

DOI: 10.7667/PSPC201502

有序用电智能多代理系统架构与机制研究

陈霄¹, 童星², 张宁², 易永仙¹, 栾开宁³, 周玉¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 210019; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084; 3. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 有序用电是需求侧管理的重要组成部分。当系统存在电力供应缺口时, 通过削减用户负荷保障电力供需平衡。其方案编制以人工为主, 缺乏互动, 智能化程度较低, 导致有序用电指标分配工作精细化程度不高, 执行较粗放。设计了一种覆盖空间上多层电网的有序用电智能多代理系统架构。该架构将电网物理结构分为“系统—节点—用户”三层, 并分别为系统、节点和用户建立智能代理模型。在智能代理内部, 嵌入了学习机制使得智能代理能对环境变化作出自适应的响应。在智能代理之间, 提出了一种鼓励用户互济的协商机制, 该机制使得一个用户无法完成指标缺口时, 其他用户可对其进行支援并获得补偿。通过智能代理模型的协作, 实现了有序用电指标的多层次、自适应、交互式分配。

关键词: 有序用电; 需求侧管理; 多代理系统; 协商机制; 缺口分配

Intelligent multi-agent system for orderly power utilization: architecture and coordination mechanism design

CHEN Xiao¹, TONG Xing², ZHANG Ning², YI Yongxian¹, LUAN Kaining³, ZHOU Yu¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, State Grid Key Laboratory of Electric Power Metrology, Nanjing 210019, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Orderly power utilization is an important measurement of demand side management. When there is power supply shortage or emergency events, orderly power utilization can be applied to decrease electricity demand and ensure the balance of electricity supply and demand. Nowadays orderly power utilization is mainly carried out in a manually manner without optimization and communicating with consumers, which cannot obtain a precise and strategic allocation of load shedding. This paper designs an intelligent multi-agent system architecture and coordination mechanism for the multi-layer distribution of load shedding in orderly power utilization. The electrical grid is decomposed into three layers: system layer, node layer and customer layer. The three layers are modelled using intelligent agent. For each agent, a learning mechanism is embedded to make the agent be able to adaptively response to the environment. Among different agents, an agent coordination mechanism is designed to encourage customers' mutual support. Through the cooperation of agents, the proposed method can adaptively and interactively distribute the load shedding, obtaining a strategic orderly power utilization in a multi-layer electrical grid.

Key words: orderly power utilization; demand side management; multi-agent; coordination mechanism; load shedding distribution

0 引言

有序用电是需求侧管理的重要组成部分, 指在电力供应不足、突发事件等情况下, 通过行政措施、

经济手段、技术方法, 依法控制部分用电需求, 维护供用电秩序平稳的管理工作, 具体措施包括: 错峰、避峰、节电和拉闸^[1-2]。近年来, 我国电力消费保持高速增长, 季节性电力紧缺连年发生, 迎峰度夏(冬)期间电力供需矛盾突出^[3]。有序用电工作在保障居民生活和重要用户用电, 抑制高耗能、高排放行业用电过快增长, 促进电力供需平衡, 维护良好

基金项目: 国家电网公司科技项目(智能有序用电辅助决策支持技术研究)

的供用电秩序等方面发挥了积极作用,有力地支撑了电力系统安全与可靠运行^[4]。

目前应用的有序用电软件系统功能主要包括人工编制方案辅助、方案执行(错避峰与释放)监督与考核、方案演练、控制后节电效果分析等^[5-8]。系统存在的问题在于:1)仍需要人工编制缺口指标分配方案^[9],电网用户数量巨大^[10],导致有序用电方案编制工作量巨大,工作效率低;2)有序用电方案实际执行时,临时调整方案的现象时有发生,由于没有赋予用户之间互动的权力,致使无充足时间让用户准备,引起用户不满,也加大了操作人员的执行难度和出错概率;3)系统智能化程度低,学习能力较弱,无法做出自适应的迭代改进。上述问题直接导致了目前有序用电工作精细化程度不高,执行较粗放,方案的科学性、合理性、安全性、公平性以及用户的满意度仍有待提高。

所谓智能代理(Agent),是一个充分自治的、具有独立决策制定和行为控制能力的软、硬件系统或其他系统,是分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence)领域的一个主要内容^[11]。多代理系统(Multi-agent System),顾名思义,是一种由多个智能代理共同合作组成的能够智能和灵活地对工作条件的变化和周围过程的需求进行响应的系统。为达到某一全局目标,多代理系统通过协调一组拥有分布式知识(知识、意图、策略、规划和行为等)的智能代理,使其相互协商与协作,完成对问题求解^[12]。该技术目前在电力系统多个领域,如电力系统调度^[13-14]、电力市场^[15]、暂态稳定^[16]、继电保护^[17-18]、故障分析^[19]、拓扑分析^[20]、微电网控制^[21-23]领域内,已经获得了广泛的应用,然而在有序用电领域却鲜有应用。

本文将智能多代理系统技术应用在有序用电领域,提出了一种有序用电智能多代理系统架构与协商机制:建立了覆盖空间上多层电网的有序用电智能多代理系统架构,并在智能代理中内嵌了学习机制,提出了鼓励用户互济的代理协商机制,实现了有序用电缺口指标的多层次、自适应、交互式分配。

1 有序用电智能多代理系统

1.1 系统架构

提出了覆盖空间上多层电网的有序用电智能多代理系统架构,如图1所示。首先根据电网物理结构将其分为“系统—节点—用户”式结构,一个节点包含多个用户,系统则包含电网内所有节点;其

次分别为系统、节点和用户建立智能代理模型,实现对有序用电工作实体的数学抽象;最终通过代理之间的分工与协作共同完成有序用电缺口指标的多层次、自适应、交互式分配。

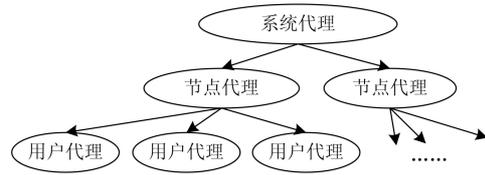


图1 有序用电智能多代理系统架构

Fig. 1 Multi-agent system architecture for orderly power utilization

不同层级代理的功能设计如下:

(1) 系统代理

系统代理负责计算系统缺口指标,从各节点代理收集下属各节点的节电特性(一般包含节电潜力和节电损失系数等),根据各地市的节电特性,调用有序用电缺口指标分配算法,将缺口指标分配到各个节点代理。

(2) 节点代理

节点代理一方面向系统代理上报自身的节电特性,另一方面在从系统代理得到分配的缺口指标后,从下属各用户代理收集节电特性,依此将缺口指标分配到各用户代理。

(3) 用户代理

用户代理是这一层次化代理结构中的最底层,完成对用户的抽象,负责收集用户节电特性并上报给节点代理以及代理用户执行的有序用电方案。

1.2 指标分配机制

因为电网中用户具有海量性,直接将缺口指标分配到海量用户,这一问题规模太大,数学优化算法往往难以在有限的时间内求得指标分配的最优解。以我国某省为例,2014年参与有序用电的大用户数目达到23万,因此在有序用电指标静态分配算法中,这一问题的决策变量数目至少在23万以上,目前即使最成熟的商业数学优化软件 IBM/CPLEX 也难以求解。

基于上述有序用电智能多代理系统架构建立一种基于分解协调的有序用电缺口指标分配流程,如图2所示:1)由下至上,每层代理都需要向上层代理上报自己的节电特性,以便上层代理汇总生成等效的节电特性;2)由上而下,上层代理在获取下层代理的节电特性后,再根据自身分配得到的有序用电缺口指标,逐层分解完成由本级到下级的缺口指标分配任务。

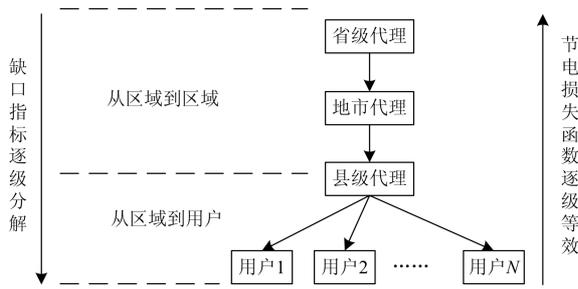


图2 基于分解协调的有序用电指标分配流程

Fig. 2 Shortage distribution for orderly power utilization based on decomposition-coordination method

分解协调方法的物理本质是将一个大规模的规划问题根据问题的物理背景划分为若干个“子空间”(如本文研究中将系统按照各个节点划分,再将节点按照各个用户划分),在各个“子空间”中充分挖掘其内部决策变量之间的组合优化效益,从而得到各个“子空间”的等效外特性;然后根据各个“子空间”的等效外特性,在上层主问题中进一步挖掘各个“子空间”之间的组合优化效益。

这个过程可以形象地称为“优化空间分解”。区域内部的用户形成优化“子空间”,和其他节点的“子空间”进行协调优化,这样能够避免所有用户统一建模优化,减少决策变量的数目,从而极大地提升大规模规划问题的求解效率。如图3所示,原始优化空间 Ω 的可行域是 2^N ,通过优化空间分解为 r 个优化子空间后,每个子空间的可行域分别为 $2^{N_1}, 2^{N_2}, \dots, 2^{N_r}$ (N_1, N_2, \dots, N_r 之和为 N),极大地降低了寻优空间的大小,提高了寻优效率。

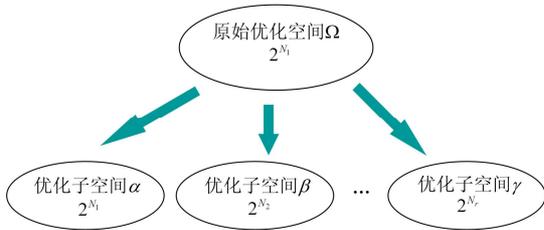


图3 优化空间分解示意图

Fig. 3 Decomposition of optimization space

1.3 有序用电指标分配算法

有序用电指标分配工作的本质在于通过对用户峰荷时段用电进行削减以降低系统峰荷,保障电力系统安全运行。因此,有序用电指标分配的第一原则为降低系统峰荷,确保电力系统安全。在提升电力系统安全性的同时,有序用电指标分配还应尽可能降低给全社会带来的经济损失。站在电网企业角度上,不能为了追求很高的安全性而过度地限电,导致售电收入大幅下降;站在用户角度上,应尽可能

降低用户的节电损失,减小给用户生产生活造成的影响。

(1) 目标函数

有序用电指标分配静态算法的优化目标是电网售电损失和用户节电损失最小化。

$$\min \sum_{i=1}^N f_i^s(\Delta D_i) + \sum_{i=1}^N f_i^d(\Delta D_i) \quad (1)$$

式中: ΔD_i 是第 i 个用户的节电负荷; N 为用户数; $f_i^s(\Delta D_i)$ 为由于用户 i 节电所造成的电网售电损失,一般为线性函数; $\sum_{i=1}^N f_i^s(\Delta D_i)$ 为全网整体售电损失; $f_i^d(\Delta D_i)$ 为第 i 个用户的节电损失函数,为非线性函数; $\sum_{i=1}^N f_i^d(\Delta D_i)$ 是所有用户节电损失总和。

(2) 约束条件

a) 功率平衡约束

$$\Delta P - \sum_{i=1}^N \Delta D_i = 0 \quad (2)$$

式中: ΔP 是有序用电缺口指标; ΔD_i 是用户 i 的节电负荷; N 为用户数。

b) 用户节电负荷上下限约束

$$\Delta D_i^{\min} \leq \Delta D_i \leq \Delta D_i^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中, ΔD_i^{\min} 和 ΔD_i^{\max} 分别是用户 i 节电负荷上下限。 ΔD_i^{\min} 一般为0, ΔD_i^{\max} 为用户的总节电潜力。

c) 用户用电连续性约束

$$\begin{aligned} -\Delta D_i^d &\leq (D_i + \Delta D_i) - D_i^- \leq \Delta D_i^u, \quad i=1, 2, \dots, N \\ -\Delta D_i^d &\leq D_i^+ - (D_i + \Delta D_i) \leq \Delta D_i^u, \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $(D_i + \Delta D_i)$ 为用户 i 实施节电后的负荷; D_i^- 和 D_i^+ 则分别为超前或者滞后一个时段的用户负荷; ΔD_i^u 和 ΔD_i^d 分别为用户 i 的负荷增减速率限制。

d) 线路潮流安全约束

$$P_{l(i-j)} \leq \frac{P_{l(i-j)} - P_{l(j-i)}}{2} - \sum_{k=1}^N G_{l(i-j),k} \Delta D_k \leq \bar{P}_{l(i-j)} \quad (5)$$

$$l(i, j) \in \Psi_L$$

式中: Ψ_L 为电网中阻塞线路集; $P_{l(i-j)}$ 、 $P_{l(j-i)}$ 为阻塞线路 l 的正向潮流和反向潮流; $G_{l(i-j),k}$ 为线路 $l(i-j)$ 有功潮流对节点 k 有功的灵敏度,即发电机输出功率转移分布因子; 而 $\bar{P}_{l(i-j)}$ 和 $\underline{P}_{l(i-j)}$ 分别为线路 l 的正反向有功功率传输极限。

1.4 有序用电智能代理学习机制

有序用电的指标分配过程中,决定用户指标分

配多少的主要因素为用户的节电潜力。用户的节电潜力的预测一般通过预测负荷曲线减去节电负荷曲线得到。这种评估方法主要依赖于历史数据的准确性、聚类算法的有效性，生成的节电负荷曲线有可能不符合用户用电的客观规律。

用户代理除具有与其他用户进行协商交互的能力外，其自身还具有一定的学习能力，反映在可根据用户实际节电曲线，对事先评估的节电负荷曲线进行改进，使其更符合真实的用电曲线。

当用户以接近节电潜力的缺口指标进行节电时，认为此情况下用户的实际用电曲线为其真实的节电负荷曲线。这里定义用户实际完成的缺口指标与节电潜力的接近程度为保生产节电深度，计算方法如式(6)。

$$\text{节电深度} = \frac{\text{实际完成缺口指标}}{\text{节电潜力}} \quad (6)$$

节电深度反映了实际完成缺口指标与节电潜力的接近程度，通过设置一定的上下阈值 $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 来判断用户实际完成缺口指标是否理论节电潜力。例如，当 $\delta_{\min}=0.9$ ， $\delta_{\max}=1.1$ ，则用户的实际完成缺口指标位于节电潜力的 90%~110% 区间内，才认为实际用电曲线接近真实的节电负荷曲线，用户代理将学习此次用户的真实节电负荷曲线 $D^*=[D_1^* \ D_2^* \ \dots \ D_T^*]$ ， T 为时段数，并综合有序用电指标分配算法中上次采用的节电负荷曲线 $D=[D_1 \ D_2 \ \dots \ D_T]$ 计算得到新的节电负荷曲线，将此曲线提供给下次指标分配算法使用。设用户的学习强度设为 α ，新的节电负荷曲线计算公式如式(7)。

$$D_t = \alpha D_t + (1-\alpha)D_t^* \quad (7)$$

$$t=1, 2, \dots, T$$

2 鼓励用户互济的代理协商机制

用户代理分配得到的缺口指标由节点代理分配得到，其分配指标的多少受到用户节电损失函数影响。当评估得到的用户节电特性与真实节电特性存在较大差别时，则容易出现用户分配缺口指标过大或过小的情况。用户分配缺口指标过大时，超过了用户的真实节电潜力，将导致用户无法执行有序用电方案的情况发生；用户分配缺口指标过小，则无法充分利用用户的真实节电潜力。这里提出一种鼓励用户互济的用户代理协商机制。用户代理协商机制的关键在于如何促使每个用户申报真实的节电潜力以及如何鼓励用户快速响应其他用户的支援请求。

在促使用户申报真实节电潜力方面，本机制通过为所有用户建立支援评分机制来实现。用户的支援评分设为用户在历史支援任务中的总贡献度，计算方法取其历史累计支援容量减去历史累计受援容量。用户支援评分越高，当其向协商代理提出支援请求时，代表用户对有序用电指标协商的历史贡献越高，其获取支援的优先级越高；相反，若用户评分越低，当其需要支援时，越晚获得支援。这种机制将鼓励存在“节电潜力剩余”的用户代理向协商代理申报其真实准确的剩余节电潜力，用以支援“节电潜力不足”的用户。

在鼓励用户快速响应其他用户的支援请求方面，协商机制将按照申报速度从快到慢依次安排用户支援，即申报越快的用户，其剩余节电潜力越优先参与支援，而申报越慢的用户，其剩余节电潜力将越后安排参与支援。

如图 4 所示，具体协商机制步骤分为受援容量申报、支援容量申报、用户容量匹配 3 个过程。

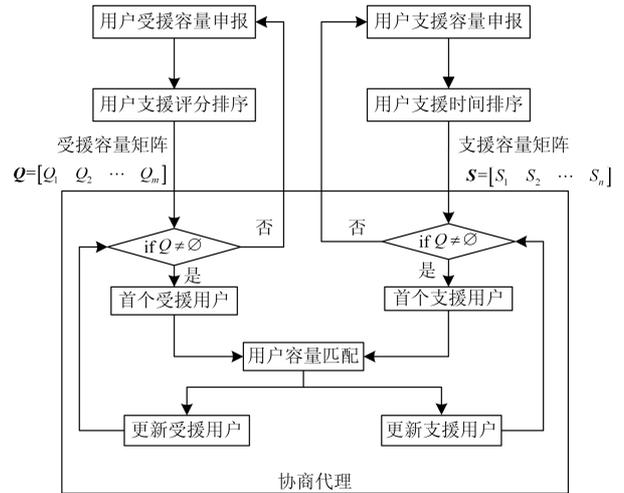


图 4 鼓励用户互济的代理协商机制

Fig. 4 Agent coordination mechanism encouraging customers' mutual support

(1) 受援容量申报

受援用户 i 向协商代理申报受援容量 Q_i ，按照历史支援评分高低 W_i 对受援用户进行排序，按照此顺序得到新的受援容量矩阵 $Q=[Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_m]$ ， m 为受援用户数。由于评分越高的受援用户越先得到支援，因此 Q_1 最先得到支援，其次为 Q_2 ，最后为 Q_n 。

(2) 支援容量申报

支援用户向协商代理申报支援容量，按照支援用户申报时间排序，越早申报的支援用户越先参与支援，依此序给出支援容量矩阵 $S=[S_1 \ S_2 \ \dots \ S_n]$ ， n 为支援用户数。

(3) 用户容量匹配

a) 判断受援容量矩阵 Q 或者支援容量矩阵 S 是否为 \emptyset , 若二者都不为 \emptyset , 则开始容量匹配, 进入 b), 若二者任一为 \emptyset , 则视为完成一轮协商, 重新回到步骤 a), 开始用户容量申报。

b) 用户容量匹配的过程中, 排序第一的受援用户 Q_1 和排序第一的支援用户 S_1 将会进行匹配。若受援用户容量 $Q_1 \geq S_1$, 进入 c); 若受援用户容量 $Q_1 < S_1$, 进入 d)。

c) 匹配之后支援用户容量 S_1 将被用尽, 支援用户分配的缺口指标和支援评分同时增加 S_1 , 受援用户的缺口指标和支援评分减小 S_1 , $Q_1 = Q_1 - S_1$, 之后将 S_1 从 S 中删除, 回到 a)。

d) 匹配之后受援用户容量 Q_1 将被完全满足, 受援用户分配的缺口指标和支援评分减小 Q_1 , 支援用户的缺口指标和支援评分增加 Q_1 , $S_1 = S_1 - Q_1$, 之后将 Q_1 从 Q 中删除, 回到 a)。

3 算例分析

这里采用 IEEE-118 节点系统为测试算例, 该系统共有 118 个节点, 54 台发电机, 186 条线路, 99 个负荷节点, 假设每个节点有 100 个有序用电参与用户。因此该系统由上而下可被分为三层: 系统层、节点层以及用户层。按照每一层的功能和结构特点, 为每一层分别建立智能代理模型, 整个系统可被剖分成系统代理、节点代理以及用户代理。系统代理和节点代理之间、节点代理与用户代理之间, 通过鼓励互济的代理协商机制, 实现节点与节点、用户与用户之间相互支援剩余的节电容量。同时用户代理可根据用户实际节电曲线, 对事先评估的节电负荷曲线进行改进, 使其更符合真实的用电曲线。

3.1 代理互济仿真结果

鼓励互济的代理协商机制, 既可适用于系统代理与节点代理之间的协商, 也可适用于节点代理与用户代理之间的协商。这里以节点代理与用户代理之间的协商结果为例说明该机制。以系统中某节点为例, 节点内含有 100 个用户, 选择两种典型场景进行分析。第一种场景为支援容量冗余场景, 该场景中 43 个用户为支援用户, 总计支援容量为 992.87 kW, 17 个用户为受援用户, 总计受援容量为 459.23 kW, 另有 40 个用户未参与协商。第二种场景为支援容量不足场景, 该场景中 15 个用户为支援用户, 总计支援容量为 1 097.33 kW, 42 个用户为受援用户, 总计受援容量为 487.85 kW, 另有 43 个用户未

参与。如表 1 所示。

表 1 用户申报支援容量、申报时间以及其实际支援容量
Table 1 Submitted supporting capacity, time and real supporting capacity for customers

用 户 ID	申报 支援 容量	实际 支援 容量	申报 时间	用 户 id	申报 支援 容量	实际 支援 容量	申报 时间
1	1.63	1.63	20.553	23	30.855	0	247.27
2	28.06	28.06	23.223	24	13.264	0	282.36
3	44.093	44.093	37.166	25	41.219	0	296.58
4	33.459	33.459	63.734	26	49.133	0	309.04
5	9.5217	9.5217	77.31	27	36.512	0	311.51
6	18.446	18.446	93.306	28	17.194	0	311.55
7	23.036	23.036	104.42	29	29.203	0	325.18
8	49.082	49.082	110.56	30	5.3885	0	329.33
9	7.8202	7.8202	112.04	31	45.315	0	330.86
10	42.776	42.776	120.29	32	43.983	0	344.16
11	32.238	32.238	133.39	33	40.888	0	345.93
12	18.814	18.814	136.57	34	13.036	0	348.01
13	9.5462	9.5462	149.15	35	29.718	0	360.46
14	21.413	21.413	158	36	1.1256	0	366.44
15	24.101	24.101	174.79	37	21.263	0	374.44
16	6.0306	6.0306	183.74	38	15.636	0	387.44
17	29.475	29.475	205.65	39	8.0742	0	389.68
18	11.309	11.309	223.69	40	8.9383	0	396.67
19	19.231	19.231	224.35	41	21.144	0	459.68
20	29.149	29.149	241.24	42	4.7115	0	460.36
21	12.59	0	241.98	43	29.926	0	473.68
22	14.522	0	246.25				

(1) 支援容量冗余场景

在支援容量冗余场景中, 因为支援容量超过了受援容量, 供大于求, 所有受援用户的容量均被满足, 而只有部分支援用户的容量得以作用。如表 1 所示, 为支援用户向协商代理申报支援容量、对应申报时间以及其实际支援容量。

用户 ID 按照用户申报时间排序, ID 越小的用户代表申报时间越早, 因此其支援容量优先被调用。如图 5 所示, 黑色柱形为用户 1~43 的申报支援容量, 灰色柱形为用户 1~43 的实际支援容量。图中显示, 最后一位参与支援的用户为第 20 位用户, 之后所有用户的支援容量均没有中标, 这是因为该场景下支援容量冗余, 申报时间早的用户优先中标, 而申报时间晚的用户无法中标。

(2) 支援容量不足场景

在支援容量不足场景中, 因为受援容量超过了支援容量, 供不应求, 所有支援用户的容量均被利用, 而只有部分受援用户的容量得到满足。

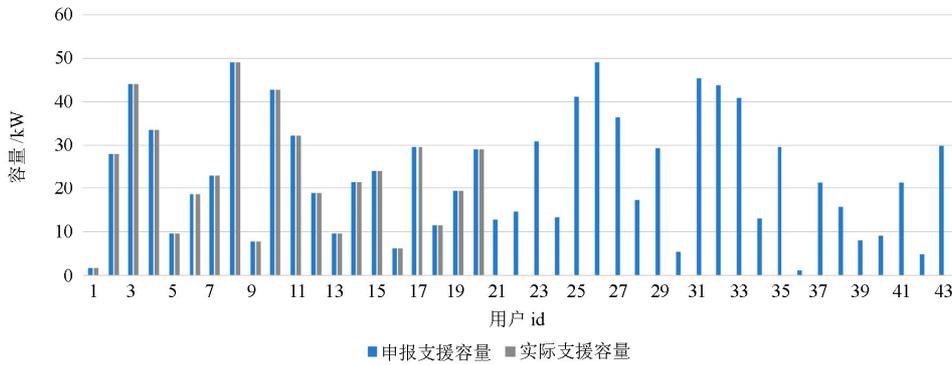


图 5 用户申报支援容量与其实际支援容量

Fig. 5 Submitted supporting capacity and real supporting capacity for customers

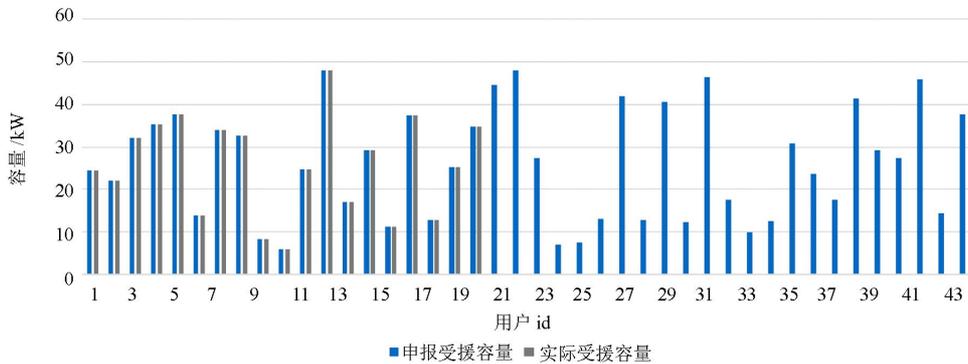


图 6 用户申报受援容量与其实际受援容量

Fig. 6 Submitted supported capacity and real supported capacity for customers

用户 ID 按照用户支援评分排序, ID 越小的用户代表支援评分越高,因此其受援容量优先被满足。如图 6 所示,黑色柱形为用户 1~42 的申报受援容量,灰色柱形为用户 1~42 的实际受援容量。图中显示,最后一位被满足的受援用户为用户 19,之后所有用户的受援容量均没有中标,这是因为该场景下支援容量不足,只有支援评分高的用户优先中标,而支援评分低的用户无法中标。

3.2 用户代理学习机制仿真结果

用户代理学习的原理在于,将用户真实的节电负荷曲线和指标分配算法中采用的理论节电负荷曲线进行加权综合,使理论节电负荷曲线逐步趋近真实的节电负荷曲线。其中学习率 α 为真实节电负荷曲线的权重,而 $1-\alpha$ 为理论节电负荷曲线的权重。 α 位于 $[0,1]$ 之间,其越趋近于 1,则学习速度越快,其越趋近于 0,学习速度越慢。当 $\alpha=1$ 时,用户代理学习速度最快,指标分配时采用的用户理论节电负荷曲线为其上一次有序用电时的真实节电负荷曲线;而当 $\alpha=0$ 时,用户代理将不学习,节电潜力始终按照最初给定的理论节电负荷曲线计算。

这里设置 $\alpha=0.5$ 、 $\alpha=0.9$ 以及 $\alpha=0.1$, 模拟峰

荷时段某用户的节电负荷学习结果如图 7 所示。该用户在峰荷时段的初始理论节电负荷为 790 kW,而其真实节电负荷为 758 kW。

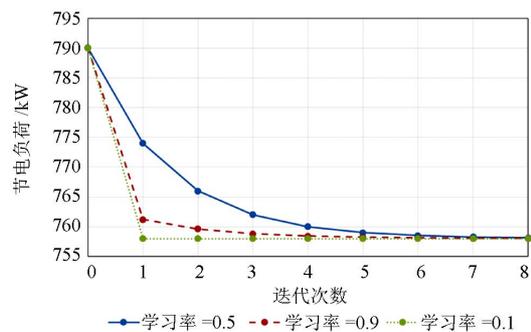


图 7 节电负荷学习结果

Fig. 7 Response load learning results

可以看到,学习强度 α 越大,理论节电负荷越快收敛于真实节电负荷。这里认为误差小于 1 kW 即为收敛,因此 $\alpha=0.5$ 时,学习次数为 7 时才收敛;而当 $\alpha=0.9$,收敛次数为 2; $\alpha=0.1$ 时,学习次数为 10 时依然不收敛。

从上述结果不难得出结论:当用户的真实节电

负荷曲线非常稳定时, 推荐采用较大的学习强度, 如 $\alpha=0.9$, 使用户的理论节电负荷快速收敛到真实值上; 而当用户的真实节电负荷曲线变化较大时, 推荐采用适中的学习强度, 如 $\alpha=0.5$, 防止用户的理论节电负荷曲线不稳定。

4 结论

电网中有序用电参与用户数量巨大, 用户个性不一, 使得目前以人工为主的有序用电方案编制方法存在工作量大、效率低、缺乏互动、智能化程度不高等缺点。基于分布式人工智能中的智能多代理技术, 本文提出了一种覆盖空间上多层电网的有序用电智能多代理系统架构, 可实现有序用电缺口指标的多层次、自适应、交互式分配, 具有如下特点:

1) 多代理系统架构对实际电网进行了多层次化抽象, 通过“系统—节点—用户”三层代理结构, 将原本复杂的有序用电指标分配任务, 分解成多个较简单的指标分配子任务。

2) 提出在智能代理中内嵌节电曲线的学习机制, 使得智能代理可根据用户实际节电情况对节电曲线进行迭代改进, 当用户负荷特性突变导致原本估计的节电曲线变化时, 智能代理也能迅速地适应这一情况。

3) 通过鼓励用户互济的代理协商机制, 实现了有序用电用户代理之间的协商二次分配, 当有序用电指标一次分配不准确时, 用户间可通过该协商机制对缺口指标进行二次优化调整。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于有序用电管理办法的通知[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [2] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Boxi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [3] 徐正波. 我国电力短缺的供需角度分析[D]. 成都: 西南财经大学, 2012.
XU Zhengbo. Research on the power shortage of China — based on the supply and demand of electricity[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2012.
- [4] 余立平. 电力用户有序用电对电煤需求影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- YU Liping. Analysis on effects of power consumption orderly of users on fired-coal need[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [5] 吴佳, 张凯俊, 王金跃, 等. 基于精细化管理的有序用电辅助决策[J]. 浙江电力, 2013(4): 59-63.
WU Jia, ZHANG Kaijun, WANG Jinyue, et al. Decision support system for orderly power utilization based on delicacy[J]. Zhejiang Electric Power, 2013(4): 59-63.
- [6] 王志伟, 薛亮, 张国庆, 等. 山东省有序用电智能决策系统设计及应用[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(6): 52-54.
WANG Zhiwei, XUE Liang, ZHANG Qingguo, et al. Design and application of smart orderly electric power decision system[J]. Power DSM, 2011, 13(6): 52-54.
- [7] 肖建红. 利用电能信息采集系统实施有序用电[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(5): 57-58.
XIAO Jianhong. Implementation of orderly power consumption by energy information collection system[J]. Power DSM, 2012, 14(5): 57-58.
- [8] 李永清. 有序用电决策管理系统[D]. 南京: 东南大学, 2005.
LI Yongqing. Decision-making and management system for orderly power utility[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [9] 李正明, 张纪华, 陈敏洁. 基于层次分析法的企业有序用电模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 136-141.
LI Zhengming, ZHANG Jihua, CHEN Minjie. Fuzzy comprehensive evaluation of enterprise's orderly power utility based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 136-141.
- [10] 张粒子, 蔡学文, 鲁宇, 等. 面向错峰潜力分析的典型用户筛选[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 146-150.
ZHANG Lizi, CAI Xuewen, LU Yu, et al. Peak shifting potential analysis-oriented typical consumers screening[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 146-150.
- [11] 李伟超, 牛改芳. 智能代理技术分析及应用[J]. 情报杂志, 2003, (06): 29-30.
- [12] 喻磊. 基于多代理理论的微电网分布式优化控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
YU Lei. Study on distributed optimization control approach for microgrid based on multi-agent theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 张晓花, 谢俊, 赵晋泉, 等. 考虑风电和电动汽车等不确定性负荷的电力系统节能减排调度[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2408-2414.

ZHANG Xiaohua, XIE Jun, ZHAO Jinliang, et al. Energy-saving emission-reduction dispatching of electrical power system considering uncertainty of load with wind power and plug-in hybrid electric vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2408-2414.

[14] 李文云, 蒋亚坤, 雷炳银, 等. 基于 Multi-Agent 系统的含分布式电源电网能源优化管理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 21-27.

LI Wenyun, JIANG Yakun, LEI Bingyin, et al. MAS based energy management strategies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 21-27.

[15] 张森林. 电力市场双边交易若干问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

ZHANG Senlin. Study on several important problems of bilateral transactions in electricity market[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[16] 常海军, 侯玉强, 任先成, 等. 电网暂态相继失稳风险评估及协调阻断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 40-47.

CHANG Haijun, HOU Yuqiang, REN Xiancheng, et al. Research on risk assessment and coordinated blocking of transient successive instability in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 40-47.

[17] 陈振宇, 梁强. 基于多代理系统的继电保护[J]. 继电器, 2005, 33(3): 40-42.

CHEN Zhenyu, LIANG Qiang. Scheme of protective relaying based on multi agent system[J]. Relay, 2005, 33(3): 40-42.

[18] 边莉, 边晨源. 电网故障诊断的智能方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 146-153.

BIAN Li, BIAN Chenyuan. Review on intelligence fault diagnosis in power networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 146-153.

[19] 余文辉, 王少荣, 柳斐, 等. 基于在线自组织同步 MAS 的电网广域保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 69-76.

YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, et al. A wide-area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 69-76.

[20] 李学平, 卢志刚, 刘照拯, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修的多代理策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 48-55.

LI Xueping, LU Zhigang, LIU Zhaocheng, et al. Multi-agent strategy of distribution networks multi-faults rush-repair with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 48-55.

[21] 朱涛, 梁铃, 宋振涛, 等. 基于 MAS 和 Petri-net 技术的新能源电网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 1-7.

ZHU Tao, LIANG Ling, SONG Zhentao, et al. MAS based coordination control strategies for micro-grid by using Petri-net[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 1-7.

[22] 章健, 梅彦, 贺兴, 等. 新一代智能电网的管理——多微电网的网络架构、运行模式及控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 45-49.

ZHANG Jian, MEI Yan, HE Xing, et al. Study on the management for smart grid: multi-microgrids and their operation mode, Interaction Mechanism and Control Strategy[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(18): 45-49.

[23] 张旭, 韩民晓, 徐良. 交流微电网稳定控制器并联效率优化设计[J]. 电器与能效管理技术, 2016(6): 41-46.

ZHANG Xu, HAN Minxiao, XU Liang. Efficiency optimization design of parallel AC microgrid stability controller[J]. Low Voltage Apparatus, 2016(6): 41-46.

收稿日期: 2015-11-18; 修回日期: 2016-03-24

作者简介:

陈 霄(1985-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力用户负荷分析, 电能计量; E-mail: cx_012003@163.com

童 星(1989-), 男, 通信作者, 博士研究生, IEEE 学生会员, 研究方向为负荷预测、需求侧响应、电力用户行为分析; E-mail: tongx11@mails.tsinghua.edu.cn

张 宁(1985-), 男, 博士, 讲师, IEEE 会员, 研究方向为多能源系统、电力系统规划及运行优化的工作。E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)