

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191210

泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型

胡健, 秦玉杰, 焦提操, 邵选英

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 建设泛在电力物联网的目标之一是促进清洁能源的消纳, 应对能源消费清洁低碳转型的需求。泛在电力物联网环境下, 以虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)作为分布式可再生能源管理的手段, 提出一种考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型。依据碳排放权配额制原则, 建立三种不同碳排放权约束场景, 并利用基于分布估计的膜算法分析三种场景下系统的调峰成本和环境效益。结果表明, 碳排放权约束会导致调峰系统出力变化来减少碳排放量, 但在一定范围内系统的碳排放量不随约束的变动而改变, 具有一定的自由碳排放权约束空间。碳排放权约束水平会影响 VPP 调峰系统的经济成本, 碳排放权的分配应遵循公平性和效率性原则。

关键词: 泛在电力物联网; 虚拟电厂; 调峰; 碳排放权; 膜算法

Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power internet of things environment

HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, SHAO Xuanying

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: One of the goals of ubiquitous power internet of things is to make the energy consumption cleaner and lower carbon. Under the ubiquitous power internet of things, a peak shaving model considering carbon emission restriction is proposed based on Virtual Power Plant (VPP), which is used as a management means of distributed energy. According to the principle of carbon emission quota system, three different scenarios of carbon emission restriction are established, and the peak shaving cost and environmental benefits of the system under three scenarios are analyzed by using membrane computing based on distribution estimation. The results show that the carbon emission restriction will lead to the change of the output of peak shaving system to reduce carbon emissions, but within a certain range, the carbon emissions of the system will not change with the change of the restriction, in other words, there is a certain free carbon emission restriction space. The level of carbon emission restriction will affect the cost of VPP peak shaving system and the allocation of carbon emission rights should follow the principle of fairness and efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703249).

Key words: ubiquitous power internet of things; virtual power plant; peak shaving; carbon emission rights; membrane computing

0 引言

在互联网+智慧能源的背景下, 以广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控为特征的新一代电力系统正在形成, 将对电力系统的运行控制和管理模式产生深远的影响^[1]。建设泛在电力物联网就是

充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术、先进通信技术, 实现电力系统各个环节万物互联、人机交互, 使新一代电力系统成为具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活特征的智慧服务系统。

泛在电力物联网可以深度感知发、输、配、用各环节的状态环境信息, 使得分布式可再生能源可观、可测、部分可控, 并能够将用户侧可调负荷纳入系统调控范畴, 实现源网荷储协同互动。基于泛

在电力物联网构建虚拟电厂^[2] (Virtual Power Plant, VPP), 实现分布式可再生能源和需求侧可控负荷 (Controllable Load, CL)^[3] 的聚合, 通过源荷友好互动实现可再生能源和电网的协同调度并提供调峰等辅助服务, 将有力支撑可再生能源的接入, 促进可再生能源的消纳^[4]。随着全国统一的碳排放权交易市场的建设, 引入市场机制控制温室气体排放是目前主要的减排思路^[5]。因此, 分布式可再生能源以 VPP 的形式参与调峰时, 应考虑碳排放权约束, 使其符合我国建立统一的碳排放权交易市场机制的要求。同时, 为控制污染物的排放, 调峰系统的运行也应综合考量主要污染物的排污成本^[6-7]。

目前我国针对 VPP 的研究已有一定的成果, 包括 VPP 内部调度经济性问题、VPP 发电价格机制研究等^[8-11], 但考虑碳排放权约束、污染物约束及 VPP 参与系统调峰的研究较少。文献[12]在碳排放权交易机制下, 将 VPP 的减排优势和常规机组的稳定、可调优势相结合, 对其合作空间进行研究。文献[13]引入碳排放约束, 利用鲁棒优化方法来提高风电出力 and 市场电价的预测精度, 建立了考虑碳排放权约束的 VPP 竞价模型。文献[14]引入环境经济调度概念, 考虑污染物排放约束、VPP 与常规机组联合运行的经济性, 建立了考虑常规机组和 VPP 间环境经济调度的二阶约束二阶规划模型。文献[15]设计了考虑可再生能源参与的调峰市场交易机制, 激励可再生能源参与调峰, 促进可再生能源消纳和节能减排。文献[16]建立了 VPP 内部调峰调度模型, 但未考虑 VPP 与常规机组联合的调峰模型。文献[17]考虑了碳排放权约束, 以运行成本的低碳性和经济性为原则建立了核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰模型, 但其主要由核电机组缓解调峰压力, 未考虑 VPP 内部可再生能源发电的调峰潜力。

基于泛在电力物联网构建 VPP, 可聚合风电 (Wind Turbine, WT)、光伏 (Photovoltaic, PV)、燃气轮机 (Convention Gas Turbine, CGT)、储能系统 (Energy Storage System, ESS) 等分布式能源和用户侧的可中断负荷^[18] (Interruptible load, IL)、备用负荷 (Load Reserve, LR) 等 CL, 通过源网荷储协同互动参与系统调峰等辅助服务, 促进可再生能源的消纳。本文在泛在电力物联网环境下, 建立考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型, 并通过不同碳排放权约束场景的对比分析, 探讨碳排放权约束对 VPP 调峰系统的影响。

1 碳排放权配额制

碳排放权交易市场利用市场机制控制温室气体

排放, 能有效降低社会减排成本, 有助于我国能源消费结构实现绿色低碳转型升级^[19]。我国设置了碳排放权省域分解机制, 各省市按照一定的标准向管辖区域内重点排放单位分配额度。配额的分配方式分为有偿和无偿两种形式。目前我国主要采用混合式分配方式, 以无偿分配为主, 有偿分配为辅。参照公平性和效率性原则, 无偿分配方式包括“祖父法”和“标杆法”。祖父法是按照控排单位历史排放量来确定配额, 而标杆法是以某行业的碳排放量代表某一生产单位活动碳排放水平, 并以此作为分配参考指标。

2 排碳量和排污费

传统燃煤火电机组和燃气、燃油机组在发电过程中产生大量的温室气体及污染物^[20], 需要根据排放气体种类和污染物含量制定相应的排放机制。

2.1 碳排量

碳排量可由以下公式^[21]表示。

$$e = \alpha \times b \times P \quad (1)$$

式中: P 为火电机组出力大小; b 为电力折算标准煤系数, 取 $0.123 \text{ kg/kW}\cdot\text{h}$; α 为一次能源的碳排放因子, 通常由式(2)确定。

$$\alpha = NCV \times CEF \times 44 \div 22 \quad (2)$$

式中: NCV 为平均低位发热量; CEF 为碳排放系数。

2.2 排污成本

根据我国大气污染管理条例的相应规定, 我国废气排污费按照 0.7 元/污染物当量 收取, 则排污费成本可表示为

$$C_{pa} = 0.7 \lambda_1 \lambda_2 \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{N_i} \quad (3)$$

式中: i 分别代表烟尘、 SO_2 、 NO_x 和 CO 四种污染物。我国火电发电厂分布区域主要在中东部地区, 考虑到其经济状况, 将地区收费调整系数 λ_1 与环境功能区收费调整系数 λ_2 设为平均数 1; N 为大气污染物当量值; G 为火电机组大气污染物排放量。

$$G = \mu \times b \quad (4)$$

式中, μ 为排放系数。

3 考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型

本文针对由 VPP 和燃煤火电机组组成的调峰系统, 考虑碳排放权约束, 将低碳性和经济性作为优化目标, 构建考虑环境、经济双重目标的 VPP 调峰模型。

3.1 目标函数

可再生能源以VPP形式参与调峰时,调峰系统运行成本来自VPP和火电机组两方面。以成本最小化为目标,构建调峰系统目标函数,如式(5)所示。

$$\min F = C_{\text{VPP}} + C(P) \quad (5)$$

其中: F 为调峰系统运行成本; C_{VPP} 为VPP运行成本^[4, 16, 22-23]; $C(P)$ 为火电机组运行成本。

1) VPP运行成本

$$C_{\text{VPP}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [C_{\text{CGT}}(P_{\text{CGT},i}^t) + C_{\text{ss}}(D_{\text{CGT},i}^t) + C_{\text{pa,CGT}}^{i,t}] + \sum_{t=1}^T C_{\text{ESS}}(P_{\text{ESS}}^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J C_{\text{W}}(P_{\text{W},j}^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z C_{\text{PV}}(P_{\text{PV},z}^t) + \sum_{t=1}^T C_{\text{IL}}(L_{\text{curt}}^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C(\Delta L_{\text{LR},t}^m) \quad (6)$$

$$C_{\text{CGT}}(P_{\text{CGT},i}^t) = a(P_{\text{CGT},i}^t)^2 + bP_{\text{CGT},i}^t + c \quad (7)$$

$$C_{\text{ss}}(D_{\text{CGT},i}^t) = [U_{\text{CGT},i}^t(1 - U_{\text{CGT},i}^t)]D_{\text{CGT},i}^t \quad (8)$$

$$D_{\text{CGT},i}^t = \begin{cases} N_{\text{CGT},i}^{\text{hot}}, T_{\text{CGT},i}^{\text{min}} < T_{\text{CGT},i}^t \leq T_{\text{CGT},i}^{\text{min}} + T_{\text{CGT},i}^{\text{cold}} \\ N_{\text{CGT},i}^{\text{cold}}, T_{\text{CGT},i}^t > T_{\text{CGT},i}^{\text{min}} + T_{\text{CGT},i}^{\text{cold}} \end{cases} \quad (9)$$

$$C_{\text{ESS}}(P_{\text{ESS}}^t) = a_{\text{ESS}}(P_{\text{ESS}}^t)^2 + b_{\text{ESS}}|P_{\text{ESS}}^t| + c_{\text{ESS}} \quad (10)$$

$$C_{\text{W}}(P_{\text{W},j}^t) = K_{\text{W}}P_{\text{W},j}^t \quad (11)$$

$$C_{\text{PV}}(P_{\text{PV},z}^t) = K_{\text{PV}}P_{\text{PV},z}^t \quad (12)$$

$$C_{\text{IL}}(L_{\text{curt}}^t) = a_{\text{IL}}(L_{\text{curt}}^t)^2 + b_{\text{IL}}L_{\text{curt}}^t + c_{\text{IL}} \quad (13)$$

$$C(\Delta L_{\text{LR},t}^m) = \rho_{\text{LR},t}^m \Delta L_{\text{LR},t}^m \quad (14)$$

式中: $C_{\text{CGT}}(P_{\text{CGT},i}^t)$ 为燃气轮机能耗成本; $P_{\text{CGT},i}^t$ 为第 i 台CGT在 t 时段的出力; a 、 b 和 c 为燃气机组运行成本系数; $C_{\text{ss}}(D_{\text{CGT},i}^t)$ 为燃气轮机启停成本; $U_{\text{CGT},i}^t$ 、 $D_{\text{CGT},i}^t$ 分别为第 i 台CGT在 t 时段的运行状态和启停成本; $N_{\text{CGT},i}^{\text{hot}}$ 和 $N_{\text{CGT},i}^{\text{cold}}$ 分别为第 i 台CGT热启动、冷启动成本; $T_{\text{CGT},i}^{\text{min}}$ 、 $T_{\text{CGT},i}^{\text{cold}}$ 和 $T_{\text{CGT},i}^t$ 分别为第 i 台CGT最短允许停机、冷启动时间和持续停机时间; $C_{\text{pa,CGT}}^{i,t}$ 为第 i 台CGT在 t 时段的排污费; $C_{\text{ESS}}(P_{\text{ESS}}^t)$ 为储能系统运行成本; P_{ESS}^t 为ESS在 t 时段的充放电功率,其正负代表充放电; a_{ESS} 、 b_{ESS} 和 c_{ESS} 为ESS充放电成本系数; $C_{\text{W}}(P_{\text{W},j}^t)$ 为风电站运行成本; $P_{\text{W},j}^t$ 为第 j 台风电机组在 t 时段的实际出力; K_{W} 为风电运行维护成本系数; $C_{\text{PV}}(P_{\text{PV},z}^t)$ 为光伏电站运行成本; $P_{\text{PV},z}^t$ 为第 z 台光伏机组在 t 时段的实际出力; K_{PV} 为光伏运行维护成本系数; $C_{\text{IL}}(L_{\text{curt}}^t)$ 为可中断负荷成本; L_{curt}^t 表示可中断负荷

在 t 时段的出力; a_{IL} 、 b_{IL} 、 c_{IL} 分别表示可中断负荷获得的补偿成本系数; $C(\Delta L_{\text{LR},t}^m)$ 、 $\rho_{\text{LR},t}^m$ 、 $\Delta L_{\text{LR},t}^m$ 分别为第 m 个需求响应提供商在 t 时段的备用成本、备用单位成本和备用出力。

1) 火电机组运行成本

在不同出力情况下,火电机组的运行成本^[24]组成不同。因此,火电机组运行成本函数可以表示为

$$C(P) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N C(P_n^t) \quad (15)$$

$$C(P_n^t) = \begin{cases} f(P_n^t) & P_{n,\text{min}} < P_n^t \leq P_{n,\text{max}} \\ f(P_n^t) + W_{\text{cost}}(P_n^t) & P_{n,\text{a}} < P_n^t \leq P_{n,\text{min}} \\ f(P_n^t) + W_{\text{cost}}(P_n^t) + C_{n,\text{oil}}^t + W_{\text{ev}}(P_n^t) & P_{n,\text{b}} < P_n^t \leq P_{n,\text{a}} \\ U_n^t[1 - U_n^{t-1}]S_n^{\text{up}} + U_n^{t-1}[1 - U_n^t]S_n^{\text{down}} & P_n^t = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$f(P_n^t) = (d(P_n^t)^2 + eP_n^t + f)S_{\text{coal}} + C_{\text{pa},n}^t \quad (17)$$

$$W_{\text{cost}}(P_n^t) = \beta S_{n,\text{unit}} / (2N_f(P_n^t)) \quad (18)$$

$$C_{n,\text{oil}}^t = C_{n,\text{con}}^t S_{\text{oil}} + C_{\text{pa,oil}}^{n,t} \quad (19)$$

$$W_{\text{ev}}(P_n^t) = S_{\text{punish}}(P_n^t, C_{n,\text{oil}}^t) \quad (20)$$

式中: $f(P_n^t)$ 为基本调峰运行成本; P_n^t 为第 n 台火电机组在 t 时段的出力; d 、 e 、 f 分别为机组耗量特性函数系数; S_{coal} 为煤炭价格; $C_{\text{pa},n}^t$ 为第 n 台火电机组在 t 时段的排污费; $P_{n,\text{max}}$ 、 $P_{n,\text{min}}$ 分别为第 n 台机组最大出力和基本调峰阶段的最小技术出力; $P_{n,\text{a}}$ 、 $P_{n,\text{b}}$ 分别为第 n 台机组投油深度调峰稳燃、稳燃极限负荷值; U_n^t 表示机组在 t 时段的状态, $U_n^t = 1$ 和 $U_n^t = 0$ 分别表示机组运行、停运状态; S_n^{down} 、 S_n^{up} 分别表示第 n 台火电机组的停运、启动成本; $W_{\text{cost}}(P_n^t)$ 为不投油深度调峰阶段火电机组损耗成本; β 为火电机组深度调峰时运行影响系数; $N_f(P_n^t)$ 为第 n 台火电机组在 t 时段转子致裂循环周次; $S_{n,\text{unit}}$ 为第 n 台火电机组组机成本; $C_{n,\text{oil}}^t$ 为投油深度调峰阶段第 n 台火电机组在 t 时段的投油成本; $C_{n,\text{con}}^t$ 为油耗量; S_{oil} 为油价; $C_{\text{pa,oil}}^{n,t}$ 为燃油排污费; $W_{\text{ev}}(P_n^t)$ 为投油深度调峰阶段因燃油而导致的污染物超标排放政府罚款; S_{punish} 为污染物超标排放的罚款函数。

3.2 约束条件

系统功率平衡约束

$$Q^t = \sum_{i=1}^I P_{CGT,i}^t + \sum_{j=1}^J P_{W,j}^t + \sum_{z=1}^Z P_{PV,z}^t + P_{ESS}^t + L_{curt}^t + \sum_{m=1}^M \Delta L_{LR,t}^m - L_{load}^t + \sum_{n=1}^N P_n^t \quad (21)$$

式中: L_{load}^t 为 VPP 内部 t 时段负荷; Q^t 为 t 时段的需求负荷。

1) VPP 内部约束

$$P_{CGT,i}^{\min} \leq P_{CGT,i}^t \leq P_{CGT,i}^{\max} \quad (22)$$

$$P_{CGT,i}^{\text{down}} \leq P_{CGT,i}^{t+1} - P_{CGT,i}^t \leq P_{CGT,i}^{\text{up}} \quad (23)$$

$$\chi_{SOC}^t = \chi_{SOC}^{t-\Delta t} + \frac{\int_{t-\Delta t}^t P_{ESS}^t dt}{E} \quad (24)$$

$$\chi_{SOC}^{\min} \leq \chi_{SOC}^t \leq \chi_{SOC}^{\max} \quad (25)$$

$$P_{ESS}^{\text{discharge}} \leq P_{ESS}^t \leq P_{ESS}^{\text{charge}} \quad (26)$$

$$0 \leq L_{curt0}^t \leq \eta_{\max} L_{load}^t \quad (27)$$

$$0 \leq \frac{L_{curt}^t}{L_{load}^t} + \frac{L_{curt}^{t+1}}{L_{load}^{t+1}} \leq \eta_{\max}^{\text{cnt}} \quad (28)$$

$$D_m^{\min} \leq \Delta L_{LR,t}^m \leq D_m^{\max} \quad (29)$$

式中: $P_{CGT,i}^{\max}$ 、 $P_{CGT,i}^{\min}$ 分别为第 i 台 CGT 出力上下限; $P_{CGT,i}^{\text{up}}$ 、 $P_{CGT,i}^{\text{down}}$ 分别为第 i 台 CGT 爬坡率上下限; E 表示储能系统的容量, 单位为 MW·h; χ_{SOC}^t 为 t 时刻储能系统的荷电状态, 表示剩余电量百分比, χ_{SOC}^{\max} 、 χ_{SOC}^{\min} 分别表示储能荷电状态的最大、最小值; P_{ESS}^{charge} 、 $P_{ESS}^{\text{discharge}}$ 分别为 ESS 的最大充、放电速率; L_{curt0}^t 为需要调用的 IL 电量; η_{\max} 为 IL 单时段的最大调用率、 η_{\max}^{cnt} 为 IL 连续调用率的最大值; D_m^{\max} 和 D_m^{\min} 为第 m 个需求供应商在单时段可接受负荷削减量上、下限。

2) 火电机组功率约束

$$U_n^t P_n^{\min} \leq P_n^t \leq U_n^t P_n^{\max} \quad (30)$$

$$P_n^{\min} \leq P_n^t \leq P_n^{\max} \quad (31)$$

$$\begin{cases} (U_n^{t-1} - U_n^t)(T_{n,t-1}^{\text{on}} - T_n^{\text{on}}) \geq 0 \\ (U_n^t - U_n^{t-1})(T_{n,t-1}^{\text{off}} - T_n^{\text{off}}) \geq 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$U_n^{t-1} P_n^{t-1} - \gamma_n^{\text{down}} \leq P_n^t \leq \gamma_n^{\text{up}} + U_n^{t-1} P_n^{t-1} \quad (33)$$

式中: P_n^{\min} 、 P_n^{\max} 分别为第 n 台火电机组的最小、最大技术出力; T_n^{on} 、 T_n^{off} 分别为第 n 台火电机组最小连续运行、停机时间; $T_{n,t-1}^{\text{on}}$ 、 $T_{n,t-1}^{\text{off}}$ 分别为第 n 台火电机组在 $t-1$ 时段连续运行、停机时间; γ_n^{up} 、 γ_n^{down}

分为第 n 台火电机组的向上、向下爬坡率。

3) 碳排放约束

在碳交易机制背景下, 本文引入最大允许碳排放量 (Maximum Total Emission Allowances, MTEA)。

$$\sum_{t=1}^T e_t \leq \text{MTEA} \quad (34)$$

式中, e_t 为 t 时段的碳排放量。

4 基于分布估计的膜算法

本文运用基于分布估计的膜算法对模型求解。该算法在膜计算^[25-26]框架下融入分布估计算法^[27], 建立概率模型进行膜中子代新种群的更替, 同时结合膜计算中的转运机制, 进行不同膜间优秀对象的交流, 经过不断进化和更替来实现解空间最佳矩阵的寻优^[28]。算法采用组织型膜算法, 如图 1。

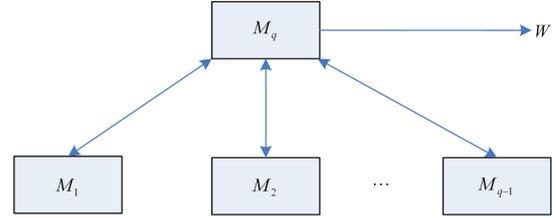


图 1 膜算法的膜结构

Fig. 1 Membrane structure of membrane computing

图中 M_1, M_2, \dots, M_{q-1} 为基本膜, M_q 为交换膜, W 为环境。

本文设有 8 个初始变量, 分别代表燃气轮机、火电机组、风光出力、储能系统以及可控负荷, 并设有 5 个膜, 四个基本膜, 一个交换膜, 采用分布估计方法进行子膜种群的进化, 最大迭代次数为 300, 每个膜中的个体数量为 100, 初始化随机生成每个膜中个体, 初始化矩阵为 100 行, 3×4 列矩阵。算法步骤如图 2 所示。

5 算例分析

5.1 算例说明

本文通过改进 IEEE 30 节点系统来构建 VPP 系统, 如图 3 所示。其中, 节点 1 和节点 2 为系统自有的两台容量分别为 300 MW 和 600 MW 的火电机组接入点; 节点 5 为能提供 CL(包括 10 MW 的 IL 和 20 MW 的 RL)的智能工业园区接入点; 节点 6 为 40 MW 容量的储能系统(ESS)接入点; 节点 7 为总装机容量 60 MW 风电电站(W)接入点; 节点 8 和 28 分别为 50 MW 和 30 MW 容量的分布式燃气轮机(CGT)接入点; 节点 11 为总装机容量 10 MW 的光伏电站(PV)接入点。

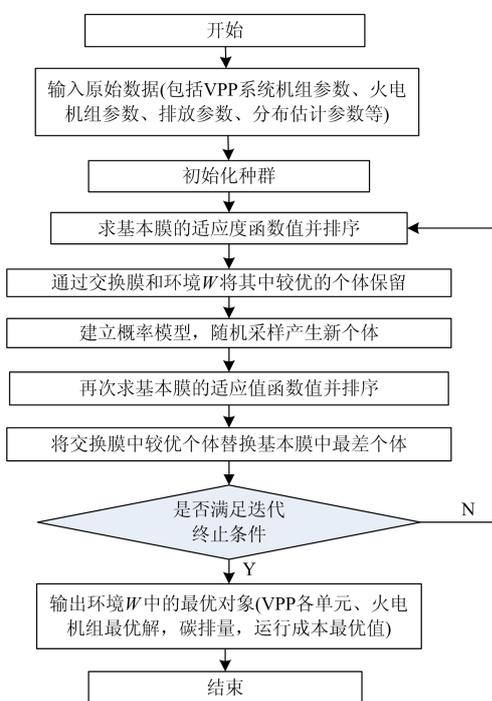


图 2 基于分布估计的膜算法流程图

Fig. 2 Flow chart of membrane computing based on distribution estimation

VPP 内部各功率单元及火电机组参数见表 1、表 2。风、光发电出力及负荷情况由北方某地区典型的夏季出力场景获得, 相关数据见表 3。在本文中, 燃气轮机燃烧天然气、火电机组燃烧原煤且在火电机组投油深度调峰阶段燃烧柴油均排放 CO₂。在碳排放量计算过程中所需的参数值见表 4。假设

表 1 VPP 内部单元参数

Table 1 Unit parameters in VPP

机组/参数	二次项/(元/MW ²)	一次项/(元/MW)	常数项/元	最大出力/MW	最小出力/MW
燃气轮机 1	43.2	186	0	50	0
燃气轮机 2	43.0	189	0	30	0
风电机组	0	412.8	0	60	0
光伏机组	0	357.76	0	10	0
储能系统	45	168	0	40	0
可中断负荷	13.2	78	0	10	0
备用负荷	0	360	0	20	0

表 2 火电机组参数

Table 2 Thermal power unit parameters

机组容量/ MW	二次项/ (元/MW ²)	一次项/ (元/MW)	常数项/元	最大出力/ MW	最小技术 出力/MW	不投油深度调峰 稳燃负荷值/MW	投油深度调峰稳燃 极限负荷值/MW
300	0.060 3	157.8	6 300	300	165	120	60
600	0.004	152.4	7 560	600	300	210	120

燃煤机组脱硫效率为 95%，脱氮效率为 95%，除尘效率为 99%，度电标准煤耗为 123 g/(kW·h)，在计算排污费过程中所涉及的污染物排放当量值和机组大气污染物排放系数见表 5、表 6。

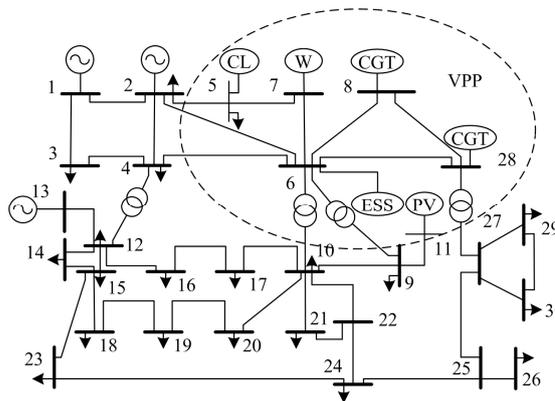


图 3 含 VPP 的 IEEE 30 节点系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the IEEE 30-node system with VPP

在碳排放权配额的分配上, 不管是“祖父法”还是“标杆法”, 都是基于一定碳排量比例来进行分配。本文将不考虑碳排放权约束的场景设为原场景, 并以 VPP 与火电机组满发碳排放量作为参照标准, 依据不同的碳排放权约束水平设置三种模拟场景。

场景 1: VPP 和火电机组的任意连续 4 h 碳排放量不超过该段满发排放量的 85%;

场景 2: VPP 和火电机组的任意连续 4 h 碳排放量不超过该段满发排放量的 80%;

场景 3: VPP 和火电机组的任意连续 4 h 碳排放量不超过该段满发排放量的 75%。

表 3 风电、光伏出力及负荷

Table 3 Wind power, photovoltaic and load schedules

				单位: MW			
时刻	风电站	光伏电站	负荷	时刻	风电站	光伏电站	负荷
1:00	45	0	300	13:00	46	9.5	724
2:00	43	0	290	14:00	45.5	8.3	678
3:00	43	0	255	15:00	45	8	716
4:00	43.5	0	218	16:00	44	7.8	727
5:00	44	0	176	17:00	45	3	727
6:00	45	0	160	18:00	46	0.5	737
7:00	46	0	320	19:00	48	0	804
8:00	50	2.5	598	20:00	49	0	764
9:00	52	6	668	21:00	48	0	584
10:00	51	8	785	22:00	47	0	460
11:00	49	8.6	840	23:00	46	0	394
12:00	47	9	930	0:00	44.8	0	325

表 4 燃料碳排放参数

Table 4 Parameters involved in carbon emissions from fuels

燃料	折标准煤(ce)系数/ (kgce/kg)	碳排放系数/ (kgC/GJ)	平均低位发热量/ (kJ/kg)
原煤	0.714 3	25.8	20 908
天然气	1.33	15.3	38 931
柴油	1.457 1	20.2	43 070

表 5 火电机组大气污染物排放系数

Table 5 Emission coefficient of atmospheric pollutants from thermal power units

燃料	SO ₂	NO _x	烟尘	CO
煤炭/(kg/t)	0.192	9.08	1 000	0.23
天然气/(kg/10 ⁶ m ³)	630	6200	238.5	—

表 6 火电机组大气污染物排放当量

Table 6 Emission equivalent of atmospheric pollutants from thermal power units

大气污染物	SO ₂	NO _x	烟尘	CO
污染当量值	0.95	0.95	2.18	16.7

5.2 算例结果与分析

根据 VPP 内部发电单元、火电机组、用电负荷的相关数据及碳排放权约束,运用膜聚类算法对模型求解,可得三种场景下系统的碳排放量,见图 4。

由图 4 可知,当碳排放权约束为 85%时,碳排放量与原场景下的碳排放量相同,说明场景 1 下系统具有一定不受碳排放权约束的空间。当碳排放权约束为 80%时,调峰系统的碳排放量在 10:00—13:00 出现降低现象,说明场景 2 下调峰系统的出力状况受到了影响,通过改变出力的方式将碳排放量调节至约束范围内。当碳排放权约束为 75%时,从 7:00—

16:00 系统的碳排放量出现了不同程度的下调,从 10:00—13:00 碳排放量下调幅度较大,说明场景 3 下系统所受约束力较大。

三种情景下各发电单元的出力情况见图 5—图 7。

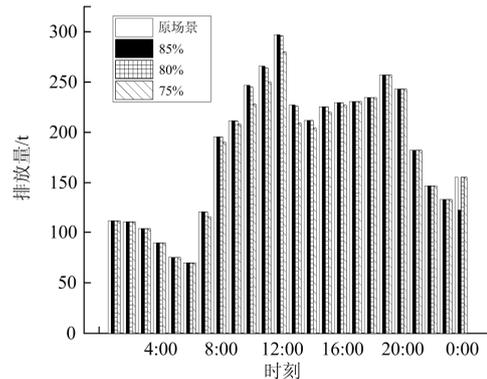


图 4 各场景下排放量状况

Fig. 4 Emissions in each scenario

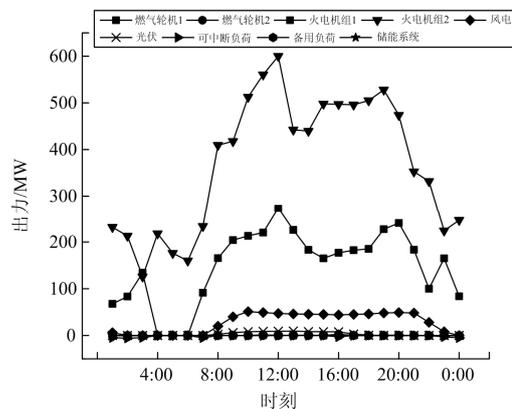


图 5 场景 1 下各发电单元出力状况

Fig. 5 Output status of each generating unit in Scenario 1

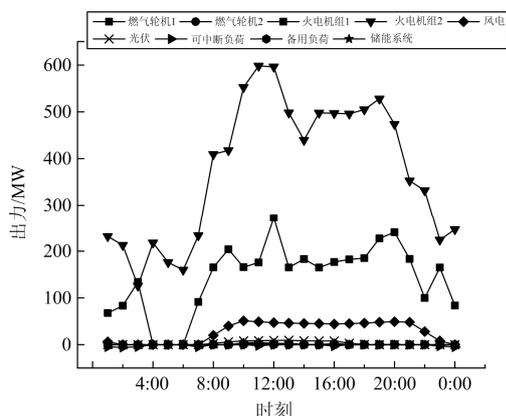


图 6 场景 2 下各发电单元出力状况

Fig. 6 Output status of each generating unit in Scenario 2

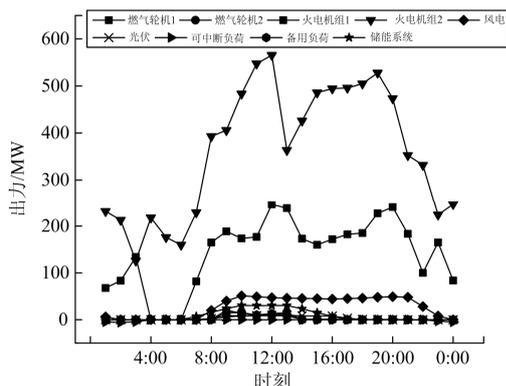


图 7 场景 3 下各发电单元出力状况

Fig. 7 Output status of each generating unit in Scenario 3

场景 1 各发电单元的出力情况与原场景出力状况一致, 没有受到碳排放权的约束。在该场景中, VPP 内部风电站和光伏电站在用电高峰期全部并网, 在用电低谷期选择按最优成本原则调度, 其发电量大大降低, 起到了“削峰填谷”的作用。

对比场景 2 和场景 1 可知, 碳排放权的约束使得火电机组出力状况发生了变化, VPP 内部单元出力变化不明显。

对比场景 3 和场景 2 可知, 火电机组出力大幅度降低, 且涉及出力下调的时间范围扩大。VPP 内部的燃气轮机出力变化明显, 其出力在一定时间段内大幅度上升。

三种场景下 VPP 及各火电机组的发电量、碳排放量和运行成本见表 7。

由前述分析可知, 场景 1 下系统的发电量、碳排放量和成本与原场景一致。与场景 1 相比较, 场景 2 下 VPP 发电量增加, 火电机组发电量有所调整, 碳排放量略有减少, 运行成本有所增加; 场景 3 下 VPP 发电量大幅度增加, 火电机组发电量相应减少, 碳排放量减少, 但运行成本大幅度增加。

表 7 各场景下 VPP 及各火电机组的发电量、碳排放量和运行成本

Table 7 Output, carbon emissions and cost in each scenario

场景	VPP 发电量/ (MW·h)	火电机组 1 发电量/ (MW·h)	火电机组 2 发电量/ (MW·h)	总排放 量/t	成本/元
1	717.36	3 570.02	8 892.60	4 338.28	4 357 324
2	740.29	3 416.40	9 023.29	4 332.51	4 359 104
3	1 114.47	3 428.1	8 676.72	4 239.29	4 703 064

由此可见, 碳排放权约束会导致调峰系统出力变化来减少碳排放量; 在一定范围内, 系统的碳排放量不随约束的变动而发生改变, 具有一定自由碳排放权约束空间; 当碳排放权约束水平达到一定限度后, 调峰系统将无法满足碳排放量约束要求。因此, 在制定碳排放权配额时, 应结合实际情况, 保证配额分配的公平性和效率性。

6 结论

本文在泛在电力物联网环境下, 建立考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型, 并得出了以下结论:

1) 建设泛在电力物联网是顺应能源革命和数字革命融合发展趋势, 落实能源安全新战略, 促进能源高质量发展的重要举措。通过泛在电力物联网, 可实现分布式可再生能源的可观、可测和部分可控, 实现负荷调度模式由“源随荷动”向“源荷互动”转变, 进而实现能源配置由“就地为主、互补余缺”向“时空多维、全局统筹”转变。

2) 在泛在电力物联网环境下, VPP 作为管理可再生能源的有效手段, 能有效聚合各类分布式可再生能源和用户侧可调负荷资源, 促进源网荷储协同互动。可再生能源以 VPP 的形式参与系统理性调峰, 不仅可缓解常规调峰机组的调峰压力和减少新设备的投资, 也有利于可再生能源的消纳。

3) 响应我国减排的环境政策, 基于泛在电力物联网建立考虑碳排放权约束的 VPP 调峰模型, 促进各类可再生能源合理有效地参加电力市场, 可以成为一项基于泛在电力物联网的增值业务。同时, 碳排放权的配额应秉承公平性和效率性原则, 不宜过高或过低, 从而保证配额分配能够起到激励消纳可再生清洁能源的目的。

4) 在满足碳排放权约束的前提下, 参与碳排放权交易市场, 通过碳排放权的交易提高系统总体经济效益, 是值得进一步研究的方向。

参考文献

[1] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电

- 力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [2] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [3] HUANG W, ZHANG N, KANG C, 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(4): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [4] 赵洪山, 刘然. 奖惩机制下虚拟电厂优化调度效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2840-2846.
ZHAO Hongshan, LIU Ran. Benefit analysis of optimal schedule of virtual power plant under reward-punishment mechanism[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2840-2846.
- [5] 张潇, 邵鑫潇, 蒋惠琴. 行业碳排放权的初始配额分配-文献综述[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(11): 1520-1525.
ZHANG Xiao, SHAO Xinxiao, JIANG Huiqin. Initial allocation of carbon emission rights in the industry-literature review[J]. Resource Development & Market, 2018, 34(11): 1520-1525.
- [6] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑阶梯排污费的日前电力市场出清计算[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 27-31.
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Day-ahead market clearing calculation considering stepwise emission Penalty[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 27-31.
- [7] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.
PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [8] 宋巍, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 35-45.
SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 35-45.
- [9] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 218-227.
ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 218-227.
- [10] 王昶, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 222-231.
WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 222-231.
- [11] 何奇琳, 艾芊. 售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 1-10.
HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 1-10.
- [12] 张媛, 徐谦, 杨莉, 等. 考虑碳交易的虚拟电厂与常规机组合作空间研究[J]. 能源工程, 2016(5): 1-7.
ZHANG Yuan, XU Qian, YANG Li, et al. Analysis of cooperative game room between virtual power plant and conventional units considering carbon trading mechanism[J]. Energy Engineering, 2016(5): 1-7.
- [13] 孙国强, 袁智, 许晓慧, 等. 碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 97-103.
SUN Guoqiang, YUAN Zhi, XU Xiaohui, et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 97-103.
- [14] 刘然, 赵洪山. 考虑污染物排放约束的传统电厂与虚拟电厂间环境经济调度模型[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 53-59.
LIU Ran, ZHAO Hongshan. An environmental/economic dispatch model for conventional power plants and virtual power plants considering pollutant emission constraint[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 53-59.
- [15] 杨萌, 张粒子, 杨巍巍. 考虑可再生能源参与的调峰交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 45-52, 79.

- YANG Meng, ZHANG Lizi, YANG Weiwei. Design of trading mechanism for peak shaving service considering participation of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 45-52, 79.
- [16] 郝晓弘, 杨婧元. 基于灰色 PSO 算法的分布式电网多目标调峰调度优化[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(6): 79-83.
- HAO Xiaohong, YANG Jingyuan. Grey PSO algorithm-based multi-objective optimization of scheduling of distributed power grid with peak load regulation[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(6): 79-83.
- [17] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.
- LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [18] 林君豪, 张焰, 陈思, 等. 考虑可控负荷影响的主动配电网系统分布式电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 46-53, 73.
- LIN Junhao, ZHANG Yan, CHEN Si, et al. Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 46-53, 73.
- [19] YANG Jun, FENG Xin, TANG Yufei, et al. A power system optimal dispatch strategy considering the flow of carbon emissions and large consumers[J]. Energies, 2015, 8(9): 9087-9106.
- [20] 高嵩, 赵洁, 黄迪南. 1 000 MW 超超临界二次再热燃煤发电技术[J]. 中国电力, 2017, 50(6): 6-11.
- GAO Song, ZHAO Jie, HUANG Dinan. Double-reheat coal-fired power generation technologies for 1 000 MW ultra-supercritical units[J]. Electric Power, 2017, 50(6): 6-11.
- [21] 吕寒. 我国火电企业碳排放权价值评估及其成本影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- LÜ Han. Research on carbon emission right value evaluation and its cost influence of thermal power company[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [22] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3590-3597.
- XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597.
- [23] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
- FAN Songli, AI Qian, HE Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034.
- [24] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
- LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [25] SONG T, GONG F, LIU X, et al. Spiking neural P systems with white hole neurons[J]. IEEE Transactions on Nano Bioscience, 2016, 15(7): 666-673.
- [26] XUE J, LIU X. Communication P system with oriented chain membrane structures and applications in graph clustering[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(7): 4198-4210.
- [27] 王思明, 童安蓉. 改进的分布估计算法在配电网故障定位中的应用[J]. 应用科学学报, 2017, 35(1): 21-30.
- WANG Siming, TONG Anrong. Improved estimation of distribution algorithm (EDA) for locating fault sections in distribution networks[J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2017, 35(1): 21-30.
- [28] 邹武俊, 田涛, 蒲家蓉, 等. 基于膜聚类算法的风机振动故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(2): 9-13.
- ZOU Wujun, TIAN Tao, PU Jiarong, et al. Fault diagnosis of fan vibration based on membrane clustering algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(2): 9-13.

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2019-12-18

作者简介:

胡 健(1976—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子与分布式电源并网技术、电力市场; E-mail: hujian@sdut.edu.cn

秦玉杰(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源接入对配电网的影响及对策、电力市场。E-mail: qinyvjie1994@163.com

(编辑 姜新丽)