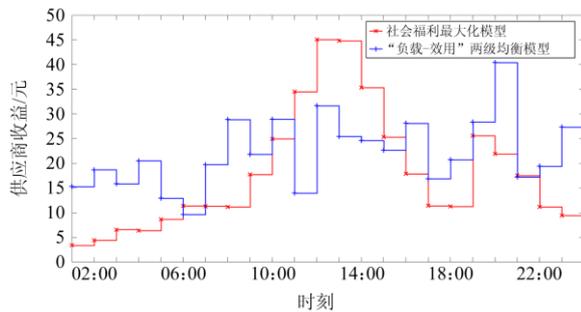


图 7 电力供应商的收益效用图
Fig. 7 Utility of revenue for power suppliers

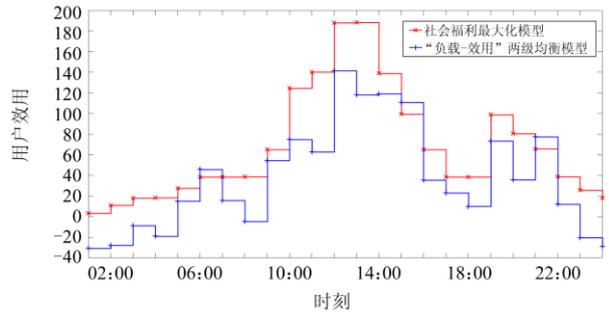


图 8 电力用户的收益效用变化图
Fig. 8 Utility of revenue to electricity users

型 24 h 的社会总福利变化。由图 9 不难发现，虽然各时间间隙下两级均衡模型下的社会总福利略低于社会福利最大化模型，然而从总体结果来看，二者相差不大，这是由于两级均衡模型在保证“负载-效用”两级均衡时，也追求了社会福利的最大化。同样值得注意的是，根据表 1，通过将负载均衡以及效用均衡纳入实时电价的定价优化，较之社会福利最大化模型，两级均衡模型有着更低的负载方差（其中两级均衡模型下的用户用电负载方差为 52.25，社会福利最大化模型下的用户用电负载方差为 185.64），同时两级均衡下电网系统各主体之间的收益效用得到了均衡（其中两级均衡模型下的各主体的最大收益差距为 353.52，社会福利最大化模型下的各主体的最大收益差距为 1 185.19），这对电力系统的稳定健康发展有着重要的意义。

表 1 模型指标对比

Table 1 Index comparison of the two models

模型	负载方差	用户总效用	电力公司总收益/元	电力供应商总收益/元
社会福利最大化模型	185.64	1 609.11	452.49	423.92
两级均衡模型	52.25	886.94	739.16	533.42

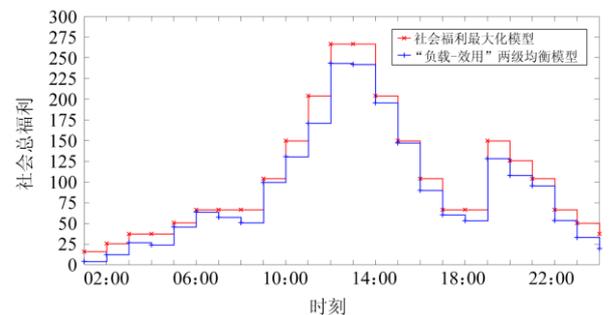


图 9 24 h 社会总福利变化图
Fig. 9 Total social welfare for 24 hours

4 结论

智能电网实时电价是需求侧管理价格响应的一种理想定价机制, 通过引导用户节约、高效用电以实现电网系统的削峰填谷, 对于电网系统的健康稳定发展有着重要意义。考虑到基于社会福利最大化的实时电价定价机制一方面未考虑到电力系统各主体的利益独立性, 无法实现电力系统各主体的效用均衡, 另一方面可能造成用户负载峰谷的产生或者转移, 本文在社会福利最大化模型的基础上, 将“负载-效用”两级均衡融入智能电网实时电价的定价优化, 建立了实时电价定价策略的“负载-效用”两级均衡模型, 随后基于电网系统各主体的收益效用函数推导出采购电价与实时电价的定价机制, 并在这种定价机制的基础上, 设计了基于多目标遗传算法(NSGA-II)的模型求解算法。最后, 通过数值仿真实验表明, 基于两级均衡模型的实时电价定价机制较之社会福利最大化模型更能保证电网系统各参与方的收益效用均衡, 也避免了负载峰谷的产生与转移, 使得用户用电更加合理化, 这对于电网系统的可持续稳定健康发展有着重要的意义。

然而, 本文也存在一些不足: 1) 为简化模型, 未将用户之间存在的差异性以及用户用电的不确定性纳入研究; 2) 在进行电力供应商成本分析时, 只考虑了其发电成本, 电力供给过程的其他成本以及设备维护成本未考虑在内; 3) 未考虑电网内互补能源以及可替换能源对实时电价带来的影响; 4) 只考虑了一个电力供应商以及一个电网公司的简单电网系统, 大规模电网系统的实时电价定价策略需要进一步研究。因此, 在未来的研究中, 一方面需要将用户的差异性以及用电的不确定性融入实时电价的定价策略研究, 另一方面, 考虑更多的实际可能, 进而为大规模电网系统的电价研究提供解决思路。

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.
YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.
- [3] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(10): 201-209.
- GAO Yan. The social welfare maximization model of real-time pricing for smart grid[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(10): 201-209.
- [4] 代业明, 高岩. 基于智能电网需求侧管理的多零售商实时定价策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4244-4249.
DAI Yeming, GAO Yan. Real-time pricing strategy with multi-retailers based on demand-side management for the smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4244-4249.
- [5] 王凌云, 胡兴媛, 李昇. 基于多代理的实时电价机制下微网需求侧协同调控优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 69-76.
WANG Lingyun, HU Xingyuan, LI Sheng. Collaborative regulation control optimization on demand side of microgrid based on multi-agent under real time price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 69-76.
- [6] CAMPILLO J, DAHLQUIST E, WALLIN F, et al. Is real-time electricity pricing suitable for residential users without demand-side management?[J]. Energy, 2016, 109: 310-325.
- [7] HUANG W J, ZHANG N, KANG C Q, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [8] KÖK A G, SHANG K, YÜCEL Ş. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions[J]. Management Science, 2018, 64(1): 131-148.
- [9] 李媛媛, 李军祥, 党亚峥, 等. 基于 KKT 条件智能电网实时定价的光滑牛顿算法[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(4): 646-656.
LI Yuanyuan, LI Junxiang, DANG Yazheng, et al. Smoothing Newton algorithm for real-time pricing of smart grid based on KKT conditions[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2020, 40(4): 646-656.
- [10] DONG C W, NG C T, CHENG T C E. Electricity time-of-use tariff with stochastic demand[J]. Production and Operations Management, 2017, 26(1): 64-79.
- [11] 杨旭英, 周明, 李庚银. 智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 220-226.
YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 220-226.
- [12] 代业明, 高岩, 高红伟, 等. 基于需求响应的智能电网

- 实时电价谈判模型[J]. 中国管理科学, 2017, 25(3): 130-136.
- DAI Yeming, GAO Yan, GAO Hongwei, et al. Real-time pricing contract bargaining based on demand response in smart grid[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(3): 130-136.
- [13] SRINIVASAN D, RAJGARHIA S, RADHAKRISHNAN B M, et al. Game-theory based dynamic pricing strategies for demand side management in smart grids[J]. Energy, 2017, 126: 132-143.
- [14] 薛云涛, 陈祎超, 李秀文, 等. 基于用户满意度和 Ramsey 定价理论的峰谷分时阶梯电价联合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 122-128.
- XUE Yuntao, CHEN Yichao, LI Xiuwen, et al. Federation model of TOU and ladder price based on customer satisfaction and Ramsey pricing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 122-128.
- [15] MENG F L, ZENG X J. A Stackelberg game-theoretic approach to optimal real-time pricing for the smart grid[J]. Soft Computing, 2013, 17(12): 2365-2380.
- [16] 李江波, 王波, 高岩, 等. 马尔可夫决策过程下的智能电网实时电价模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(11): 2756-2763.
- LI Jiangbo, WANG Bo, GAO Yan, et al. Optimal real-time pricing model of smart grid based on Markov decision process[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2756-2763.
- [17] 代业明, 高岩. 具有多类资源多类用户智能电网实时定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2315-2323.
- DAI Yeming, GAO Yan. Real-time pricing decision-making in smart grid with multi-type users and multi-type power sources[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(9): 2315-2323.
- [18] 梅生伟, 魏韡. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(11): 1331-1344.
- MEI Shengwei, WEI Wei. Hierarchical game and its applications in the smart grid[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(11): 1331-1344.
- [19] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C] // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 415-420.
- [20] 邹小燕, 张新华. 基于社会福利最大化的电力市场双边竞价机制设计[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(1): 44-54.
- ZOU Xiaoyan, ZHANG Xinhua. Double electricity auction mechanism design based on maximizing market welfare[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(1): 44-54.
- [21] SONG X, QU J Y. An improved real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C] // 11th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation, June 29-July 4, 2014, Shenyang, China: 2509-2513.
- [22] ZHANG W, LI J, CHEN G, et al. A comprehensive model with fast solver for optimal energy scheduling in RTP environment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2314-2323.
- [23] ASADI G, GITIZADEH M, ROOSTA A. Welfare maximization under real-time pricing in smart grid using PSO algorithm[C] // 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 14-16, 2013, Mashhad, Iran: 1-7.
- [24] WANG Y, WU L, WANG S. A fully-decentralized consensus-based ADMM approach for DC-OPF with demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2637-2647.
- [25] 王金叶, 马良, 刘勇, 等. 智能电网实时定价的自适应光学优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 29-35.
- WANG Jinye, MA Liang, LIU Yong, et al. Self-adaptive optics inspired optimization for real-time pricing of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 29-35.
- [26] 陆玉玉, 王波, 王晓飞, 等. 考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 41-46.
- LU Yuyu, WANG Bo, WANG Xiaofei, et al. Real-time pricing revenue equilibrium model considering fairness in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 41-46.
- [27] 高小龙, 张云, 刘雪燕. 基于多目标规划的电力实时定价策略研究[J]. 价格理论与实践, 2018(9): 66-69.
- GAO Xiaolong, ZHANG Yun, LIU Xueyan. Research on real-time electricity price pricing based on multi-objective programming[J]. Price: Theory & Practice, 2018(9): 66-69.
- [28] 李江波, 王波, 高岩, 等. 社会福利均衡的实时电价多层互动模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 56-63.
- LI Jiangbo, WANG Bo, GAO Yan, et al. Optimal real-time pricing for society welfare balance based on multi-layers model[J]. Power System Protection and

- Control, 2017, 45(4): 56-63.
- [29] 田廓. 基于电网投资视角的省级电网输配电价定价办法解析及投资优化策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 7-13.
TIAN Kuo. Provincial power grid enterprise transmission and distribution price method analysis & investment optimization policy based on perspective of grid investment[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 7-13.
- [30] 程杉, 陈欢田. 基于 Stackelberg 博弈的智能电网完全分布式需求响应策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 60-65, 96.
CHENG Shan, CHEN Huantian. Fully distributed demand response strategy for smart grid based on Stackelberg game[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 60-65, 96.
- [31] 侯文捷, 武鸿鹏, 高峰亭, 等. 基于区块链智能合约的电力供应链利益分配研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2020, 33(1): 144-148.
HOU Wenjie, WU Hongpeng, GAO Fengting, et al. Research on profit allocation of power supply chain based on block chain smart contract[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2020, 33(1): 144-148.
- [32] DING T, LU R, XU Y, et al. Joint electricity and carbon market for Northeast Asia energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 99-110.
- [33] 陶莉, 高岩, 朱红波. 以极小化峰谷差为目标的智能电网实时定价[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 315-324.
TAO Li, GAO Yan, ZHU Hongbo. Real-time pricing strategy for smart grid based on the minimization of the peak-valley difference[J]. Journal of Systems Engineering, 2020, 35(3): 315-324.
- [34] PARK C K, KIM H J, KIM Y S. A study of factors enhancing smart grid consumer engagement[J]. Energy Policy, 2014, 72: 211-218.
- [35] 金颖丰, 高岩. 智能电网分段实时定价优化策略研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 171-175.
JIN Yingfeng, GAO Yan. Optimal piecewise real-time pricing strategy for smart grid[J]. Computer Simulation, 2016, 33(4): 171-175.
- [36] 代业明, 高红伟, 高岩, 等. 具有电力需求预测更新的智能电网实时定价机制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 58-63.
DAI Yeming, GAO Hongwei, GAO Yan, et al. Real-time pricing mechanism in smart grid with forecasting update of power demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 58-63.
- [37] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 342-348.
PANG Qingle, GAO Houlei, LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 342-348.
- [38] 白浩, 雷金勇, 周长城, 等. 考虑安全性和经济性均衡的中压配电系统最佳负载能力计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 119-123.
BAI Hao, LEI Jinyong, ZHOU Changcheng, et al. Calculation method for optimal load capacity of medium-voltage distribution system considering the balance between safety and economy[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2020, 32(12): 119-123.
- [39] 刘芳芳, 吕林, 刘友波, 等. 高渗透清洁能源的城市高压配电网转供调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 1-9.
LIU Fangfang, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer scheduling strategy for urban high-voltage distribution network with highly-penetrated renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 1-9.
- [40] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [41] 崔强, 王秀丽, 刘祖永. 市场环境下计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 62-68.
CUI Qiang, WANG Xiuli, LIU Zuyong. Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 62-68.

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-03-27

作者简介:

吴志强(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为系统工程、决策分析; E-mail: 3073477557@qq.com

高岩(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统需求侧管理与定价机制, 投资组合优化, 非光滑优化;

王波(1960—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为系统工程, 运营管理, 金融计量。E-mail: toddwang2000@126.com

(编辑 周金梅)