计及电-热-氢差异化激励需求响应的 园区综合能源系统优化调度

罗舒钰,李 奇,阳 洋,蒲雨辰 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:建立基于阶梯式补偿价格的电负荷需求响应模型,基于预计平均热感觉指数量化人体舒适度的热负荷 需求响应模型以及基于智能停车场统一调度的电动汽车和氢燃料电池汽车需求响应模型。在此基础上,以 电-热-氢园区综合能源系统为研究对象,考虑系统运维老化、激励补偿以及弃风弃光成本,通过混合整数线 性规划求解得到优化调度策略。以东部沿海某城市实际数据为例,对所提方法的有效性进行验证,仿真结果 表明所提方法能够充分挖掘需求侧资源的调节潜力,在调度灵活性和经济性上具有明显优势。 关键词:园区综合能源系统;差异化需求响应;综合需求响应;多能耦合;需求侧资源

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202310002

0 引言

园区综合能源系统(community intergrated energy system, CIES)由于其源网荷储一体化和多能互 补的特性得到广泛应用[1-3],在风光等可再生能源大 规模接入的背景下,CIES的调度除了要实现传统削 峰填谷的调节目标,更要在适应新能源出力间歇性 的特点下维持系统功率平衡。因此,为合理利用可 再生能源与储能的潜能,充分发挥多种能源负荷运 行灵活性,实现供需双向交互响应,推动"双碳"目标 的实现,充分挖掘需求侧资源调节能力具有重要 意义。需求侧管理(demand side management, DSM) 具有很高的灵活性和巨大的响应潜力[45],由于不同 能源系统在产能特性、供需特性以及负荷特性方面 存在较大差异,通过DSM的方式削弱或延迟综合能 源用户对一种或多种能源的需求,将影响其余能源 供求关系,实现多能互补,缓解系统供需不平衡和调 峰难等问题[6-7]。

目前,针对多种能源负荷综合需求响应已有不 少研究。文献[8]基于多种能量转换设备实现能源 转换,通过实时电价、气价、热价对负荷侧进行调 度。文献[9]考虑了电、热、气负荷的激励需求响应 (incentive based demand response,IDR),以促进风 电消纳,实现能量梯级利用以及提高能效。文献 [10]在氢能综合能源系统调度研究中,通过价格型 弹性矩阵描述柔性电负荷,通过阶梯补贴机制对冷

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-09-24

在线出版日期:2023-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377123,51977181); 四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52377123,51977181) and the Natural Science Foundation of Sichuan Province(2022NSFSC0027) 热负荷进行调度。文献[11]考虑了电、气、热、氢负 荷的IDR,参照传统电负荷需求响应资源管理方式, 采用经济补偿对4类负荷进行调度。文献[12]通过 效用函数统一量化电、热、氢负荷调度中产生的成 本。以上对于综合需求响应在系统优化调度阶段的 研究大多侧重于电、气、热等传统能源负荷的响应, 较少考虑氢负荷调度潜力,或对电、热、氢等各类负 荷建立统一的需求响应模型,忽略了不同能源负荷 实际参与调度的差异性。随着我国氢燃料电池汽车 (hydrogen fuel cell vehicles, HFCVs)以及加氢站的 大力发展,新能源汽车负荷值得充分研究,例如:文 献[13]建立了一种考虑多种不确定因素的电动汽车 (electric vehicles, EVs)充电引导双层优化模型;文 献[14]研究了氢燃料电池汽车负荷对住宅能源系统 的影响。综上所述,考虑氢燃料电池汽车等新能源 汽车充能行为的调度潜力,根据电、热、氢等各类负 荷特征,对CIES综合需求响应进行差异化建模具有 重要意义。

针对热负荷需求响应的研究大多基于其热惯性 特点,此特征使得负荷曲线可以跟随需求进行一定 的调整^[15]。用户舒适度是考虑供热系统热惯性中的 重要问题,文献[16]通过热水器温度范围约束来考虑 居民舒适度;文献[17]根据实际温度与标准温度构建 函数计算用户舒适度;文献[18]根据用户的实际用 电曲线与舒适度最大值计算用户的用电舒适度值。 但以上研究缺乏普适的指标定义人体对于环境的感 知,导致系统热惯性与室内外温度无法实时关联。

综上所述,现有的CIES需求响应研究较少涉及 氢能负荷的响应情况,或对电、热、氢各类负荷建立 统一的需求响应,忽略了不同能源负荷参与调度的 差异性以及多能源负荷综合需求响应的耦合关系, 在热负荷热惯性建模时缺乏对用户舒适度更为全面 的考虑。基于上述问题和背景,本文针对多能源负

215

荷的联合响应问题提出了一种计及多能源负荷差异 化 IDR 的 CIES 调度策略,分别对电负荷、热负荷以 及新能源汽车负荷,建立了基于阶梯式补偿价格的 需求响应模型,基于平均热感觉指数(predicted mean vote, PMV)量化人体舒适度的需求响应模型 以及基于智能停车场(intelligent parking lot, IPL)统 一调度的需求响应模型。综合考虑系统运维老化、 激励补偿以及弃风弃光成本,以电-热-氢 CIES 为研 究对象进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。

1 电-热-氢CIES建模

本文搭建的电-热-氢CIES如图1所示,其包含 源(光伏、风机)、换(电锅炉)、储(蓄电池、氢能系统、 蓄热槽)以及各类需求响应负荷。



Fig.1 System structure diagram

电动汽车和居民电负荷主要由风力发电以及光 伏发电供给,燃料电池补充发电;热负荷主要由电锅 炉供给,燃料电池和电解槽补充供热;蓄电池/蓄热 槽作为储电/热设备,起到削峰填谷的作用。氢储 能系统通过电解槽制氢和燃料电池放电实现电、氢 之间的双向转换,同时电解槽和燃料电池运行中的 余热输送至热母线,实现了热、电、氢之间的耦合。

系统中的储能部分包含蓄电池和氢能系统:效 率较高且动态响应较快的蓄电池在短时间存储上具 有优势;氢能系统作为系统中可长时间存储的较大 容量后备能源,可补充高负荷情况下的功率缺额。 通过2种储能的性能互补共同保障负荷高峰时期的 供能稳定性,改善系统运行的经济性、可靠性。

对于系统的各个子单元,风机、光伏、蓄电池、蓄 热槽、电锅炉、燃料电池等的模型在已有研究中得到 了多次阐述^[19-21],故此处不再赘述。本文将详细介 绍各能源负荷差异化需求响应机制的构建。

2 差异化需求响应机制构建

2.1 电负荷 IDR 电力 IDR 是指电力市场价格明显波动或电力系 统可靠性存在一定风险时,电力用户根据激励措施, 如电费折扣等经济补偿,调整其用电行为,从而促进 电力供需平衡,保障电网稳定运行。

传统电力需求响应将电负荷分为可中断负荷与 可转移负荷,本文主要关注一级、二级负荷之外的可 中断负荷(interruptible load,IL)。为达到需求侧电 力的差别定价、增加互动积极性等效果,对参与负荷 调度的柔性负荷给予阶梯补偿价格,如图2所示,根 据减少电负荷占总用电负荷的比例r_L进行分段,阶 段1为基本响应阶段,后续阶段为弹性响应阶段,用 户根据各自的意愿与CIES签订调度合同,并选择参 与响应的阶段。



图 2 阶梯分段式补偿示意图 Fig.2 Schematic diagram of stepped segmented compensation

用户在阶段*m*的计划响应电量应满足阶梯式分 段补偿中阶段*m*的容量限制,如式(1)所示。

$$0 \leq \Delta P_{t,l,m}^{\mathrm{IL}} \leq \Delta P_{t,l,m}^{\mathrm{IL},\max} \tag{1}$$

式中: $\Delta P_{t,l,m}^{\text{IL}}$ 为用户 $l \propto t$ 时刻阶段m的响应电量; $\Delta P_{t,l,m}^{\text{IL}}$ 为用户 $l \propto t$ 时刻阶段m的最大响应电量。

CIES 在实际调度时根据用户提交的负荷可削减量和报价,按成本从低到高确定实际负荷削减量, 阶梯补偿成本 *F*_a为:

$$F_{\rm il} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^{N_{\rm i}} \sum_{m=1}^{N_{\rm m}} c_m \Delta P_{t,l,m}^{\rm IL}$$
(2)

式中: N_i 为签订合同的用户数; N_m 为用户参与电负荷 调度的总阶段数; c_m 为用户l提供的阶段m的报价。

2.2 热负荷 IDR

热惯性环节的时间延迟性以及居民对温度的感知模糊性是供暖热负荷(heating load,HL)的2个突出特点,即系统产热量的小范围波动不会导致建筑物内部温度短时间剧烈变化,以及在人体舒适度可接受范围内温度具有波动空间。

考虑到居民住房的实际情况,供热区域的热动 态过程可表示为^[22]:

$$\rho CV \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t} - H_{\mathrm{dis}} = H_{\mathrm{ld}}$$
(3)

式中: ρ 为空气密度;C为空气比热容;V为受热体积; T_{in} 为室内温度; H_{dis} 为住房建筑散热量; H_{ld} 为提供给用户的热量。

住房建筑耗散热量表示为墙体和窗户的散热之

和,如式(4)所示。

$$\begin{cases} H_{\rm dis} = H_{\rm wall} + H_{\rm win} \\ H_{\rm wall} = k_{\rm w} S_{\rm w} (T_{\rm en} - T_{\rm in}) \\ H_{\rm win} = k_{\rm wi} S_{\rm wi} (T_{\rm en} - T_{\rm in}) \end{cases}$$
(4)

式中: H_{wall} 为建筑墙体散热量; H_{win} 为建筑窗户散热量; T_{en} 为环境温度; k_{w} 为墙体传热系数; S_{w} 为墙体总面积; k_{wi} 为窗户传热系数; S_{wi} 为窗户总面积。

供热量表示为[22]:

$$H_{\rm ld} = \varepsilon_{\rm r} W_{\rm rs} \left(T_{\rm g} - T_{\rm en} \right) \tag{5}$$

式中: ε, 为供热器的有效系数; W_s 为热负荷侧的热媒 流量热当量; T_s 为散热器进口的供水温度。

人体对舒适度的感知受衣着情况、空气温度、空 气湿度等因素的影响,为了量化温度对人体舒适度 的影响,本文采用 PMV 评价人体对环境的感知,在 舒适温度下,PMV 取值为0。

根据ISO7730标准^[23],在其他影响因素固定时, PMV 与室内温度的关系为:

$$V_{\rm PMV} = \begin{cases} \alpha \left(T_{\rm in} - T_{\rm st} \right) & T_{\rm in} \ge T_{\rm st} \\ \beta \left(T_{\rm st} - T_{\rm in} \right) & T_{\rm in} < T_{\rm st} \end{cases}$$
(6)

式中: V_{PMV} 为PMV的值; T_{st} 为室内标准温度; α 、 β 为相关系数,取值分别为0.3895、0.4065。

根据建筑领域的相关标准^[24],应在保障居民舒 适度的同时满足建筑物室内标准供暖温度,即:

$$\begin{cases} T_{\rm st} = 18 \,^{\circ}{\rm C} \\ -0.8 < V_{\rm puty} < 0.8 \end{cases} \tag{7}$$

通过式(6)、(7)求解得到室内实际温度范围为 [16.03,20.05]℃。

在温度范围内,可通过调节智能室温装置的流 量或供水温度调节采暖区域的室内温度,即:

$$\begin{cases} \rho CV \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t} - H_{\mathrm{dis}} = \varepsilon_{\mathrm{r}} W_{\mathrm{rs}} \left(T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{en}} \right) \\ 16.03 \ ^{\circ}\mathrm{C} \leq T_{\mathrm{s}} \leq 20.05 \ ^{\circ}\mathrm{C} \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

2.3 新能源汽车负荷 IDR

通过对 CIES 中的 IPL 进行协调管理, 可以缓解 电动汽车充电负荷以及氢燃料电池汽车加氢负荷激 增带来的供能压力, 是改善系统服务性能和经济性 的有效方式。

以IDR的方式调整电动汽车的充电行为和氢 燃料电池汽车的加氢行为,可一定程度上削弱先到 先充(fast arrive,fast charge,FAFC)造成的用能高 峰。电动汽车进入IPL后通过智能充电桩进行充 电,车主可自定义初始状态、充电结束时的预期状 态以及离开时间,IPL管理系统由车主输入的信息 计算充电桩所需充电功率,并进行集中调度,如式 (9)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{ev},i}(t) = \zeta_{\text{ch},i}(t) P_{\text{cev}} \\ \sum_{t=t_{\text{av},i}}^{t_{\text{red},i}} P_{\text{ev},i}(t) = (S_{\text{end},i}^{\text{ev}} - S_{\text{arv},i}^{\text{ev}}) C_{\text{evs},i} \end{cases}$$
(9)

式中: $P_{ev,i}(t)$ 为第i辆电动汽车在t时刻的充电功率; P_{cev} 为恒充电模式下的充电功率; $\zeta_{ch,i}(t)$ 表示第i辆 电动汽车在t时刻处于充电状态,取值为1; $t_{arv,i}$ 、 $t_{end,i}$ 分别为第i辆电动汽车进入和离开IPL的时刻; $S_{arv,i}^{ev}$ 、 $S_{end,i}^{ev}$ 分别为第i辆电动汽车的初始充电状态和离开 时的充电状态; $C_{evs,i}$ 为第i辆电动汽车的电池容量。

t时刻IPL中的总充电负荷为:

$$P_{\rm evs}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\rm evs}} \sum_{t=t_{\rm av,i}}^{t_{\rm eul,i}} P_{\rm ev,i}(t)$$
(10)

式中:Nevs为电动汽车数量。

与电动汽车相似,氢燃料电池汽车进入IPL后按照车主的需求自定义加氢相关信息,IPL的智能管理系统集中统一调度后进行加氢,满足的约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq m_{\text{hv},i}(t) \leq m_{\text{hv},\max} \\ \sum_{t=t_{\text{arc},i}}^{t_{\text{end},i}} m_{\text{hv},i}(t) = (S_{\text{arv},i}^{\text{hv}} - S_{\text{end},i}^{\text{hv}}) C_{\text{hvs},i} \\ m_{\text{hvs}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{hvs}}} \sum_{t=t_{\text{m},i}}^{t_{\text{end},i}} m_{\text{hv},i}(t) \end{cases}$$
(11)

式中:m_{hv,i}为第*i* 辆氢燃料电池汽车单位时间加氢 量,由IPL及氢燃料电池汽车决定;S^{hv}_{arv,i}、S^{hv}_{end,i}分别为 第*i* 辆氢燃料电池汽车初始储氢状态和期望离开时 的储氢状态;N_{hvs}为氢燃料电池汽车数量;C_{hvs,i}为第*i* 辆氢燃料电池汽车电池的容量。

3 计及电-热-氢差异化需求响应的CIES运行 优化模型

3.1 目标函数

本文以系统运维成本 $F_{fam, day}$ 、系统老化成本 $F_{age, day}$ 、附加成本 $F_{add, day}$ 之和最小为目标函数,如式(12)所示,考虑计及多种负荷差异化IDR的优化调度问题, 其中附加成本由激励补偿成本 $F_{il, day}$ 和弃风弃光成本 $F_{dd, day}$ 组成。

$$F_{\text{day}} = \min\left(F_{\text{f&m, day}} + F_{\text{age, day}} + F_{\text{add, day}}\right)$$
(12)

1)系统运维成本如式(13)所示。

$$F_{i\&m, day} = \sum_{i=1}^{24} \left[\sum_{j \in \Omega_{im}} \sigma_j \left| P_j(t) \right| + \sum_{j \in \Omega_{id}} \left| P_j(t) \right| \delta_j(t) \left(\frac{C_j}{L_j} + \sigma_j \right) + \sum_{j \in \Omega_{im}} \frac{C_j}{L_j} \left| P_j(t) \right| + \sigma_H \left| v_{H2}(t) \right| \right]$$
(13)

式中: $\Omega_{\mu\nu}$ 为包含光伏、风电的集合; Ω_{el} 为包含电解槽、燃料电池、电锅炉的集合; Ω_{bat} 为包含蓄电池、蓄热槽的集合; σ_i 为设备j的成本系数; $\delta_i(t)$ 为二进制

变量,取值1或0分别表示 Ω_{el} 中的设备处于运行状态或停止状态; L_j 为设备j的寿命; C_j 为设备j的单位购置成本; $P_j(t)$ 为设备j的工作功率; σ_{H} 为储氢罐的成本系数; $v_{H2}(t)$ 为储氢罐的氢气进出量。

2)系统老化成本[21,25]如式(14)所示。

$$F_{\text{age,day}} = \sum_{t=1}^{2} \left(F_{\text{age_fc}}(t) + F_{\text{age_el}}(t) + F_{\text{age_bat}}(t) \right) (14)$$

$$\begin{cases} F_{\text{age_fc}}(t) = F_{\text{fc_s}}(t) + F_{\text{fc_low}}(t) + F_{\text{fc_bigh}}(t) + F_{\text{fc_idl}}(t) \\ F_{\text{age_el}}(t) = F_{\text{el_op}}(t) + F_{\text{el_s}}(t) \\ F_{\text{age_bat}}(t) = \left(S_{\text{bat}}(t-1) - S_{\text{bat}}(t) \right) C_{\text{bat}} \end{cases}$$

式中: $F_{age_fc}(t)$ 、 $F_{age_el}(t)$ 、 $F_{age_bat}(t)$ 分别为燃料电池、电 解槽和蓄电池 t 时刻的老化成本; $F_{fc_s}(t)$ 、 $F_{fc_low}(t)$ 、 $F_{fc_high}(t)$ 、 $F_{fc_idl}(t)$ 分别为燃料电池 t 时刻启停、低功率 运行、高功率运行、功率变化状态产生的老化成本; $F_{el_op}(t)$ 、 $F_{el_s}(t)$ 分别为 t 时刻电解槽正常运行和启停 状态下电池电压变化带来的老化成本; $S_{bat}(t)$ 与 $S_{bat}(t-1)$ 分别为蓄电池 t 时刻与t-1 时刻的荷电状态。

3)附加成本如式(15)所示。

$$\begin{cases} F_{add, day} = F_{il, day} + F_{dst, day} \\ F_{il, day} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^{N_{i}} \sum_{m=1}^{N_{m}} c_{m} \Delta P_{t, l, m}^{IL} \\ F_{dst, day} = \sum_{t=1}^{24} C_{dst} P_{dst}(t) \end{cases}$$
(15)

式中: C_{dst}为弃风弃光惩罚相关系数; P_{dst}(t)为t 时刻 弃风弃光功率。

3.2 约束条件

3.2.1 能量约束

电量守恒约束如式(16)所示。

$$P_{bo}(t) + P_{el}(t) + P_{evs}(t) + P_{Id}(t) =$$

 $P_{pv}(t) + P_{wi}(t) + P_{fc}(t) + P_{bat}(t)$ (16)

式中: $P_{bo}(t)$ 、 $P_{el}(t)$ 、 $P_{Id}(t)$ 、 $P_{pv}(t)$ 、 $P_{wi}(t)$ 、 $P_{fc}(t)$ 、 $P_{bat}(t)$ 分别为t时刻电锅炉、电解槽、居民负荷、光伏发电、 风力发电、燃料电池、蓄电池的电功率。

热能守恒约束如式(17)所示。

 $H_{\rm bo}(t) + H_{\rm el}(t) + H_{\rm fc}(t) + H_{\rm hs}(t) = H_{\rm ld}(t)$ (17) 式中: $H_{\rm bo}(t)$ 、 $H_{\rm el}(t)$ 、 $H_{\rm fc}(t)$ 、 $H_{\rm hs}(t)$ 、 $H_{\rm ld}(t)$ 分别为t时刻 电锅炉、电解槽、燃料电池、蓄热槽、居民负荷的热 功率。

氢能守恒约束如式(18)所示。

$$m_{\rm sto}(t) - m_{\rm sto}(t - \Delta t) = \int_{0}^{\Delta t} (m_{\rm el} - m_{\rm fc}) dt \qquad (18)$$

式中:m_{sto}为储氢罐氢气储存量;m_{el}、m_{fc}分别为电解 槽的产氢速率和燃料电池耗氢速率。

3.2.2 设备功率约束

弃风弃光功率约束如式(19)所示。

$$0 \leqslant \frac{P_{dst}(t)}{P_{pv}(t) + P_{wi}(t)} \leqslant 5\%$$
(19)

对于电-热-氢耦合系统,其热能的释放与功率 并非线性关系,而是在系统允许向母线释放的功率 范围内,根据负荷需求输出,因此其热能约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq H_{\rm el}(t) \leq H_{\rm el_max}(t) \\ 0 \leq H_{\rm fc}(t) \leq H_{\rm fc_max}(t) \end{cases}$$
(20)

$$\begin{cases} H_{\rm el_{max}}(t) = \mu_{\rm el_{he}}(1 - \eta_{\rm el}) P_{\rm el}(t) \\ H_{\rm fc_{max}}(t) = \mu_{\rm fc_{he}} \frac{(1 - \eta_{\rm fc})}{\eta_{\rm fc}} P_{\rm fc}(t) \end{cases}$$
(21)

式中: $H_{el_max}(t)$ 、 $H_{fe_max}(t)$ 分别为电解槽、燃料电池的 最大可释放热功率; η_{el} 为电解槽效率; μ_{el_he} 、 μ_{fe_he} 为 传热系数; η_{fe} 为燃料电池效率。

系统各设备输出功率与其最大装机容量相关, 储能系统输出满足上下限约束,具体表达式见附录 A式(A1)、(A2)。

4 算例分析

采用 MATLAB-Yalmip 调用商业求解器 Gurobi 进行优化求解,系统以1d为周期、1h为步长进行仿 真。采用东部沿海某城市 CIES 1a的气候环境参数 和居民负荷数据,通过聚类处理和计算,得到季度典 型天下可再生能源出力和电、热负荷需求数据,见附 录B。电-热-氢 CIES 成本计算中的经济参数设置见 附录C表C1。电负荷阶梯式补偿系数设置见附录C 表C2。

4.1 单一IDR调度结果分析

在第三季度典型天背景下,采用单一IDR负荷 策略,各种方案下的成本如表1所示。总体而言,相 较于没有IDR的优化调度,所提出的各负荷IDR策 略单独作用时,都能够有效降低优化调度成本。

表1 单一IDR调度成本

Table 1 Single IDR scheduling costs

方案	单日总成 本 / 元	运维成 本 / 元	老化成 本 / 元	附加成 本 / 元	成本降低 率 / %
无需求响应	10114	1958	8156	0	—
IL-DR	9523	1 3 7 9	7779	365	5.84
HL-DR	10019	1863	8156	0	0.94
EVs-DR	9784	2005	7779	0	3.26
HFCVs-DR	10073	1917	8156	0	0.41

4.1.1 居民电负荷需求响应调度结果分析

采用阶梯式补偿的电负荷 IDR 策略时,系统的 运行状态见附录 D图 D1,可中断负荷削减的功率和 对应的负荷中断率见附录 D图 D2。03:00 — 04:00 时段,风力发电充足且电负荷需求量较低,在满足电 负荷需求前提下余电输送至电解槽用于制氢及产 热,此时段可中断负荷有一定程度的削减,从而提高 电解槽功率,减少运行时长累积引起电池电压变化 带来的蓄电池老化成本。17:00时负荷需求量高但 光伏和风力发电充足,电负荷有较大程度的削减,在 满足本文设置的储氢罐始末存储状态一致的约束下,电解槽在18:00时停止工作。05:00—09:00和19:00—22:00时段,光伏和风电出力明显不足,蓄电池、燃料电池补充发电,这2个时段中可中断负荷会削减一定的功率以减缓储能的压力,降低系统的运维成本,同时减小燃料电池功率变化带来的老化成本。由于电负荷激励的补偿系数设置得较高,中断负荷率全天处于较低水平,但该方法依旧明显降低了系统运维成本、老化成本,从而降低了总成本(相较于无需求响应时分别降低了29.57%、4.62%、5.84%)。4.1.2 热负荷需求响应调度结果分析

218

采用智能室温热负荷需求响应策略时,系统的运行状态见附录D图D3,分时温度和热功率见图3。图中:*H*_{pro}、*H*_{hs}分别为系统产热功率、系统储热功率。



power under scheme of HL-DR

由图3可知,产热功率曲线与室内外温度差曲 线并不同步变化,由于储热系统的缓冲作用,即使系 统产热不随热负荷需求及时变化,室内温度依旧保 持在16~20℃内,PMV值为0,人体对环境的感知始 终处于舒适状态,系统的调度灵活性增加。在08:00、 13:00、21:00时刻能量供过于求,室内温度明显升 高,以提高能量利用率,降低其余设备的工作功率, 减小运维成本,进而降低总成本,相较于无需求响应 时,运维成本、总成本分别降低了4.85%、0.94%。 4.1.3 新能源汽车需求响应调度结果分析

电动汽车未考虑需求响应时,即遵循"先到先 充,即插即充"的无序充电策略,各电动汽车充电功 率及总功率如图4所示。图中:P_{ev1}—P_{ev7}分别为第 1—7辆电动汽车的充电功率。

考虑 IPL 的统一调度后,各电动汽车充电功率 及总功率如图5 所示。

由图4、5可知,09:00的负荷转移到了10:00, 11:00—15:00的负荷转移到了15:00之后,这是因为 IPL对各电动汽车进行集中管理后,电动汽车的充电 行为在时域上不再需要具有连续性,其负荷可以根 据调度需求灵活后移。叠加总负荷也向后转移,充 电负荷主要集中在18:00、24:00附近时段,18:00、 24:00的风光出力均明显高于居民电负荷需求。相





较于不考虑需求响应的情况,全天充电总功率峰值 在18:00时的充电负荷进一步增大,以减少电解槽利 用余电制氢的工作功率,降低系统老化成本。系统 在时域上的灵活性增强,蓄电池的全天工作状态改 变,运维成本略有上升,但老化成本显著减少,总成 本有一定程度的降低,相较于无需求响应时,老化成 本、总成本分别降低了4.62%、3.26%。 氢燃料电池汽车在采用IDR前、后的负荷分布如图6所示。图中:*m*_{hfev1}一*m*_{hfev7}分别为第1—7辆氢燃料电池汽车的耗氢速率。



图 6 氢能负荷分布 Fig.6 Distribution of hydrogen energy load

由图6可知,普通停车场中,氢燃料电池汽车在 返回停车场的单位时间内完成加氢,IPL中则只需要 在第2天离开时间之前完成加氢,考虑居民实际的 用车情况,本文假设最早离开停车场的时间为第2 天07:00,考虑需求响应后,加氢行为主要集中在 01:00—04:00,因为此时段风力发电充足,电解槽利 用余电制氢,氢能可以不经过储氢罐存储而直接加 以利用,提高了能量的利用效率,小幅降低了运维成 本和总成本,两者分别降低了2.1%、0.41%。但目前 氢燃料电池汽车的保有率很低,故总成本降低率很 低,但未来随着氢燃料电池汽车使用范围的扩大,调 度潜能将进一步增加。

4.2 联合IDR调度结果分析

应用热、电、氢多能源负荷差异化综合需求响应 策略,得到在4个季度典型天下的调度成本见表2。

表り	联合 IDR 调度成本
122	松口IDIN門及成件

Table 2 Joint IDR scheduling costs

季度	单日总成 本 / 元	运维成 本 / 元	老化成 本 / 元	附加成 本 / 元	成本降 低率 / %
第一季度	10534.0	4 399.0	6011.0	124.0	14.61
第二季度	15803.0	9924.0	9924.0	159.0	26.56
第三季度	8318.2	5760.8	5760.8	415.7	17.76
第四季度	7997.1	6296.2	6296.2	96.0	8.96

如表2所示,与未考虑需求响应相比,本文所提的差异化IDR联合调度在不同工况场景下均具有经济性上的优势,4个季度典型天下的单日调度成本分别减少了14.6%、25.56%、17.76%和8.96%,4个季度典型天中第二季度的成本降幅最大,因为该季度天气、环境适宜,相较于其他季度调度潜能更大,这也证明了本文所提方法在发掘负荷需求侧响应潜能的能力。

第三季度典型天下的运行曲线与储能状态分别 见附录D图D4、D5。在多种储能模块缓冲互补和多 种负荷 IDR下,电热负荷需求在1d内得到安全可靠的供应,储能设备始终工作于合理的状态范围内。 与不考虑需求响应相比,电解槽和燃料电池的全天运行时长缩短,累积的总功率降低,氢能系统减少的 余电消纳部分转化为了电储能,氢储能系统的可利 用余热减少使电锅炉总功率增加,蓄热槽起到了更 多缓冲作用。氢储能系统中各设备功率的减少使系 统老化成本降低,对比表1、2可知,多负荷差异化 IDR联合作用时,成本减少率远高于各单一需求响 应策略成本减少率之和,验证了多种策略协调互补 相较于单种负荷需求响应具有调度灵活性和经济性 上的优势。

联合 IDR 各类负荷的响应结果如图 7 所示,验 证了多种策略在调度中的灵活性。





由图7(a)可见,在风光出力不足/电解槽利用 余电制氢的时段,可中断电负荷削减,以缓解储能的 压力/提高电解槽的功率;由图7(b)可见,尽管产 热功率曲线与室内外温度差曲线变化趋势相差很 大,但在储热系统的缓冲作用下,室内温度依然维持 在人体感到舒适的温度范围内,系统余电较多时室 内温度较高,风光出力不足或系统储能压力较大时 室内温度较低;由图7(c)可见,在智能停车场的集中 管理与调度下,氢燃料电池汽车加氢行为集中于 01:00—04:00时段,此时段可中断电负荷削减,在满 足舒适度约束的前提下适当降低室内温度以减少能 量消耗,电解槽利用余电制氢,加氢行为可以在一定 程度上避免氢气在储氢罐中的存储和通过燃料电池 利用的过程,提高了能量利用率,电动汽车充电行为 集中在风光出力高峰以及系统供大于求的时段,起 到了削峰填谷的作用,缓解了系统中储能设备的工 作压力。多能耦合以及多种负荷需求响应策略的协 调互补提高了系统调度的灵活性。

5 结论

220

本文基于传统需求响应调度,构建了热、电、氢 负荷的需求响应模型,提出了计及多能源负荷差异 化IDR的园区综合能源系统优化调度策略,得到主 要结论如下:

1)相较于不考虑需求响应的优化调度,本文所 提出的不同负荷 IDR 策略单独作用时,都能够有效 降低优化调度成本;

2)多负荷差异化IDR联合作用时,成本减少率 远高于各单一策略成本减少率之和,多种需求响应 策略协调互补在不同工况场景下均具有调度灵活性 和经济性上的优势;

3)多负荷差异化IDR策略在环境因素适宜的季 度成本降幅更大,验证了本文所提方法发掘负荷需 求响应潜能的能力。

为了更加贴合应用场景,后续研究中可以考虑 多个IPL之间的协调管理、用户行为偏好等负荷侧 实际因素,同时可以考虑系统并网,将能源交易成本 纳入目标函数中。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1] 減海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 等. 电-热-气混联综合能源系统状态 估计研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 187-199.

ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, et al. Review and prospect of state estimation for electricity-heat-gas integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7):187-199.

- [2] 程义,李更丰. 基于双层模仿学习的多园区综合能源系统分布 式协同优化调度[J]. 电力系统自动化,2022,46(24):16-25.
 CHENG Yi,LI Gengfeng. Distributed collaborative optimal dispatch of multi-park integrated energy system based on bilayer imitation learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(24):16-25.
- [3] 王奖,邓丰强,张勇军,等.园区能源互联网的规划与运行研究 综述[J].电力自动化设备,2021,41(2):24-32,55.

WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24-32, 55.

- [4] CUI Jia, GAO Mingze, ZHOU Xiaoming, et al. Demand response method considering multiple types of flexible loads in industrial parks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 122:106060.
- [5] LI Yang, HAN Meng, SHAHIDEHPOUR M, et al. Data-driven distributionally robust scheduling of community integrated energy systems with uncertain renewable generations considering integrated demand response [J]. Applied Energy, 2023, 335:120749.
- [6] 彭春华,张金克,陈露,等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):1-7.
 PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid conside-ring differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):1-7.
- [7]肖白,刘健康,张博,等.考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储 能的并网型微电网优化配置[J].电力自动化设备,2023,43 (1):121-129.
 XIAO Bai,LIU Jiankang,ZHANG Bo,et al. Optimal configura-

tion of grid-connected microgrid with hydrogen energy storage considering ladder-type carbon trading and demand response [J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(1):121-129.

- [8] 吴佩隆,王维庆,樊小朝,等.考虑氢负荷与综合需求响应的天 然气制氢的园区综合能源系统优化配置[J].现代电子技术, 2023,46(7):135-142.
 WU Peilong, WANG Weiqing, FAN Xiaochao, et al. Optimal configuration of industrial PIES for natural gas hydrogen production considering hydrogen load and comprehensive demand response[J]. Modern Electronics Technique,2023,46(7): 135-142.
- [9]高玉,王琦,陈严,等.考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(4):51-59. GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(4):51-59.
- [10] 吕智林,易佳奇,刘泉,等.含氢能利用和需求响应的综合能源 系统低碳优化[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(7): 10-19.

LÜ Zhilin, YI Jiaqi, LIU Quan, et al. Low-carbon optimization of integrated energy system with hydrogen energy utilization and demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023,35(7):10-19.

[11] 李天格,胡志坚,陈志,等. 计及电-气-热-氢需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行优化策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(1):16-24.
 LI Tiange,HU Zhijian,CHEN Zhi, et al. Multi-time scale low-

carbon operation optimization strategy of integrated energy system considering electricity-gas-heat-hydrogen demand response [J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(1):16-24.

- [12] 吴彪,张少华,王硯,等.基于信息间隙决策理论-分布鲁棒优化的含电-氢-热混合储能综合能源系统需求响应策略[J/OL].电网技术.(2023-06-05)[2023-09-03].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0433.
- [13] 詹华,江昌旭,苏庆列.基于分层强化学习的电动汽车充电引导方法[J].电力自动化设备,2022,42(10):264-272.
 ZHAN Hua, JIANG Changxu, SU Qinglie. Electric vehicle charging navigation method based on hierarchical reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,

221

42(10):264-272.

- [14] 窦真兰,张春雁,赵慧荣,等.含氢能汽车负荷的住宅光-氢耦合能源系统容量优化配置[J].中国电力,2023,56(7):54-65.
 DOU Zhenlan,ZHANG Chunyan,ZHAO Huirong, et al. Optimal capacity configuration of residential solar-hydrogen coupling energy system with hydrogen vehicle load [J]. Electric Power,2023,56(7):54-65.
- [15] 徐箭,胡佳,廖思阳,等.考虑网络动态特性与综合需求响应的 综合能源系统协同优化[J].电力系统自动化,2021,45(12): 40-48.

XU Jian, HU Jia, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated energy system considering dynamic characteristics of network and integrated demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12):40-48.

- [16] 贺强,张轶,刘旸,等.考虑用户舒适度的需求侧负荷转移策略
 [J]. 电网与清洁能源,2021,37(5):43-51.
 HE Qiang, ZHANG Yi, LIU Yang, et al. Demand side load transfer strategy considering user comfort [J]. Power System and Clean Energy,2021,37(5):43-51.
- [17] 韩瀛,乌聪敏.考虑用户舒适度的楼字微电网优化运行方法
 [J].建筑电气,2021,40(6):75-79.
 HAN Ying,WU Congmin. User comfort-based method for optimal operation of building microgrid [J]. Building Electricity, 2021,40(6):75-79.
- [18] 金国锋,邢敬舒,张林,等.考虑用户舒适度的蓄热式电采暖参与风电消纳的多目标优化[J].电力建设,2022,43(3):12-21.
 JIN Guofeng, XING Jingshu, ZHANG Lin, et al. Multi-objective optimization of wind power accommodation with regenerative electric heating considering user comfort[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3):12-21.
- [19] 侯慧,刘鹏,黄亮,等.考虑不确定性的电-热-氢综合能源系统规划[J]. 电工技术学报,2021,36(增刊1):133-144.
 HOU Hui,LIU Peng,HUANG Liang, et al. Planning of electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(Supplement 1):133-144.
- [20] 降国俊,崔双喜,樊小朝,等.考虑电转氢气过程及综合需求响应的电-氢-气综合能源系统协调优化运行[J].可再生能源, 2021,39(1):88-94.

JIANG Guojun, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Electrichydrogen-gas integrated energy system considering E2H conversion process and comprehensive demand response coordination and optimization of operation[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1):88-94.

- [21] PU Yuchen, LI Qi, ZOU Xueli, et al. Optimal sizing for an integrated energy system considering degradation and seasonal hydrogen storage[J]. Applied Energy, 2021, 302:117542.
- [22] 仪忠凯,李志民. 计及热网储热和供热区域热惯性的热电联合 调度策略[J]. 电网技术,2018,42(5):1378-1384.
 YI Zhongkai, LI Zhimin. Combined heat and power dispatching strategy considering heat storage characteristics of heating network and thermal inertia in heating area [J]. Power System Technology,2018,42(5):1378-1384.
- [23] ISO. Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria(ISO 7730:2005):UNE-EN ISO 7730-2006[S]. Geneva, Switzerland:ISO,2006.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化 管理委员会.城镇供热服务:GB/T 33833—2017[S].北京: 中国国家标准化管理委员会,2017.
- [25] 阳洋,李奇,蒲雨辰,等.考虑电动汽车充电方式的热-电-氢耦 合孤岛综合能源系统优化配置[J].电网技术,2022,46(10); 3869-3880.
 YANG Yang, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of CHHP island IES considering different charging modes of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2022, 46(10);

作者简介:

3869-3880.

罗舒钰(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为综合 能源系统优化调度、碳交易等(E-mail:Luoshuyu@my.swjtu. edu.cn);

李 奇(1984—),男,教授,博士研究生导师,主要研究 方向为轨道交通新能源技术、综合能源系统运行与控制等 (E-mail:liqi0800@163.com)。

(编辑 任思思)

Community integrated energy system optimal scheduling considering differentiated power-heat-hydrogen incentive based demand response

LUO Shuyu, LI Qi, YANG Yang, PU Yuchen

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The demand response model for power load based on stepped compensation price, demand response model for heat load based on the predicted mean vote to quantify human comfort, and demand response model for electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles based on unified dispatch of smart parking lots are established. On this basis, taking the community integrated heat-power-hydrogen energy system as the research object, and considering system operation and maintenance aging, incentive compensation, and wind and light abandonment costs, the optimal dispatching strategy is obtained through mixed integer linear programming solution. Taking the actual data of an eastern coastal city as an example, the effectiveness of the proposed method is verified. The simulative results show that the proposed method can fully exploit the regulation potential of demand-side resources, and has obvious advantages in scheduling flexibility and economy.

Key words: community integrated energy system; differentiated incentive demand response; integrated demand response; multi-energy coupling; demand-side resources 附录 A

$$\begin{cases} 0 \le P_{j}(t) \le n_{j} \quad j \subset \mathcal{Q}_{pv}, \mathcal{Q}_{wind}, \mathcal{Q}_{el}, \mathcal{Q}_{fc}, \mathcal{Q}_{bo} \\ -\chi_{bat}C_{bat} \le P_{bat}(t) \le \chi_{bat}C_{bat} \\ -\chi_{hs}C_{hs} \le H_{hs}(t) \le \chi_{hs}C_{hs} \end{cases}$$
(A1)

式中: P_{bat}(t)、P_{hs}(t)分别为蓄电池和蓄热槽的输出功率; n_j为设备 j 对应最大装机容量; C_{bat}、C_{hs}分别为蓄电池、蓄热槽的容量; χ_{bat}、χ_{hs}分别为蓄电池、蓄热槽的功率系数。

$$\begin{cases} S_{\min}^{\text{bint}} \leq S_{\text{bat}}(t) \leq S_{\max}^{\text{bax}} \\ S_{\min}^{\text{hs}} \leq S_{\text{hs}}(t) \leq S_{\max}^{\text{hs}} \\ S_{\min}^{\text{hc}} \leq S_{\text{hc}}(t) \leq S_{\max}^{\text{hc}} \end{cases}$$
(A2)

式中: $S_{\text{bat}}(t)$ 、 $S_{\text{hs}}(t)$ 、 $S_{\text{hc}}(t)$ 分别为蓄电池、蓄热槽、储氢罐在时刻 t的存储状态, $S_{\text{min}}^{\text{bat}}$ 、 $S_{\text{max}}^{\text{hs}}$

附录 B

Tab	ole B1 Outpu	it power of p	hotovoltaic a	array
山口		输出功	b率/kw	
厅写	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	6.447189	2.19277	0
8	0.752526	51.46088	33.53182	0.401453
9	28.67574	179.6176	135.4543	27.65429
10	123.328	281.601	229.3912	119.0305
11	237.9993	347.7998	289.0903	222.1256
12	330.3085	378.3703	314.5355	297.7608
13	384.6456	385.8129	318.9131	335.2437
14	319.9791	304.7146	282.0195	290.0985
15	384.023	380.2256	316.0363	304.324
16	328.223	363.0588	305.1227	238.8918
17	148.337	210.2773	193.2929	111.8809
18	121.0066	241.3159	201.4202	45.31523
19	27.23094	134.1197	105.877	2.27525
20	0.157296	35.19512	26.69807	0
21	0	0.960208	0.842642	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

表 B1 光伏阵列输出功率 Table B1 Output power of photovoltaic arr

	表 B2	风力发电机	諭出功率	
	Table B2 C	utput power	of wind turbi	ne
皮早		输出功	b率/kw	
C' T	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度
1	241.4	241.4	241.4	202.8246
2	241.4	241.4	241.4	187.4594
3	241.4	241.4	241.4	169.8368
4	241.4	241.4	241.4	154.6674
5	51.06363	86.711	46.80935	32.0066
6	41.26827	79.38735	51.19182	28.17897
7	31.47569	75.19771	56.73424	24.60489
8	20.97507	37.97701	39.33526	17.86402
9	27.53991	61.33784	41.12295	19.08766
10	36.1087	93.35846	44.18969	20.13965
11	45.39538	137.5913	45.92494	21.46396
12	57.06965	193.45	47.90562	21.99758
13	71.52593	241.4	51.40205	22.35818
14	87.31561	241.4	53.75273	22.96792
15	158.2784	241.4	120.8466	67.5916
16	241.4	241.4	232.8442	150.1059
17	241.4	241.4	241.4	241.4
18	241.4	241.4	241.4	241.4
19	241.4	241.4	241.4	241.4
20	241.4	241.4	241.4	241.4
21	241.4	241.4	241.4	241.4
22	241.4	241.4	241.4	236.3194
23	241.4	241.4	241.4	220.1156
24	241.4	241.4	241.4	208.9301

	Table B3 F	Power load d	lemand	
卢 旦		负荷功]率/kW	
厅与	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度
1	59.79	96.26	144.41	68.09
2	50.2	77.05	115.5	55.61
3	45.01	66.01	98.47	48.7
4	44.38	61.54	88.77	46.88
5	44.76	59.41	83.36	46.64
6	49.89	62.81	83.83	51.29
7	63.38	73.45	92.3	65.73
8	86.78	115.73	143.09	91.09
9	93.5	143.47	195.38	104.69
10	85.47	158.23	228.79	102.42
11	87.75	178.2	265.25	110.61
12	88.17	191.62	292.93	115.06
13	84.91	194.63	304.81	114.44
14	82.43	193.17	307.82	113.24
15	81.31	199.46	320.95	114.29
16	88.33	199.25	325.61	120.64
17	113.68	213.86	339.87	144.94
18	156.32	240.37	359.44	185.53
19	175.05	241.27	347.86	198.05
20	164.03	214.44	298.61	182.01
21	158.64	244.88	311.36	177.63
22	142.73	226.69	296.77	160.38
23	111.99	176.3	237.55	126.25
24	85.94	135.64	190.12	97.1

表 B3 电负荷需求

_		Table B4	Heat load	d demand	
	皮旦		负荷功率/kw		
	厅 5	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度
-	1	95.21488	46.93543	34.48376	80.49551
	2	96.95368	48.30042	35.79005	84.86863
	3	98.21536	49.25053	36.67972	85.25708
	4	98.55159	49.45322	36.83635	85.02527
	5	97.51727	48.56012	35.92162	83.93512
	6	95.13162	46.59656	33.93555	82.6946
	7	91.48429	43.91408	31.47332	80.80877
	8	85.60821	39.1952	26.90598	77.3817
	9	78.83551	33.78274	21.66512	70.98805
	10	71.13096	27.6292	15.7069	63.9898
	11	63.91315	21.83986	10.0682	57.32987
	12	58.52702	17.49152	5.861111	51.83841
	13	54.87968	14.59369	3.069957	47.49975
	14	53.53155	13.51373	2.0174	44.64907
	15	54.87968	14.59369	3.069957	45.11583
	16	58.04988	17.11465	5.532187	46.77298
	17	63.01653	21.11461	9.3665	49.5798
	18	68.88941	25.81132	13.94011	55.03993
	19	75.31627	31.01159	19.22169	60.80707
	20	80.20286	34.92287	22.9213	65.5749
	21	84.67956	38.43511	26.25439	67.96821
	22	88.30448	41.30444	29.02988	69.83211
	23	91.03277	43.47703	31.14753	71.18853
_	24	93.29354	45.30441	32.96131	76.00648
	-				

表 B4 热负荷需求

附录 C

	Table C1 F	Parameter settings	
参数	参数值	参数	参数值
$C_{\rm el}/[\Psi \cdot (kW)^{-1}]$	9000	$\sigma_{el}/[{\boldsymbol{\Psi}}\cdot({\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{W}})^{-1}]$	9.5
$C_{\rm fc}/[\Psi \cdot (kW)^{-1}]$	10000	$\sigma_{fc}/[{\bf Y}\cdot({\bf k}W)^{-1}]$	5.4
$C_{bo}/[{\bf Y} \cdot (kW)^{-1}]$	1000	$\sigma_{bo}\!/[{\bf Y}\!\cdot({\bf k}W)^{-\!1}]$	0.56
$C_{\text{bat}}/[\Psi \cdot (\mathbf{kW} \mathbf{h})^{-1}]$	1000	$\sigma_{H}/[{\boldsymbol{\Psi}}\cdot(Nm)^{-3}]$	0.297
$C_{hs}/[\underbrace{\Psi} (kW h)^{-1}]$	1500	$\sigma_{pv/wi}/[{\bf Y}\cdot(kW)^{-1}]$	0.6

表 C1 参数设置 Table C1 Parameter setting

表 C2 阶梯分段补偿系数

Table C2 Stepp	ed segment	compensation	factor
----------------	------------	--------------	--------

阶段	补偿系数
1 (10%)	2.0
2 (15%)	2.5
3 (20%)	3.2
4 (25%)	4.0
5 (30%)	5.0

附录 D















Fig.D5 Energy storage state under scheme of joint IDR