

基于Stackelberg博弈的充换储一体化电站微电网 双层协调优化调度

程 杉^{1,2},倪凯旋^{1,2},赵孟雨^{1,2}

(1. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心,湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:针对电动汽车充换储一体化电站(CSSIS)与微电网所有权不同的微电网经济运行问题,建立基于Stackelberg博弈的双层优化调度模型。上层微电网作为领导者,以自身收益最大为目标函数,制定与下层CSSIS进行电能交易的内部电价;下层CSSIS作为跟随者,根据内部电价调整自身充、放电计划,以最大化自身收益。采用差分进化算法和Gurobi软件分别对上、下层优化问题进行求解,得到最优内部电价和CSSIS的最优充、放电计划。仿真算例表明,所提算法可以有效求解微电网与CSSIS交互的均衡策略,不仅能同时提高两者收益,还能更有效地利用CSSIS资源。

关键词:微电网;充换储一体化电站;Stackelberg博弈;内部电价;差分进化算法

中图分类号:TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006008

0 引言

截至2020年,纯电动汽车和插电式混合动力汽车的生产能力达到200万辆,累计产销量超过500万辆^[1]。作为促进新能源电动汽车发展的核心基础设施,充换电站BCSS(Battery Charging-Swapping Station)的规划、建设和运行备受关注。将BCSS中退役下来的动力电池作为储能电池,组成充换储一体化电站CSSIS(Charging-Swapping-Storage Integrated Station),不仅可以满足不同用户的需求,而且可以实现电池的梯次利用,充分利用动力电池的剩余价值^[2]。将CSSIS和可再生能源发电以及其他负荷组成一体化电站微电网ISMG(Integrated Station MicroGrid),将成为提高整体运行经济性和环境效益的最有效途径^[3]:可再生能源发电可降低电动汽车对化石燃料的依赖,实现真正意义上的低碳;电动汽车可协助解决可再生能源的间歇性问题,降低储能系统成本;微电网可实现电动汽车对可再生能源发电的就地消纳利用,降低二者单独接入电网造成的不良影响。

国内外学者在含换电站BSS(Battery Swapping Station)或者CSSIS的微电网经济运行方面进行了大量研究。文献[4]以微电网运行成本最小为目标,建立含BSS的微电网经济调度模型。文献[5]提出将BCSS与储能电站ESS(Energy Storage Station)设计成CSSIS的思想,但并未涉及将其与微电网进行结

合以实现两者优势互补。文献[6]采用遗传算法对含CSSIS的微电网经济调度问题进行求解,并利用滑动窗口法安排BCSS充电计划。上述文献大多是针对微电网和BSS或CSSIS同属一个利益主体,微电网可以直接完成对BSS或CSSIS的调度,并没有充分考虑到BSS或CSSIS的利益和参与意愿。文献[7]利用入侵杂草算法和CPLEX软件分别对属于不同利益主体的微电网和BSS双层优化问题进行求解,但其求解时间较长。

当涉及不同利益体之间的生产策略与价格制定时,Stackelberg博弈可以更快速地求解出各参与者的最优策略。Stackelberg博弈是一个分层决策问题,该博弈主要包含领导者和跟随者,领导者考虑自身利益做出决策,跟随者综合考虑自身利益与领导者决策做出相应的决策^[8]。目前,已有研究将Stackelberg博弈运用于电能生产者与消费者之间的交互过程中。文献[9]以运营商作为领导者、以用户作为跟随者,提出基于Stackelberg博弈的需求响应模型。文献[10]构建电网与用户之间电能交易的一主多从的Stackelberg博弈模型。文献[11]提出多主多从Stackelberg博弈的综合能源交易模型,并基于分布式算法求解多个分布式能源站和用户之间的均衡交互策略。考虑电动汽车的充电优化管理,文献[12]利用Stackelberg博弈分析电动汽车聚合商与电动汽车用户之间的交互过程,提高了电动汽车和分布式能源在参与电网能量交易中的经济收益。

上述文献主要考虑的是将微电网与BSS或者CSSIS结合以实现优势互补,运用Stackelberg博弈分析电能生产者与消费者之间的交互过程。但关于如何利用Stackelberg博弈分析属于不同利益主体的微

收稿日期:2019-11-17;修回日期:2020-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607105)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607105)

电网和 CSSIS 的交互过程、如何决策两者相应策略的相关研究较少。为此,本文建立 Stackelberg 博弈,通过分析 ISMG 中微电网与 CSSIS 之间的交互过程,求解出两者的均衡交互策略。首先,介绍基于 Stackelberg 博弈的双层优化调度思想,在此基础上建立相应的数学模型,并证明博弈均衡的存在性;然后,结合差分进化 DE(Differential Evolution)算法与 Gurobi 软件求解基于 Stackelberg 博弈的双层优化调度模型,得出博弈均衡;最后,基于算例和对比分析验证所提方法的有效性。

1 基于 Stackelberg 博弈的双层优化调度框架

CSSIS 的所有权和经营权不属于微电网,只能通过内部电价引导 CSSIS 参与微电网的优化运行。由于微电网和 CSSIS 属于不同的利益主体,他们均从自身角度出发,在满足各自运行约束的条件下,追求自身利益最大化。

基于 Stackelberg 博弈的双层优化调度框架如图 1 所示,上层微电网是 Stackelberg 博弈的领导者,与 CSSIS 和配电网进行能量和信息的交互,着重解决微电网经济优化运行问题。微电网控制器是提供全局信息的机构,负责收集光伏 PV(Photo Voltaic)、风机 WT(Wind Turbine)、柴油发电机 DG(Diesel Generator)、燃料电池 FC(Fuel Cell)、负荷出力,制定与下层 CSSIS 进行交互的内部电价。下层 CSSIS 是 Stackelberg 博弈的跟随者,其控制器根据上层下达的内部电价,在满足 CSSIS 运行约束的条件下对 CSSIS 充、放电行为进行优化,将获得的最优充、放电计划反馈给上层微电网控制器。上层微电网控制器根据反馈优化 DG、FC 出力,调整内部电价。上、下 2 层据

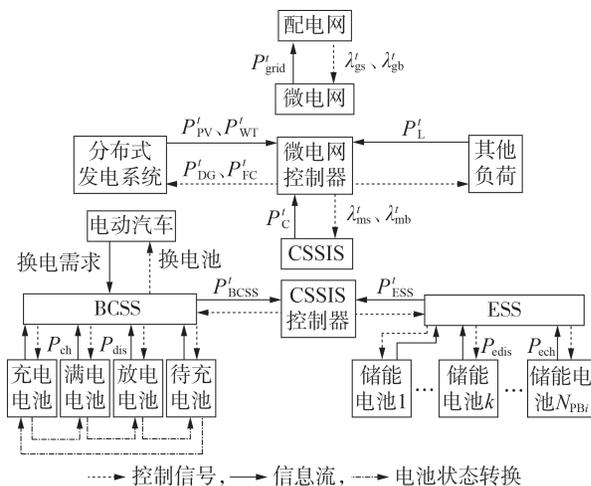


图 1 基于 Stackelberg 博弈的双层优化调度框架

Fig.1 Bi-level optimal scheduling framework based on Stackelberg game

此进行博弈,如此循环迭代至预先设定的 DE 算法的最大迭代次数,输出最终优化方案,实现微电网和 CSSIS 的互利共赢。

如上所述,上、下 2 层模型之间通过微电网所提供的内部电价及 CSSIS 反馈的充、放电功率进行联系,其中内部电价是自变量,CSSIS 充、放电功率则是因变量。

2 优化调度模型

2.1 上层微电网经济运行模型

微电网根据 CSSIS 和 PV、WT 出力值,优化 DG、FC 出力,调整内部电价,使自身收益达到最大。收益为售电收入 C_{Exch} 与发电成本 C_{cost} 之差,其表达式为:

$$\begin{aligned} \max U_{\text{MG}} &= C_{\text{Exch}} - C_{\text{cost}} \\ C_{\text{Exch}} &= \sum_{t=1}^T \left(-\lambda'_{\text{gb}} \min(P'_{\text{grid}}, 0) + \lambda'_{\text{ms}} \max(P'_c, 0) + \right. \\ &\quad \left. \lambda'_{\text{mb}} \min(P'_c, 0) - \lambda'_{\text{gs}} \max(P'_{\text{grid}}, 0) \right) \\ C_{\text{cost}} &= C(P_{\text{DG}}) + C(P_{\text{FC}}) \\ C(P_{\text{DG}}) &= \sum_{t=1}^T \left[a + bP'_{\text{DG}} + c(P'_{\text{DG}})^2 + k_{\text{DG}}P'_{\text{DG}} \right] \\ C(P_{\text{FC}}) &= \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{FC}} \frac{P'_{\text{FC}}}{L_{\text{HVFC}} \eta_{\text{FC}}} + k_{\text{FC}}P'_{\text{FC}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, T 为调度总时刻, $T=24$; λ'_{gs} 、 λ'_{gb} 分别为 t 时刻微电网从配电网购电和向配电网售电的电价; λ'_{mb} 、 λ'_{ms} 分别为 t 时刻微电网从 CSSIS 购电和向 CSSIS 售电的电价; P'_{grid} 和 P'_c 分别为 t 时刻微电网与配电网和 CSSIS 的交互功率, $P'_{\text{grid}} > 0$ 、 $P'_c > 0$ 分别表示微电网从配电网、CSSIS 从微电网购电,反之则表示售电; P'_{DG} 、 P'_{FC} 分别为 t 时刻 DG、FC 功率; $C(P_{\text{DG}})$ 、 $C(P_{\text{FC}})$ 分别为 DG、FC 发电成本; a 、 b 、 c 为 DG 耗量特性函数的参数; k_{DG} 为 DG 污染物排放成本和运行维护成本总的折算系数; C_{FC} 为 FC 采用的燃料气体单价; L_{HVFC} 为燃气的低热值; η_{FC} 为燃料电池效率; k_{FC} 为 FC 维护成本系数。

上层约束条件如下。

(1) 功率平衡约束。

$$P'_{\text{FC}} + P'_{\text{DG}} + P'_{\text{WT}} + P'_{\text{PV}} + P'_{\text{grid}} = P'_c + P'_L \quad (2)$$

其中, P'_{WT} 、 P'_{PV} 、 P'_L 分别为 t 时刻 WT、PV、负荷的功率。

(2) CSSIS 功率约束。

P'_c 为 BCSS 功率 P'_{BCSS} 和 ESS 功率 P'_{ESS} 之和,满足:

$$P'_c^{\min} \leq P'_c \leq P'_c^{\max} \quad (3)$$

其中, P'_c^{\min} 、 P'_c^{\max} 分别为 CSSIS 最小、最大功率。

(3) DG 出力约束。

$$P_{DG}^{\min} \leq P'_{DG} \leq P_{DG}^{\max} \quad (4)$$

$$R_{DG}^{\text{down}} \leq P'_{DG} - P_{DG}^{t-1} \leq R_{DG}^{\text{up}} \quad (5)$$

其中, P_{DG}^{\min} 、 P_{DG}^{\max} 分别为 DG 最小、最大出力; R_{DG}^{down} 、 R_{DG}^{up} 为 DG 爬坡约束。

(4) FC 出力约束。

$$P_{FC}^{\min} \leq P'_{FC} \leq P_{FC}^{\max} \quad (6)$$

$$R_{FC}^{\text{down}} \leq P'_{FC} - P_{FC}^{t-1} \leq R_{FC}^{\text{up}} \quad (7)$$

其中, P_{FC}^{\min} 、 P_{FC}^{\max} 分别为 FC 最小、最大出力; R_{FC}^{down} 、 R_{FC}^{up} 为 FC 爬坡约束。

(5) 电价约束。

为实现上、下 2 层之间的电能交互,需保证两者均可获利:对微电网而言,需使其实现上、下 2 层互动获得的利润比单独优化时高;对 CSSIS 而言,当其他条件相同时,需使其采用内部电价时的获利大于采用电网电价时的获利,或者使微电网给予的补偿大于因其参与微电网运行优化造成的损失。因此, λ'_{mb} 、 λ'_{ms} 应满足:

$$[\lambda'_{mb}, \lambda'_{ms}] \subset [\lambda'_{gb}, \lambda'_{gs}] \quad (8)$$

2.2 下层 CSSIS 经济运行模型

电动汽车的换电需求可以由每辆电动汽车的换电时刻确定。本文研究的电动汽车为私家车,假设 CSSIS 中的 BCSS 只提供换电服务,且电池规格相同。电动汽车从 t_0 时刻行驶至换电需求时刻 t_1 ,其行驶距离为:

$$S_d = \begin{cases} \frac{100(F_{\text{SOC}_{t_0}} - g)C_{\text{rated}}}{H_{100}} & F_{\text{SOC}_{t_0}} \geq g \\ 0 & F_{\text{SOC}_{t_0}} < g \end{cases} \quad (9)$$

其中, $F_{\text{SOC}_{t_0}}$ 为电动汽车在 t_0 时刻的荷电状态 (SOC); g 为换电需求时刻荷电状态阈值; C_{rated} 为电池额定容量; H_{100} 为电动汽车百千米耗电量。

该距离也可表示为:

$$S_d = \begin{cases} S_0 \int_{t_0}^{t_1} f_s(t) dt & 0 \leq t_0 \leq t_1 \leq 24 \\ S_0 \left[\int_{t_0}^{24} f_s(t) dt + \int_0^{t_1} f_s(t) dt \right] & 0 \leq t_1 \leq t_0 \leq 24 \end{cases} \quad (10)$$

其中, S_0 为电动汽车日总行驶里程,其概率密度函数可表示为式 (11)^[13]; $f_s(t)$ 为电动汽车各时段行驶里程占日行驶总里程的百分数^[14]。

$$f_d(s) = \frac{1}{s\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln s - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2} \right] \quad (11)$$

其中, s 为电动汽车行驶距离; $\mu_d = 3.31$; $\sigma_d = 0.87$ 。

联立式 (9) 和式 (10) 即可求得电动汽车换电需求时刻,利用 Monte Carlo 方法模拟得出电动汽车在每天各时段换电的概率,从而计算出电动汽车的换电需求 N'_{ex} ,即为 CSSIS 换电需求。

对 BCSS 内的电池做如下假设:采用恒功率进行充、放电,其数学表达式如式 (12) 所示;充、放电行为直至满足设定的荷电状态才结束。

$$\begin{cases} P'_{\text{BCSS, ch}} = N'_c P_{\text{ch}} / \eta_{\text{ch}} \\ P'_{\text{BCSS, dis}} = N'_d P_{\text{dis}} \eta_{\text{dis}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, N'_c 、 N'_d 分别为 t 时刻充电、放电电池数量; P_{ch} 、 P_{dis} 分别为电池的额定充、放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为电池充、放电效率。

效用函数在经济学中被广泛应用于描述消费者消耗某种商品时所获得的满意程度,近年来也被应用于电力系统中^[15]。本文采用常用的二次效用函数^[16]来描述 CSSIS 消耗电能所获得的满意度,其表达式为:

$$U_c = e_n \max(P'_c, 0) - \frac{d_n}{2} (\max(P'_c, 0))^2 \quad (13)$$

其中, e_n 、 d_n 为 CSSIS 消耗电能的偏好系数,可以反映出用户对电能的需求程度,会影响用户对电能需求量。

下层 CSSIS 根据上层确定的内部电价调整自身的充、放电计划以实现收益最大化,即:

$$\max U_{CS} = \max(C_R - C_C) \quad (14)$$

其中, C_R 、 C_C 分别为 CSSIS 总收入、总支出,其表达式分别如式 (15) 和式 (16) 所示。

$$C_R = \sum_{t=1}^T \left[\lambda C_{\text{rated}} N'_{ex} - \lambda'_{mb} \min(P'_c, 0) + e_n \max(P'_c, 0) - \frac{d_n}{2} (\max(P'_c, 0))^2 \right] \quad (15)$$

$$C_C = \sum_{t=1}^T \left[\lambda'_{ms} \max(P'_c, 0) + \alpha_0 N'_{ex} + k_{om} |P'_c| + \alpha_0 \left(\frac{|\min(P'_{\text{BCSS}}, 0)|}{C_{\text{rated}}} + \frac{|\min(P'_{\text{ESS}}, 0)|}{C_{\text{rated}}} \right) \right] \quad (16)$$

其中, λ 为 CSSIS 向电动汽车收取的换电费用; N'_{ex} 为 t 时刻的换电需求; k_{om} 为 CSSIS 运行和维护成本系数; α_0 为电池进行一次充、放电的折旧费用; C_{rated} 为 ESS 额定容量。

下层约束条件如下。

(1) 电池总数量平衡约束。

$$N'_{\text{full}} + N'_c + N'_d + N'_{\text{wait}} = N_{\text{all}} \quad (17)$$

其中, N'_{full} 、 N'_{wait} 、 N_{all} 分别为 t 时刻满电、待充电池数量和 BCSS 内电池总数量。

(2) 换电约束。

$$\begin{cases} N'_{\text{full}} + N'_c \geq N'^{t+1}_{ex} + N'_{\text{ex}} \\ N'_{\text{full}} - N'_d \geq N'^{t+1}_{ex} + N'_{\text{ex}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, N'^{t+1}_{ex} 为 $t+1$ 时刻的换电需求。

(3) 充、放电电池数量约束。

$$N'_c, N'_d \leq N_{\text{max}} \quad (19)$$

其中, N_{\max} 为 BCSS 内充、放电槽数量。

(4) 充、放电状态约束。

$$N_c^t N_d^t = 0 \quad (20)$$

上式表明, 任一时刻 BCSS 内不能同时进行充电和放电操作。

(5) 满电、待充电约束。

$$0 \leq N_{\text{full}}^t, N_{\text{wait}}^t \leq N_{\text{all}} \quad (21)$$

下一时刻满电电池数量可按照如下公式计算:

$$N_{\text{full}}^{t+1} = N_{\text{full}}^t + N_c^t - N_d^t - N_{\text{ex}}^t \quad (22)$$

(6) ESS 约束。

ESS 出力约束为:

$$P_{\text{ESS}}^{\min} \leq P_{\text{ESS}}^t \leq P_{\text{ESS}}^{\max} \quad (23)$$

其中, P_{ESS}^{\min} 、 P_{ESS}^{\max} 分别为 ESS 最小、最大功率。

荷电状态约束为:

$$E_{\text{ESS}}^t = E_{\text{ESS}}^{t-1} + P_{\text{ESSc}}^t \eta_c \Delta t - \frac{P_{\text{ESSdc}}^t}{\eta_{\text{dc}}} \Delta t$$

$$E_{\text{ESS}}(0) = E_{\text{ESS}}(T) \quad (24)$$

$$F_{\text{SOCESS}}^t \in [0.3, 0.9] \quad (25)$$

其中, E_{ESS}^{t-1} 为 $t-1$ 时刻 ESS 储存的能量; P_{ESSc}^t 、 P_{ESSdc}^t 分别为 ESS 在 t 时刻的充、放电功率; η_c 、 η_{dc} 分别为 ESS 充、放电效率; $E_{\text{ESS}}(0)$ 、 $E_{\text{ESS}}(T)$ 分别为 ESS 始、末能量; F_{SOCESS}^t 为 ESS 在 t 时刻的荷电状态。

2.3 Stackelberg 博弈模型

根据第 1 节所述, 博弈模型可以表示为:

$$G = \{(\text{MGUCSSIS}), P_{\text{CS}}, \lambda_{\text{mb}}, \lambda_{\text{ms}}, U_{\text{MG}}, U_{\text{CS}}\} \quad (26)$$

其中, MGUCSSIS 表示微电网和 CSSIS 是博弈方; P_{CS} 为 CSSIS 的充、放电计划策略集; λ_{mb} 、 λ_{ms} 分别为微电网从 CSSIS 购电和向 CSSIS 售电的电价策略集。

如前所述, 微电网和 CSSIS 的目标都是使自身利润最大化。为此, 微电网会制定最优内部电价, 同时 CSSIS 也会依据内部电价决策最优充、放电计划, 此时就会达到博弈的均衡, 微电网和 CSSIS 单独改变策略均不会再提高自身效益。

假设 $(P^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}^*)$ 为 Stackelberg 博弈 G 的一个策略集, 如果其满足如下条件, 则定义该策略集为 Stackelberg 均衡。

$$U_{\text{CS}}(P^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}^*) \geq U_{\text{CS}}(P_c, P_c^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}^*) \quad \forall P_c \in P_{\text{CS}} \quad (27)$$

$$\begin{cases} U_{\text{MG}}(P^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}^*) \geq U_{\text{MG}}(P^*, \rho_{\text{mb}}, \rho_{\text{ms}}^*) \\ U_{\text{MG}}(P^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}^*) \geq U_{\text{MG}}(P^*, \rho_{\text{mb}}^*, \rho_{\text{ms}}) \end{cases}$$

$$\forall \rho_{\text{mb}} \in \lambda_{\text{mb}}, \forall \rho_{\text{ms}} \in \lambda_{\text{ms}} \quad (28)$$

其中, P_c^* 为其他策略。

此时微电网无法通过调整内部电价增加自身利润, CSSIS 也不能改变充、放电计划增加自身利润。

2.4 Stackelberg 博弈均衡存在性证明

根据文献 [15], 当 Stackelberg 博弈 G 满足如下条件时, 其存在 Stackelberg 均衡。

(1) 策略集 λ_{mb} 、 λ_{ms} 均为关于其欧氏空间的非空、凸的、有界的子集。

(2) U_{CS} 是关于 P_c 的拟凹函数。

(3) U_{MG} 是关于 λ_{mb} 、 λ_{ms} 、 P_c 的连续函数。

(4) U_{CS} 是关于 λ_{mb} 、 λ_{ms} 、 P_c 的连续函数。

显然, U_{CS} 、 U_{MG} 关于各变量连续。由式 (1) 可知策略集 λ_{mb} 、 λ_{ms} 满足条件 (1)。

由式 (13)–(16) 可知, CSSIS 消耗电能的效用函数是严格凹函数, 而其他项均为关于 P_c 的线性函数或者常数函数, 因此 U_{CS} 在整体上是关于 P_c 的凹函数。而凹函数一定是拟凹函数, 所以条件 (2) 显然是满足的。

综上, Stackelberg 博弈 G 的 Stackelberg 均衡是存在的。

3 Stackelberg 博弈模型求解

将 DE 算法和 Gurobi 软件相结合求解 Stackelberg 博弈模型, 其步骤如下:

(1) 初始化种群, 置迭代次数 $k = 0$, 随机产生满足约束的内部电价 $\lambda_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda_{\text{ms}, k}$, 并将其发送给 CSSIS;

(2) 判断是否达到最大迭代次数 k_{\max} , 若是, 则输出最优结果, 否则进行下一步;

(3) CSSIS 根据 $\lambda_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda_{\text{ms}, k}$, 利用 Gurobi 对下层问题进行求解, 得到该情况下的最优充、放电计划 P_c^k , 并将其反馈给上层;

(4) 微电网根据 CSSIS 反馈的充、放电计划 P_c^k 计算上层目标函数 U_{MG} ;

(5) 对自变量 $\lambda_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda_{\text{ms}, k}$ 进行交叉、变异操作, 产生子代 $\lambda'_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda'_{\text{ms}, k}$;

(6) 根据子代 $\lambda'_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda'_{\text{ms}, k}$ 计算相应的子代上层目标函数 U'_{MG} ;

(7) 进行选择操作, 若 $U_{\text{MG}} > U'_{\text{MG}}$, 则将 $\lambda_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda_{\text{ms}, k}$ 作为下一次迭代的内部电价, 否则将 $\lambda'_{\text{mb}, k}$ 、 $\lambda'_{\text{ms}, k}$ 作为下一次迭代的内部电价, 转至步骤 (2)。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文采用文献 [7] 中压微电网作为算例, 具体结构见附录中图 A1。系统基准容量为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 基准电压为 10 kV ; 节点电压的上限和下限分别为 1.07 、 0.93 p.u. ; 联络线传输功率的上、下限分别为 300 、 -300 kW , 其余微电网支路传输功率的上、下限分别为 3 、 -3 MW 。WT、PV^[17]、负荷^[18] 日前预测出力见附录中图 A2, 微电网及 CSSIS 相关模型^[6-7, 19-20] 参

数见附录中表 A1 和表 A2,电网各时段电价^[19]见附录中表 A3。

DE 算法参数为:种群数量为 100,最大迭代次数 $k_{max}=100$,缩放因子为 0.5,交叉概率为 0.9。

4.2 仿真结果

为了说明基于 Stackelberg 博弈的双层协调优化调度的经济效益,本文设计 5 种案例进行对比:Case 1,基于 Stackelberg 博弈的双层协调优化调度;Case 2,不采用 Stackelberg 博弈的双层协调优化调度;Case 3,基于 Stackelberg 博弈,但仅对微电网和 BCSS 协调优化调度;Case 4,将 Case 1 中内部电价改为电网电价进行双层协调优化调度;Case 5,使 Case 1 中内部电价购、售电价相同进行双层协调优化调度。

(1) 采用 Stackelberg 博弈的优势。

表 1 是 5 种案例中微电网和 CSSIS(BCSS)利润。由表可知,相较于 Case 2,Case 1 中微电网与 CSSIS 利润都有所提高,这说明 Stackelberg 博弈可以有效提高博弈参与者收益。图 2 为 Case 1 和 Case 2 中上、下 2 层目标函数随 DE 算法迭代的收敛曲线。可见,迭代达到 Stackelberg 博弈均衡之前,微电网利润随着迭代次数逐渐增加,CSSIS 利润逐渐减少。Case 1

表 1 微电网和 CSSIS(BCSS)利润对比

Table 1 Comparison of profit between microgrid and CSSIS(BCSS)

案例	微电网利润 / 元	CSSIS(BCSS)利润 / 元
Case 1	1 354.7	279 930
Case 2	1 009.7	-49 502
Case 3	1 364.8	233 270
Case 4	1 241.4	276 610
Case 5	1 211.9	277 100

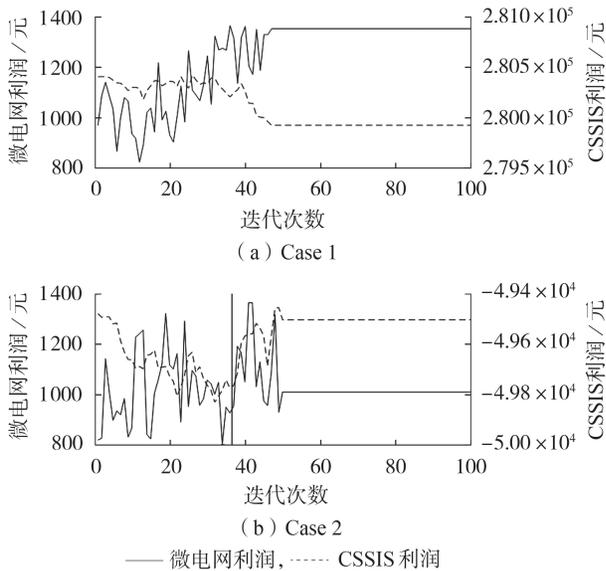


图 2 2 种案例中 DE 算法的收敛曲线

Fig.2 Iterative convergence curves of DE algorithm for two cases

中迭代至 43 次时上、下 2 层同时达到收敛,证明了 2.4 节中 Stackelberg 博弈均衡的存在,而 Case 2 则需要迭代至 50 次算法才收敛,这说明 Stackelberg 博弈有助于算法寻优,加速迭代收敛。

图 3 为 Case 1—3 中微电网和 CSSIS(BCSS)的输出情况。结合附录中图 A3 可见,除时段 8—16 外 CSSIS(BCSS)出力基本与电网交互功率相同,这主要是因为时段 8—16 微电网内可再生能源出力大于其固定负荷,将盈余电量出售给 CSSIS 获利,减少了从电网购入电量。CSSIS 在各个时段均有放电,但主要集中于电价的平时段和谷时段,这主要是因为峰时段也是电动汽车换电需求的高峰期,需要对站内电池进行充电以满足用户需求,由附录中图 A3 中可知其换电需求。Case 1 中放电时段为时段 2、4、20、23,Case 2 中放电时段为时段 3、4、10,可见 Case 1 中放电时段多于 Case 2,且其放电量更大,从附录中图 A3 可知,Case 2 虽然在 3 个时段放电,但其放电操作全部由 ESS 完成,BCSS 中电池没有放电,这导致 Case 2 中在时段 0—4、20—23 的待充电电池比 Case 1 多,对这部分电池利用得不充分造成了资源浪费,这一点在图 4 中体现得更明显。图 4 是 ESS 各时段出力及荷电状态值。由图可知,Case 1 中 ESS 仅在充电、放

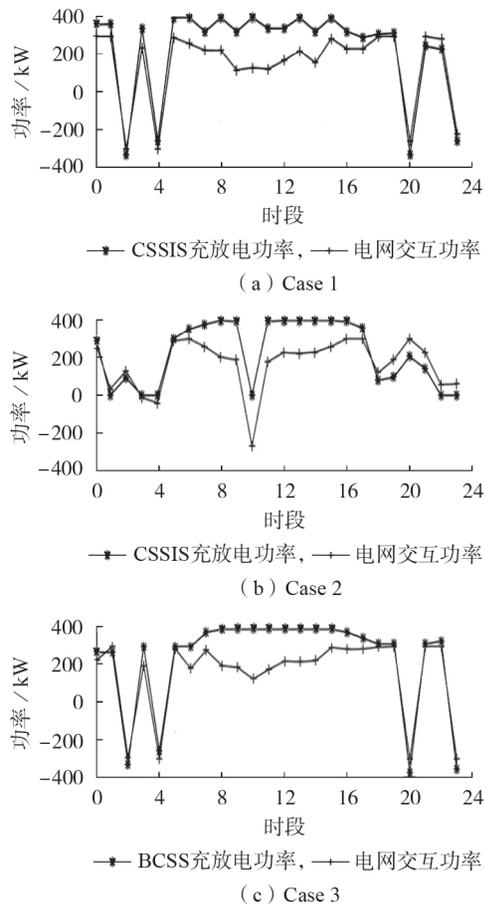


图 3 3 种案例中微电网和 CSSIS(BCSS)出力情况

Fig.3 Microgrid and CSSIS(BCSS) output of three cases

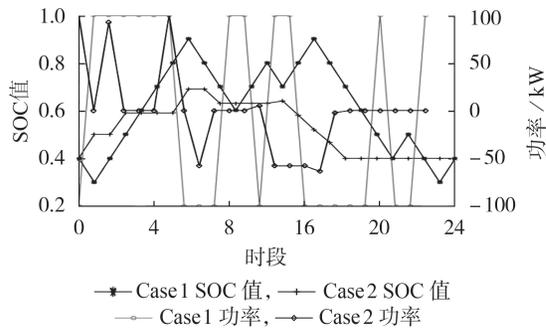


图4 ESS各时段出力及荷电状态值

Fig.4 ESS output and SOC value at each period

电2种状态之间转换,Case 2中ESS则在充电、放电、静置3种状态之间转换,且有多达14个时段处于静置状态,这极大地浪费了ESS资源,而Case 1则不会出现该问题。

附录中图A4是Case 1和Case 2中FC、DG出力情况。由图可知:在时段10—15,FC、DG出力都保持在各自最小功率,这主要是由于此时微电网中WT、PV出力较大,微电网供过于求,FC、DG出力的减少有助于充分消纳WT、PV出力;在时段1—5和19—23,Case 2中FC、DG出力一直维持在各自最小功率附近,而Case 1中FC、DG出力基本维持在最大功率附近。

上述现象也进一步解释了Case 2中CSSIS利润为负的原因,Case 2中在电价高峰时段一直维持最大出力使充电成本激增,且不能合理调度微电网以及CSSIS内的资源,造成了潜在的经济损失,这也体现了采用Stackelberg博弈的优势,其可以更好地调度微电网及CSSIS内资源,实现资源的合理利用,有效提高微电网和CSSIS利润。

(2)采用内部电价的优点。

由表1可知,与Case 4、Case 5相比,Case 1中微电网利润分别提高了9.13%、1.2%,CSSIS利润分别提高了11.78%、1.02%,这也突出了采用内部电价的性价比优势。附录中图A5是3种电价方案中CSSIS出力情况。从图中可见:Case 1中的电价峰时段8和10也是换电需求高峰时期,其充电功率比其他2种方案大,这虽然会造成充电成本增加,但相应的CSSIS满意度会更高,其效用也会更大,并且会储存更多满电电池以降低其他时段的充电需求;在时段11、12,其充电功率较其他2种方案有所下降,其充电成本也会降低。图5是Case 1中最终得到的内部电价,相较于Case 4、Case 5所采用固定分时电价,本文所述内部电价可更加灵活地调整,从而实现微电网和CSSIS的互利共赢。

(3)采用CSSIS的优点。

由表1可知,Case 1中微电网利润虽然比Case 3

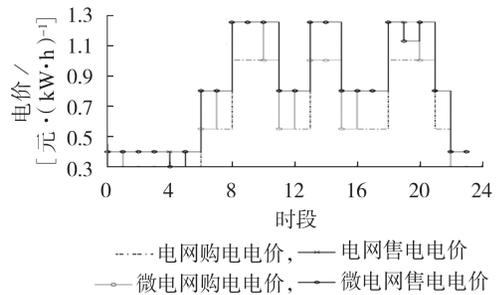


图5 Case 1中内部电价

Fig.5 Internal electricity price in Case 1

中下降了0.7%,但其CSSIS利润比Case 3中提高了20%。由图3可知,虽然Case 1和Case 3中放电时段相同,在时段2、4、20的出力相同,Case 1中在时段23的出力比Case 3中的小,但是其CSSIS所获得的利润却比Case 3中要高,这主要是因为Case 3中在时段7—16其充电功率一直维持在较高水平造成充电成本增大,Case 1中有ESS调节可实现“低储高发”,其与电网交互功率较Case 3中有一定程度下降,不仅降低了充电成本,也减少了对电网造成的持续冲击,这也是Case 1中微电网利润会略微下降的原因。

(4)CSSIS偏好参数对博弈均衡的影响。

附录中表A4描述了不同偏好参数对博弈均衡的影响,当内部电价确定以后,CSSIS将根据自身的消费满意度制定最优的充放电计划。由表中可知:CSSIS利润与 e_n 值成正比,与 d_n 值成反比;微电网利润与 e_n 成正比,在 $d_n \geq 0.5$ 时与其成正比,反之与其成反比。

5 结论

本文将Stackelberg博弈应用到不同利益主体的微电网与CSSIS电能交互模型中,结合DE算法和Gurobi软件,分别对博弈参与者微电网与CSSIS的收益最大化问题进行迭代求解,并对Stackelberg博弈均衡的存在性进行了证明。最后,结合具体仿真算例对所提出模型以及算法有效性进行了验证。仿真结果表明,采用本文所提出的基于Stackelberg博弈的双层优化调度模型不仅可以提高微电网和CSSIS的利润,实现双方互利共赢,而且还可以充分利用CSSIS资源,避免因资源闲置带来的经济损失。

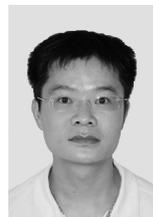
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[EB/OL]. (2012-06-28)[2019-03-20]. http://www.gov.cn/jzwgk/2012-07/09/content_2179032.htm.
- [2] 孙俊博,解大,娄宇成,等. 充放储一体化电站的黑启动方案[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(5):43-50.

- SUN Junbo, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Black-start scheme for charging-discharging-storage integrated station[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5):43-50.
- [3] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2):1-14.
XIAO Xiangning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):1-14.
- [4] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):1-6.
CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):1-6.
- [5] 楚皓翔, 解大, 娄宇成, 等. 电动汽车智能充放储一体化电站无功电压调控策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11):48-54.
CHU Haoxiang, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Strategy of reactive power and voltage control for integrated EV station of intelligent charging, discharging and storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):48-54.
- [6] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 考虑不确定因素下含充换储一体化电站的微网能量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(3):669-676.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of microgrid containing charging-swapping-storage integrated station under uncertain factors of wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):669-676.
- [7] 陈思, 张焰, 薛贵挺, 等. 考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4):60-69.
CHEN Si, ZHANG Yan, XUE Guiting, et al. Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):60-69.
- [8] 李暄, 马瑞, 罗阳. 基于Stackelberg博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5):88-95.
LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5):88-95.
- [9] 王程, 刘念, 成敏杨, 等. 基于Stackelberg博弈的光伏用户群优化定价模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12):146-153.
WANG Cheng, LIU Nian, CHENG Minyang, et al. Stackelberg game based optimal pricing model for photovoltaic prosumer cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):146-153.
- [10] MAHARJAN S, ZHU Q Y, ZHANG Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1):120-132.
- [11] WEI F, JING Z X, WU P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200:315-329.
- [12] 张高, 王旭, 蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11):48-55.
ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):48-55.
- [13] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1):39-46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1):39-46.
- [14] 田园园, 廖清芬, 徐雨田, 等. 基于有序充电策略的换电站及分布式电源多场景协调规划方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9):62-69.
TIAN Yuanyuan, LIAO Qingfen, XU Yutian, et al. Multi-scenario coordinated planning method of EV battery-swapping station and distributed generation based on coordinated charging strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):62-69.
- [15] LIU N, CHENG M Y, YU X H, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8):6740-6750.
- [16] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8):6087-6097.
- [17] 李晨迪, 陈渊睿, 曾君, 等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术, 2016, 40(2):387-395.
LI Chendi, CHEN Yuanrui, ZENG Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):387-395.
- [18] 刘灵恺, 雷霞, 李竹, 等. 电动汽车换电站可用电池组数动态调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22):242-250.
LIU Lingkai, LEI Xia, LI Zhu, et al. Dynamic scheduling strategy for available battery number of electric vehicle in battery-swap station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22):242-250.
- [19] 朱兰, 周雪莹, 唐陇军, 等. 计及可中断负荷的微电网多目标优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6):1847-1854.
ZHU Lan, ZHOU Xueying, TANG Longjun, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1847-1854.
- [20] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):29-36.
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):29-36.

作者简介:



程杉

程杉(1981—),男,湖北宜昌人,副教授,博士,通信作者,研究方向为新能源微电网运行优化与控制、电动汽车充换电设施与可再生能源集成、智能计算及其在电力系统中的应用等(E-mail:hpucquy@ctgu.edu.cn);

倪凯旋(1995—),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要研究方向为新能源微电网技术(E-mail:nikx00@163.com);

赵孟雨(1993—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源微电网技术(E-mail:17698099382@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第69页 continued on page 69)

Transient overvoltage analysis of wind farm with UHVDC block and HVRT coordinated control

QIN Shiyao¹,JIANG Rongrong²,LIU Jin²,LI Shaolin¹,DAI Linwang¹,LIU Qiao²

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For HVRT(High Voltage Ride Through) problem of sending wind farm caused by UHVDC(Ultra High Voltage Direct Current) block, the mathematical model of the wind farm at the sending end of UHVDC transmission is established, the influence of UHVDC blocking fault on the overvoltage of the wind farm at the sending end is studied, and the influence of overvoltage on the direct drive permanent magnet synchronous generator wind turbine and the power controllable domain of wind turbine are analyzed. The control strategy of HVRT is proposed based on the coordination of wind turbine with division of controllable domain and static synchronous compensator. In the controllable domain of wind turbine, the wind turbine uses its dynamic reactive power compensation to achieve HVRT. When beyond the controllable domain of wind turbine, the centralized reactive power compensation device of the wind farm coordinates with the wind turbine to achieve HVRT. Finally, the system simulation model is established in PSCAD / EMTDC to verify the accuracy and effectiveness of theoretical analysis and control strategy, and the risk of high voltage off-grid of wind turbines during UHVDC blocking fault is reduced.

Key words: UHVDC power transmission; wind farms; direct drive permanent magnet synchronous generator wind turbine; static synchronous compensator; transient overvoltage; HVRT coordinated control

(上接第 55 页 continued from page 55)

Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station

CHENG Shan^{1,2}, NI Kaixuan^{1,2}, ZHAO Mengyu^{1,2}

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University,

Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the economic operation problem of microgrid with different ownership of EV (Electric Vehicle) CSSIS (Charging-Swapping-Storage Integrated Station) and microgrid, a bi-level optimal scheduling model based on Stackelberg game is established. As a leader, the upper microgrid takes its maximum profit as the objective function and formulates the internal price for electricity trading with the lower CSSIS. As a follower, the lower CSSIS adjusts its charging and discharging plan according to the internal electricity price to achieve its maximum profit. The differential evolution algorithm and Gurobi software are used to solve the upper and lower optimization problems respectively, and the optimal internal electricity price and optimal charging and discharging plan of CSSIS are obtained. The simulative case shows that the proposed algorithm can effectively solve the interactive equilibrium strategy between microgrid and CSSIS, which can not only improve the profits of both, but also use CSSIS resource more effectively.

Key words: microgrid; CSSIS; Stackelberg game; internal electricity price; differential evolution algorithm

附录：

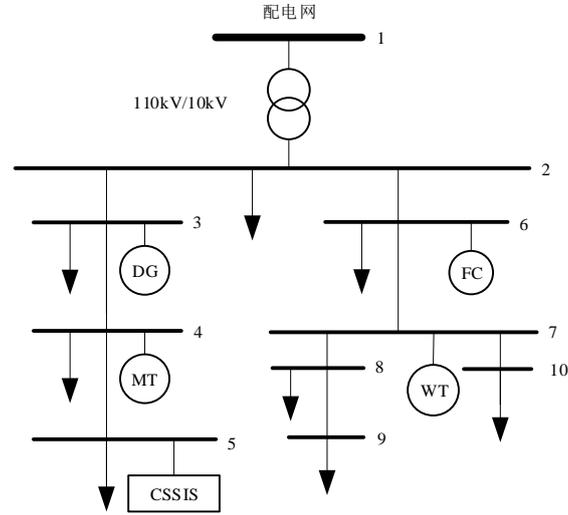


图 A1 中压微电网算例系统
Fig.A1 Mid-voltage microgrid case system

表 A1 微电网参数
Table A1 Microgrid parameters

参数	取值
$P_{DG}^{\min}, P_{DG}^{\max} / \text{kW}$	20,100
$R_{DG}^{\text{down}}, R_{DG}^{\text{up}} / \text{kW}$	-60,60
$a, b, c / [\bar{\text{元}} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	6,0.012, 8.5×10^{-4}
$P_{FC}^{\min}, P_{FC}^{\max} / \text{kW}$	8,40
$R_{FC}^{\text{down}}, R_{FC}^{\text{up}} / \text{kW}$	-30,30
$k_{DG}, k_{FC} / [\bar{\text{元}} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0764,0.1
$C_{FC} / (\bar{\text{元}} \cdot \text{m}^3)$	1.81
L_{HVRFC}	9.7
η_{FC}	40%

表 A2 CSSIS 参数
Table A2 CSSIS parameters

参数	取值
$P_C^{\min}, P_C^{\max} / \text{kW}$	-400,400
$N_{\text{all}}, N_{\text{full}}^0$	180,10
$P_{\text{dis}}, P_{\text{ch}} / \text{kW}$	-15,15
$\eta_{\text{dis}}, \eta_{\text{ch}}$	0.95,0.95
N_{max}	30
$k_{\text{om}} / [\bar{\text{元}} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.0832
$P_{\text{ESSde}}', P_{\text{ESSc}}' / \text{kW}$	-100,100

η_{dc}, η_c	0.95, 0.95
$C_{rated}, C_{erated} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	30, 1000
H_{100} / kW	10
g	0.2
$\lambda / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	1.3
$\alpha_0 / (\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	6
d_n, e_n	0.1, 60

表 A3 电网电价
Table A3 Grid price

时段	时段划分	$\lambda'_{gb} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\lambda'_{gs} / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$
谷时段	00:00—06:00, 22:00—24:00	0.3	0.4
平时段	06:00—08:00, 11:00—13:00, 15:00—18:00, 21:00—22:00	0.55	0.8
峰时段	08:00—11:00, 13:00—15:00, 18:00—21:00	1.00	1.25

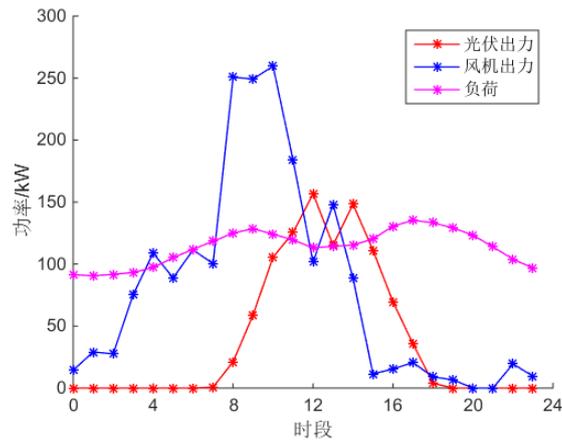
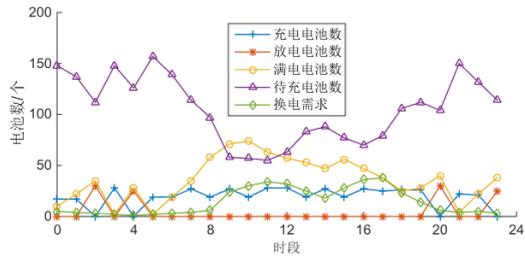
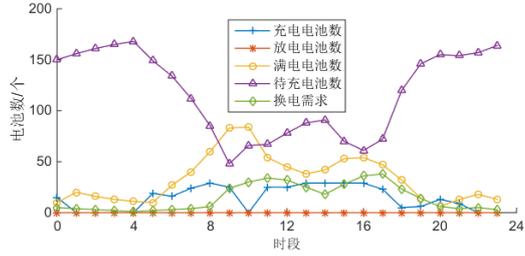


图 A2 风机、光伏和负荷的预测出力

Fig.A2 Predicted outputs of wind turbine, photovoltaic and load



(a) Case1中CSSIS内各种电池状态



(b) Case2中CSSIS内各种电池状态

图 A3 CSSIS 各时段内不同状态电池数量

Fig.A3 Battery numbers in different states for each period of CSSIS

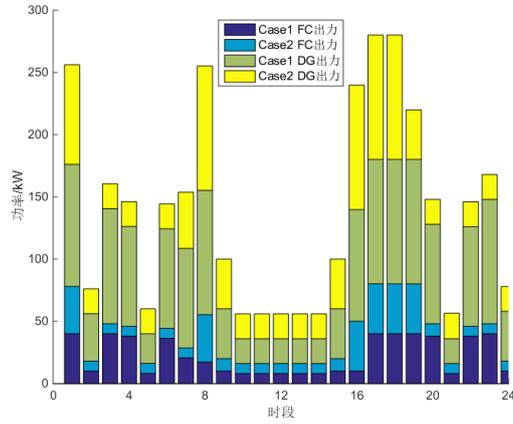


图 A4 Case1 和 Case2 中 FC、DG 出力情况

Fig.A4 FC and DG output in Case1 and Case2

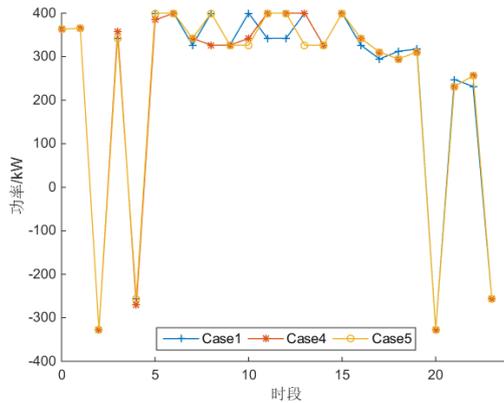


图 A5 3 种情况中 CSSIS 出力情况

Fig.A5 CSSIS output in three cases

表 A4 不同偏好参数对结果的影响
 Table A4 Effect of different preference parameters on results

(d_n, e_n)	CSSIS 利润/元	微电网利润/元
(60,0.1)	277 930	1 354.7
(50,0.1)	195 930	1 189.3
(40,0.1)	117 900	1 017.9
(30,0.1)	46 713	946.4
(60,10)	-8 153 900	1 455.7
(60,1)	-56 174	1 469.1
(60,0.5)	-138 630	1 208.9