

基于企业生产特性的自备电厂灵活性调节评估方法

黄怡凡¹,张海静²,王 磊¹,马 磊³,周 颖⁴,鞠文杰²,王为帅²,祝令凯⁵,陈宋宋⁴

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210096;2. 国网山东省电力有限公司,济南 250000;
3. 国网新疆电力有限公司,乌鲁木齐 830000;4. 中国电力科学研究院,北京 100000;
5. 国网山东省电力有限公司 电力科学研究院,济南 250000)

Flexibility adjustment evaluation method of self-supplied power plant based on enterprise production characteristics

HUANG Yifan¹, ZHANG Haijing², WANG Lei¹, MA Lei³, ZHOU Ying⁴, JU Wenjie⁵,

WANG Weishuai², ZHU Lingkai⁵, CHEN Songsong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;2. State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China;3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China;5. Electric Power Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China)

摘要:为促进自备电厂参与电网互动,提出一种基于企业生产特性的自备电厂灵活性调节评估方法。根据企业生产流程中各环节不同的用电情况构建表征电力流关系的生产特性矩阵,在此基础上分析自备电厂用电系统的灵活性。将自备电厂发电和用电系统等效为一个整体,提出分钟级和小时级两类灵活性评估指标,并以企业用电成本最低为目标,求解最优机组出力和负荷安排,从而对自备电厂灵活性调节能力进行评估。结果表明,该方法给出了自备电厂调节能力的量化评估结果,为推进自备电厂及其所属企业参与电网互动提供参考,并促进新能源消纳。

关键词:自备电厂;评估方法;灵活性调节;生产特性;新能源消纳

Abstract: In order to promote the self-supplied power plant to participate in the interaction of power grid, a flexible adjustment evaluation method based on the production characteristics of enterprises is proposed. According to the different power consumption of each link in the production process of the enterprise, the production characteristic matrix representing the power circulation relationship is constructed. On this basis, the flexibility of the power consumption system of the self-supplied power plant is analyzed. Equivalent to the power generation and power consumption system of the captive power plant as a whole, two kinds of flexibility evaluation indexes are put forward, including minute level and hour level. Taking the lowest power cost as the goal to solve the optimal unit output and load arrangement, the flexibility adjustment ability of the self-supplied power plant is evaluated. The results present that the method gives the quantitative evaluation results of self-supplied power plant regulation capacity, which provides reference for promoting self-supplied power plant and its affiliated enterprises to participate in grid interaction, as well as promotes new energy consumption.

Key words: self-supplied power plant; evaluation method; flexibility adjustment; production characteristic; new energy consumption

0 引言

自备电厂是指企业为满足自身用电需求建造的发电厂。自备电厂按照满足本单位生产需要的准则进行发电,自用不足时则向电网购买部分电力。与之相对的是公用电厂,即为公众提供电力的发电厂。

为更好地管理监督自备电厂,国家的相关指导意见

收稿日期:2020-07-22;修回日期:2020-11-09

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目:面向市场化供需调节的自备电厂灵活互动技术研究(SGSDDK00 YJJS1900143)

指出需正确引导和规范自备电厂的发展,促进各类型电厂共同管理,普及自备电厂的辅助服务^[1]。由于自备电厂装机容量庞大,该类电厂在新能源消纳和需求响应调峰领域存在巨大的应用潜力,作为电力系统中的灵活性资源可以有效促进社会资源的综合利用^[2]。但是,自备电厂的运行不仅与其类型、容量等有关,也与其所属企业的生产特性、生产方式等密切相关,因此,挖掘自备电厂在新形势下帮助新能源消纳、参与调峰的应用潜力时需统筹考虑两者生产运营的配合关系,提出切实可行的调节潜力评估方法^[3]。

在自备电厂调节潜力分析方面,文献[4]建立

了含有可平移负荷和自备电厂出力调节等需求响应方法的机组组合模型,并分析了自备电厂可调容量和可平移负荷大小等关键因素对于其发挥效能的影响。文献[5]针对分时电价下高耗能企业发用电响应问题,讨论了各时段之间的价格关系对高耗能企业发用电响应行为的影响,并建立了高耗能企业自发电调度和负荷转移一体化调度模型。目前的研究局限于将自备电厂发电侧和用电侧独立成两部分分别研究,而自备电厂的运行与其所属企业密切相关,因此需要考虑发用电系统的综合特性。

在调节潜力评估方法方面,文献[6]提出了用系统爬坡资源不足概率(insufficient ramping resource expectation,IRRE)来衡量用于长期规划的电力系统的灵活性,并和期望指标IRRE共同构成灵活性指标。同时,调节潜力度量可以识别系统最有可能面临灵活资源短缺的时间间隔,并且可以测量更改操作工序和添加灵活资源的相对影响。近年来国外关于调节潜力评估指标的研究逐渐成熟,但潜力评估指标的适用范围暂时局限于对电力系统的整体评价,并且只考虑调节范围会导致评价结果不够精准。文献[7]中介绍了电力系统灵活性的概念、灵活性资源的分类和灵活性资源与需求的平衡原理,以及灵活性定量评价体系,并由此提出了电力系统灵活性规划的核心及求解思路、待解决的关键难题及技术思路,为规划可再生能源能够高比例接入的未来电力系统奠定基础。文献[8]中针对新能源比例高的系统存在的功率随机波动幅度大的问题,对电力系统中的各灵活性资源做出量化评估,该方法忽略爬坡速率等因素只考虑调节的范围,通过比较调节的范围总结潜力评价结果。由此可见,不同于传统的需求响应研究理论与方法,自备电厂及其所属企业中需同时考虑发电与用电系统的运行特性,目前研究的调节潜力评估方法考虑的因素不够全面且仅单独适用于发电侧或用电侧,适用于自备电厂发用电系统的调节潜力评估理论和方法还有待研究。

因此,针对大量企业自备电厂的调节潜力未被挖掘的现状,本文将基于企业的生产特性构建自备电厂发用电系统的灵活性调节评估方法,为国家分行业分类型挖掘企业自备电厂调节潜力提供依据,有利于引导企业自备电厂科学参与电网供需互动调节。

1 自备电厂所属企业生产特性

1.1 企业生产特性矩阵

根据企业内部的电力流通关系可得企业源侧主要由电网供电和自备电厂供电2部分构成,包括电

网传统能源发电、电网新能源发电、自备电厂燃煤机组发电、自备电厂热电联产机组发电、自备电厂余热余压机组发电以及储能装置供电。企业负荷侧可根据工艺流程中各环节不同的用电情况,将一天的生产流程划分为不同的生产环节,每个环节完成不同的生产需求,且对应不同大小的用电功率。因此,可用生产特性矩阵表征源侧所提供的不同种类电力对各生产环节用电的分配情况,分配关系为

$$\begin{cases} H_1 = c_{11}E_1 + c_{12}E_2 + \dots + c_{1n}E_n \\ \vdots \\ H_m = c_{m1}E_1 + c_{m2}E_2 + \dots + c_{mn}E_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_1, H_2, \dots, H_m 分别为负荷侧的 m 个生产环节的用电功率; E_1, E_2, \dots, E_n 分别为源侧的 n 个供电方式的功率; c 为转换因子,用于表示生产环节的用电功率中不同供电方式所提供功率的占比。

由此可以得到生产特性矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

1.2 企业用电灵活性分析

电解铝、碳化硅和水泥等企业的生产方式在一定范围内均可调整,通过调整排班规划、工资补贴等方式达到负荷转移的目的^[9-10]。

在负荷转移的过程中,每一时刻的负荷同时可能向其他时刻转出负荷和接收其它时刻的转入负荷,为

$$P_t = P_t^0 + \sum_{i \in T} P_i(i, t) - \sum_{j \in T} P_i(t, j) \quad (3)$$

式中: P_t 为 t 时刻进行负荷转移操作后的负荷量; P_t^0 为 t 时刻未进行负荷转移前的负荷初始量; $P_i(t, j)$ 为从 t 时刻转入 j 时刻的负荷转移量; $P_i(i, t)$ 为从 i 时刻转入 t 时刻的负荷转移量; T 为调度周期。

假设生产特性矩阵中共有 m 个生产环节,新能源供电对应生产特性矩阵中的第 l 列元素,新能源供电和生产环节 s 之间的转换因子为 c_{sl} ,其中 $s = 1, 2, \dots, m$ 。为促进新能源消纳,负荷调节时按照各环节新能源用电占比大小安排负荷调节顺序,优先调节新能源用电占比大的生产环节,即 $\max_{s \in m} c_{sl}$ 对应的生产环节。其中,同一时刻负荷转出总量为该时刻各生产环节转出负荷总和,为

$$P_t - P_t^0 = \sum_s^m \Delta p_s \quad (4)$$

式中: Δp_s 为生产环节 s 的负荷变化量。

2 自备电厂发用电系统灵活性调节评估模型

2.1 灵活性调节评估指标

研究自备电厂发用电资源的灵活性调节能力,

需将发电侧与用电侧等效成一个等效负荷,以一个整体对对外响应。在自备电厂发用电系统中,技术能力和经济能力共同构成灵活性调节能力,技术能力需考虑机组出力约束和爬坡速率等,经济能力需考虑发电成本、碳排放成本和购电成本等。针对不同的应用场景,分别设置用于评价分钟级灵活性的评估指标和小时级灵活性的评估指标,分钟级指标包括可调节容量的调节速率、单位调节成本,小时级指标包括可调节电量。

2.1.1 可调节容量的调节速率

在评估分钟级灵活性时,将等效负荷的单位调节速率定义为自备电厂的灵活性指标,该指标主要表征系统在不同时刻不同调度时间尺度内的灵活性调节速率,计算公式为

$$r_t^{\text{rate}} = \frac{\partial R_t}{\partial t} = \frac{P_{G,t}^0 - P_{G,t} + R_{\text{user}}}{\Delta T} \quad (5)$$

$$R_t = P_{G,t}^0 - P_{G,t} + R_{\text{user}} \quad (6)$$

式中: $P_{G,t}^0$ 为调节前机组出力; $P_{G,t}$ 为调节后机组出力; R_{user} 为负荷侧调节功率; ΔT 为调度时间尺度。

2.1.2 单位调节成本

单位调节成本 ΔC_t^{cost} 可通过企业用电成本 C_u 对等效负荷 $(P_t - P_{G,t})$ 求偏导进行求解,计算公式为

$$\Delta C_t^{\text{cost}} = \frac{\partial C_u}{\partial (P_t - P_{G,t})} \quad (7)$$

式中: C_u 为企业用电成本。

2.1.3 可调节电量

可调节电量由机组可调节电量和负荷调节量组成,由此可得可调节电量 Q_t^{elec} 的计算公式,为

$$Q_t^{\text{elec}} = \sum_{t \in T} (P_{G,t}^0 - P_{G,t}) \times \Delta t + Q_{\text{user}} \quad (8)$$

式中: Δt 为时间间隔; Q_{user} 为负荷侧调节电量。

2.2 灵活性调节评估模型求解

为了计算灵活性调节评估指标,首先要建立企业用电成本模型,然后以成本最低为优化目标求解最优自备机组出力和企业负荷安排,最后将最优自备机组出力和企业负荷安排代入式(5)、式(7)、式(8)计算灵活性指标,得出评估结果。

2.2.1 目标函数

企业用电成本包括自备电厂发电成本、购电成本、负荷转移成本、电网补贴费用以及碳排放成本,为

$$\begin{aligned} \min C_u &= C_G(E_{G,t}) + C_B(P_{d,t}) + \\ &C_C(P_{G,t}, P_{d,t}) + C_L(P_t) - C_S(P_{G,t}, P_t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $C_G(E_{G,t})$ 为自备电厂发电成本; $C_B(P_{d,t})$ 为购电成本; $C_C(P_{G,t}, P_{d,t})$ 为碳排放成本; $C_L(P_t)$ 为负荷转移成本; $C_S(P_{G,t}, P_t)$ 为电网补贴费用。

(1) 自备电厂发电成本

自备电厂的发电成本包括初期投资、运行维

护、资源消耗和交叉性补贴等成本,可表示为凸二次函数,则在 T 时段内机组的发电成本为

$$C_G(P_{G,t}) = \sum_{t \in T} (a_t \times P_{G,t}^2 + b_t \times P_{G,t} + c_t) \times \Delta t \quad (10)$$

式中: a_t 、 b_t 、 c_t 为成本函数的系数。

(2) 企业购电成本

由于企业源侧主要由电网供电和自备电厂供电两部分构成,从电网购的电费用为

$$C_B(P_{d,t}) = \sum_{t \in T} P_{d,t} \times \Delta t \times c_{d,t} \quad (11)$$

式中: $c_{d,t}$ 为 t 时刻网购电的单位电价; $P_{d,t}$ 为 t 时刻网购电。

(3) 电网补贴费用

电网采用补贴的方式激励发用电系统减小对外提供的等效负荷,而企业用电成本中也随之增加一项电网补贴费用为

$$C_S(P_{G,t}, P_t) = \sum_{t \in T} (P_{G,t}^0 - P_{G,t} + P_t^0 - P_t) \times \Delta t \times c_{s,t} \quad (12)$$

(4) 碳排放成本

计及能效和环保约束,企业排放成本为

$$C_C(P_{G,t}, P_{d,t}) = \left[\sum_{t \in T} (k_{G,t} \times P_{G,t} + k_{d,t} \times P_{d,t}) \times \Delta t - M \right] \times c_{c,t} \quad (13)$$

式中: $c_{c,t}$ 为碳排放市场交易价格; M 为该类排放对应的排放配额; $k_{G,t}$ 为自备供电的电力排放因子; $k_{d,t}$ 为电网供电的电力排放因子。

(5) 负荷转移成本

负荷转移将带来人员排班、工资补贴、设备起停等变化。假设供电侧 n 个不同类型的电力来源 E_1, E_2, \dots, E_n 在总用电 E 中的占比分别为 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$,则生产环节 s 的总用电占比 $c_{s,\text{total}}$ 可表示为 $c_{s,\text{total}} = \sum_{i \in n} c_{s,i} \times \eta_i$ 。而初始用电负荷越小,对应调节同样大小的负荷带来的影响越大,此处通过生产环节的总用电占比表征用电负荷的大小。由此折合得到负荷转移成本为

$$C_L(P_t) = \sum_{t \in T} \alpha \times \left(\sum_s^m \frac{1}{c_{s,\text{total}}} \times \Delta p_s^2 \right) \times |t-j| \times \Delta t \quad (14)$$

式中: α 为折合系数; $t-j$ 表示负荷在 j 时刻和 t 时刻之间发生转移。

2.2.2 约束条件

(1) 自备机组出力

自备机组时刻 t 的出力范围为

$$\begin{aligned} P_{G,t} - \min(P_{G,t} - P_G^{\text{min}}, R_{u,t} \times \Delta T) &\leqslant \\ P_{G,t} &\leqslant P_{G,t} + \min(P_G^{\text{max}} - P_{G,t}, R_{u,t} \times \Delta T) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $R_{u,t}$ 和 $R_{d,t}$ 分别为机组上下爬坡速率。

(2) 负荷转移量约束

负荷转移过程中,负荷转出总量不能大于转出时刻的初始负荷,且不能为负,每一时刻可以既不转出负荷也不接收任何负荷,即

$$P_i(i,t) \geq 0 \quad (16)$$

$$P_i(t,j) \geq 0 \quad (17)$$

$$0 \leq \sum_{j \in T} P_i(t,j) \leq P_i^0 \quad (18)$$

(3) 功率平衡约束

t 时刻的功率平衡约束为

$$P_{d,t} + P_{G,t} = P_t \quad (19)$$

2.2.3 模型求解

利用粒子群算法求解模型,求解流程如图1所示。其中个体学习因子和社会学习因子均设置为2,粒子最大速度设置为5,惯性因子设置为0.6。终止条件为达到设定的迭代次数,此处最大迭代次数设置为800。

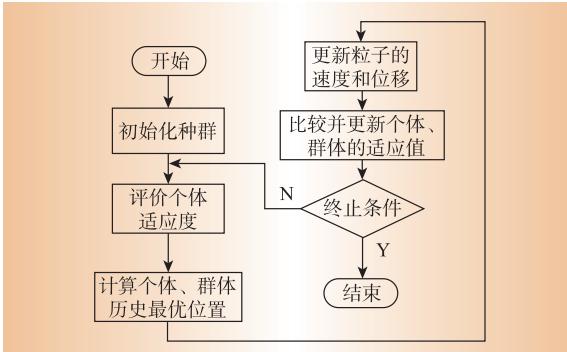


图1 粒子群算法流程图

Fig. 1 Flow chart of PSO algorithm

由此得到最优机组出力和负荷安排,把解得的自备电厂发用电情况代入式(5)、式(7)、式(8)中可计算得到调节容量的调节速率、单位调节成本和可调节电量。

3 算例分析

选取典型负荷日 2019 年 4 月 17 日山东某电解铝企业自备电厂实际运行情况进行分析。

3.1 基础数据

该企业自备电厂机组出力和负荷曲线如图2所示,风电出力如图3所示,机组的相关参数如表1所示,电网的相关参数如表2所示。

3.2 结果分析

由于灵活性指标从时间尺度上分为分钟级和小时级两类,此处按照该分类对自备电厂进行评估,并分析自备电厂类型对灵活性评估的影响。

3.2.1 灵活性评估结果

针对分钟级指标,选取 4:00 和 6:00 计算其可调节容量调节速率和单位调节成本,做出灵活性评估。

4:00 时解得负荷转移量为 19.904 0 MW,机组出力为 190.55 MW,可调节容量单位调节速率为 8.326 9 MW/min。根据单位调节用电成本模型求解

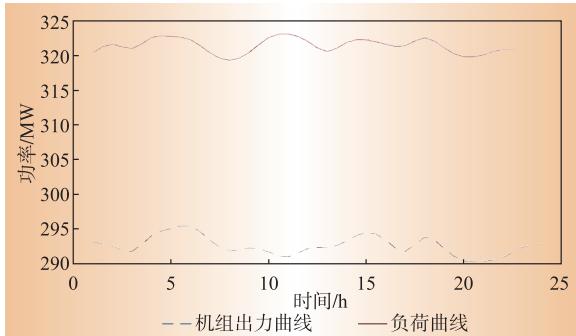


图2 4月17日机组出力和负荷曲线

Fig. 2 Unit output and load curves on April 17

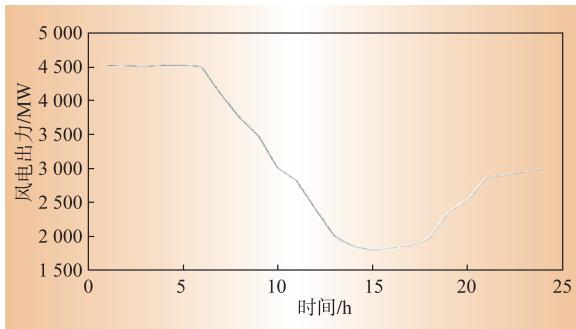


图3 4月17日风电出力曲线

Fig. 3 Wind power output curve on April 17

表1 自备电厂相关参数

Table 1 Relevant parameters of self-provided power plant

参数类型	具体数据
机组最大出力/MW	350.0
机组最小出力/MW	186.5
机组上爬坡速率/(MW·min ⁻¹)	7.0
机组下爬坡速率/(MW·min ⁻¹)	7.0
发电成本模型系数 a_i /(元·MW ⁻² ·h ⁻¹)	4.5×10^{-6}
发电成本模型系数 b_i /(元·MWh ⁻¹)	0.039 125 0
发电成本模型系数 c_i /(元·h ⁻¹)	14.061 954 5
机组发电效率/%	40.0
电力排放因子/(t·MWh ⁻¹)	0.9
负荷转移成本折合系数 α	0.001

表2 电网相关参数

Table 2 Relevant parameters of power grid

参数类型	具体数据
新能源占比/%	26.7
新能源机组发电效率/%	80.0
常规机组发电效率/%	45.0
工业峰时电价/(元·kWh ⁻¹)	1.025
工业谷时电价/(元·kWh ⁻¹)	0.425

得到单位调节用电成本为 9.34 元。

6:00 时解得负荷转移量为 20.032 1 MW,机组出力为 191.55 MW,可调节容量单位调节速率为 8.335 5 MW/min,根据单位调节用电成本模型求解得到单位调节用电成本为 9.43 元。

针对小时级指标,根据已知参数对企业用电成本模型进行求解,求得成本最低时机组在1:00—6:00内自备电厂数据调整如表3所示,调节前后的机组出力如图4所示,调节前后的等效负荷如图5所示。

表3 1:00—6:00自备电厂调节能力
Table 3 1:00—6:00 self-provided power plant regulation capacity

时刻	负荷转移量/MW	调整后机组出力/MW	可调电量/MWh
1:00	19.80	187.85	
2:00	19.96	188.55	
3:00	19.92	186.50	
4:00	19.90	190.55	
5:00	19.81	189.00	
6:00	20.03	191.55	747.83

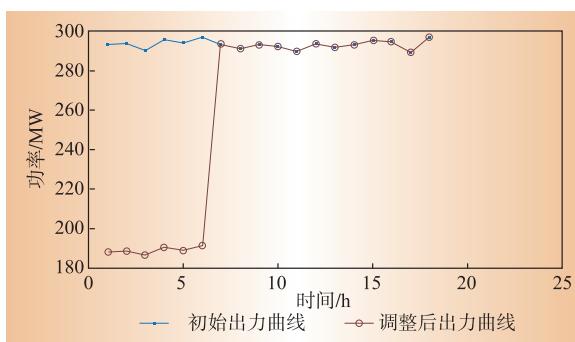


图4 1:00—6:00调节前后机组出力曲线
Fig. 4 1:00—6:00 output curves of unit before and after adjustment

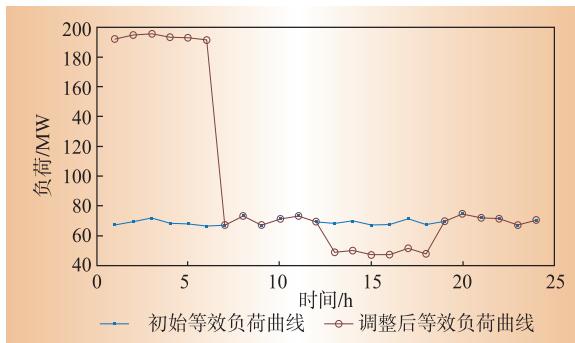


图5 1:00—6:00调节前后等效负荷曲线
Fig. 5 1:00—6:00 equivalent load curves before and after adjustment

3.2.2 自备电厂类型对灵活性评估的影响

在核算企业的用电碳排放量时,通常使用电网平均排放因子计算外购电力的用电排放情况,使用电力排放因子计算自备电厂的用电排放情况,这两部分之和为总的企业用电排放。电网平均排放因子受到燃煤电厂和新能源电厂占比的影响,而自备电厂电力排放因子主要由发电机组类型决定。由于在同一场景中外界电网新能源出力占比不变,则电网平均排放因子相同,基于此背景展开分析灵活

性评估指标随多类型自备电厂电力排放因子变化的变化趋势。

此处选取6:00的分钟级指标和1:00—6:00的小时级指标进行分析。随着自备电厂排放因子的变化,分钟级指标可调容量变化速率和单位调节成本的变化分别如图6和图7所示,小时级指标可调节电量的变化如图8所示。

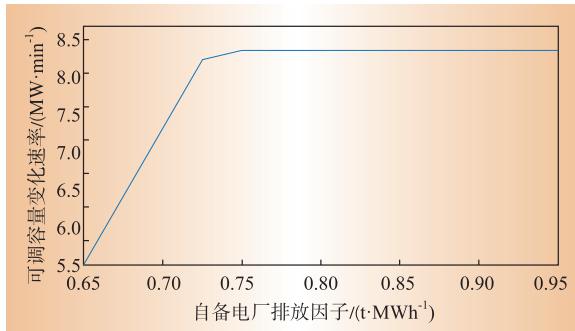


图6 可调容量变化速率随自备电厂排放因子变化曲线
Fig. 6 Change curve of adjustable capacity change rate with emission factor of self-provided power plant

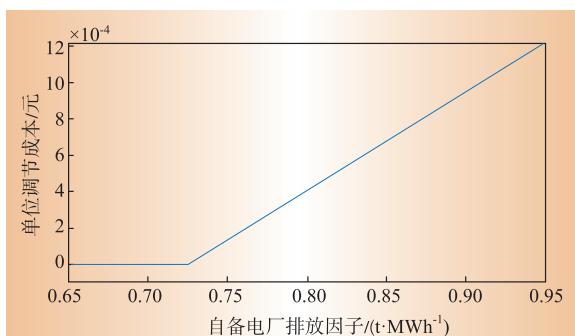


图7 单位调节成本随自备电厂排放因子变化曲线
Fig. 7 Change curve of unit adjustment cost with emission factor of self-provided power plant

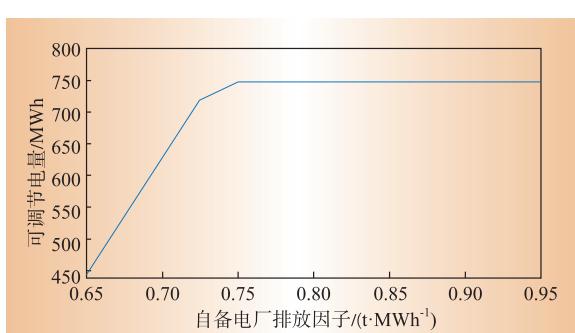


图8 可调节电量随自备电厂排放因子变化曲线
Fig. 8 Change curve of adjustable electric quantity with emission factor of self-provided power plant

由图6可知可调节容量变化速率首先随自备电厂排放因子的增大而增大,增大到0.75时该指标达到饱和值,随自备电厂排放因子的增大而不再变

化。由图7可知,单位调节成本首先随自备电厂排放因子的增大而不变,因为此时的机组出力均为企业用电成本最低的全局最优解,单位调节成本均为0,到达0.725时开始随自备电厂排放因子的增大而增大。由图8可知,可调节电量和可调节容量变化速率的变化趋势相同。

因此可得,自备电厂排放因子增大时,机组出力将随之减小从而使企业用电成本最低,当机组出力减小到技术能力所决定的最小出力时,可调节容量变化速率和可调节电量将不再随排放因子的变化而变化,此时达到这两个灵活性指标的最大值。相反地,自备电厂排放因子较小时,机组出力均能取得企业用电成本函数的全局最优解使得该状态下的单位调节成本趋近于0。当排放因子达到临界值后机组的最优出力开始受到技术能力的约束,与此同时单位调节成本随排放因子的增大而增大。

多类型自备电厂发电机组的类型不同决定其不同的排放因子,因此不同类型的自备电厂灵活性调节能力也有所不同。在不同场景下,可以按照需要选择不同类型自备电厂参与电网互动。

4 结束语

本文在考虑企业生产特性的前提下,构建了生产特性矩阵,并在此基础上提出了一种自备电厂发用电系统的灵活性调节评估方法,有效推进自备电厂及其所属企业参与电网互动,促进新能源消纳。同时,该方法验证了不同类型的自备电厂的发用电系统灵活性调节能力有所不同,可为国家分类别管理自备电厂提供参考依据。具体来说,可以根据自备电厂发电原理将其分为纯燃煤、热电联产、资源综合利用3类进行管理;也可以根据其所属企业的行业类型分为电解铝、水泥等多个类型进行管理,用本文构建的企业生产特性矩阵表征同类自备电厂及其所属企业生产特性,在自备电厂参与电网互动时依据灵活性评估指标选择调节潜力大的自备电厂优先参与。**D**

参考文献:

- [1] 翁爽.自备电厂:何以实现涅槃重生[J].中国电力企业管理,2018(31):22-24.
WENG Shuang. Captive power plant: how to realize nirvana rebirth[J]. China Power Enterprise Management, 2018 (31):22-24.
- [2] 朱莉雅.石化行业利用自备电厂实现热电联产的节能措施[J].电力需求侧管理,2012,14(5):28-29,32.
ZHU Liya. Energy saving measures of petrochemical industry using the captive power plant to achieve the cogen-

eration [J]. Power Demand Side Management, 2012,14 (5):28-29,32.

- [3] 孙宇军,李扬,王蓓蓓,等.需求响应促进可再生能源消纳的运作模式研究[J].电力需求侧管理,2013,15 (6):6-10.
SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. Study on operation mode of demand response accommodating the utilization of renewable energy [J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(6):6-10.
- [4] 王健,鲁宗相,乔颖,等.高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J].电网技术,2017,41(7):2 115-2 124.
WANG Jian, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Research on demand response mechanism of wind power local accommodation utilizing energy-intensive loads [J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2 115-2 124.
- [5] 刘晓琳,王兆杰,高峰,等.分时电价下的高耗能企业发用电响应[J].电力系统自动化,2014,38(8):41-49.
LIU Xiaolin, WANG Zhaojie, GAO Feng, et al. Response behaviors of power generation and consumption in energy intensive enterprise under time-of-use price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8):41-49.
- [6] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):922-931.
- [7] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40 (13):147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):147-158.
- [8] 李则衡,陈磊,路晓敏,等.基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J].电网技术,2017,41(7):2 187-2 194.
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis [J]. Power System Technology, 2017, 41 (7):2 187-2 194.
- [9] 刘皓明,黄海萍,高元,等.考虑有载调压变压器的电解铝稳流控制及其能效分析[J].电力需求侧管理,2013,15(3):34-37,52.
LIU Haoming, HUANG Haiping, GAO Yuan, et al. Current stabilization control strategy and energy efficiency analysis in an aluminum smelter considering OLTC [J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(3):34-37,52.
- [10] 贺辉.“十二五”期间湖南电网电力负荷特性分析及其相关建议[J].电力需求侧管理,2017,19(3):39-42.
HE Hui. Analysis on load characteristics of Hunan power grid in 12th five year plan and its suggestions [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(3):39-42.

作者简介:

黄怡凡(1997),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为电力市场和需求响应;

张海静(1980),女,山东德州人,硕士,高级工程师,主要从事电力体制改革、电力市场建设、需求侧管理、电能替代、综合能源服务工作;

王磊(1963),女,山西太原人,副教授,研究方向为信息技术在电力系统中的应用、电力市场需求响应和电力系统优化调度。

(责任编辑 曹阳)