

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0006.007

考虑供给与负荷转移的虚拟电厂调度策略

朱以晨, 李军祥, 莫非

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要:虚拟电厂是一种通过先进信息通信技术和软件系统,将分布式发电机组、储能系统、可控负荷、电动汽车等分布式设备聚合优化并协调参与电力市场和电网运行的特殊电厂。针对现阶段可再生能源产业的风力、光伏并网发电和优先消纳困难等问题,基于虚拟电厂强通信、高聚合的特性,提出了一种考虑供给与负荷转移的虚拟电厂调度策略,以虚拟电厂整体利润最优为目标函数,从供给侧与需求侧同时强化虚拟电厂的调度弹性。其中供给转移通过储能设备实现,考虑蓄电池储能系统与氢能存储系统同时参与调度,发挥各自储能优势,负荷转移通过柔性负荷实现,并将所有柔性负荷分为短期、中期、长期 3 类来反映实际情况,以柔性负荷的负荷量与最晚调度时间为类别划分依据。实验结果表明:储能设备及柔性负荷参与虚拟电厂调度,显著提高了虚拟电厂运行的强健性,增强了新能源的消纳水平,实现了“削峰填谷”的效果,并且在经济性上有着良好的表现。

关键词:虚拟电厂;可再生能源;储能设备;柔性负荷;能源消纳

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)06-0056-09

0 引言

近年来我国可再生能源取得飞跃式发展,光伏、风电、水电装机均稳居世界第一,成长为世界节能和利用可再生能源第一大国。现阶段可再生能源产业发展瓶颈主要表现为风力、光伏并网发电和优先消纳困难,可再生能源消纳市场培育不足,“弃风弃光”现象严重,造成大量能源浪费^[1]。在这样的电网背景下,诸多学者将虚拟电厂定义为解决可再生能源消纳问题的具体途径。虚拟电厂(VPP)^[2]由各种市场实体组成,包括分布式发电机组、虚拟电厂

运营商、电网运营商和柔性负荷^[3]等,在规模效益驱动下,利用通信、控制、计算机等技术将独立分布式能源聚合统一参与电力市场,利用电力市场加强电力系统供应侧与需求侧之间的协调互动,加强新能源与系统间的相互容纳能力。

当前国内外对虚拟电厂有着较广泛的研究。在负荷预测方面,龙勇等^[4]考虑节假日等因素会影响月度负荷预测的准确性,提出基于季节调整方法和 BP 神经网络的月度电力负荷组合预测模型;董雷等^[5]为解决虚拟电厂隐私问题提出了一种基于元模型的优化算法,在保护隐私的同时,避免对下层博弈模型的繁复计算。伴随着分布式电源及新能源的

收稿日期:2021-11-07; **修回日期:**2021-12-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(71572113, 71871144); 国家自然科学基金匹配项目(1P16303003, 2020KJFZ034, 2019KJFZ048, 2018KJFZ035); 上海理工大学大学生创新训练计划项目(XJ2021150, XJ2021160, XJ2021165, XJ2021191, XJ2021206).

作者简介:朱以晨(1996—),男,上海青浦人,硕士研究生,从事智能电网研究.

通讯作者:李军祥(1971—),男,山东乐陵人,教授,博士/博士后,从事管理科学与工程研究. Email:lijx@usst.edu.cn.

不断发展,将会有越来越多的虚拟电厂参与综合能源系统中;范宏等^[6]建立了一个考虑系统网损的多区域虚拟电厂综合能源日前日内调度模型,为多虚拟电厂之间协调运行提供了模型依据;陶莉^[7]等提出以极小化峰谷差为目标建立实时定价优化模型,对虚拟电厂的求解和价格制定具有指导意义。虚拟电厂能够在电力市场交易过程中起到积极作用,但是由于分布式能源,与虚拟电厂之间较难形成信息对称的双向选择,容易造成电力交易过程中信息成本增加,提升交易成本。为解决这个问题,何奇琳等^[8-9]讨论了区块链技术在虚拟电厂中的应用前景,分析了区块链技术与虚拟电厂融合的互补性与可行性。综上所述,诸多学者研究并分析了虚拟电厂的技术实现与框架结构,有效推动了虚拟电厂从理论走向现实,但是虚拟电厂通信与聚合上的优势体现得不够充分,仍有值得研究的空间。在这样的研究背景下,本文基于虚拟电厂强通信、高聚合的特性,通过实现供给与负荷的转移来提高虚拟电厂整体的经济性与能源的消纳度。

本文研究的虚拟电厂类型为商业型虚拟电厂,其内部成员除风力发电机组、光伏发电机组、火力发电机组外,还考虑储能设备及柔性负荷的参与来实现供给与负荷的转移。在储能设备方面,考虑蓄电池储能系统与氢能存储系统同时参与调度,体现储能设备的多样性;在柔性负荷方面,则将负荷分为短期、中期、长期3类以体现如智能洗衣机、新能源汽车等智能用电负荷。期望通过供给与负荷的转移,实现新能源接入下的能源高效消纳,从供给侧及需求侧达到“削峰填谷”的作用,减少“弃风弃光”现象,加速并实现传统能源向可再生能源的高速转型,充分体现虚拟电厂通信与聚合的核心优势。

1 模型假设

1.1 虚拟电厂运行模式

本文构建的虚拟电厂属于商业型虚拟电厂,不考虑虚拟电厂对配电网的影响。假设虚拟电厂联盟由风力发电机组、太阳能发电机组、火力发电机组、储能设备以及柔性负荷组成,且各成员都保持个体理性, T 表示一个调度周期内的总时段数。

1.2 新能源发电利润

风电机组与光电机组的收入主要包括两个部分,分别是售电收入和国家可再生能源电价附加资金的补贴。针对可再生能源,国内实行的是固定的标杆上网电价,并通过行政手段提供固定的单位补贴,现有较多针对实时电价的研究^[10-11],广泛认为实时电价能够显著提高社会总效用,有应用于虚拟电厂的价值,本文暂不对其深入研究。风电与光电机组的成本体现在生产变动成本和运行维护,因此 T 周期 t 时段内风电与光电机组的利润函数可分别表示为

$$E_{i,t}^w = p_t^w q_{i,t}^w + \mu_i^w q_{i,t}^w - c_i^{v,w} q_{i,t}^w - c_i^{f,w} \quad (1)$$

$$E_{j,t}^s = p_t^s q_{j,t}^s + \mu_j^s q_{j,t}^s - c_i^{v,s} q_{j,t}^s - c_i^{f,s} \quad (2)$$

其中, p_t^w 和 p_t^s 分别表示 t 时段内的风电、光电销售电价; $q_{i,t}^w$ 和 $q_{j,t}^s$ 分别表示 t 时段内第 i 组风电机组和第 j 组光电机组参与调度的实际有效电量; μ_i^w 和 μ_j^s 分别表示 t 时段内国家可再生能源电价附加资金对第 i 组风电机组和第 j 组光电机组的单位补贴; $c_i^{v,w}$ 和 $c_i^{f,w}$ 分别表示 t 时段内风电机组的单位可变成本与固定成本; $c_i^{v,s}$ 和 $c_i^{f,s}$ 表示 t 时段内光电机组的单位可变成本与固定成本。

1.3 传统发电利润

传统发电主要指火力发电,其收益为售电收入,成本则由燃料费用、运维费用和停电补偿组成,其中燃料费用较复杂,使用二次函数^[12]来表达 t 时段内火电机组 k 发电总成本:

$$c_{k,t}^f = a_k (q_{k,t}^f)^2 + b_k q_{k,t}^f + c_k$$

其中, a_k, b_k, c_k 分别为对应系数,由机组运行历史数据拟合得到, $q_{k,t}^f$ 为 t 时段内第 k 组火电机组参与调度的实际有效电量。

综上所述, t 时段火电机组 k 的利润函数表示为

$$E_{k,t}^f = p_t^f q_{k,t}^f - c_{k,t}^f \quad (3)$$

其中, p_t^f 为 t 时段内火电上网电价。

1.4 储能设备

本文将储能设备 L 分为蓄电池 l_b 和储氢系统 l_h 。

1.4.1 蓄电池储能系统

以锂电池为主的蓄电池储能技术以其高技术成熟度,被广泛应用于各个领域。锂电池的充放电特征^[13]由容量、功率、充电效率、放电效率、自放电率和荷电状态进行描述,分为充电和放电两种状态。

存储的能量通过监测一段时间内的充电和放电功率,使用以下相关性公式进行评估:

$$q_{l_b,t}^e = q_{l_b,t-1}^e + (q_{l_b,t}^{e, \text{ch}} \eta_{l_b}^{\text{ch}} - q_{l_b,t}^{e, \text{dis}} / \eta_{l_b}^{\text{dis}}) \quad (4)$$

其中, $q_{l_b,t}^e$ 和 $q_{l_b,t-1}^e$ 表示蓄电池 l_b 在 t 时段和 $t-1$ 时段的电量状态, $q_{l_b,t}^{e, \text{ch}}$ 和 $q_{l_b,t}^{e, \text{dis}}$ 表示蓄电池 l_b 在 t 时段的电力储存和释放量, $\eta_{l_b}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{l_b}^{\text{dis}}$ 分别表示蓄电池 l_b 的充、放电效率。

1.4.2 氢能存储系统

以锂电池为主的蓄电池由于其高成本、低能量存储密度和有限的生命周期,并不是最经济的大规模能量存储技术。氢能存储系统由于其长期存储、灵活移动等优势,可以作为长期能量存储的替代方案^[14]。

氢能存储系统由氢生成阶段、氢存储阶段和电能再生阶段三部分构成^[15]。在氢生成阶段,由风电、光伏发电设备产生的过剩功率通过氢发生器转换成氢气;在氢存储阶段,氢气被存储在高压罐体设备中;当虚拟电厂电量不足时,再通过氢气燃气轮机或者氢燃料电池将氢气转化为电能输入虚拟电厂。氢能存储系统存储的能量主要通过高压罐体内部压强评估:

$$P_{l_h,t}^e = \frac{P_{l_h,t-1}^e V_{l_h} / (R \Gamma_t) + (q_{l_h,t}^{e, \text{ch}} \eta_{l_h}^{\text{ch}} - q_{l_h,t}^{e, \text{dis}} / \eta_{l_h}^{\text{dis}})}{V_{l_h}} R \Gamma_t \quad (5)$$

其中, $P_{l_h,t}^e$ 和 $P_{l_h,t-1}^e$ 分别表示氢能存储系统 l_h 在 t 时段和 $t-1$ 时段的罐体压强, V_{l_h} 表示氢能存储系统 l_h 的高压罐体设备容积, R 表示通用气体常量, Γ_t 表示 t 时段罐体内部温度, $q_{l_h,t}^{e, \text{ch}}$ 和 $q_{l_h,t}^{e, \text{dis}}$ 表示氢能存储系统 l_h 在 t 时段的电力储存和释放量, $\eta_{l_h}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{l_h}^{\text{dis}}$ 分别表示氢能存储系统 l_h 的氢发生器转化效率和氢气产电效率。

虚拟电厂中的储能设备可以认为是虚拟电厂的成员,在辅助虚拟电厂运行的同时获得相应的收益。因此蓄电池储能系统与氢能存储系统的收益表示为

$$E_{l_b,t}^e = \mu_{l_b,t}^e q_{l_b,t}^{e, \text{dis}} - c_{l_b,t}^e \quad (6)$$

$$E_{l_h,t}^e = \mu_{l_h,t}^e q_{l_h,t}^{e, \text{dis}} - c_{l_h,t}^e \quad (7)$$

其中, $\mu_{l_b,t}^e$ 和 $\mu_{l_h,t}^e$ 表示蓄电池储能系统 l_b 和氢能存储系统 l_h 在 t 时段释出电量参与调度时的调度补偿系数, $c_{l_b,t}^e$ 和 $c_{l_h,t}^e$ 表示蓄电池储能系统 l_b 和氢能存储系统 l_h 在 t 时段的固定成本,主要包括运维成本、

折旧成本等。

储能设备的规模成本与虚拟电厂的规模有直接关系,当储能设备规模远大于虚拟电厂的适配水平时,其折旧成本将远大于参与虚拟电厂调度所获得的收益,由于储能设备的建设规划早于调度,因此假设储能设备的规模是理性且适配虚拟电厂规模的。

1.5 柔性负荷

柔性负荷指能够主动参与到虚拟电厂调度,并不要求在固定的时段完成需求的弹性负荷,例如家用电器中的智能洗衣机、电动汽车等。由于不同的柔性负荷拥有不同的属性,其弹性程度、负荷需求量、负荷连续性等各不相同,因此将柔性负荷 M 分为短期柔性负荷 m_α 、中期柔性负荷 m_β 、长期柔性负荷 m_γ 三类。

短期柔性负荷的主要特征是电量需求较小,可供调度范围相对较小,拥有明确的最晚需求时间。例如智能自动洗碗机,可以在饭后的数个时段内完成,同时消耗的电量较少,勿需分多个时段进行。

中期柔性负荷的调度弹性介于短期与长期柔性负荷之间,可以概括为需要在一个调度周期内完成,并且可以分多个时段完成,例如新能源汽车。

长期柔性负荷指对整个调度周期来说灵活度最高的柔性负荷,并不一定需要在当前调度周期完成需求,拥有跨越多个连续调度周期的特性。例如当明确新能源汽车近期不会使用时,将从中期柔性负荷转化为长期柔性负荷参与当前周期的调度,并在最晚调度时间所在周期重新转化为中期柔性负荷。

柔性负荷的收益为响应虚拟电厂调度的调峰补偿收益,其实际意义是在 t 时段,根据柔性负荷剩余待参与调峰电量,获得基于调峰补偿系数的收益,引入辅助变量 $\hat{q}_{m,t}^l$ 表示柔性负荷 m 在 t 时段剩余待参与调峰电量,用公式表示为

$$\hat{q}_{m,t}^l = q_m^{l, \text{max}} - \sum_{i=1}^{t-1} q_{m,i}^l, \forall t \in [1, T+1]$$

其中, $q_m^{l, \text{max}}$ 表示柔性负荷 m 在整个调度周期的总弹性负荷电量, $q_{m,i}^l$ 表示柔性负荷 m 在 i 时段的实际调度负荷量,当 t 取值为 $T+1$ 时, $\hat{q}_{m,T+1}^l$ 表示整个调度周期结束后的剩余待参与调峰电量。

对于虚拟电厂来说,该柔性负荷收益等效于调峰补偿成本。用公式表示为

$$E_{m,t}^l = \mu_{m,t}^l \hat{q}_{m,t}^l \quad (8)$$

其中, $\mu_{m,t}^l$ 表示柔性负荷 m 在 t 时段的调峰补偿系数。

2 虚拟电厂调度模型

2.1 模型目标函数

虚拟电厂能够聚合不同区域的分布式能源,并进行动态组合,使其达到较为理想的利用率和整体效益。当各发电机组参与虚拟电厂,共同参与市场行为时,各成员之间将由非合作博弈转变为合作博弈,通过合作提高整体的总利润。这种情况下虚拟电厂的收益包括风力发电机组收益、光伏发电机组收益、火力发电机组收益、储能设备调峰收益和向大电网售卖多余电量收入,成本包含柔性负荷响应调峰调度支出和向外购电成本,公式表示为

$$f_t = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{i \in I} E_{i,t}^w + \sum_{j \in J} E_{j,t}^s + \sum_{k \in K} E_{k,t}^f + \sum_{l_b \in L} E_{l_b,t}^e + \sum_{l_b \in L} E_{l_b,t}^c - \sum_{m \in M} E_{m,t}^l + p_t^{\text{out}} q_t^{\text{out}} - p_t^{\text{in}} q_t^{\text{in}} \right)$$

其中, I, J, K, L, M 分别表示参与调度的风力发电机组、太阳能发电机组、火力发电机组、储能设备以及柔性负荷集合, p_t^{out} 和 p_t^{in} 分别表示 t 时段内虚拟电厂向大电网出售和购买电量的统一电价, q_t^{out} 和 q_t^{in} 分别表示 t 时段内虚拟电厂向大电网输出和向外购的电。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

对于整个虚拟电厂来说,每个时间段都需要保持需求和供给之间的功率平衡,约束公式表示如下:

$$\sum_{i \in I} q_{i,t}^w + \sum_{j \in J} q_{j,t}^s + \sum_{k \in K} q_{k,t}^f + \sum_{l_b, l_h \in L} (q_{l_b,t}^{\text{e,dis}} + q_{l_h,t}^{\text{e,dis}}) - \sum_{l_b, l_h \in L} (q_{l_b,t}^{\text{e,ch}} + q_{l_h,t}^{\text{e,ch}}) + q_t^{\text{in}} - q_t^{\text{out}} = q_t^{\text{d}} + \sum_{m \in M} q_{m,t}^l - q_t^{\text{d,unmet}}, \forall t \in [0, T] \quad (9)$$

其中, q_t^{d} 表示在 t 时段内虚拟电厂所辐射范围内的电力负荷需求量, $q_t^{\text{d,unmet}}$ 表示 t 时段内未能被满足的负荷量。

2.2.2 机组出力约束

对于风电、光电、火电发电机组来说,假定设备运行稳定,则存在输出功率约束,用公式分别表示为

$$0 \leq q_{i,t}^w \leq q_{i,t}^{w,\max}, \forall i \in I, \forall t \in [0, T] \quad (10)$$

$$0 \leq q_{j,t}^s \leq q_{j,t}^{s,\max}, \forall j \in J, \forall t \in [0, T] \quad (11)$$

$$q_{k,t}^{f,\min} \leq q_{k,t}^f \leq q_{k,t}^{f,\max}, \forall k \in K, \forall t \in [0, T] \quad (12)$$

其中, $q_{i,t}^{w,\max}, q_{j,t}^{s,\max}$ 分别表示风力发电机组和光伏发电机组在 t 时段的预测最大发电量, $q_{k,t}^{f,\min}$ 和 $q_{k,t}^{f,\max}$ 分别表示 t 时段火电机组设备的最小调峰功率和额定功率。

2.2.3 火力发电机组爬坡约束

火电机组存在爬坡功率限制:

$$-r_k^{f,\text{down}} \leq q_{k,t}^f - q_{k,t-1}^f \leq r_k^{f,\text{up}}, \forall k \in K \quad (13)$$

其中, $r_k^{f,\text{up}}$ 和 $r_k^{f,\text{down}}$ 分别表示火电机组 k 的最大爬坡功率和最大溜坡功率。

2.2.4 储能设备约束

储能设备约束分为蓄电池储能系统和氢能存储系统。蓄电池储能系统约束包括常规容量约束、充放电状态约束、充放电速率约束,用下列约束来表示:

$$0 \leq q_{l_b,t}^{\text{e,ch}} \leq u_{l_b,t}^{\text{e,ch}} q_{l_b,t}^{\text{e,chmax}}, \forall l_b \in L, \forall t \in [0, T] \quad (14)$$

$$0 \leq q_{l_b,t}^{\text{e,dis}} \leq u_{l_b,t}^{\text{e,dis}} q_{l_b,t}^{\text{e,dismax}}, \forall l_b \in L, \forall t \in [0, T] \quad (15)$$

$$u_{l_b,t}^{\text{e,ch}} + u_{l_b,t}^{\text{e,dis}} = 0 \text{ 或 } 1, \forall l_b \in L, \forall t \in [0, T] \quad (16)$$

$$q_{l_b,t}^{\text{e,min}} \leq q_{l_b,t}^{\text{e}} \leq q_{l_b,t}^{\text{e,max}}, \forall l_b \in L, \forall t \in [0, T] \quad (17)$$

其中, $u_{l_b,t}^{\text{e,ch}}$ 和 $u_{l_b,t}^{\text{e,dis}}$ 表示蓄电池 l_b 在 t 时段的充放电状态,变量类型为布尔变量, $q_{l_b,t}^{\text{e,chmax}}$ 和 $q_{l_b,t}^{\text{e,dismax}}$ 表示蓄电池单位时段最大充放电量, $q_{l_b,t}^{\text{e,min}}$ 和 $q_{l_b,t}^{\text{e,max}}$ 表示蓄电池 l_b 的容量限制,蓄电池的电量状态 $q_{l_b,t}^{\text{e}}$ 由式(4)确定。

氢能存储系统约束包括常规容量约束,罐体内部压强需要在安全阈值内以保证设备的安全运行,同时考虑到罐体内部温度对内部压强的影响,容量约束为

$$P_{l_h,t}^{\text{e,min}}(\Gamma_{\min}) \leq P_{l_h,t}^{\text{e}}(\Gamma_t) \leq P_{l_h,t}^{\text{e,max}}(\Gamma_{\max}) \\ \forall l_h \in L, \forall t \in [0, T], \forall \Gamma_t \in [\Gamma_{\min}, \Gamma_{\max}] \quad (18)$$

其中, $P_{l_h,t}^{\text{e,min}}(\Gamma_{\min})$ 和 $P_{l_h,t}^{\text{e,max}}(\Gamma_{\max})$ 分别表示在罐体温度最大和温度最小情况下,氢能存储系统 l_h 的罐体压强上下限,通过设备的安全阈值获得, $P_{l_h,t}^{\text{e}}(\Gamma_t)$ 表示在温度 Γ_t 下氢能存储系统的压强状态,由式(5)确定。

氢能存储系统运行状态的常规约束为

$$0 \leq q_{l_h,t}^{\text{e,ch}} \leq u_{l_h,t}^{\text{e,ch}} q_{l_h,t}^{\text{e,chmax}}, \forall l_h \in L, \forall t \in [0, T] \quad (19)$$

$$0 \leq q_{l_h,t}^{\text{e,dis}} \leq u_{l_h,t}^{\text{e,dis}} q_{l_h,t}^{\text{e,dismax}}, \forall l_h \in L, \forall t \in [0, T] \quad (20)$$

$$u_{l_h,t}^{\text{e,ch}} + u_{l_h,t}^{\text{e,dis}} = 0 \text{ 或 } 1, \forall l_h \in L, \forall t \in [0, T] \quad (21)$$

其中, $u_{l_h,t}^{e, \text{ch}}$ 和 $u_{l_h,t}^{e, \text{dis}}$ 表示氢能存储系统 l_h 在 t 时段的充放电状态, 变量类型是布尔变量, $q_{l_h}^{e, \text{chmax}}$ 和 $q_{l_h}^{e, \text{dismax}}$ 表示氢能存储系统 l_h 的单位时段最大充放电电量。

2.2.5 柔性负荷约束

短期柔性负荷 m_α 与中期柔性负荷 m_β 的差异主要体现在需求电量上, 因此短期、中期柔性负荷的间断性与负荷量约束用公式表示为

$$\sum_{t=\tilde{t}_{m_\alpha}}^{\tilde{T}_{m_\alpha}} \xi_{m_\alpha,t} q_{m_\alpha,t}^l = q_{m_\alpha}^{l, \text{max}}, \forall m_\alpha \in M \quad (22)$$

$$\sum_{t=\tilde{t}_{m_\alpha}}^{\tilde{T}_{m_\alpha}} \xi_{m_\alpha,t} = 1, \forall m_\alpha \in M \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^T q_{m_\beta,t}^l = q_{m_\beta}^{l, \text{max}}, \forall m_\beta \in M \quad (24)$$

其中, \tilde{t}_{m_α} 表示短期柔性负荷 m_α 的参与调度时间, \tilde{T}_{m_α} 表示短期柔性负荷 m_α 的最晚需求时间, $\xi_{m_\alpha,t}$ 为引入的布尔辅助变量, 表示短期柔性负荷 m_α 在 t 时段是否参与实际调度, $q_{m_\alpha,t}^l$ 和 $q_{m_\beta,t}^l$ 分别表示短期柔性负荷 m_α 和中期柔性负荷 m_β 在 t 时段的实际参与调度量, $q_{m_\alpha}^{l, \text{max}}$ 和 $q_{m_\beta}^{l, \text{max}}$ 分别表示短期柔性负荷 m_α 和中期柔性负荷 m_β 在整个调度周期内的负荷需求量。

短期和中期柔性负荷的最晚调度约束为

$$\tilde{q}_{m_\alpha, T+1}^l = 0 \quad (25)$$

$$\tilde{q}_{m_\beta, T+1}^l = 0 \quad (26)$$

其中, $\tilde{q}_{m_\alpha, T+1}^l$ 和 $\tilde{q}_{m_\beta, T+1}^l$ 分别表示短期柔性负荷 m_α 和中期柔性负荷 m_β 在调度周期结束后的剩余待参与调峰电量。

长期柔性负荷的负荷需求能够跨越调度周期, 其负荷量限制约束用公式表示为

$$\sum_{t=1}^T q_{m_\gamma,t}^l \leq q_{m_\gamma}^{l, \text{max}}, \forall m_\gamma \in M \quad (27)$$

其中, $q_{m_\gamma,t}^l$ 和 $q_{m_\gamma}^{l, \text{max}}$ 分别表示长期柔性负荷 m_γ 在 t 时段的实际参与调度量和在整个调度周期内的负荷需求量。

2.3 虚拟电厂结构下利润最优模型

综上所述, 虚拟电厂结构下利润最优模型表示为

$$\max_{\substack{q_{i,t}^w, q_{j,t}^s, q_{k,t}^f, q_{l_h,t}^{e, \text{dis}}, \\ q_{l_h,t}^{e, \text{dis}}, q_{m,t}^l, q_t^{\text{out}}, q_t^{\text{in}}}} F = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{i \in I} E_{i,t}^w + \sum_{j \in J} E_{j,t}^s + \sum_{k \in K} E_{k,t}^f + \right)$$

$$\sum_{l_b \in L} E_{l_b,t}^e + \sum_{l_h \in L} E_{l_h,t}^e - \sum_{m \in M} E_{m,t}^l + p_t^{\text{out}} q_t^{\text{out}} - p_t^{\text{in}} q_t^{\text{in}} \quad \text{s.t}$$

其中, 目标函数中的 $E_{i,t}^w$ 、 $E_{j,t}^s$ 、 $E_{k,t}^f$ 、 $E_{l_b,t}^e$ 、 $E_{l_h,t}^e$ 、 $E_{m,t}^l$ 可分别由式(1)—式(3), 式(6)—式(8)表示。

上述模型属于非线性整数规划模型, 求解复杂度较高, 使用 Cplex 优化引擎能够在合理的运行时间内求解出对应的结果。通过模型的转化, 能够在结果高保真度下获得更快的求解速度, 暂不对其进行深入描述。

3 虚拟电厂收益分配仿真

3.1 仿真假设

本文仿真基于 Python 编程, 通过 DOpplex 库调用 Cplex 求解器求解。选用某区域内 10 组风力发电机组、10 组光伏发电机组、5 组火力发电机组、5 组蓄电池储能系统、5 组氢能存储系统和 10 组柔性负荷, 通过组成虚拟电厂来满足辐射范围内的负荷需求。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

参数名	值	参数名	值	参数名	值
p_t^w	0.4	p_t^f	0.55	$\mu_{l_h,t}^e$	0.2
μ_t^w	0.2	a_k	0.001	$c_{l_h,t}^e$	10
$c_t^{v,w}$	0.1	b_k	0.3	$\eta_{l_h}^{\text{ch}}$	0.8
$c_t^{f,w}$	10	c_k	10	$\eta_{l_h}^{\text{dis}}$	0.8
p_t^s	0.55	$\mu_{l_b,t}^e$	0.2	p_t^{out}	0.2
μ_t^s	0.2	$c_{l_b,t}^e$	10	p_t^{in}	1.1
$c_t^{v,s}$	0.1	$\eta_{l_b}^{\text{ch}}$	0.9	$p_t^{\text{out,max}}$	2 000
$c_t^{f,s}$	10	$\eta_{l_b}^{\text{dis}}$	0.9	$p_t^{\text{in,max}}$	3 000

参数设置如表 1 所示, 其中部分参数在定义中应根据时间发生改变。在本文的仿真中, 设置这类参数为固定值, 目的是减少变量的数目, 将实时定价等研究因素剥离, 增强对比效果的清晰程度。

3.2 虚拟电厂调度结果分析

经过最优化模型的计算, 该虚拟电厂的调度结果如图 1、图 2 所示。图 1 表示调度供给端的结果, 包括了风电调度量、光电调度量、火电调度量、两类储能系统的电能释出量、向外购电量和未满足负荷需求量; 图 2 表示调度需求端的结果, 包括常规负荷需求、柔性负荷、两类储能设备的充电量以及虚拟电厂向外售电量。比较图 1 和图 2 可以发现, 供给与需求达成了平衡, 即结果符合功率平衡约束。图 1

中:“”表示风电;“”表示光伏;“”表示火电;“”表示蓄电池释出电量;“”表示氢能释出电量;“”表示虚拟电厂向外购电;“”表示未满足负荷需求量。图 2 中:“”表示常规负荷需求;“”表示蓄电池存储电量;“”表示氢能释出电量;“”表示虚拟电厂向外购电;“”表示未满足负荷需求量。

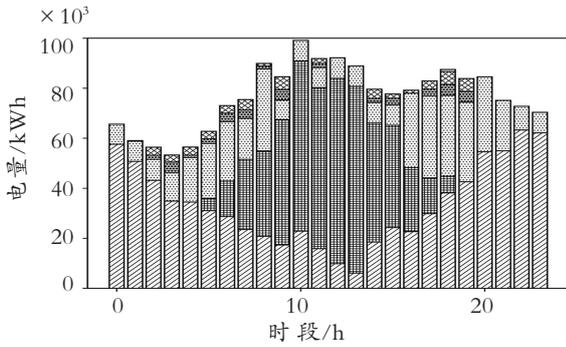


图 1 虚拟电厂电能实际供给情况

Fig. 1 Actual power supply of VPP

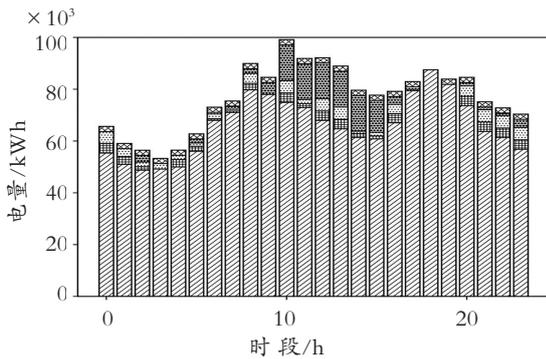


图 2 虚拟电厂电能实际需求情况

Fig. 2 Actual power demand of VPP

由于总负荷需求存在变化,部分时段会出现电能供给量大于负荷的情况,此时各发电机组无法达到满功率,图 1 展示了各发电机组的实际调度量。在时段 0 到时段 8 左右,负荷主要依靠风电机组和火电机组满足,其中火电机组大部分时段处于深度调峰状态,功率较低,起到风电机组的补充作用;在时段 8 到时段 16 左右,光伏发电机组处于活跃状态,满足了这些时段的负荷需求,从风电机组与火电机组的实际调度电量来看,光伏发电机组供给远大于需求;时段 16 到时段 24 也主要依靠风电机组和火电机组,不同的是,这些时段中火电机组的贡献更加突出。通过各发电机组实际调度情况可以得出进一步的发展方向:通过增设储能设备,将午时段过高的电量供给向前后时段转移,或更充分开发柔性负

荷,将负荷向午时段靠拢,减少弃风弃光功率,并且由于火电机组普遍处于深度调峰状态,可以适当减少火电机组规模,提高新能源比例。

图 3 表示蓄电池储能系统与氢能存储系统内部储存的能量状态,由于规模以及物理属性的不同,各储能设备有着不同的充放电速率限制。储能设备的作用是将电量从供给富裕时段向需求密集时段转移,在图 3 中,储能设备于时段 4 到时段 10 和时段 17 到时段 20 内处于电能释出状态,即在时段发电机组供应的能量不足以满足负荷需求,这恰好与图 1 中火电机组的活跃期相对应。从这个角度上来说,储能设备与火电机组都担负着新能源机组供应的补充与调节作用,体现了“削峰填谷”的功能。

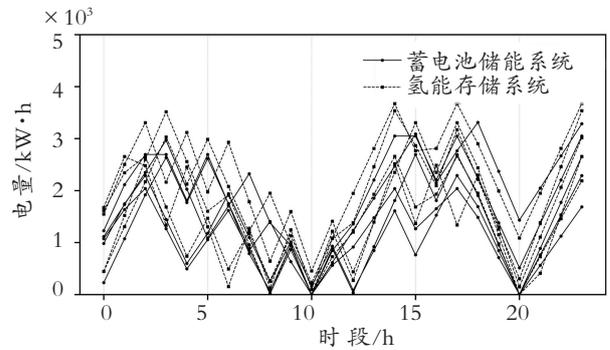


图 3 储能设备电量状态

Fig. 3 Power state of energy storage equipment

柔性负荷的作用是转移负荷峰值,以此减少未满足负荷量与弃风弃光量。图 4 表示柔性负荷的调度情况,其中柔性负荷主要集中在时段 10 到时段 15 左右,结合对供给情况的分析可以发现,这些时段为供给富裕时段,通过负荷需求的转移,减少了供给富裕时段的可再生能源浪费,使新能源消纳比例进一步提高。

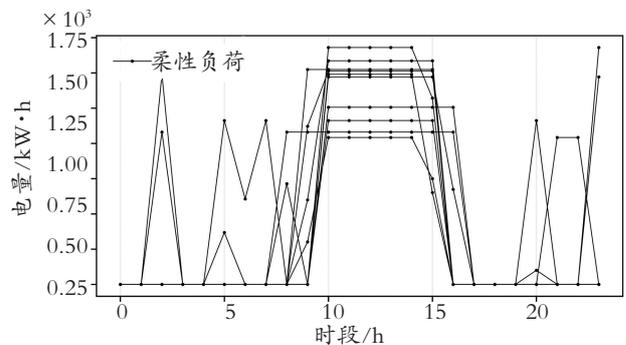


图 4 柔性负荷调度情况

Fig. 4 Flexible load dispatch

3.3 储能设备和柔性负荷效果比较分析

为了更加直观地展现储能设备和柔性负荷在虚拟电厂调度中的作用,建立了在有无储能设备与柔性负荷参与调度而其他参数保持不变情况下的仿真计算对照组 4 组,仿真结果如表 2 所示。

在各发电机组、负荷需求等不变的情况下,调整

储能设备与与柔性负荷的数量。从风电机组、光伏发电机组实际调度电量来看,储能设备与柔性负荷的参与都能够显著提高可再生能源的消纳比例,弃风弃光量最高从 183 454 kW·h 降低至 58 581 kW·h,极大地增强了可再生能源的消纳能力。

表 2 柔性负荷与储能设备影响变化

Table 2 Results of with or without flexible load and energy storage equipment

观察量名	单位	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
柔性负荷数	组	10	0	10	0
储能设备数	组	10	10	0	0
风电实际调度总量	kW·h	791 074	757 018	721 351	702 412
光伏实际调度总量	kW·h	579 351	566 768	571 208	543 140
火电实际调度总量	kW·h	363 668	363 339	360 620	360 620
弃风弃光量	kW·h	58 581	105 219	136 447	183 454
储能设备充电量	kW·h	123 375	122 862	0	0
储能设备释出量	kW·h	60 298	59 748	0	0
柔性负荷量	kW·h	47 007	0	47 007	0
VPP 向外购电量	kW·h	690	690	6 000	6 000
VPP 向外售电量	kW·h	44 084	44 084	42 916	42 916
未满足负荷量	kW·h	0	0	11 364	11 364
VPP 总收益	CNY	817 983	745 946	662 388	587 667

从 VPP 向外购电量的角度看,储能设备的参与使向外购电量从 6 000 kW·h 减少至 690 kW·h,有效减少了高额外购电量的成本支出,通过储能设备将电能从供给富裕时段转至需求密集时段释出,显著减少了需求高峰时段对外购买电能的依赖并使整个调度周期内的未满足负荷量从 11 364 kW·h 降低到了 0。

对于 VPP 总收益,储能设备与需求响应负荷都表现出了极大的贡献,柔性负荷的参与使收益提高了 12.7%;储能设备的参与使收益提高了 26.9%;而当两者都参与时,收益提高了 39.2%。这些收益的提升,本质上是通过可再生能源更高比例消纳获得。

综上所述,储能设备与柔性负荷的参与,能够明显降低虚拟电厂对外部的依赖程度,强化能源消纳能力,同时向外购售电能的减少也意味着虚拟电厂整体成本有所降低,提高了其整体的收益。

3.4 求解速率分析

虚拟电厂的作用是聚合分布式能源、储能设备、柔性负荷等符合规范的分布式设备,可以预想接入

虚拟电厂的成员数量会非常庞大,因此对调度模型求解速度会有有一定的要求。图 5 表示 VPP 成员规模与求解时间的关系曲线,当风电机组、光伏发电机组、火电机组、柔性负荷接入数量达到 10 000 时,在个人电脑上仍然能够在 10 s 内求解最优调度结果,且求解时间未出现爆炸性增长。而储能设备的接入数量对求解速度有较大影响,可以看到当储能设备接入数量为 90 个时,求解时间已经达到了 15 s 左右,但也未出现指数性增长,因此可以初步定义模型求解的时间复杂度为 $O(n)$,且运行时间主要基于储能设备数量。

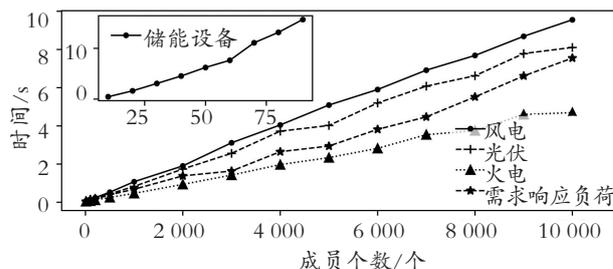


图 5 VPP 成员规模与求解时间关系
Fig. 5 Relationship between VPP member size and solution time

4 结束语

针对可再生能源的接入与消纳问题,基于虚拟电厂强通信、高聚合特性,提出了一种考虑供给与负荷转移的虚拟电厂调度策略;从供给侧与需求侧同时强化虚拟电厂的调度弹性,其中供给转移通过储能设备实现,考虑蓄电池储能系统与氢能存储系统同时参与调度,发挥各自储能优势,负荷转移通过柔性负荷实现,并将所有柔性负荷分为短期、中期、长期三类以反映实际情况。实验结果表明:储能设备及柔性负荷参与虚拟电厂调度,能够显著提高虚拟电厂运行的强健性,增强新能源的消纳水平,实现“削峰填谷”的效果,并且在经济性上有着良好的表现。本文通过储能设备及柔性负荷实现供给与负荷的转移,伴随着虚拟电厂的发展,将面临各种复杂分布式设备的接入,因此急需找到一种虚拟电厂适应复杂设备的新范式。

参考文献 (References):

- [1] 王云珠. 我国可再生能源消纳制约因素分析及解决对策[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(2): 4—11.
WANG Yun-zhu. Analysis of restrictive factors on renewable energy consumption in China and countermeasures[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(2): 4—11.
- [2] 许福鹿, 周任军, 曹俊波, 等. 多种市场下虚拟电厂电-热-气协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 35—42.
XU Fu-lu, ZHOU Ren-jun, CAO Jun-bo, et al. Coordinated optimal dispatching of power-heat-gas for virtual power plant participating in multiple markets [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 35—42.
- [3] 张莉, 高岩, 朱红波, 等. 考虑用电量不确定性的智能电网实时定价策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3622—3631.
ZHANG Li, GAO Yan, ZHU Hong-bo, et al. Real-time pricing strategy based on uncertainty of power consumption in smart grid [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3622—3631.
- [4] 龙勇, 苏振宇, 汪於. 基于季节调整和BP神经网络的月度负荷预测[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(4): 1052—1060.
LONG Yong, SU Zhen-yu, WANG Yu. Monthly load forecasting model based on seasonal adjustment and BP neural network[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2018, 38(4): 1052—1060.
- [5] 董雷, 涂淑琴, 李焱, 等. 基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 973—983.
DONG Lei, TU Shu-qin, LI Ye, et al. A stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 973—983.
- [6] 范宏, 陆骁霄. 基于HSS算法的多区域虚拟电厂综合能源调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 124—130.
FAN Hong, LU Xiao-xiao. Integrated energy scheduling of multi-regional virtual power plants based on HSS algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1): 124—130.
- [7] 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 Hong-bo. 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.
- [8] 何奇琳, 艾芊. 区块链技术在虚拟电厂中的应用前景[J]. 电器与能效管理技术, 2017(3): 14—18.
HE Qi-lin, AI Qian. Application prospect of block chain technology in virtual power plant[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(3): 14—18.
- [9] 邵炜晖, 许维胜, 徐志宇, 等. 基于区块链的虚拟电厂模型研究[J]. 计算机科学, 2018, 45(2): 25—31.
SHAO Wei-hui, XU Wei-sheng, XU Zhi-yu, et al. Study on virtual power plant model based on blockchain [J]. Computer Science, 2018, 45(2): 25—31.
- [10] 李军祥, 潘婷婷, 高岩. 智能电网互补能源供用电实时定价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1092—1096.
LI Jun-xiang, PAN Ting-ting, GAO Yan. Real-time pricing algorithm for supply and demand of complementary energy on smart grid [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1092—1096.
- [11] 原冠秀, 高岩, 王宏杰. 基于效用分类的智能电网实时电价算法[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(1): 29—35.
YUAN Guan-xiu, GAO Yan, WANG Hong-jie. A real-time pricing algorithm based on utility classification in a smart grid [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(1): 29—35.

- [12] 李军祥, 周继儒, 何建佳. 基于区块链的电网实时定价混合博弈研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4183—4191.
LI Jun-xiang, ZHOU Ji-ru, HE Jian-jia. Mixed game of real-time pricing based on block chain for power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4183—4191.
- [13] 李振坤, 李一骄, 张代红, 等. 储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3676—3683.
LI Zhen-kun, LI Yi-jiao, ZHANG Dai-hong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3676—3683.
- [14] SERRA F, LUCARIELLO M, PETROLLESE M, et al. Optimal integration of hydrogen-based energy storage systems in photovoltaic microgrids: a techno-economic assessment[J]. Energies, 2020, 13(16): 1—18.
- [15] YUN T, PENG S, QIAN H. A model of electro-thermal hybrid energy storage system for autonomous control capability enhancement of multi-energy microgrid [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 489—497.

Scheduling Strategy of Virtual Power Plant Considering Supply and Load Transfer

ZHU Yi-chen, LI Jun-xiang, MO Fei

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

Abstract: Virtual power plant (VPP) is a special power plant that aggregates distributed equipment such as distributed generators, energy storage systems, controllable loads and electric vehicles through advanced information and communication technology and software systems, and then participates in the operation of power market and power grid coordinately. Aiming at the difficulty of wind power and photovoltaic participating in large power grid and preferential consumption in the renewable energy industry at the present stage, a VPP scheduling strategy considering supply and load transfer is proposed based on the characteristics of strong communication and high aggregation of VPP. The optimal overall profit of the VPP is considered as the objective function, the scheduling flexibility of the VPP is strengthened from the supply side and the demand side at the same time. Supply transfer is realized through energy storage equipment, battery energy storage system and hydrogen energy storage system are considered to participate in scheduling at the same time, giving full play to their energy storage advantages. Load transfer is realized by flexible load and all flexible loads are divided into short-term, medium-term and long-term to reflect the actual situation where the classification is based on the load of flexible load and the latest dispatching time. The simulation results show that the participation of energy storage equipment and flexible load can significantly improve the robustness of VPP operation, enhance the consumption level of new energy, achieve the effect of “peak shaving and valley filling”, and have a good economic performance.

Key words: virtual power plant; renewable energy; energy storage equipment; flexible load; energy consumption

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

朱以晨,李军祥,莫非. 考虑供给与负荷转移的虚拟电厂调度策略[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(6): 56—64.

ZHU Yi-chen, LI Jun-xiang, MO Fei. Scheduling strategy of virtual power plant considering supply and load transfer[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(6): 56—64.