

考虑需求响应优先级的配电终端虚拟电厂 优化调度研究

郝俊伟, 樊艳芳

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 虚拟电厂技术提升了分布式能源消纳潜力, 填补了电网调度盲区。为引导用户参与电力调度, 在激励型需求响应购电协议基础上, 构建了包含智能家居负荷和冷热联供建筑相变储能系统的虚拟储能模型, 并量化分析各类资源可调度裕度; 以用户响应特性为指标, 采用熵权法评估各类用户负荷的动态响应性能, 设置虚拟储能参与调度的动态响应优先级; 以虚拟电厂收益最大为目标, 综合考虑资源购电成本、电热平衡等因素, 提出了集分布式电源和智慧社区激励响应负荷的终端虚拟电厂优化调度模型, 采用改进光线寻优算法对模型求解。结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 虚拟电厂; 激励型需求响应; 虚拟储能; 熵权法; 动态响应优先级

中图分类号: TK81; TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)05-0647-08

0 引言

随着泛在电力物联网的发展, 城市中分布式电源、智能家居负荷的渗透率不断提高。分布式电源自身的复杂性对于高峰负荷需求并不友好, 而作为物联网应用载体的智能家居负荷耗电量占城市总用电比重较高, 但其可调度性能并未充分发挥作用^[1]。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)技术作为推进物联网建设的重要基础之一, 在聚合分布式资源、填补电网调度盲区等方面提供了重要价值^[2]。VPP在配电终端难以深度挖掘用户侧资源的潜能, 而需求响应(Demand Response, DR)技术可以有效的将系统末端被动的用户侧资源转换为主动参与系统调控的可控资源, 为VPP合理调控用户侧资源提供了关键技术, 也为缓解尖峰负荷效应和消纳分布式电源提供了新方法。

目前, 已有诸多文献在用户侧DR展开研究。文献[3]针对智能小区的柔性可削减负荷建立实时DR调度策略来降低用户用电成本, 但只考虑了单类型负荷的响应。文献[4, 5]通过DR构建家庭能源管理系统满足负荷需求和节约能源成本, 但未考虑到供需资源互动的优化效应。文献[6, 7]构建电热耦合型的DR模型, 提升负荷响应能力

的调度潜力, 但忽略了不同负荷的响应性能的差异性。文献[8]建立了精细化DR的VPP模型, 通过挖掘用户侧资源的调度潜力提高VPP经济效益, 但并未对负荷的响应性能进行评估。上述研究侧重DR的机理分析, 忽略了对负荷调度响应优劣性能的评估和调度的优先级。系统调度不仅考虑资源协调互动, 也须设定各类资源的调度优先顺序, 从而引导社区用户的响应规范。

本文构建一种包含分布式电源和用户激励响应负荷的电热耦合型VPP调度模型。通过集约化管理将用户侧智能家居负荷和建筑相变储能系统融合为虚拟储能系统(Virtual Energy Storage System, VESS)^[9]参与VPP调控, 采用熵权法对VESS各类资源响应性能进行综合评估, 设定负荷参与调度的动态响应优先级, 规约化DR的优先响应顺序。最后采用改进光线寻优算法对模型算例进行求解。

1 配电终端虚拟电厂建模

1.1 虚拟电厂模型结构

本文构建的VPP由分布式电源和用户侧VESS资源两部分构成。分布式电源由智慧社区周边分布式风能和家庭屋顶光伏构成, VESS由社区智能家居负荷资源和冷热联供建筑相变储能

收稿日期: 2023-01-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51767023)。

通信作者: 樊艳芳(1971-), 女, 副教授, 研究方向为可再生能源并网技术。E-mail: 410849062@qq.com

系统构成,如图 1 所示。

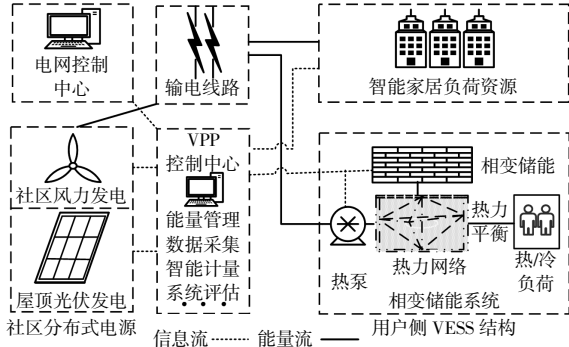


图 1 虚拟电厂资源构成

Fig.1 Resource composition of VPP

由图 1 可知,VPP 采用集中控制模式,通过智能通信系统调控内部资源完成调度指令负荷,满足需求后实施余电上网政策,未完成电量须向电网购电以满足功率平衡。风电、光伏全额参与 VPP 调控,而用户侧 VESS 是通过与用户签订激励型 DR 调度负荷资源,将高峰负荷削减或搬移至平常时段,作为协调风光的弹性可控调度资源,基本功能等同于储能,其调度成本除给予用户的补贴,还须要投入相应的调度维护成本,负荷响应性能越好,调度可靠性越高,相应的调度维护成本就越低。VPP 通过对电源侧和用户侧的协同控制,实现搬移负荷、提升多能源间协同价值,满足未来灵活多变的电网调度需求。

1.2 虚拟储能响应容量量化模型

VESS 通过与用户签订补贴协议挖掘用户负荷的可调度裕度,按照补贴机制在调度时段响应削减或转移负荷的调令,是一种能够搬移负荷资源的调度策略。VESS 的基本功效视为一种负的可存储的备用容量资源,将高峰时段的部分负荷需求量转移至平常时段,既缓解了电力供需紧张,又提升了风光资源消纳量。

1.2.1 可削减负荷

可削减负荷是指用户可削减功率的智能家居负荷,负荷的削减相当于 VESS 的放电,等同于常规储能释能,其响应模型为^[10]

$$\begin{cases} C_{CL,i}(t) = k_{CL,i} P_{CL,i}(t) \Delta T \\ k_{CL,i} = k_{CL,i}^f + \eta_1 \\ P_{CL,i}(t) = \gamma_{CL,i} P_{CL,i}^*(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_{CL,i}(t)$ 为第 i 个可削减负荷在 t 调度时段的

总调度费用; $k_{CL,i}, k_{CL,i}^f$ 分别为调度第 i 个可削减负荷的总成本单价和补贴单价; $P_{CL,i}(t), P_{CL,i}^*(t)$ 分别为第 i 个可削减负荷在 t 调度时段的实际调度量和原负荷值; η_1 为调度维护成本系数; $\gamma_{CL,i}$ 为负荷削减率; ΔT 为该调度时段负荷执行调度时长。

1.2.2 可转移负荷

可转移负荷是指用户可以提前或延迟使用的智能家居负荷,转移前后的负荷曲线差值为正,代表 VESS 的放电过程,反之则为 VESS 的充电过程,其响应模型为^[10]

$$\begin{cases} C_{SL,i}(t) = k_{SL,i} P_{SL,i}(t) U_i(t) \Delta T \\ k_{SL,i} = k_{SL,i}^f + \eta_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{SL,i} = [t_{SL,i}^{on}, t_{SL,i}^{off}] \quad (3)$$

式中: $C_{SL,i}(t)$ 为第 i 个可转移负荷在 t 调度时段的总调度费用; $k_{SL,i}, k_{SL,i}^f$ 分别为第 i 个可转移负荷的总成本单价和补贴单价; $P_{SL,i}(t)$ 为第 i 个可转移负荷在 t 时段的转移功率; η_2 为调度维护成本系数; $U_i(t)$ 为第 i 个可转移负荷在 t 时刻调度状态(0-1 变量,0 为未调度,1 为调度); $T_{SL,i}, t_{SL,i}^{on}, t_{SL,i}^{off}$ 分别为第 i 个可转移负荷可转移时间段集合、可转移时间的上、下限。

1.2.3 冷热联供建筑相变储能系统

相变储能系统是一种与建筑材料相结合的储冷/储热装置^[11],由于其良好的可控性,可作为 VESS 响应调度的最后保障策略。根据文献[11]建立建筑相变储能系统,房内简化结构如图 2 所示。

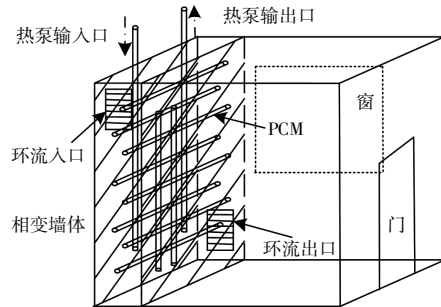


图 2 相变房间简化结构图

Fig.2 Simplified structure diagram of phase change room

热泵将多余的分布式电能转换为热能,通过制冷剂为媒介将热能存储于建筑相变材料(PCM)中,实现富余电能的储存,通过换流风扇强制室内热量流动,实现控温过程。相变储能调度时,将平

时段存储的能量在高峰时段释能,供用户热力所需,相当于该时段 VESS 的放电。由于需要预留居民基础热量需求和作为调度后备资源,其调度成本单价随着荷电状态值减少而不断增大。其数学模型为

$$\begin{cases} C_{XB,i}(t)=k_{XB,i}P_{XB,i}(t)\Delta T \\ k_{XB,i}=\eta_3(1-S_t)+\eta_4 \\ S_t=H_p/H_{p,\max} \\ c_{hp}P_{hp}(t)=H_{p,\max}(S_t-S_{t-1})+Q_{hl}(t) \\ P_{XB,i}(t)\phi\leq Q_{hl}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_{XB,i}$ 为第*i*个相变储能系统的调度成本单价; ϕ 为电热功率换算系数; η_3, η_4 为补贴价格系数; $P_{XB,i}(t)$ 为第*i*个相变储能系统在*t*调度时段热功率,其转换热量小于此时段的热负荷 $Q_{hl}(t)$; $H_p, H_{p,\max}$ 分别为相变储能系统当前储能量和最大储能容量; S_{t-1}, S_t 分别为第*t-1*和*t*时段相变储能系统荷电状态值; c_{hp} 为热泵电热转换系数; $P_{hp}(t)$ 为热泵功率。

2 考虑调度优先级的需求响应运行机理

激励型 DR 通过激励用户在某时段参与 DR 项目,但用户负荷参与调度响应性能层次不齐,无序化的资源调度只会增加 VPP 的调度维护成本和降低可靠性。因此,从用户响应性能角度出发,分析各类用户负荷的响应性能指标,进而评估其响应性能,最后设定负荷的调度优先顺序,通过有序化的调度提升 DR 的质量和引导社区用户的响应规范,提升 VPP 的整体经济效益。

2.1 可削减负荷调度优先级评估

可削减负荷响应性能主要受响应速度、响应量和响应时长 3 个指标制约。其中:响应速度 S1 指用户从接到响应指令到开始响应的的时间;响应量 S2 指负荷的削减率;响应时长 S3 指实际参与响应的最大时长。由于需要依据各个指标对响应用户进行综合评价,可采用熵权法确定各个指标的权重,最后求出待评估用户的综合价值。假定有 *n* 个响应用户,其指标矩阵为

$$Z=[z_{ij}] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{n3} \end{bmatrix}, i=1, \dots, n; j=1, 2, 3 \quad (5)$$

式中: z_{ij} 为第*i*个用户的第*j*个指标。

对指标矩阵进行标准化转换后再求取其熵

值。第*j*个指标的熵值为

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \left(\sum_{i=1}^n F_{ij} \ln F_{ij} \right) \quad (6)$$

式中: $F_{ij}=z'_{ij} / \sum_{i=1}^n z'_{ij}$, z'_{ij} 为标准化处理后的指标。当 $F_{ij}=0$ 时, $\ln F_{ij}=0$ 。

其次,得出每一个指标的熵权。第*j*个指标的熵权为

$$\psi_j = \frac{1-H_j}{x - \sum_{j=1}^x H_j}, x=3 \quad (7)$$

式中: $0 \leq \psi_j \leq 1, \sum_{j=1}^x \psi_j = 1$; *x* 为指标数量。

最后,求得用户*i*的响应综合评价值为

$$I_{CL,i} = \sum_{j=1}^x \psi_j z_{ij}, x=3 \quad (8)$$

由以上方法可知,响应综合价值越高,表明该用户在响应速度、响应量和响应时长 3 个指标方面的综合评估性能越好。当收到响应信号时优先调度评价价值高的用户负荷,根据响应用户的综合评价价值高低顺序,设定调度优先级顺序。

当拥有同等评价价值的 *m* 个用户共同参与响应时,需求量少于响应量,用户响应量分配应按照该时段用户的响应裕度的大小均等化分配用户响应量,即:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \int_{t_1}^{t_2} \Delta P'(t) dt}{\sum_i P_i(t_2-t_1)} \quad (9)$$

式中: $\Delta P_i, P_i$ 分别为第*i*个用户实际分配的响应量和最大响应量; $\Delta P'$ 为 *m* 个用户的总调度需求量; t_1, t_2 分别为某时段调度需求起止时间。

2.2 可转移负荷调度优先级评估

可转移负荷用户可提前变更智能家居工作时间,不考虑响应速度问题,只受用电设备规则约束,其优先级顺序受响应量 S2、响应时长 S3 和响应功率 S4 (负荷运行功率)影响,参考本文 2.1 方法求得用户*i*的响应综合评价值为

$$I_{SL,i} = \sum_{j=1}^y \phi_j u_{ij}, y=3 \quad (10)$$

式中: ϕ_j 为第*j*个可转移负荷的熵权; u_{ij} 为第*i*个用户的*j*指标。

可转移负荷用户调度响应分配量采用本文 2.1 所述方法。

2.3 相变储能系统调度优先级

相变储能系统采用统一管控模式,默认全天处于运行状态,并不存在设备响应速率等约束,优先考虑装设相变储能系统容量大的用户。在 VPP 调度时除满足用户室温需求后,剩余容量统一调控,相变储能系统也是 VPP 调度的后备调度策略,在风光资源和 VESS 中发生不确定性偏差时,VPP 通过调度相变储能系统补足功率失衡。

3 考虑需求响应优先级的虚拟电厂建模与求解

3.1 目标函数

以 VPP 收益最大化为目标,建立目标函数:

$$\begin{cases} F = \max \sum_{t=1}^T [C_{\text{rev}}(t) - C_{\text{DE}}(t) - C_V(t)] \\ C_{\text{rev}}(t) = \sum_{i=1}^T [k_{\text{fin}} P_{\text{fin}}(t) - k_{\text{lose}} P_{\text{lose}}(t)] \\ C_V(t) = \sum_{i=1}^n [C_{\text{SL},i}(t) + C_{\text{CL},i}(t) + C_{\text{XB},i}(t)] + k_{\text{ws}} P_{\text{ws}}(t) \\ C_{\text{DE}}(t) = k_{\text{WT}} P_{\text{WT}}(t) + k_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t) \\ P_V(t) = P_{\text{CL}}(t) + P_{\text{SL}}(t) + P_{\text{XB}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: F 为 VPP 的当日收益值; $C_{\text{rev}}(t)$ 为 t 时段完成电网调度指令负荷的收益; $C_V(t)$, $C_{\text{DE}}(t)$ 分别为 t 时刻调度 VESS 和分布式能源的调度成本; k_{fin} , k_{lose} , k_{WT} , k_{PV} , k_{ws} 分别为完成调度指令负荷的收益、电网购电、风电、光伏和 VESS 消耗风光资源的购电单价; $P_{\text{fin}}(t)$, $P_{\text{lose}}(t)$, $P_{\text{WT}}(t)$, $P_{\text{PV}}(t)$, $P_{\text{ws}}(t)$ 分别为 t 时段完成调度指令负荷、电网购电、风电、光伏和 VESS 消耗风光资源的总功率值; $P_V(t)$, $P_{\text{CL}}(t)$, $P_{\text{SL}}(t)$, $P_{\text{XB}}(t)$ 分别为 t 时段调度 VESS、可削减负荷、可转移负荷、相变储能系统的总功率值。

3.2 约束条件

① 电源侧出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq P_{\text{WT}}^{\text{max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{WT}}^{\text{max}}(t)$, $P_{\text{PV}}^{\text{max}}(t)$ 分别为风机、光伏在第 t 个调度时段机组最大功率输出值。

② 可削减负荷约束

$$0 \leq P_{\text{CL}}(t) \leq P_{\text{CL}}^{\text{max}}(t) \quad (13)$$

式中: $P_{\text{CL}}^{\text{max}}(t)$ 为第 t 个调度时段可削减负荷的最大响应量。

③ 可转移负荷

$$0 \leq P_{\text{SL}}(t) \leq P_{\text{SL}}^{\text{max}}(t) \quad (14)$$

式中: $P_{\text{SL}}^{\text{max}}(t)$ 为第 t 个调度时段可转移负荷的最大响应量。

④ 相变储能系统约束

$$Q_{\text{cr}}(t) = Q_{\text{pci-PCM}}(t) + Q_{\text{po-PCM}}(t) + Q_{\text{pi-PCM}}(t) \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{cr}}(t)$ 为用户建筑相变储能系统的热负荷,其大小等于 PCM 相变潜热过程释放的热量。

⑤ 交互功率约束

VPP 输出功率和电网购电功率之和与电网指令负荷功率 $P_C(t)$ 相等。

$$P_C(t) = P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_V(t) + P_{\text{lose}}(t) \quad (16)$$

⑥ VESS 约束

$$0 \leq P_V(t) \leq P_V^{\text{max}} \quad (17)$$

式中: P_V^{max} 为 VESS 爬坡速率 P_V 的上限值。

3.3 基于改进光线寻优算法的模型求解

光线寻优算法是基于几何光学中费马定理的一种快速寻优求解算法,通过模拟光线在介质中以不同角度折射或反射形式在搜索域内迭代搜索,能够快速搜寻到目标域中最优值^[12]。在文献 [12] 中提出了无网格光线寻优算法 (Light Ray Optimization Based on Grid Free Method, FLRO),该方法通过去除网格缩减计算时长提高了收敛速度,能够较好求解本文模型。但 FLRO 定步长的思路难免会陷入到搜索精度和搜索时长之间的矛盾,若选取步长较大,则导致收敛快、精度低;若选取步长较小,则精度高、收敛速度慢。理想的步长是从大到小逐渐变化,为确保算法收敛速度,须要设定合适的初始步长,且考虑变步长的取值范围。因此,本文提出了改进 FLRO,基于 Sigmoid 函数变步长的方法^[13]设定变步长形式,步长的表达式为

$$\begin{cases} \mu(k) = \frac{2}{1 + e^{-|\varepsilon(k)|}} - \tau, \tau \geq 1 \\ s(k+1) = s(k) \cdot \mu(k) \\ s_{\text{min}} \leq s(k) \leq s_0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mu(k)$ 为步长因子; τ 为缩减因子,其大小决定迭代收敛速度; $\varepsilon(k)$ 为相邻两次传播点之间的

距离。

随着迭代进行,步长逐步减小,直至满足精度要求,跳出迭代求得目标函数值。

模型求解流程如图 3 所示。

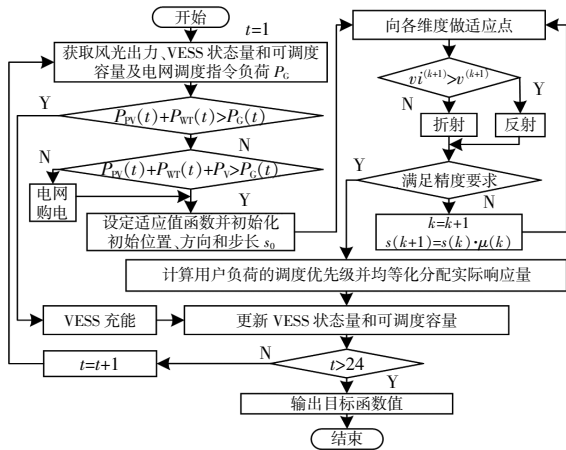


图 3 模型求解流程图
Fig.3 Model solution flow

4 算例分析

4.1 算例参数

以夏季某日 24 h 为调度周期,社区周边风电和光伏机组总装机容量各有 500 kW,典型日风电、光伏、负荷调度指令负荷和外界温度的预测数据如图 4 所示。VPP 完成电网指令负荷的补贴和峰、平时段购电电价如表 1 所示。

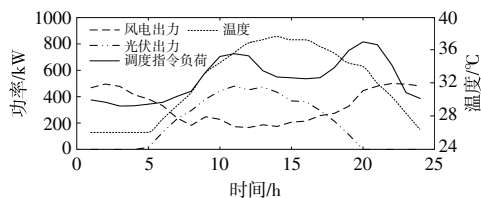


图 4 风、光、调度指令负荷和温度典型预测曲线
Fig.4 Typical forecast curve of wind, PV, dispatch command load and temperature

表 1 价格参数

Table 1 Price parameters

时段类型	时段	购电价/元	调度补贴/元	余电价/元
峰时段	07:00-23:00	0.894		
平时段	00:00-07:00	0.417	0.60	0.08
	23:00-24:00			

社区有 200 个用户参与 VPP 的 DR 项目,其中有 20 家装设相变储能。可削减负荷和可转移负荷用户分为 3 组参与 DR,其参与调度时段为全天任意时段,具体分组和响应参数如表 2 所示。相变储能系统的建筑构造和热力学参数均参考文献

表 2 可削减和可转移负荷配置参数

Table 2 Reconfigurable and transferable load configuration parameters

CL 负荷	S1	S2	S3	$k_{CL,i}^f$ 元/kW	P_{CL}^{max} kW·h	容量 kW
CL1	5	80	45	0.7	150	250
CL2	10	90	30	0.7	150	300
CL3	20	95	50	0.7	150	150
SL 负荷	S2	S3	S4	$k_{SL,i}^f$ 元/kW	P_{SL}^{max} kW·h	容量 kW
L1	85	60	0.9	0.25	130	200
SL2	90	30	0.6	0.25	130	100
SL3	95	90	1.2	0.25	130	400

[11], ϕ, c_{hp} 均为 2.6。而热负荷的相对值由外界温度带入式(3)计算求得,室温保持在 24~27 °C,其中,补贴价格系数 η_3, η_4 取值分别为 0.25 和 0.15, k_{WT}, k_{PV} 取值均为 0.4。

响应过程中的调度维护费用包含设备的运维成本和响应存在的不确定性风险维护成本等,综合考虑后,设定单位调度维护成本系数合理的取值为 0.1%~0.3%^[14],考虑到在调度过程中可削减负荷比可转移负荷调度的响应过程更加稳定、可靠性高,设定的可削减负荷的调度维护成本系数整体比可转移负荷更低。在考虑调度优先级响应后,优先级越高的用户调度可靠性越好,对应的维护成本系数越低,根据用户的调度优先级别设定不同等级的调度维护成本系数。设定用户负荷的调度维护成本系数如表 3 所示。

表 3 可削减和可转移负荷调度维护成本系数

Table 3 Cost parameters of risk mitigation for reducible and transferable loads

负荷类型	评估前	优先级一	优先级二	优先级三
CL 负荷 η_1	0.001 5	0.001 0	0.001 5	0.002 0
SL 负荷 η_2	0.001 6	0.001 2	0.001 6	0.002 2

4.2 结果分析

4.2.1 仿真结果

为验证本文所提的综合 DR 调度优先级的经济性和合理性,拟定了 3 种场景。场景 1:不考虑 VESS,即无 DR 措施,VPP 只含风光资源参与电网调度运行;场景 2:考虑 VESS,不考虑综合调度优先级响应,VESS 资源为无序调度;场景 3:考虑 VESS 和综合调度优先级响应,即本文所提的方案。各场景下优化结果分别如图 5 和表 4 所示。

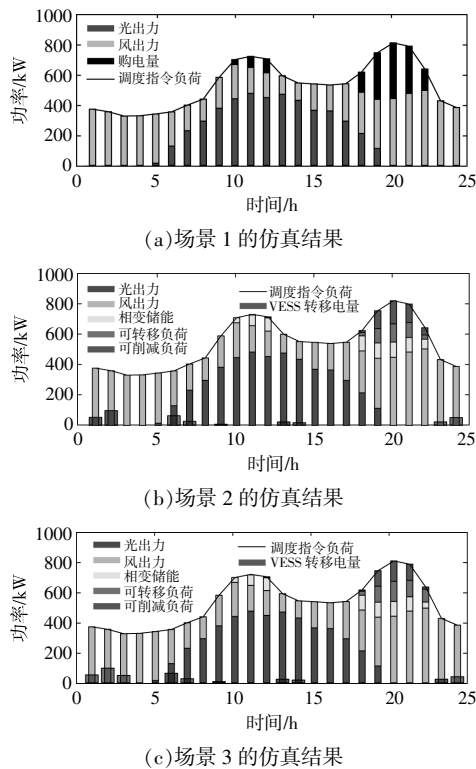


图5 不同场景下出力对比

Fig.5 Comparison of output under different scenarios

表4 不同场景下出力参数

Table 4 Output parameters under different scenarios

场景	场景 1	场景 2	场景 3
可再生能源利用率/%	84.98	96.47	98.52
VPP 购电电量/kW	-1 469	0	0

由图 5 和表 4 结果可知, 由于场景 1 无 VESS 参与, VPP 在高峰时段以高昂价格向电网购电满足功率平衡, 风光利用率为 84.98%。在场景 2 中, 调度 VESS 将峰时段的负荷削减或转移至平时段来消纳风光资源, 风光利用率为 96.47%, 该模型满足了调度指令负荷需求, 验证了该调度策略的有效性。在场景 3 中, 对 DR 用户进行评估, 综合调度优先级后的调度模型, 可转移负荷的转移电量提高, VESS 消纳了更多的风光富余电量, 风光利用率提升至 98.52%, 该场景为 VPP 最优调度状况下运行策略。

4.2.2 相变储能系统电热耦合特性结果分析

场景 2, 3 均为电热耦合响应调度模型, 综合调度优先级响应对相变储能系统响应功率影响较小, 两种场景相变储能系统吞吐能量和热力特性较为类似, 其热力侧特性曲线如图 6 所示。

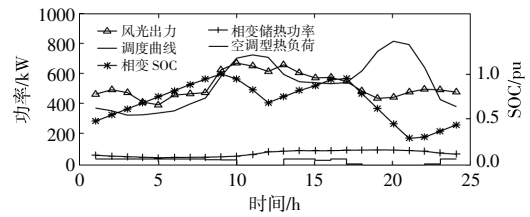


图6 热力侧特性曲线

Fig.6 Thermal side characteristic curve

由图 6 可以看出, 在 VPP 调度运行中, 0:00-09:00, 13:00-17:00, 23:00-24:00 风光输出电量富余, 由经济性约束将富余电量优先通过热泵转换热能储存于相变储能系统中, 剩余电量供给可转移负荷使用, 而在 10:00-12:00 和 18:00-22:00, 相变储能系统参与 VPP 调度, 将存储的热能释放。在 22:00 之后, 相变储能系统开始回补能量, 直至达到当日初始状态量, 为下一个调度日做初始准备。

4.3 经济效益性能分析

通过计算求得 3 种场景下经济效益情况, 如表 5 所示。

表5 不同场景下经济性对比

Table 5 Economic comparison in different scenarios

场景	VESS 激励成本/元	购电成本/元	余电上网收益/元	VPP 总收益元
场景 1	0	1 313.29	90.36	1 487.47
场景 2	834.46	0	10.95	1 941.57
场景 3	794.93	0	8.79	2 170.60

由图 5 和表 5 可见, 由于场景 1 无 VESS, 在峰时段只能向电网购电, 而平时段风光富余电能以低价格余电上网导致经济性较差, 仅为 1 487.47 元。场景 2 通过支出 834.46 元的 VESS 激励成本, 激励用户削减或转移峰时负荷满足指令负荷需求, 无购电成本, 提升了风光资源的消纳量, 余电上网收益降低 79.41 元, VPP 总收益提高 454.10 元。场景 3 为评估调度优先级后的模型, 与场景 2 相比, VESS 的激励成本下降 39.53 元, 原因是一方面优先调度高质量用户使调度维护成本下降, 另一方面负荷特性和经济性, 该场景可转移负荷调度量和风光消纳量提高, 从而上网电量降低, VPP 收益达到 2 170.60 元。调度优先级策略通过优先调度高品质的用户负荷参与电力调度, 引导用户的响应规范, 提升了调度可靠性, 并提高了

VPP 总体经济效益。

4.4 改进光线寻优算法适应性

本文采用经典粒子群算法和 FLRO 对比验证本文所提改进 FLRO 的求解性能。粒子群算法参数不再赘述;FLRO 初始位置和方向随机化,适应搜索值设为 0.5 个步长,步长取值为 0.1,算法运行停止精度设为 0.02;改进 FLRO 将初始步长 s_0 设为各维度取值范围的 0.1 倍, s_{\min} 设为 0.01, τ 设为 1.01。以场景 3 最后一个调度时段为例,各算法迭代 1 500 次的运行结果如图 7 所示。

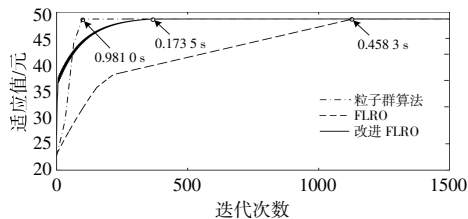


图 7 算法收敛时间比较

Fig.7 Comparison of algorithm convergence time

由图 7 可见,3 种算法均可以求出函数最佳适应值。一方面,改进 FLRO 通过变步长方式在保证精度的基础上,提升了求解速度,而在迭代过程中会产生锯齿现象,这也是通过变步长迭代出现的正常现象,并不会影响最终求值性能;另一方面,粒子群算法为群体迭代形式,通过较少的迭代次数求得最优值,而光线寻优算法为单值目标函数值迭代,通过步长迭代递进的方式至最优解需要经过一定的迭代次数,其快速的求解速度对于求解大规模复杂的工程应用问题具有较大意义。

5 结论

本文通过在配电终端聚合用户侧资源和分布式电源参与 VPP 调控,考虑到用户负荷具有不同的响应性能,提出了一种考虑 DR 优先级的终端 VPP 调度模型。研究表明,采用动态响应优先级设定用户负荷的调度优先级顺序,可以正确引导社区用户的响应规范,提升用户参与调度响应的可靠性。构建 VESS 完善了用户侧资源集约化互动响应调度的水平,满足了日益凸显的负荷高峰需求,为提升风光资源消纳水平提供了可参考的技术路径,提升了 VPP 的调度弹性和总体经济效益。

参考文献:

- [1] 王蓓蓓,赵盛楠,刘小聪,等.面向可再生能源消纳的智能用电关键技术分析与思考[J].电网技术,2016,40(12):3894-3903.
- [2] 王宜元,刘敦楠,刘蓁,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.
- [3] 南思博,李庚银,周明,等.智能小区可削减柔性负荷实时需求响应策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):42-50.
- [4] Su Y,Zhou Y,Tan M. An interval optimization strategy of household multi-energy system considering tolerance degree and integrated demand response [J].Applied Energy,2020,260:114144-114155.
- [5] Ozan Erdinc. Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households[J].Applied Energy,2014,126:142-150.
- [6] 江叶峰,熊浩,胡宇,等.考虑电热综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J].电力建设,2019,40(12):61-69.
- [7] 胡泽升,陆俊,黄瑞,等.计及需求响应的智慧能源小区热电耦合系统用能优化方法[J].电力系统自动化,2020,44(12):22-34.
- [8] 陈张宇,刘东,刘浩文,等.基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J].电网技术,2021,45(7):2542-2550.
- [9] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-591.
- [10] 程林,齐宁,田立亭.考虑运行控制策略的广义储能资源与分布式电源联合规划[J].电力系统自动化,2019,43(10):27-40,43.
- [11] 魏繁荣,林湘宁,陈乐,等.基于建筑相变材料储能的微网综合能源消纳系统[J].中国电机工程学报,2018,38(3):792-804.
- [12] 李加莲.光线寻优算法的研究及改进[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [13] 张红梅,韩万刚.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J].仪器仪表学报,2015,36(8):1822-1830.
- [14] 王嘉阳,周保荣,吴伟杰,等.西部集中式与东部分布式光伏平准化度电成本研究[J].南方电网技术,2020,14(9):80-89.

Research on optimal dispatching of virtual power plant of distribution terminal considering priority of demand response

Hao Junwei, Fan Yanfang

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The virtual power plant technology provides a new path for user-side demand response to enhance the potential of distributed energy consumption and fill the blind area of grid dispatching. In order to guide users to participate in power dispatching, a virtual energy storage model including smart home load and building phase-change energy storage system with combined cooling and heating was constructed based on the incentive demand response power purchase agreement, and the schedulable margin of various resources was quantitatively analyzed; Taking user response characteristics as an indicator, using entropy weight method to evaluate the dynamic response performance of various user loads, setting the dynamic response priority of virtual energy storage participating in dispatching; taking the maximum benefit of virtual power plants as the goal, comprehensively considering resource power purchase costs, electric heating Based on factors such as balance, a terminal virtual power plant optimal scheduling model that integrates distributed power sources and smart community incentive response loads is proposed, and an improved light optimization algorithm is used to solve the model. The results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: virtual power plant; demand response; virtual energy storage; entropy weight method; dynamic comprehensive response priority