

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.016

基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制

张亮¹, 李章溢¹, 裴玮², 肖浩², 孙瑞¹, 黄骏¹, 李雪峰¹

(1. 欣旺达电子股份有限公司, 广东 深圳 518108; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要:为平抑可再生能源系统所引起的联络线功率波动, 工业园区通常采取整合园区内部所有源荷设备进行统一集中管理或基于电力需求响应的简单源荷互动运行模式, 未能充分挖掘园区多能负荷综合需求响应的潜力。在分析工业园区用能特点的基础上, 文中提出了一种基于综合需求响应的联络线功率控制方法, 建立了园区与生产任务相关的储能、空调负荷以及电动汽车的综合需求响应特性模型, 并通过激励多元用户进行需求响应以平抑功率的波动, 有效实现了兼顾综合运行成本及跟踪控制误差的联络线功率控制。结合南方某蓄电池生产工业园区进行算例分析, 结果表明该方法能降低园区经济损失, 使内部负荷用户受益, 并确保对联络线功率计划的有效跟踪。

关键词:工业园区; 综合能源系统; 联络线控制; 综合需求响应; 序列二次规划

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)03-0106-08

0 引言

工业园区具备多样的分布式能源和可控资源, 具备良好的调控灵活性, 在辅助服务及需求响应实施等方面具备优势^[1-6]。为进一步提升工业园区的需求辅助服务, 与上级电网之间的精确联络线功率控制是关键。然而, 工业园区中可再生能源种类多、随机波动大, 多种能源之间相互耦合转换不确定, 负荷需求也受制于生产任务而呈现强随机性, 这些特性使得工业园区在联络线功率控制方面面临极大的挑战。

目前, 针对含多种能源集成的综合能源系统联络线功率控制, 已有多项相关研究被报导。文献[7]采用模型预测控制(model predictive control, MPC)技术将联络线功率控制问题转化为非线性二次规划模型求解, 提高了微网新能源发电功率消纳, 且降低了联络线控制误差; 文献[8]提出一种基于MPC的滚动优化联络线控制策略, 在消除微电网中不确定因素的影响同时, 实现精准的联络线计划跟踪; 文献[9-11]提出一种聚合商通过控制潜在响应资源参与电力市场调控的需求响应策略。综上所述, 在传统联络线控制中, 通常采取集中整合能源系统内部所有机组和储能设备进行统一调控的传统控制方式, 难以兼顾多主体间的利益需求。

有鉴于此, 相关文献也提出了基于博弈论或者需求响应互动的方式来实现负荷参与下的联络线控制。文献[12]建立了基于两阶段随机规划的微电网市场互动模型, 在不影响用户用能体验的情况

下, 实现了微电网联络线功率波动平抑; 文献[13]提出多时间尺度的楼宇虚拟储能系统和电动汽车优化调度模型, 实现基于电动汽车负荷和虚拟储能的联络线功率波动平抑; 文献[14]提出基于任务延时机制的服务器集群负荷需求响应模型, 通过互动方式调整服务器集群负荷来有效平抑数据中心园区联络线功率波动。然而, 上述文献的联络线控制中也存在一些不足。在控制对象方面, 这些文献仅考虑电力需求响应, 未考虑多种能源综合需求响应的耦合转换及联合调控潜力; 在控制方式方面, 所采用的激励响应措施也较为单一, 而工业园区能源设备形式的多样化、不同可控需求响应单元的调度成本差异性较大, 很难通过简单单一的需求响应控制方式对各类用户制定统一规范的需求响应激励措施、补偿标准来响应调节。

文中提出一种基于差异化综合需求响应的工业园区联络线功率控制方法。该方法采用差异化的激励型需求侧响应功率控制方法, 突破原有园区统一管理、成本被动分摊的运行模式, 充分调动内部多元可控单元主动参与园区的功率调控, 有效协调兼顾园区各方的经济利益。同时, 通过差异化的激励方案, 将综合需求响应的负荷用户与园区自建的备用机组相互配合, 保障在维持园区功率平衡的前提下, 实现对联络线计划的高效控制。

1 基于综合激励型需求响应的工业园区联络线功率控制架构

在传统工业园区的系统联络线功率控制中, 园区调控中心通常采取外网购电后出售给内部负荷用户的供能方式。外网购电供能方式配合园区内

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-12-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903400)

部自建的微燃机、光伏等分布式能源单元,可维持园区内部的多能源供需平衡^[15-16]。在实际运行过程中,若园区综合能源系统出现较大的实时功率缺额且备用机组容量不足,那么园区调度中心须向上级配电网以较高的“惩罚价格”购买临时电力,这将带来高额的经济损失。为尽量避免违背联络线功率计划而带来的高额临时购电费用,文中提出一种基于激励型综合需求响应的联络线功率控制框架。

园区调度中心一方面通过调控内部可调度机组及配合外购电进行实时功率平衡,另一方面可向内部多元负荷用户提出差异化的综合需求响应激励计划,鼓励负荷用户在功率不平衡时将用电量降低到一定水平,在实现对联络线功率序列的有效跟踪的同时,降低园区费用支出。由于需求响应激励金额通常小于临时购电价格,因此园区方将有希望降低经济损失成本,同时负荷用户在不影响其用能需求的前提下,通过转移或削减负荷,获得一定的补偿,实现园区与用户的双赢。

2 园区多元用户综合需求响应特性建模

2.1 企业储能用户

企业储能作为工业园区源荷间能量调控和平衡的关键枢纽,在满足日前调度计划的前提下,通常会预留一定的充放电区间。因此可充分利用其剩余备用容量,通过充放电的方式参与到用户激励方案中^[17]。

在参与功率调节过程中,由于储能设备获得的园区方激励金额通常远大于储能设备响应过程中的损耗费用,故将之忽略。在实时需求响应的过程中,储能设备响应后的功率变化量 ΔP_t^{ES} 与储能用户的单位功率的激励价格 $p_{r,t}^{\text{ES}}$ 及实时荷电状态(state of charge, SOC) 的偏差值有关,相互关系为:

$$\Delta P_t^{\text{ES}} = k_m p_{r,t}^{\text{ES}} \left(k_n + \frac{S_{\text{soc},t} - S_{\text{soc},0}}{S_{\text{soc},0}} \right) \quad (1)$$

式中: $S_{\text{soc},t}$ 为储能设备荷电状态实际值; $S_{\text{soc},0}$ 为储能设备荷电状态的前日调度结果; k_m, k_n 均为常数,决定着激励力度的大小,该系数应结合园区调度成本及负荷用户参与积极性等实际情况选定。由式(1)可知,只有当储能设备 SOC 与前日调度结果的差值在一定范围内时,储能设备才参与激励方案,并与单位功率的激励价格 $p_{r,t}^{\text{ES}}$ 呈现正相关关系。此时园区方所给予企业储能的激励金额为:

$$R_{\text{ES}} = \sum_{t=1}^T p_{r,t}^{\text{ES}} \Delta P_t^{\text{ES}} \quad (2)$$

式中: T 为总的联络线优化控制时段数。

储能设备在参与需求响应调节过程中,还需满足自身的运行约束限制^[9],主要包括充放电功率限幅约束、剩余容量约束等。

2.2 空调负荷用户

空调作为工业园区综合能源系统中负荷的重要组成部分,具备极大的需求响应调控潜力。通过响应用户激励方案,用户可调整空调温度设定值来有效降低空调耗电量,从而参与功率计划调控。空调负荷参与功率调节时的运行特性及响应潜力与房间的热平衡模型密切相关。

2.2.1 房间的热平衡模型

房间的热平衡模型指通过空气等天然介质对冷、热能量的存储来实现室温调节的过程。室温调节过程中热力平衡及其与温度之间的关系为:

$$c_A \rho_A V (T_t^{\text{in}} - T_{t-1}^{\text{in}}) = (M_t^{\text{gain}} - M_t^{\text{ac}}) \Delta t \quad (3)$$

$$M_t^{\text{gain}} = (U_{\text{OA}} A_S + c_A \rho_A V \zeta) (T_{t-1}^{\text{out}} - T_{t-1}^{\text{in}}) \quad (4)$$

式中: c_A, ρ_A 分别为空气比热容和空气密度; $T_{t-1}^{\text{in}}, T_{t-1}^{\text{out}}$ 分别为上一取样时刻的室内、室外温度; A_S, V 分别为房间的表面积、体积; $M_t^{\text{gain}}, M_t^{\text{ac}}$ 分别为当前时段总的热、冷负荷; ζ 为空气交换时间常数; U_{OA} 为房间与外部环境的传热系数。

为简化计算,通常可将模型中的常量化简,令: $U_{\text{OA}} A_S + c_A \rho_A V \zeta = k_1, c_A \rho_A V = k_2$, 式(3)和式(4)描述的房间热模型可表示为:

$$T_t^{\text{in}} = T_{t-1}^{\text{in}} + \left[\frac{k_1 (T_{t-1}^{\text{out}} - T_{t-1}^{\text{in}})}{k_2} - \frac{\eta_{\text{ac}} P_{\text{ac},t}}{k_2} \right] \Delta t \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{ac}} P_{\text{ac},t} = M_t^{\text{ac}}$; $P_{\text{ac},t}$ 为 t 时段空调设备所消耗的电功率; η_{ac} 为空调系统的制冷效率。

在室温调节系统运行功率的前提下,还需满足房间的温度约束范围:

$$T_{\text{min}}^{\text{in}} \leq T_t^{\text{in}} \leq T_{\text{max}}^{\text{in}} \quad (6)$$

式中: $T_{\text{max}}^{\text{in}}, T_{\text{min}}^{\text{in}}$ 分别为满足人体舒适度前提的室内温度上、下限。

2.2.2 空调负荷用户响应特性

假设空调负荷用户在进行需求响应的过程中牺牲的仅是自身舒适度,而无需付出其他代价。因此空调负荷对激励方案的响应功率与激励价格之间存在线性关系:

$$\Delta P_t^{\text{ac}} = k_{\text{ac}} p_{r,t}^{\text{ac}} P_{\text{ac},t} \quad (7)$$

式中: ΔP_t^{ac} 为空调负荷用户需求响应的功率调节量; k_{ac} 为一个非负常数,代表空调负荷用户对激励方案反应的敏感度,与天气状况等不断变化的因素密切相关; $P_{\text{ac},t}$ 为 t 时段空调设备所消耗的电功率; $p_{r,t}^{\text{ac}}$ 为园区给予空调负荷用户的单位功率的激励价格。空调负荷用户所使用的电力减少量与当前空

调设备工作功率以及激励价格有关。此时,园区方所给予空调负荷用户的激励金额为:

$$R_{ac} = \sum_{t=1}^T P_{r,t}^{ac} \Delta P_t^{ac} \quad (8)$$

式中: R_{ac} 为园区方所给予空调负荷用户的激励金额。

2.3 电动汽车负荷用户

电动汽车用户通过规划合理的充电时段及制定有效的电动汽车入网(vehicle-to-grid, V2G)计划,具备良好的负荷需求响应潜力。为了保证电动汽车在充电结束时刻的荷电状态满足用户的驾驶需求,电动汽车参与系统功率调控时的响应功率应与时间、SOC 状态及分配给电动汽车用户的调控任务量有关,因此电动汽车电池组响应功率受多重参数影响,可表示为:

$$\Delta P_t^{veh} = \begin{cases} 0 & 0 \leq S_{veh,t} \leq S_{veh}^{min} \\ P_0 \frac{(1 - S_{veh}^{set})(T_{last} - t)}{(1 - S_{veh,t})T_{set}} & S_{veh}^{min} \leq S_{veh,t} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔP_t^{veh} 为 t 时段电动汽车参与系统功率调控时的响应功率; P_0 为电动汽车额定放电功率; $S_{veh,t}$ 为 t 时段电动汽车电池组对应 SOC 值; S_{veh}^{min} 为电动汽车进行放电操作的最低 SOC 值,当低于该值时,电动汽车仅进行充电操作; S_{veh}^{set} 为电动汽车电池组由恒流充电切换为恒压充电的转换 SOC 值; T_{last} 为电动汽车结束充电的时刻; T_{set} 为用户设定的充电结束时刻。 $(1 - S_{veh}^{set})/(1 - S_{veh,t})$ 表明电动汽车当前电池 SOC 越大,即 $S_{veh,t}$ 越接近于最大值 1 时,其参与调控的放电能力就越强; $(T_{last} - t)/T_{set}$ 表明当前时刻越接近用户所设定的充电结束时刻,电动汽车参与功率调节的潜力越小。电动汽车电池响应特性与自身 SOC 值的关系如图 1 所示,其中 S_{done} 代表电动汽车电池充电完成时的最低 SOC 值。

对于多台电动汽车联合响应功率,可根据当前 t 时段各电动汽车电池组 SOC 值,代入式(9)计算各个电池组的放电能力,按照大小排序,并通过分布式协同方式,调度前 i 个电动汽车的参与功率,即可满足实际调度过程中的响应功率需求。

电动汽车在参与响应过程中,也会导致电池寿命损耗,损耗成本模型为:

$$C_{veh,t} = \frac{Q}{E_{bat}^{veh}} C_{veh,bat} = \beta \sum_{k=1}^{L_i} g(\Delta P_{t,k}^{veh}) \quad (10)$$

式中: $C_{veh,t}$ 为 t 时段电动汽车电池放电的损耗成本; $Q = g(\Delta P_{t,k}^{veh})$ 为电动汽车电池容量衰减与放电量的函数关系; $\Delta P_{t,k}^{veh}$ 为 t 时段内第 k 次放电事件对

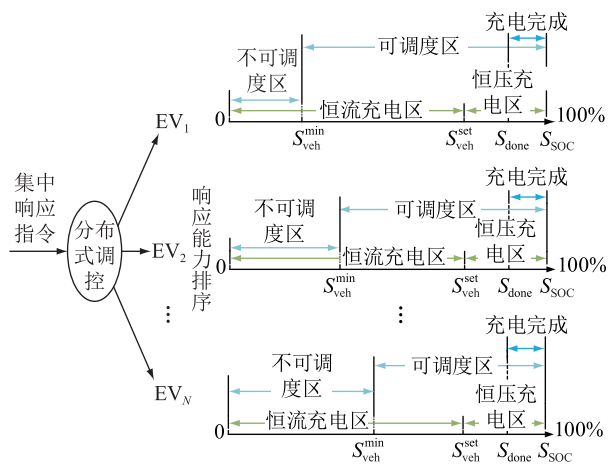


图 1 电池充放电状态与 SOC 的关系

Fig.1 Relationship between charging and discharging state of battery and SOC

应的放电功率; L_i 为 t 时段内总的放电事件数; E_{bat}^{veh} 为电动汽车电池组额定容量; $C_{veh,bat}$ 为电动汽车电池组的更换成本; $\beta = C_{veh,bat}/E_{bat}^{veh}$, 为一个常数。

由于工业园区工作时间相对固定,因此电动汽车的可控响应区间相对稳定。园区调度中心给予电动汽车的最终补偿成本可根据其参与功率调控后的损耗成本确定,可被表述为:

$$R_{veh} = \sum_{t=1}^T k_{veh} C_{veh,t} \quad (11)$$

式中: R_{veh} 为园区调度中心给予电动汽车用户的补偿成本; k_{veh} 为园区对电动汽车负荷用户所给出的激励方案的激励系数,与给予电动汽车用户的激励价格 $P_{r,t}^{veh}$ 密切相关,直接影响电动汽车负荷用户参与激励型需求响应(demand response, DR)的积极性。

3 综合激励需求响应机制下的工业园区联络线功率优化控制模型

由于园区内可再生能源系统的功率波动及负荷预测误差将导致联络线功率波动,当预测误差导致联络线功率超出计划值时,园区调度中心将被迫购买电力以维持功率平衡。此时,园区方会遭受亏损,将其定义为不含激励时的初始亏损成本:

$$L_{ini,t} = p_{e,t} P_{wave,t} \quad P_{wave,t} \geq 0 \quad (12)$$

$$P_{wave,t} = \varepsilon_{wind,t} + \varepsilon_{pv,t} + \varepsilon_{load,t} \quad (13)$$

式中: $L_{ini,t}$ 为园区方在 t 时段因功率波动而产生的亏损数额; $p_{e,t}$ 为功率波动时园区向配电网临时购电的电价; $P_{wave,t}$ 为园区的功率波动值; $\varepsilon_{wind,t}$, $\varepsilon_{pv,t}$, $\varepsilon_{load,t}$ 分别为风电、光伏功率波动、用户负荷预测误差总和。

为了降低损失,园区调度中心可针对多元负荷引入负荷激励计划,鼓励负荷用户减少电力需求,

并向参与负荷调整的用户支付激励价格。此时园区新的经济损失总额可表示如下:

$$\begin{cases} L_t = p_{e,t}(P_{\text{wave},t} - \Delta P_{\text{LOAD},t}) + \mathbf{p}_{r,t} \Delta \mathbf{P}_{\text{load},t} \\ P_{\text{wave},t} \geq 0 \\ \mathbf{p}_{r,t} = [p_{r,t}^{\text{ES}} \quad p_{r,t}^{\text{ac}} \quad p_{r,t}^{\text{veh}}] \\ \Delta \mathbf{P}_{\text{load},t} = [\Delta P_t^{\text{ES}} \quad \Delta P_t^{\text{ac}} \quad \Delta P_t^{\text{veh}}]^T \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{p}_{r,t}$ 为园区调度中心分别对企业储能、空调用户以及电动汽车用户给予的激励价格所构成的向量; $\Delta P_{\text{LOAD},t}$ 为 $\Delta \mathbf{P}_{\text{load},t}$ 向量集的元素求和; $\Delta \mathbf{P}_{\text{load},t}$ 为多元用户负荷调整量构成的向量集。园区调度中心实施激励计划后新的经济损失由两部分组成,第一部分 $p_{e,t}(P_{\text{wave},t} - \Delta P_{\text{LOAD},t})$ 为园区因分布式能源功率波动而向配电网临时购电的金额,第二部分 $\mathbf{p}_{r,t} \Delta \mathbf{P}_{\text{load},t}$ 为园区对参与功率调整的用户减少的用电量对应的激励金额。

综上,园区调度中心运行优化的目标是期望调整奖励价格 $p_{r,t}$, 激励负荷用户做出反应, 最终使园区方的总经济损失最小化且确保联络线功率符合日前计划值。最终控制目标可描述为:

$$\min R_t = \min_{p_{r,t}} \{ p_{e,t}(P_{\text{wave},t} - \Delta P_{\text{LOAD},t}) + \mathbf{p}_{r,t} \Delta \mathbf{P}_{\text{load},t} + \lambda |P_{\text{grid},t} - P_{\text{tp},t}| \} \quad P_{\text{wave},t} \geq 0 \quad (15)$$

式中: R_t 为园区调度中心在 t 时段的运行优化总目标; λ 为园区联络线计划单位功率的惩罚费用; $P_{\text{grid},t}$, $P_{\text{tp},t}$ 分别为实时联络线功率值以及联络线功率日前计划值。

同时工业园区联络线功率控制中还需满足系统功率平衡约束、联络线交换功率约束等以及式(1)~式(14)所述的各类可调控资源的运行约束等运行限制条件。系统功率平衡约束、联络线交换功率约束表示为:

$$\sum_{m=1}^{N_m} P_{\text{MT},t,m} + P_{\text{pv},t} + P_{\text{wt},t} + P_{\text{es},t} + P_{\text{grid},t} = P_{\text{load},t} \quad (16)$$

$$P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{grid},t} \leq P_{\text{grid},\max} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{load},t}$ 为工业园区综合能源系统内部包括生产负荷、生活用能负荷以及电动汽车充电负荷等在内的各类负荷总和; $P_{\text{MT},t,m}$, $P_{\text{pv},t}$, $P_{\text{wt},t}$, $P_{\text{es},t}$ 分别为园区微型燃气轮机、光伏、风电以及储能的实时出力功率; N_m 为园区内微型燃气轮机的总台数; $P_{\text{grid},\min}$, $P_{\text{grid},\max}$ 分别为园区与配电网之间的联络线交换功率的最小和最大限幅值。

4 模型求解

文中建立的优化模型为典型的最优化问题,即

园区调度中心需要通过改变激励价格,影响各类负荷用户的功率响应积极性,最终获取园区经济损失最低的运行方案。对于此问题,可抽象为优化问题。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \\ g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f(x)$ 为优化目标函数,计算如式(15)所示; $h_i(x)$ 为等式约束,代指功率平衡约束和各类调节资源耦合关系等式约束等; $g_j(x)$ 为不等式约束函数,代指机组运行约束、储能充放电约束以及联络线传输功率容量约束等。

文中采用序列二次规划 (sequential quadratic programming, SQP) 算法求解,以确定使经济损失最小的最优激励价格。SQP 算法是一种用于求解中小规模且包含约束的光滑非线性问题的有效方法,其主要原理是利用一系列线性规划或二次规划来逐次逼近原非线性规划问题。SQP 算法具有很好的全局收敛性,并具有超线性的收敛速度,能有效支撑文中模型的求解。基于 SQP 算法的模型求解流程如图 2 所示。

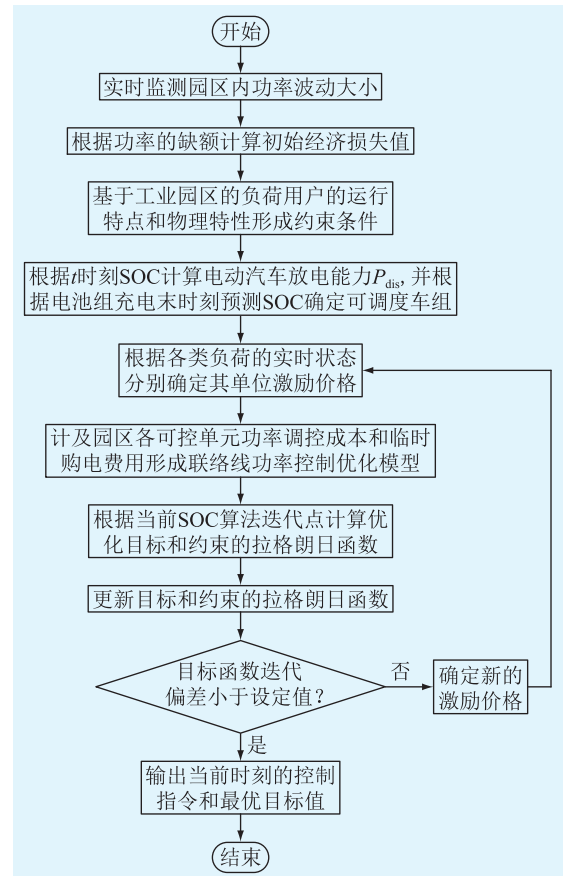


图 2 基于综合需求响应的联络线功率控制算法流程
Fig.2 Flow chart of tie-line power control algorithm based on integrated demand response

5 算例分析

5.1 算例参数

以广东某蓄电池产业工业园区为例,对提出联络线功率跟踪控制方法进行验证。其中,园区内部的储能设备包括 250 kW·h 的蓄电池系统;30 kW 的空压机和制冷;制冰功率分别为 40 kW,25 kW 的冰蓄冷系统;供热系统包括 1 台 600 kW 的微燃机电联产系统和 1 台 300 kW 的锅炉;可再生能源方面包括 30 kW 的光伏发电系统和 40 kW 的风电机组。可转移负荷包括 12 台额定充电功率为 10 kW 的电动汽车充电负荷。园区厂房的热模型参数如表 1 所示。微燃机、储能系统、电动汽车的运行参数以及各需求负荷的激励补偿系数的参数值如表 2 所示,各可控单元的调控成本特性如图 3 所示。

表 1 园区厂房的热模型参数

Table 1 Thermal model parameters of industrial park

参数	数值
$c_A / [kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	1.005
$\rho_A / (kg \cdot m^{-3})$	1.205
V / m^3	75
A_S / m^2	25
$U_{0A} / (W \cdot m^{-2})$	3.6
$\zeta / (h^{-1})$	0.5

表 2 设备运行参数

Table 2 Equipment operating parameters

参数	数值
$k_m, k_n, k_{ac}, k_{veh}$	0.9, 0.7, 0.5, 0.4
储能最大充、放电功率 $P_{ch, max}, P_{dis, max} / kW$	24, -24
储能荷电状态最大、最小值 $S_{B, max}, S_{B, min}$	0.9, 0.1
$T_{max}^{in}, T_{min}^{in} / ^\circ C$	30, 24
$S_{veh}^{min}, S_{veh}^{set}, S_{done}$	0.2, 0.8, 0.9
$C_{veh, bat} / 元$	54 000

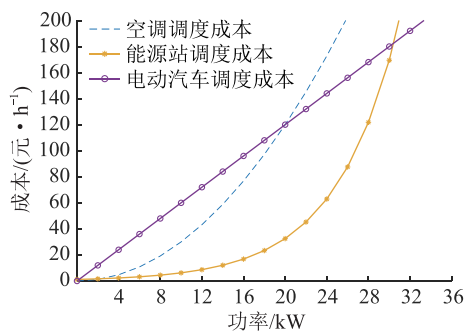


图 3 各可控单元调度成本特性

Fig.3 Scheduling cost characteristics of each controllable unit

由图 3 可见,电动汽车的调度成本特性基本呈

线性关系,而能源站及空调负荷的调度成本特性则呈现指数函数关系,其调度成本随能源站出力和负荷需求响应功率的增长而逐渐趋于饱和。

5.2 与传统方案的经济效益对比分析

首先,为了验证文中提出的基于激励型综合需求响应的联络线功率控制方案的有效性,对比分析不含激励响应的传统集中管控方案与文中方案的经济性。两种方案的运行成本及内部各类负荷用户的经济效益对比分别如表 3、表 4 所示,两种方案的日运行逐时累积成本对比如图 4 所示。

表 3 工业园区响应前后经济性对比

Table 3 Economic comparison of industrial parks before and after the response

	平均激励价格/[元·(kW·h) ⁻¹]	运行成本/元
响应前	0	3 357.2
响应后	0.4	2 489.1

表 4 各类负荷用户的响应收益

Table 4 Revenue to various load users after response

负荷类型	响应成本/元	响应收益/元
能源站	784.2	0
临时购电	524.6	0
储能用户	0	541.7
空调负荷用户	0	327.4
电动汽车用户	0	311.2

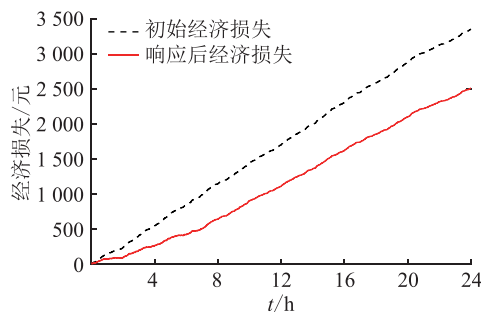


图 4 工业园区综合能源系统经济效益对比

Fig.4 Economic benefit comparison of integrated energy system in industrial park

由表 3 和表 4 可知,园区的初始经济损失成本主要是临时购电的惩罚费用,经过内部负荷需求响应后,园区的经济损失则主要包括临时购电费用、各能源站运行成本支出以及各类储能、负荷的补偿费用。虽然增加了能源站运行成本支出和各类负荷用户的补偿费用等支出,但响应后的临时购电费用较响应前大幅降低,总体经济损失较之前仍有降低。由图 4 可知,通过实施激励型综合需求响应后,园区经济损失得到有效降低,运行经济效益得到大幅提高。

5.3 负荷用户对奖励方案的响应特性分析

图 5 进一步给出了在综合激励型需求响应控制模式下园区各可控单元的日内功率出力情况。

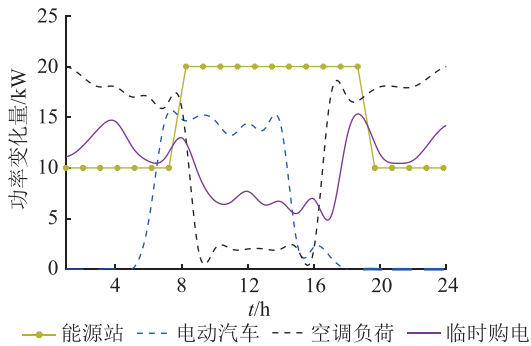


图 5 各可控单元功率变化量

Fig.5 Power variation of each controllable unit

由图可知,在电价高峰时段(10:00—16:00),园区的功率平衡主要依靠可控机组;在电价低峰时段,临时购电的价格较低,0.291 元/(kW·h)的实时谷电价甚至低于园区方给与各类机组削减或转移负荷的激励价格。在电价低峰时段,部分功率缺额可通过临时向配电网购电来补充。

电动汽车可控单元主要在上班期间接入电网参与功率响应。由于其补偿价格较低,因此具有较高的调度优先级。在 06:00—16:00 期间,电动汽车充电功率削减量一直维持在 15 kW 左右,但临近充电结束时,为保证其充电任务的按时完成,其可调度能力迅速下降。空调负荷在日前调度阶段的计划出力主要集中在电价低谷时段(16:00—09:00),空调负荷的功率削减量则主要分布在 15~20 kW 之间。能源站由于其启动成本较高,不适合频繁的开启,因此功率变化曲线较平稳,在电价高峰期(09:00—17:00)出力较多,基本运行在最大运行功率 20 kW 处。

图 6 给出了日内阶段储能用户进行需求响应后的蓄电池 SOC 及与日前经济调度结果的对比。

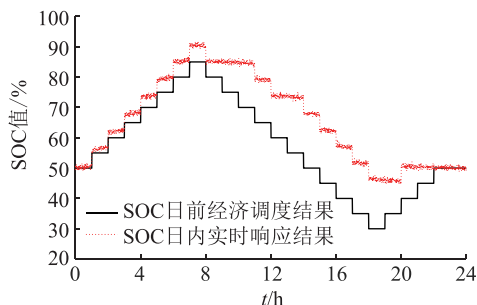


图 6 控制前后 SOC 值

Fig.6 Comparison of SOC value before and after control

由图 6 可知,通过对储能用户中蓄电池 SOC 裕量的充分利用,可有效调动其参与激励响应。蓄电池系统日内实际荷电状态较日前计划值的平均偏差约为 9.31%。在调度周期内首末时刻的 SOC 值基本跟踪了日前经济调度结果,有利于满足下一日调度计划的进行。

图 7 为日内阶段储能用户参与激励计划时的可充放电功率时序图。

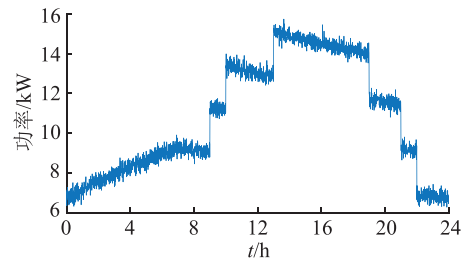


图 7 日内储能用户参与激励计划时的可充放电功率时序图

Fig.7 Time sequence power of charging and discharging for energy storage users participating in incentive plan in intraday operation

综合图 6 和图 7 可知,当储能用户实时 SOC 值大于日前调度 SOC 值,且差值越大时,储能用户参与激励计划时的可充放电功率越大,其参与激励计划的响应范围也越宽。此时,更有利于园区调度中心调动储能用户参与激励计划的积极性,进而充分利用激励方式减少园区因功率波动所造成的经济损失。

图 8 为空调负荷用户对园区调度中心所给予的不同激励价格下的功率响应曲线。

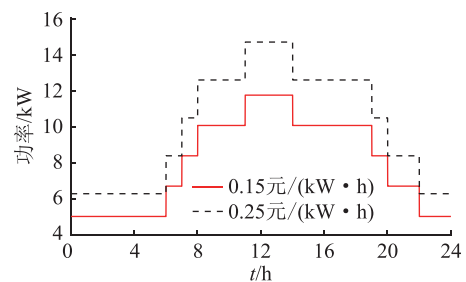


图 8 空调负荷用户在不同激励价格下的功率响应值

Fig.8 Power response of air conditioning load users under different incentive prices

由图 8 可知,在较大的激励价格下,空调负荷用户参与响应的日平均功率有较大提升,当激励价格从 0.15 元/(kW·h) 增长到 0.25 元/(kW·h) 时,其响应的日平均功率相应增长达约 32.61%。由于园区给予空调负荷用户的激励金额直接决定当前时刻空调负荷用户的功率削减量,在空调出力功率因爬坡约束带来的时段耦合下,将影响下一时刻用户

空调制冷系统的运行功率,进而影响空调负荷用户对园区给予奖励价格的响应积极性,由此也说明空调负荷用户的功率削减量与激励价格并不呈现线性关系。空调负荷用户的需求响应积极性需综合考虑激励价格及空调负荷的运行功率点来确定。

5.4 联络线功率控制结果分析

图9给出了通过激励型综合需求响应控制后的园区联络线功率曲线。

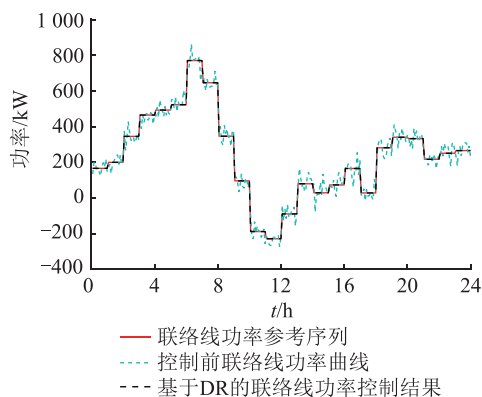


图9 联络线功率序列跟踪控制效果

Fig.9 Tie-line power sequence tracking control effect

由图9可知,园区内可控设备通过响应激励方案,调整其充放电功率,有效平抑了日内联络线功率波动。采用均方误差(mean squared error, MSE)统计施加控制方案后的平均跟踪误差为0.29%,有效实现了对日前联络线功率计划序列的跟踪。对文中所提出方法的计算时长进行统计来看,在 Intel (R) Core(TM) i5-5200 2.2-GHz 处理器、8-GB 内存, Matlab2018b 计算环境下,通过 tic 函数统计的联络线功率控制所需平均计算时间仅为 1.85 s 左右,可有效满足联络线功率控制的实时性需求。

6 结论

文中针对典型工业园区综合能源系统,提出一种基于激励型综合需求响应的联络线功率波动平抑控制方法,以典型的电池生产工业园区为例进行算例分析,结果表明:

(1) 所提方法在满足各可控单元运行约束的前提下,能有效跟踪日前联络线交换功率计划值,且可保证各类需求侧可转移、可削减负荷的运行需求。

(2) 所提方法可有效降低园区方因功率波动所引起的经济损失,负荷用户在保证自身电力需求和设备调节能力的前提下,可获得园区方所给予的激励金额,实现了用户与工业园区在利润上的双赢。

本文得到深圳市科技计划项目(JSGG2018050-7183525619)“分布式-储能电站联合运行调度管理

系统的关键技术研发”资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 贾楚蕴,李华强,高红均. 基于合同能源管理的园区能耗优化及多主体利益分配研究[J]. 智慧电力,2020,48(10):30-36,98.
JIA Chuyun, LI Huaqiang, GAO Hongjun. Research on energy optimization and benefit sharing among owners in industrial park based on energy management contract[J]. Smart Power, 2020, 48(10):30-36,98.
- [2] 朱君,孙强,冯蒙霜,等. 工业园区综合能源服务商业模式研究[J]. 电力需求侧管理,2020,22(2):67-71.
ZHU Jun, SUN Qiang, FENG Mengshuang, et al. Research on business model of integrated energy service in industrial Parks [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2):67-71.
- [3] 黄伟,刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J]. 电力系统自动化,2020,44(23):20-28.
HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station-network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23):20-28.
- [4] 杨莘博,谭忠富,林宏宇,等. 计及合作联盟的园区综合能源系统随机优化及收益分配模型[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):36-46.
YANG Shenbo, TAN Zhongfu, LIN Hongyu, et al. Stochastic optimization and income allocation model for park integrated energy system considering cooperation alliance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19):36-46.
- [5] 刘练,李林,丁明,等. 面向园区的光储型微电网设计与应用[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):171-179.
LIU Lian, LI Lin, DING Ming, et al. Design and application of photovoltaic and energy storage microgrid for the park [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3):171-179.
- [6] 朱青,曾利华,寇凤海,等. 考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储优化配置方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17):23-31.
ZHU Qing, ZENG Lihua, KOU Fenghai, et al. Research on optimal allocation method of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage in industrial Parks considering energy storage's grid-connected operation modes [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17):23-31.
- [7] 陈永椿,董萍,伍子东,等. 计及需求响应的微网现货市场运行策略[J]. 电网技术,2019,43(12):4558-4568.
CHEN Yongchun, DONG Ping, WU Zidong, et al. Microgrid operation strategy with demand response in spot electricity market [J]. Power System Technology, 2019, 43(12):4558-4568.
- [8] 肖海伟,孙久严,李章溢,等. 基于综合储能设备的工业园区联络线功率实时 MPC 控制方法[J]. 电力建设,2019,40(8):34-42.
XIAO Haiwei, SUN Jiuyan, LI Zhangyi, et al. Real-time MPC control method for tie-line power in industrial park considering integrated energy storage devices [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8):34-42.

- [9] 艾欣,陈政琦,孙英云,等. 基于需求响应的电-热-气耦合系统综合直接负荷控制协调优化研究[J]. 电网技术,2019,43(4):1160-1171.
AI Xin, CHEN Zhengqi, SUN Yingyun, et al. Study on integrated DLC coordination optimization of electric-thermal-gas coupling system considering demand response[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1160-1171.
- [10] 高赐威,李倩玉,李慧星,等. 基于负荷聚合商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [11] LI Y C, HONG S H. Real-time demand bidding for energy management in discrete manufacturing facilities [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 739-749.
- [12] 冯雷,蔡泽祥,王奕,等. 计及负荷储能特性的微网负荷协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 22-28.
FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Strategy for tie line power fluctuation suppressing of load-energy storage coordinated microgrid considering energy-storage characteristic of load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 22-28.
- [13] 杜丽佳,靳小龙,何伟,等. 考虑电动汽车和虚拟储能系统优化调度的楼宇微网联络线功率平滑控制方法[J]. 电力建设, 2019, 40(8): 26-33.
DU Lijia, JIN Xiaolong, HE Wei, et al. A tie-line power smoothing control method for an office building microgrid by scheduling thermal mass of the building and plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 26-33.
- [14] YANG T, ZHAO Y J, PEN H B, et al. Data center holistic demand response algorithm to smooth microgrid Tie-line power fluctuation[J]. Applied Energy, 2018, 231: 277-287.
- [15] 王祺,卢艳超,刘一江,等. 面向综合能源系统的投资评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 20-27.
WANG Qi, LU Yanchao, LIU Yijiang, et al. Investment evaluation method of integrated energy system[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 20-27.
- [16] 李毓,张增强,罗锐,等. 结合微电网运行方式的综合能源系统规划方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 40-46.
LI Yu, ZHANG Zengqiang, LUO Rui, et al. Integrated energy system planning method combined with microgrid operation mode[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 40-46.
- [17] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.

作者简介:



张亮

张亮(1984),男,硕士,工程师,从事新能源动力工程相关工作(E-mail: zhangl1214@126.com);

李章溢(1976),男,硕士,高级工程师,从事综合能源与储能技术研究与工作;

裴玮(1982),男,博士,研究员,从事分布式发电与微网、交直流配电网等相关工作。

Tie-line power control method for an industrial park based on integrated demand response

ZHANG Liang¹, LI Zhangyi¹, PEI Wei², XIAO Hao², SUN Rui¹, HUANG Jun¹, LI Xuefeng¹

(1. Sunwoda Electronic Co., Ltd., Shenzhen 518108, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to stabilize the power fluctuation of the tie line caused by renewable energy system, it usually adopts two kinds of operational modes in the industrial park. One is the integration of all source and load equipment in the park for unified and centralized management, and the other one is the simple interactive operation mode based on electricity demand response. These two operational modes do not tap comprehensively potentials of integrated demand response of multi-energy loads in the park. Based on a detailed analysis of the energy consumption characteristics in the industrial park, this paper proposes a tie-line power control method and establishes a model based on integrated demand response for production tasks, considering energy storage of park, air conditioning load and electric vehicles. The power fluctuation is stabilized by motivating users to respond to load demand, and the method of tie-line power control decreases effectively operating costs and tracking control errors. Taking a battery production industrial park in south China as an example, the results show that the proposed method reduces the economic loss of the park, benefits internal load users and ensures effective tracking of the tie-line power plan.

Keywords: industrial park; integrated energy system; tie-line power control; integrated demand response; sequential quadratic programming

(编辑 李栋)