电力现货市场环境下电动汽车充换电站的优化调控策略

曾宪锴[1,2],杨 苹[1,2],刘璐瑶[1],杨 康[2],谭俊丰[2]
(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640;2. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室,广东 广州 510640)

摘要:在构建新型电力系统的战略目标下,电力现货市场不断对电动汽车充换电站等需求侧资源提出新的需求与要求。基于南方电力现货市场系列试点规则,考虑现货电能量、调频辅助服务、多阶段需求响应等交易品种,建立了电动汽车充换电站的调控模型,设计了日前-日内-实时多阶段优化调控策略。日前阶段针对换电需求、调频调用电量和各交易品种价格的不确定性构建鲁棒优化问题,并采用二阶锥规划算法进行求解;日内阶段构建基于模型预测控制的滚动优化环节,实现对需求响应日内邀约的有效响应,同时改善日前调控计划的保守性;实时阶段以调控成本最低为目标,考虑需求响应实时邀约和电价波动,求解电池功率分配策略。仿真算例表明,所提策略可充分发挥充换电站的调节潜力,提升其经济效益。

关键词:电动汽车;充换电站;电力现货市场;鲁棒优化;模型预测控制;多阶段优化
中图分类号:TM 732;U 469.72 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202208018

0 引言

在构建新型电力系统的战略目标下,电动汽车EV(Electric Vehicle)充换电站BCSS(Battery Charging and Swapping Station)等需求侧资源在参与电力系统的实时平衡调节中将扮演越来越重要的角色[1]。在电力现货市场环境下,利用站内冗余电池作为调节资源,通过优化调控策略充分挖掘BCSS的调节潜力,参与多种交易品种以提升BCSS的经济效益,为新型电力系统建设提供支撑。

目前,关于BCSS优化调控策略的研究大多集中在电能量市场环境下的充电管理、与新能源发电的协同运行等方面。文献[2-3]分别分析了电池折旧和备用电池数量等因素对充电成本的影响,并形成相应的充电策略,实现了投资成本与运营成本统一考量下的优化调控。为进一步挖掘优化空间,文献[4-5]对电池的可调节性和各类充电机的特性进行建模,通过机器学习和智能算法求解调控策略。与新能源发电的协同运行方面,需要充分考虑新能源发电、换电需求、电价等多重不确定性,文献[6]在场景规划中加入风险测度以量化多类型不确定性带来的风险;文献[7]利用概率性序列描述系统的不确定性,采用机会约束规划求解调控策略,从而消除不确定性对策略有效性的影响。

随着电力体制改革不断深入,辅助服务交易推广至需求侧[8],为EV等可调资源带来新的盈利点,其关键问题在于电池资源聚合、响应能力预估、响应功率分配等。文献[9]研究EV参与辅助服务的可支配容量预测与聚合模块开发,有效解决了车网互动(V2G)聚合调控问题;文献[10]提出采用EV、储能和光伏发电系统联合调峰的方法,显著降低了区域能耗及用能成本,并在此基础上展望更利于电池储能参与电力系统调节的市场机制;文献[11-14]针对EV参与调频辅助服务,从集群、自动发电控制(AGC)、功率分配等环节分别展开研究,提出相应模型和控制策略以提高其经济效益;文献[15]考虑电价和调频指令的不确定性,提出基于调频绩效考核的EV鲁棒控制模型,增强了EV作为需求侧资源的可靠性。

上述研究从多维度分析了BCSS参与电力市场各交易品种的优化调控策略,但对于电力现货市场环境下BCSS参与多电力交易品种的调控研究较少。而随着新型电力系统逐步构建,电力现货市场逐步发展,BCSS未来将面向能量-辅助服务的多交易品种环境,对其规模化支撑电网实时平衡的能力提出新的需求和要求。为此,本文提出协同参与电能量交易、调频辅助服务交易和多阶段需求响应交易的BCSS优化调控策略。为全面反映BCSS换电服务和现货市场多品种交易的协同开展状况,提出可精确描述电池在换电、充电、放电、满电状态之间转换的换电行为约束,建立日前鲁棒优化-日内基于模型预测控制MPC(Model Predictive Control)的滚动优化-实时优化调控的BCSS多阶段优化调控策略。在此基础上,分析多阶段需求响应价格与时段对调控结果的影响,探讨不确定度控制系数和收益权重系数对BCSS运行收益的影响,从而在计及市场需求和价格的不确定性下充分发挥电池的盈利能力,为电力现货市场环境下的BCSS提供更加经济高效的运营模式。

收稿日期:2022-05-11;**修回日期:**2022-08-01
在线出版日期:2022-08-11
基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2021B0101230003)
Project supported by the Key-area Research and Development Program of Guangdong Province(2021B0101230003)

1　电力现货市场环境下EV BCSS的调控模型

根据南方电力现货市场系列试点规则方案，提出电力现货市场环境下BCSS可参与的交易品种及其特点，明确BCSS调控流程，并建立其调控模型。

1.1　EV BCSS参与的电力交易品种

随着EV换电模式的发展，BCSS的建设规模和用电量不断增长，大规模BCSS可满足电力批发市场准入条件，直接参与市场交易，小规模的BCSS则可以通过聚合的形式间接参与。对于满足准入条件的BCSS或BCSS聚合体，总结其在电力现货市场环境下可参与的交易品种及其特点，具体如下。

1）需求响应：日前-日内-实时多时间尺度开展。日前及日内阶段采用邀约响应形式，在响应时段的前1 d或前4 h发布响应邀约，需求侧竞价确定计划响应量并在响应时段执行。实时阶段采用实时响应形式，需求侧需在收到响应需求后5 min达到响应目标，并可出于安全性或经济性考虑改变响应状态。

2）调频辅助服务：优质调频资源优先调用机制。调频市场成员完成调频里程价格及调频容量申报后，将根据各成员近期的综合调频性能调整其调频里程报价，使得优质调频资源优先被调用。

3）现货电能量交易：申报偏差收益转移机制。电能量交易经历日前与实时2个阶段。日前市场用于市场成员申报，出清结算中标购售电曲线；运行日内实时市场基于实际运行情况再次计算调整，并根据市场成员实际购售电与日前中标曲线的偏差进行结算。

1.2　电力现货市场环境下EV BCSS调控架构

EV换电模式分为电池配送模式和换电站模式[16]，本文以电池配送模式为研究对象，建立电力现货市场环境下BCSS的调控架构，如图1所示，图中n_s为电池配送站总数。BCSS为电池充电，并将就绪的电池统一配送至电池配送站；EV通过电池配送站缴纳换电服务费用并获取换电服务。同时BCSS参与电力现货市场获取收益，包括电能量交易、调频辅助服务交易及多时间尺度的需求响应交易。

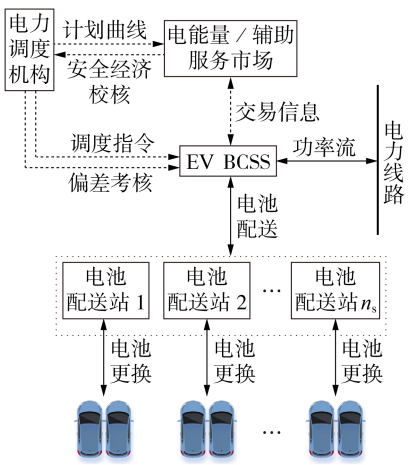


图1　电力现货市场环境下BCSS的调控架构

Fig.1　Regulation structure of BCSS under electricity spot market environment

为确保BCSS开展换电业务的同时参与电力现货市场获取收益，需从日前、日内、实时3个阶段进行优化调控，其调控流程见附录A图A1。

日前阶段，BCSS运营商接收需求响应日前邀约和调频市场信息，结合次日换电需求预测曲线，决策购售电曲线、日前需求响应曲线、调频容量和换电计划，本阶段决策中考虑换电需求、调频调用电量和各交易品种价格的不确定性，需预留一定的电量裕量，以确保其各项业务稳定开展，同时也为日内和实时阶段的优化调控预留了可调空间。日内阶段在日前优化结果的基础上开展滚动优化，接收需求响应日内邀约，结合日内换电需求预测值，决策日内需求响应曲线、调整购售电曲线和换电计划，本阶段决策中已明确各电力交易品种的日前出清价格，且日内短周期的换电需求预测结果更加准确，因此日前预留的电量在本阶段可被较充分利用。实时阶段基于日内优化结果对充放电功率在分钟级时间尺度上开展更精细的调控，根据需求响应实时邀约信息和实时电价波动，确定实时需求响应状态，制定调频功率分配策略。

1.3　电力现货市场环境下EV BCSS的调控建模

为描述上述调控流程中的转换关系，反映多时间尺度调控下BCSS充放电计划逐步修正的特性，建立相应的多时间尺度调控模型，如式（1）所示。

$$\begin{cases}\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{da}}\right)\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{da}}\right)=\mathrm{diag}\left(p_t^{\mathrm{da}}\right)=\boldsymbol{P}_{T\times T}^{\mathrm{da}}\\ \mathrm{diag}\left(p_t^{\mathrm{da}}\right)+\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{in}}\right)\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{in}}\right)=\mathrm{diag}\left(p_t^{\mathrm{in}}\right)=\boldsymbol{P}_{8\times 8}^{\mathrm{in}}\\ p_t^{\mathrm{in}}+\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{rt}}\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{rt}}=p_t^{\mathrm{rt}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：diag（·）为对角函数；$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{da}}$、$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{in}}$、$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{rt}}$分别为日前、日内和实时阶段的输入向量，表征各阶段的调控需求，$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{da}}$、$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{in}}$、$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{rt}}$分别为日前、日内和实时阶段的决策向量，具体形式见附录B式（B1）—（B6）；$\boldsymbol{P}_{T\times T}^{\mathrm{da}}$、$\boldsymbol{P}_{8\times 8}^{\mathrm{in}}$分别为日前、日内阶段的输出矩阵，表征各阶段的调控计划，T为调控周期；p_t^{da}、p_t^{in}、p_t^{rt}分别为日前、日内和实时阶段对于t时段出力的优化结果。

调控模型中关于BCSS运行和电力现货市场规则的关键问题如下。

1）换电供需建模。

EV用户前往电池配送站换电的时间存在随机性，同时电池配送耗时因交通因素影响也无法精准控制，因此BCSS面对的换电需求存在不确定性。

为描述换电需求的不确定性，假定基于EV用户行为和交通状况可得各时段的换电需求预测值d_t^{num}及其预测偏差最大值$\hat{\xi}_t^{\mathrm{num}}$，则换电需求值$\xi_t^{\mathrm{num}}\in$

$\left[d_t^{\mathrm{num}}-\hat{\xi}_t^{\mathrm{num}}, d_t^{\mathrm{num}}+\hat{\xi}_t^{\mathrm{num}}\right]$。BCSS传统运营模式下的收益来源仅为换电业务，运营商为追求收益最大化会在各调控时段到来前尽力确保满电电池数 $n_t^{100}\geqslant\xi_t^{\mathrm{num}}$。工程实际中由于投资成本限制，BCSS难以在换电高峰时期仍严格满足该约束；同时，电力现货市场环境为BCSS提供了多样化的收益来源，运营商可降低对换电需求的满足程度以追求收益最大化。

为描述BCSS因未满足换电需求而造成的损失，假定 t 时段未被满足的换电需求将流失，对应收益将损失。进而构造换电收益损失最大值 $C_t^{\mathrm{loss,max}}$ 以辅助决策，如式(2)所示。

$$C_t^{\mathrm{loss,max}}=E_t^{\mathrm{ev}}\left(\hat{\xi}_t^{\mathrm{num}}+d_t^{\mathrm{num}}-n_t^{100}\right)Q_{\mathrm{exp}}^{\mathrm{ev}}\quad n_{t-1}^{100}\leqslant\xi_t^{\mathrm{num}}\tag{2}$$

式中：E_t^{ev} 为 t 时段的换电服务电价；$Q_{\mathrm{exp}}^{\mathrm{ev}}$ 为换电电量期望值。

2)电池折旧建模。

电池运行产生的折旧成本 C^{bat} 表征了电池的总投资分解至各运行周期的成本，取决于浮充成本 C^{float} 和循环成本 C^{cycle}，如式(3)所示。

$$C^{\mathrm{bat}}=\max\left(C^{\mathrm{float}}, C^{\mathrm{cycle}}\right)\tag{3}$$

式中：max(·,·)为取最大值函数；C^{float} 可根据电池的单位容量投资成本 E_{bat}、额定容量 C_{cap} 和生产商提供的浮充寿命 T_{float} 计算得到，如式(4)所示；C^{cycle} 可根据充电功率 $P_{i,t}^{\mathrm{cha}}$、放电功率 $P_{i,t}^{\mathrm{dis}}$、充电效率 η_{cha}、放电效率 η_{dis}、基准循环次数 N_{o} 和拟合的特性参数 k_{p} 近似计算得到[17]，如式(5)所示。

$$C^{\mathrm{float}}=\frac{E_{\mathrm{bat}}C_{\mathrm{cap}}}{T_{\mathrm{float}}}\tag{4}$$

$$C^{\mathrm{cycle}}\approx\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1}{\eta_{\mathrm{dis}}}P_{i,t}^{\mathrm{dis}}+\eta_{\mathrm{cha}}P_{i,t}^{\mathrm{cha}}\right)^{k_{\mathrm{p}}}\frac{E_{\mathrm{bat}}C_{\mathrm{cap}}^{-k_{\mathrm{p}}}}{2N_{\mathrm{o}}}\tag{5}$$

3)调频调用电量。

调频辅助服务实时调用的电量存在随机性，因此在日前申报调频容量时需确保有足够的电量 $Q_t^{\mathrm{f}\pm}$ 支撑调频调用。假定基于历史调频数据可得到各时段调频调用电量预测值 d_t^{f} 及其预测偏差最大值 $\hat{\xi}_t^{\mathrm{f}}$，调频调用电量 $\xi_t^{\mathrm{f}\pm}\in\left[d_t^{\mathrm{f}}-\hat{\xi}_t^{\mathrm{f}}, d_t^{\mathrm{f}}+\hat{\xi}_t^{\mathrm{f}}\right]$，则上述约束可表示为：

$$Q_t^{\mathrm{f}\pm}\geqslant\xi_t^{\mathrm{f}\pm}\tag{6}$$

式中：$Q_t^{\mathrm{f}+}$、$\xi^{\mathrm{f}+}$ 对应向下调频场景；$Q_t^{\mathrm{f}-}$、$\xi^{\mathrm{f}-}$ 对应向上调频场景。

4)有效需求响应评估。

需求响应收益与需求侧资源的响应情况直接相关，以《广州市虚拟电厂实施细则》为例，其计算公式见附录B式(B7)。

5)电能量申报偏差收益转移。

为防止市场成员利用日前与日内市场的价差不正当套利，设定电能量申报偏差收益转移机制，以《广东现货电能量市场交易实施细则》为例，其计算公式见附录B式(B8)。

2 电力现货市场环境下EV BCSS的优化调控策略

为确保电力现货市场环境下的BCSS经济高效运行，本节提出日前-日内-实时多时间尺度的优化调控策略。

2.1 日前阶段

1)目标函数。

$$\max\ F^{\mathrm{da}}=\sum_{t=1}^{T}\left(R_t^{\mathrm{ev}}+R_t^{\mathrm{f}}+R_t^{\mathrm{res}}-C_t^{\mathrm{cha}}-C_t^{\mathrm{bat}}\right)\tag{7}$$

$$\begin{cases}R_t^{\mathrm{ev}}=E_t^{\mathrm{ev}}Q_{\mathrm{exp}}^{\mathrm{ev}}\min\left(\xi_t^{\mathrm{num}}, n_t^{100}\right)\\ R_t^{\mathrm{f}}=\left(E_t^{\mathrm{f}}+k_t^{\mathrm{f}}\right)\left(Q_t^{\mathrm{f}+}+Q_t^{\mathrm{f}-}\right)\\ R_t^{\mathrm{res}}=E_t^{\mathrm{da,res}}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,t}^{\mathrm{cha}}-P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\right)-P_t^{\mathrm{base}}\right]\\ C_t^{\mathrm{cha}}=E_t^{\mathrm{da,buy}}\sum_{i=1}^{n}P_{i,t}^{\mathrm{cha}}-E_t^{\mathrm{da,sell}}\sum_{i=1}^{n}P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\end{cases}\tag{8}$$

式中：R_t^{ev}、R_t^{f}、R_t^{res} 分别为 t 时段的换电收益、调频辅助服务收益、需求响应收益；C_t^{cha}、C_t^{bat} 分别为 t 时段的购电成本、电池折旧成本；E_t^{f} 为调频容量价格；k_t^{f} 为里程收益系数，表征 t 时段调频容量与里程收益的比例关系，由综合调频性能指标、调频里程价格和调频调用电量计算；P_t^{base} 为 t 时段的基线负荷；$E_t^{\mathrm{da,res}}$ 为 t 时段的日前需求响应价格，填谷响应价格取负值，削峰响应价格取正值；$E_t^{\mathrm{da,buy}}$、$E_t^{\mathrm{da,sell}}$ 分别为 t 时段的购、售电价格；n 为电池总数。

2)约束条件。

(1)换电约束。

$$Q_i^{\max}M_{i,t}\leqslant Q_{i,\mathrm{o}}+\sum_{t=1}^{k}\left(P_{i,t}^{\mathrm{cha}}\Delta t-P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\Delta t-H_{i,t}Q_{\mathrm{exp}}^{\mathrm{ev}}\right)\leqslant Q_i^{\max}\left(M_{i,t}+1\right)\quad k=1,2,\cdots,T\tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{n}M_{i,t}=n_t^{100}\geqslant\xi_{t+1}^{\mathrm{num}}\quad t=1,2,\cdots,T\tag{10}$$

$$H_{i,t}\leqslant M_{i,t}\tag{11}$$

式中：$Q_i^{\max}$ 为电池 i 的容量最大限额；$M_{i,t}$ 为满电状态变量，取1表示电池 i 在 t 时段末处于满电状态，取0表示未充满电；$Q_{i,\mathrm{o}}$ 为电池 i 的初始电量；Δt 为调控周期间隔；k 为任意调控周期；$H_{i,t}$ 为换电状态变量，取1表示电池 i 在 t 时段被换出，取0表示电池 i 未被换出。式(9)所示约束条件使各电池电量不超过额定值；式(10)所示约束条件使各时段末处于满电状态的电池数不少于下一时段的换电需求；式(11)所示约束条件使被更换出站的电池处于满电状态。

(2)电池能量约束。

$$\begin{cases}0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{cha}}\leqslant I_{i,t}P_{i,\max}^{\mathrm{cha}}\\ 0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\leqslant\left(1-I_{i,t}\right)P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}\end{cases}\quad t=1,2,\cdots,T\tag{12}$$

$$\begin{cases} Q_i^{\min} \leqslant Q_{i,t} \leqslant Q_i^{\max} \\ Q_{i,t+1} = Q_{i,t} + \left(P_{i,t}^{\text{cha}} - P_{i,t}^{\text{dis}}\right)\Delta t - H_{i,t} Q_{\exp}^{\text{ev}} \quad t=1,2,\cdots,T \\ \sum_{i=1}^{n} Q_{i,0} = \sum_{i=1}^{n} Q_{i,T} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$P_{i,\max}^{\text{cha}}$、$P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 分别为电池 i 的充、放电功率限额；$I_{i,t}$ 为充放电状态变量，取 1 表示处于充电状态，取 0 表示处于放电状态[18]；$Q_i^{\min}$ 为电池 i 的容量最小限额；$Q_{i,t}$ 为电池 i 在 t 时段开始时的电量；$Q_{i,0}$、$Q_{i,T}$ 分别为调控初始时段和末尾时段的电量。式(12)所示约束条件使电池不同时处于充电和放电状态；本文将电池换出视为快速放电，如式(13)所示。

(3)调频辅助服务约束。

$$\begin{cases} 0 \leqslant Q_t^{\text{f}+} \leqslant \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,\max}^{\text{cha}} - P_{i,t}^{\text{cha}} + P_{i,t}^{\text{dis}}\right) \\ 0 \leqslant Q_t^{\text{f}-} \leqslant \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,\max}^{\text{dis}} + P_{i,t}^{\text{cha}} - P_{i,t}^{\text{dis}}\right) \end{cases} \quad t=1,2,\cdots,T \tag{14}$$

$$\xi_t^{\text{num}} Q_{\exp}^{\text{ev}} \leqslant Q_t^{\text{f}+} - Q_t^{\text{f}-} + \sum_{i=1}^{n} Q_{i,t} \quad t=1,2,\cdots,T \tag{15}$$

式(14)所示约束条件表示使 BCSS 各时段出力低于其最大限额；式(15)所示约束条件表示使所申报调频容量不超过 BCSS 的可用容量。此外需遵循 1.3 节中的关键问题约束。

2.2　日内阶段

日内阶段换电需求、电能量价格存在波动，同时可能收到需求响应日内邀约，因此作进一步优化。基于 MPC 构建日内滚动优化调控环节，其优化调控步骤如下[19-20]：

1)将电池荷电状态、换电电量和调频调用电量曲线作为 MPC 参考曲线用于滚动优化跟踪；

2)建立控制时域和预测时域，考虑到越短的时间间隔内换电需求随机性越强，而越长的时间间隔将导致调控空间缩小，本文以 30 min 为控制时域，以 4 h 为预测时域；

3)获取当前 t 时段的系统状态 $\boldsymbol{x}(t)$，基于换电需求和电价的预测值以及需求响应日内邀约情况，在预测时域 $t+N_{\text{p}}$（N_{p} 为预测步长）内跟踪参考曲线，通过滚动优化算法得到预测功率曲线，并且计算各控制时域 $t+N_{\text{c}}$（N_{c} 为控制步长）内的控制序列 $\boldsymbol{u}\left(t+\varepsilon \middle| \varepsilon \in [0, N_{\text{c}}-1]\right)$；

4)将控制序列的首个结果 $\boldsymbol{u}(t)$ 作用于控制对象，并产生输出向量 $\boldsymbol{y}(t)$；

5)至 $t+1$ 时段，更新系统状态并将 $\boldsymbol{y}(t)$ 反馈给滚动优化模型，以校正 t 时段扰动量 $\boldsymbol{r}(t)$ 及预测误差。

上述基于 MPC 的滚动优化调控步骤中关键环节为滚动预测、滚动优化与反馈校正，其中滚动优化环节建立如下。

选取下网功率 $P_{\text{buy}}(t)$、换电电量 $Q^{\text{ev}}(t)$、调频调用预留电量 $Q^{\text{f}\pm}(t)$（$Q^{\text{f}\pm}(t)$ 为调频调用预留电量关于时段 t 的函数）、日内需求响应量 $Q^{\text{in,res}}(t)$、各电池充电功率 $\boldsymbol{P}_{\text{bat}}(t)=\left[P_1(t), P_2(t), \cdots, P_n(t)\right]$、各电池荷电状态 $\boldsymbol{S}_{\text{bat}}(t)=\left[S_1(t), S_2(t), \cdots, S_n(t)\right]$ 构成状态向量 $\boldsymbol{x}(t)$，如式(16)所示。

$$\boldsymbol{x}(t)=\left[\boldsymbol{P}_{\text{bat}}(t), \boldsymbol{S}_{\text{bat}}(t), P_{\text{buy}}(t), Q^{\text{ev}}(t), Q^{\text{f}\pm}(t), Q^{\text{in,res}}(t)\right]^{\text{T}} \tag{16}$$

选取换电电量增量 $\Delta Q^{\text{ev}}(t)$、调频调用电量增量 $\Delta Q^{\text{f}\pm}(t)$、日内需求响应增量 $\Delta Q^{\text{in,res}}(t)$、各电池充电增量 $\Delta \boldsymbol{P}_{\text{bat}}(t)=\left[\Delta P_1(t), \Delta P_2(t), \cdots, \Delta P_n(t)\right]$ 构成控制向量 $\boldsymbol{u}(t)$，如式(17)所示。

$$\boldsymbol{u}(t)=\left[\Delta \boldsymbol{P}_{\text{bat}}(t), \Delta Q^{\text{ev}}(t), \Delta Q^{\text{f}\pm}(t), \Delta Q^{\text{in,res}}(t)\right]^{\text{T}} \tag{17}$$

选取换电需求预测增量 $\Delta d^{\text{ev}}(t)$、调频调用预测增量 $\Delta d^{\text{in,f}}(t)$ 构成扰动向量 $\boldsymbol{r}(t)$，如式(18)所示。

$$\boldsymbol{r}(t)=\left[\Delta d^{\text{ev}}(t), \Delta d^{\text{in,f}}(t)\right]^{\text{T}} \tag{18}$$

进而形成 MPC 状态空间模型，如式(19)所示。

$$\boldsymbol{x}(t+\Delta t)=\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_a & 0 & 0 \\ \text{diag}\left(\Delta t/E_{\text{bat}}\right) & \boldsymbol{I}_a & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{I}_4 \end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)+ \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_a & 0 \\ \text{diag}\left(\Delta t/E_{\text{bat}}\right) & 0 \\ \boldsymbol{E}_a/\eta_{\text{cha}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)+\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}\boldsymbol{r}(t) \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{I}_a$ 为 $a\times a$ 维的单位矩阵；$\boldsymbol{E}(a)$ 为元素均为 1 的 $a\times a$ 维矩阵。选取电池荷电状态、换电电量和调频调用电量构成用于滚动跟踪的输出向量 $\boldsymbol{y}_1(t)$，如式(20)所示。

$$\boldsymbol{y}_1(t)=\left[\boldsymbol{S}_{\text{bat}}(t), Q^{\text{ev}}(t), Q^{\text{f}\pm}(t)\right] \tag{20}$$

选取下网功率、换电电量、调频调用电量和日内需求响应量构成用于计算日内收益的输出向量 $\boldsymbol{y}_2(t)$，如式(21)所示。

$$\boldsymbol{y}_2(t)=\left[P_{\text{buy}}(t), Q^{\text{ev}}(t), Q^{\text{f}\pm}(t), Q^{\text{in,ev}}(t)\right] \tag{21}$$

在调控中通过滚动预测迭代得到预测时域 N_{p} 内的输出向量 $\boldsymbol{Y}_1$ 和 $\boldsymbol{Y}_2$，分别如式(22)、(23)所示。

$$\boldsymbol{Y}_1=\left[\boldsymbol{S}_{\text{bat}}(t+k|t), Q^{\text{ev}}(t+k|t), Q^{\text{f}\pm}(t+k|t)\right]^{\text{T}} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{Y}_2=\left[P_{\text{buy}}(t+k|t), Q^{\text{ev}}(t+k|t), Q^{\text{f}\pm}(t+k|t), Q^{\text{in,res}}(t+k|t)\right]^{\text{T}} \tag{23}$$

进而建立滚动优化模型，目标函数见式(24)。

$$\min\ F^{\text{in}}=\left(\boldsymbol{Y}_1-\boldsymbol{Y}_{\text{r},1}\right)^{\text{T}}\boldsymbol{W}\left(\boldsymbol{Y}_1-\boldsymbol{Y}_{\text{r},1}\right)+m\boldsymbol{M}\boldsymbol{Y}_2 \tag{24}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{\text{r},1}$ 为 $\boldsymbol{Y}_1$ 的跟踪参考向量，由日前优化所得；$\boldsymbol{W}$ 为偏差权重矩阵，$\boldsymbol{M}$ 为价格矩阵，具体如附录 B 式(B9)、(B10)所示；m 为收益权重系数。目标函数中 $\left(\boldsymbol{Y}_1-\boldsymbol{Y}_{\text{r},1}\right)^{\text{T}}\boldsymbol{W}\left(\boldsymbol{Y}_1-\boldsymbol{Y}_{\text{r},1}\right)$ 为跟踪误差的平方和，一定程度上表征全局的经济性；$m\boldsymbol{M}\boldsymbol{Y}_2$ 为调控时段内的运

行成本，表征局部经济性。收益权重系数m可调节，以协调全局和局部最优[20]。

2.3 实时阶段

1）目标函数。

$$\min\ F^{\mathrm{rt}}=\sum_{t=1}^{T}\left(C_t^{\mathrm{bias}}+C_t^{\mathrm{bat}}-R_t^{\mathrm{rt,f}}-R_t^{\mathrm{res}}\right) \tag{25}$$

式中：C_t^{bias}为t时段的电能量申报偏差惩罚成本，计算公式见附录B式（B8）；$R_t^{\mathrm{rt,f}}$为t时段的调频里程收益，计算方法如式（26）所示。

$$\begin{cases} R_t^{\mathrm{rt,f}}=R_t^{\mathrm{rt,f+}}+R_t^{\mathrm{rt,f-}} \\ R_t^{\mathrm{rt,f+}}=E_t^{\mathrm{mil}}Q_t^{\mathrm{f+}}S_t^{*+}k_{\mathrm{rt}} \\ R_t^{\mathrm{rt,f-}}=E_t^{\mathrm{mil}}Q_t^{\mathrm{f-}}S_t^{*-}k_{\mathrm{rt}} \\ k_{\mathrm{rt}}=0.25\left(2k_1+k_2+k_{3\mathrm{rt}}\right) \\ k_{3\mathrm{rt}}=1-\left|L_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{f}\pm}-Q_t^{\mathrm{f}\pm}S_t^{*\pm}\right|/(\alpha^{\mathrm{cap}}P^{\mathrm{rated}}) \end{cases} \tag{26}$$

式中：$R_t^{\mathrm{rt,f+}}$、$R_t^{\mathrm{rt,f-}}$分别为t时段的向下、向上调频里程收益；E_t^{mil}为t时段的调频里程价格；S_t^{*+}、S_t^{*-}分别为向下、向上调频指令标幺值；k_{rt}为综合调频性能指标；k_1、k_2、$k_{3\mathrm{rt}}$分别为调频速率、响应时间和调频精度；$L_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{f}\pm}$、$\alpha^{\mathrm{cap}}$、$P^{\mathrm{rated}}$分别为实际调频里程、调节允许误差和BCSS的核定调频总容量。

2）约束条件。

（1）调节功率限制。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}Q_{i,k}^{\mathrm{rt}}\geqslant\sum_{i=1}^{n}Q_{i,k'}^{\mathrm{in}} \\ \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,\max}^{\mathrm{cha}}-P_{i,k}^{\mathrm{rt}}\right)\geqslant\sum_{i=1}^{n}Q_{i,k}^{\mathrm{f+}} \\ \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,k}^{\mathrm{rt}}-P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}\right)\geqslant\sum_{i=1}^{n}Q_{i,k}^{\mathrm{f-}} \end{cases} \quad \begin{matrix} k'=1,2,\cdots,T^{\mathrm{in}} \\ k=1,2,\cdots,T^{\mathrm{rt}} \end{matrix} \tag{27}$$

式中：$Q_{i,k'}^{\mathrm{in}}$、$Q_{i,k}^{\mathrm{rt}}$分别为电池i日内k'时段、实时调控后k时段的电量；$P_{i,k}^{\mathrm{rt}}$为k时段电池i的实时功率；T^{in}、T^{rt}分别为每次日内、实时调控的末端时段。

（2）还需遵循式（12）、（13）所示约束条件。

2.4 模型求解策略

上述电力现货市场环境下EV BCSS的优化调控模型，按照日前-日内-实时的顺序逐步求解。

日前阶段为鲁棒混合整数线性规划问题，本文采用椭球不确定集描述其不确性[21]，并将其等价变换成式（28）—（31）所示的二阶锥规划问题，进而通过商业求解器CPLEX 12.8.0.0求解，推导过程见附录B式（B11）—（B20）。

$$\min\ \omega \tag{28}$$

$$\omega+\sum_{t=1}^{T}\left[\left(\bar{E}_t^{\mathrm{f}}+\bar{k}_t^{\mathrm{f}}\right)\left(Q_t^{\mathrm{f+}}+Q_t^{\mathrm{f-}}\right)+\left(\bar{E}_t^{\mathrm{da,res}}-\bar{E}_t^{\mathrm{da,buy}}-\frac{E_{\mathrm{bat}}}{2N_{\mathrm{o}}C_{\mathrm{cap}}}\eta_{\mathrm{cha}}\right)\Delta t\sum_{i=1}^{n}P_{i,t}^{\mathrm{cha}}+\left(-\bar{E}_t^{\mathrm{da,res}}+\bar{E}_t^{\mathrm{da,sell}}-\frac{E_{\mathrm{bat}}}{2N_{\mathrm{o}}C_{\mathrm{cap}}}\frac{1}{\eta_{\mathrm{dis}}}\right)\Delta t\sum_{i=1}^{n}P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\right]-\rho\left\|\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}_1\right\|_2\geqslant 0 \tag{29}$$

$$\sum_{i=1}^{n}M_{i,t}-d_{t+1}^{\mathrm{num}}y_{t+1}-\rho\left\|\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}_2\right\|_2\geqslant 0\quad t=1,2,\cdots,T \tag{30}$$

$$d_t^{\mathrm{f+}}Q_t^{\mathrm{f+}}-d_t^{\mathrm{f-}}Q_t^{\mathrm{f-}}-d_{t+1}^{\mathrm{num}}v_{t+1}+\sum_{i=1}^{n}Q_{i,t+1}-\rho\left\|\boldsymbol{P}_3\boldsymbol{x}_3\right\|_2\geqslant 0\quad t=1,2,\cdots,T \tag{31}$$

式中：$\bar{E}_t^{\mathrm{f}}$、$\bar{k}_t^{\mathrm{f}}$、$\bar{E}_t^{\mathrm{da,res}}$、$\bar{E}_t^{\mathrm{da,buy}}$、$\bar{E}_t^{\mathrm{da,sell}}$分别为随机变量$E_t^{\mathrm{f}}$、$k_t^{\mathrm{f}}$、$E_t^{\mathrm{da,res}}$、$E_t^{\mathrm{da,buy}}$、$E_t^{\mathrm{da,sell}}$的预测值；$\boldsymbol{P}_{i'}$、$\boldsymbol{x}_{i'}(i'=1,2,3)$分别为所在约束式的放缩矩阵和决策变量；$\boldsymbol{\omega}$、$y_{t+1}$、$v_{t+1}$为辅助变量；$\rho$为不确定度控制系数。

日内滚动优化环节为混合整数二次规划问题，实时阶段为混合整数线性规划问题，均使用商业求解器CPLEX 12.8.0.0求解。

3 算例分析

3.1 参数设置

为验证策略有效性，仿真分析图1所示BCSS，相关参数见附录C表C1，其中电池参数采用三元锂电池常用装车数据。EV换电需求基于美国家庭出行调查数据，采用蒙特卡罗方法进行模拟，具体如图2所示。其中日前以1 h为时间尺度得到24个数据点，日内以30 min为时间尺度得到48个数据点，并假定EV中待更换电池荷电状态服从N（0.2，0.04²）概率分布。日前、实时购售电电价、调频容量、里程价格预测值根据2019年美国PJM市场的运行数据模拟，日前、日内、实时需求响应价格以《广州市虚拟电厂实施细则》为基准设定，具体数据见附录C图C1、图C2和表C2，预测偏差均设为10%。

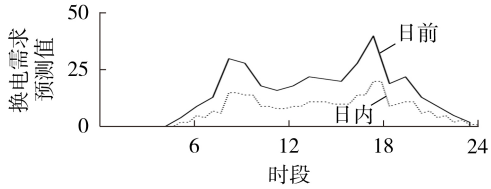


图2 不同时段下EV换电需求预测值

Fig.2 Forecast values for EV battery demand under different period

3.2 算例分析

3.2.1 优化调控分析

对电力现货市场环境下EV BCSS的优化调控进行仿真分析，仿真结果附录C图C3—C5。

由仿真结果可见，时段0—3的日前充电曲线和日内充电曲线保持一致，其他时段的日内充电曲线几乎均略低于日前充电曲线。根据2.2节分析，日内调控的目标函数由全局经济性和局部经济性构成，而时段0—5并无换电需求，完全响应时段2、3的需求响应邀约符合该调控周期的局部经济性最优目标，同时能够使得用电曲线的跟踪误差最小，即全局收益性最优，因此该时段的日前、日内充电曲线保持

一致。在其他时段，日内调控的开展基于更高精度的换电需求预测，则在各时段有更精确的充电电量需求，因此在调控目标中局部经济性的影响下，日内充电曲线相较日前的鲁棒优化曲线有所下降，有效提高了BCSS的运行经济性。

图C3中BCSS的3次长时间对外放电，分别对应3次需求响应：①时段0、1 BCSS放电，为时段2、3的填谷需求预留充电空间；②时段12、13同时存在日前和日内两阶段的削峰需求，因此经日前调控后充电功率为负值，进入日内阶段，随着时段0—11的滚动优化，BCSS中未充分利用的调频电量和换电电量逐渐累积，在该时段日内削峰需求出现时，即可利用该部分能量参与响应；③时段19、20为日前电价高峰，日前调控下充电功率为负值，进入实时阶段，实时电价再度升高，同时产生填谷需求，因此日内及实时阶段放电功率进一步增大。综上所述，本文构建优化调控策略可有效感知并适应电力现货市场环境。

3.2.2　模型参数的影响

本节重点仿真分析不确定度控制系数 ρ 和收益权重系数 m 对整体优化调控的影响。ρ 在一定程度上反映了决策者对不确定性所带来风险的回避程度；m 反映了决策者对于全局经济性和局部经济性的取舍决策。设置对比模型，仿真分析各模型在典型场景下的策略执行情况，模型参数设置及仿真结果见表1。

表1　不同参数设置下的调控结果

Table 1　Regulation results for different parameters

模型	参数设置	日前收益/元	日前成本/元	日内收益/元	日内成本/元
1	ρ=1，m=1	58738	19290	64977	17911
2	ρ=0.5，m=1	59786	18882	63783	17892
3	ρ=0，m=1	62140	17788	61780	17823
4	ρ=1，m=0	58738	19290	60145	17794

除模型3外，其他模型的日前收益均小于日内收益，日前成本均大于日内成本。该差异来自2个方面：①日前阶段为回避风险将根据 ρ 在各时段预备足量的电量，从而产生更高的购电成本和电池折旧成本，优化结果相对保守；②日内阶段BCSS可通过参与日内需求响应获得收益。

模型1—3的日前收益逐步增加，日内收益逐步下降。因为随着 ρ 降低，日前阶段对不确定性风险的回避程度逐渐减小，策略的保守程度逐渐降低，预期收益逐渐增加；进入日内阶段，模型1有充足的电量应对换电需求波动并从日内需求响应中获利；模型2的 ρ 相对较低，可在一定程度上应对换电需求波动，但难以参与日内削峰需求响应；模型3在日前阶段未考虑不确定性，完全依靠日内滚动优化应对换电需求波动，在换电高峰时段出现换电收益损失，且未有效参与日内需求响应，因此其日内收益最低且低于日前收益，日内成本大于日前成本。而模型4的日内阶段仅以跟踪误差最小为目标，在滚动优化过程中仍保持较高保守性，由于剔除了局部经济性目标，模型对需求响应日内邀约无响应，因此其日内收益最低。

3.2.3　需求响应价格与时段的影响

分析需求响应价格与时段对优化调控结果的影响。由1.1节和1.2节可知日前和日内阶段的需求响应有相似的交易机制和参与形式，实时需求响应则对需求侧资源的实时调控能力有更高的要求，因此本节选取日前需求响应和实时需求响应进行分析。

在3.1节的基础上对日前需求响应价格区间以及实时需求响应时段做出调整，形成如下场景：①场景1，日前需求响应价格、实时需求响应时段均不变；②场景2，日前需求响应价格降低（填谷、削峰价格均降低25%），实时需求响应时段不变；③场景3，日前需求响应价格不变，实时需求响应时段调整（调整为时段17、18）。仿真分析不同场景下策略执行情况，结果见图3、4。

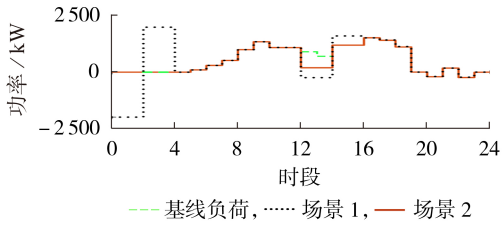


图3　场景1、2的日前优化调控充电曲线

Fig.3　Day-ahead optimized regulation charging curves in Scenario 1 and 2

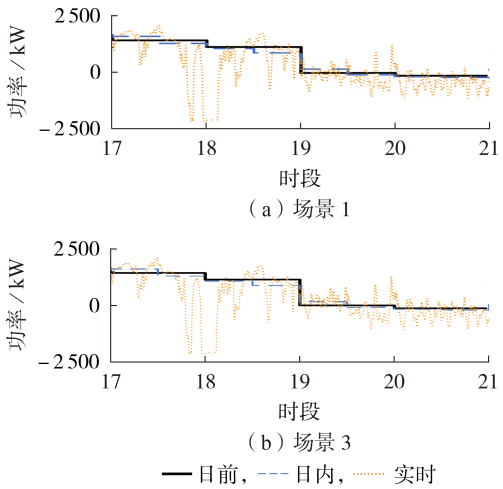


图4　场景1、3的实时优化调控充电曲线

Fig.4　Real-time optimized regulation charging curves in Scenario 1 and 3

场景1中BCSS在时段2、3响应填谷需求，在时段12、13响应削峰需求；场景2中BCSS未响应时段2、3的填谷需求，对时段12、13的削峰需求响应量减少，同时时段14、15的充电功率下降。BCSS充电伴随电池折旧成本和购电成本，放电伴随售电收益和电池折旧成本，并减少BCSS内电池电量裕度。BCSS日前优化调控以收益最高为目标，场景1中BCSS参与需求响应所获收益大于上述成本支出，且能够保有充足的电量裕度，因此其较大程度地参与需求响应。场景2中日前需求响应价格区间降低，使得时段2、3的填谷收益小于对应的成本支出，因此BCSS无响应；而在时段12、13，削峰价格较低，结合时段14、15的电能量价格数据，BCSS倾向于降低削峰需求响应量以使整体收益最高。

图4中场景1下BCSS于时段19、20响应实时阶段的填谷需求，而在场景3下未响应，因此场景1的实时曲线较场景3整体偏低。时段19、20为日前电价高峰时段，且在实时阶段电价再度上升，同时产生实时削峰需求。BCSS后续换电需求较小，在确保调频容量的基础上有充裕的放电空间进行响应；时段17、18为换电需求高峰期，此时BCSS需大量充电，同时满足日前承诺的调频容量，因此虽然该时段的实时需求响应收益较高，但BCSS无响应。由此可见，BCSS虽然能够满足实时需求响应的快速响应要求，但受到换电服务的限制，同时与调频辅助服务参与程度相互制约，其灵活可调性有所下降。

4 结论

本文依据南方电力现货市场系列试点规则方案，提出电力现货市场环境下BCSS的多时间尺度调控策略，通过参与多种交易品种提升其经济效益，同时为新型电力系统建设提供支撑。通过仿真分析，得出以下结论。

1）所提调控模型可精确描述站内各电池换电、充电、放电、满电状态之间的转换，解决现有的BCSS优化调控模型中大多通过电能储备总量描述充换电需求，无法反映各电池在各时刻所处状态的问题，从而全面反映换电服务和现货市场多品种交易的协同开展状况。

2）基于MPC的日内滚动优化综合考虑跟踪误差和局部经济性最优，可有效使BCSS跟踪日前优化调控曲线，并在收到需求响应日内邀约时积极响应，同时解决日前鲁棒优化结果的保守性问题，使调控策略更贴近实际运行状态和电力现货市场需求。

3）BCSS能够满足需求响应的快速响应要求，但其响应意愿受需求响应价格和时段的影响。当需求响应价格偏低致使需求响应预期收益低于相应付出的电池折旧成本和购电成本时，BCSS倾向于不响应；当需求响应时段与换电高峰期重叠时，EV BCSS将优先满足换电需求，响应能力较弱。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 吴克河，王继业，李为，等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(4)：966-979.
WU Kehe，WANG Jiye，LI Wei，et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE，2019，39(4)：966-979.

[2] WU Hao，PANG G K H，CHOY K L，et al. An optimization model for electric vehicle battery charging at a battery swapping station[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2018，67(2)：881-895.

[3] 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.

[4] 刘敦楠，王玲湘，汪伟业，等. 基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J]. 电力系统自动化，2022，46(4)：36-46.
LIU Dunnan，WANG Lingxiang，WANG Weiye，et al. Optimal scheduling of electric vehicle load for large-scale battery charging and swapping based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(4)：36-46.

[5] WU H，PANG G K H，CHOY K L，et al. A charging-scheme decision model for electric vehicle battery swapping station using varied population evolutionary algorithms[J]. Applied Soft Computing，2017，61：905-920.

[6] ABBASI M H，TAKI M，RAJABI A，et al. Coordinated operation of electric vehicle charging and wind power generation as a virtual power plant：a multi-stage risk constrained approach[J]. Applied Energy，2019，239：1294-1307.

[7] 张渝涵. 考虑换电需求与光伏出力双重随机性的光伏-电动汽车充换电站日前调度[D]. 天津：天津大学，2019.
ZHANG Yuhan. Day-ahead scheduling for an electric vehicle PV-based battery swapping station considering the dual uncertainties[D]. Tianjin：Tianjin University，2019.

[8] 王彩霞，时智勇，梁志峰，等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：37-48.
WANG Caixia，SHI Zhiyong，LIANG Zhifeng，et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(16)：37-48.

[9] HAN S，HAN S，SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2010，1(1)：65-72.

[10] MAHMUD K，HOSSAIN M J，RAVISHANKAR J. Peak-load management in commercial systems with electric vehicles[J]. IEEE Systems Journal，2019，13(2)：1872-1882.

[11] HAN S，HAN S，SEZAKI K. Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation：case studies for market participation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2011，2(4)：632-641.

[12] WU C, LIN X, SUI Q, et al. Two-stage self-scheduling of battery swapping station in day-ahead energy and frequency regulation markets[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116285.
[13] YAO E, WONG V W S, SCHOBER R. Robust frequency regulation capacity scheduling algorithm for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 984-997.
[14] SCARABAGGIO P, CARLI R, CAVONE G, et al. Smart control strategies for primary frequency regulation through electric vehicles: a battery degradation perspective[J]. Energies, 2020, 13(17): 4586.
[15] 吕力. 市场环境下电动汽车的聚合模型及其参与电力系统辅助服务的策略研究[D]. 南京:东南大学,2018.
LÜ Li. Convergence model of electric vehicles in market environment and its strategy for participation in ancillary service [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
[16] 高赐威,吴茜. 电动汽车换电模式研究综述[J]. 电网技术,2013,37(4):891-898.
GAO Ciwei, WU Xi. A survey on battery-swapping mode of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 891-898.
[17] BRISSAUD C, REUMONT G, SMAHA J P, et al. Structural and morphological study of damage in lead/acid batteries during cycling and floating tests[J]. Journal of Power Sources, 1997, 64(1): 117-122.
[18] 毛海鹏,张勇军,王浩林,等. 基于模块分割式电池的换电站充电策略优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):111-117.
MAO Haipeng, ZHANG Yongjun, WANG Haolin, et al. Charging strategy optimization of swapping station based on modular split batteries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 111-117.
[19] 丁泉,窦晓波,钱国明,等. 电力现货市场环境下园区型综合能源系统多阶段联合优化运行[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):56-63.
DING Quan, DOU Xiaobo, QIAN Guoming, et al. Multi-stage joint optimal operation of park-level IES in electricity spot market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 56-63.
[20] 窦晓波,徐慈慧,董建达,等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):48-55.
DOU Xiaobo, XU Minhui, DONG Jianda, et al. Multi-time scale based improved energy management model for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 48-55.
[21] 安晓敏,罗桂美. 椭球不确定集下的投资组合鲁棒优化模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,37(1):89-92.
AN Xiaomin, LUO Guimei. Robust portfolio selection under ellipsoidal uncertainty[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(1): 89-92.

作者简介:

曾宪锴

曾宪锴(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充放电管理、可再生能源并网与微电网技术、电力市场(**E-mail**:1084808006@qq.com);
杨　苹(1967—),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为可再生能源并网与微电网技术(**E-mail**:eppyang@edu.cn)。

(编辑　王欣竹)

Optimal regulation strategy of battery charging and swapping station for electric vehicles under electricity spot market environment

ZENG Xiankai[1,2], YANG Ping[1,2], LIU Luyao[1], YANG Kang[2], TAN Junfeng[2]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Clean Energy Technology of Guangdong Province, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Under the strategic goal of building the new-type power system, the electricity spot market continues to put forward new demands and requirements for demand-side resources such as battery charging and swapping station for electric vehicles. Based on pilot rules for the electricity spot market in southern China, considering the transaction varieties such as spot electric energy, frequency regulation auxiliary services and multi-stage demand response, the regulation model of battery charging and swapping station for electric vehicles is established, and the multi-stage optimal regulation strategy is designed, which includes day-ahead, intra-day and real-time stage. In the day-ahead stage, robust optimization is constructed to solve the uncertainty problems of battery swapping demand, electric energy used for frequency regulation and the price of various transaction varieties, and the solution is solved through the second-order cone programming algorithm. In the intra-day stage, the rolling optimization link based on model predictive control is constructed to ensure that intra-day demand response transactions are effectively engaged. In the real-time stage, aiming at the lowest control cost, considering the real-time invitation for the demand response and the fluctuation of electricity price, the battery power allocation strategy is solved. The simulation case shows that the proposed strategy can make full use of the regulation potential of the battery charging and swapping station and improve its economic benefits.

Key words: electric vehicles; battery charging and swapping station; electricity spot market; robust optimization; model predictive control; multi-stage optimization

附录 A

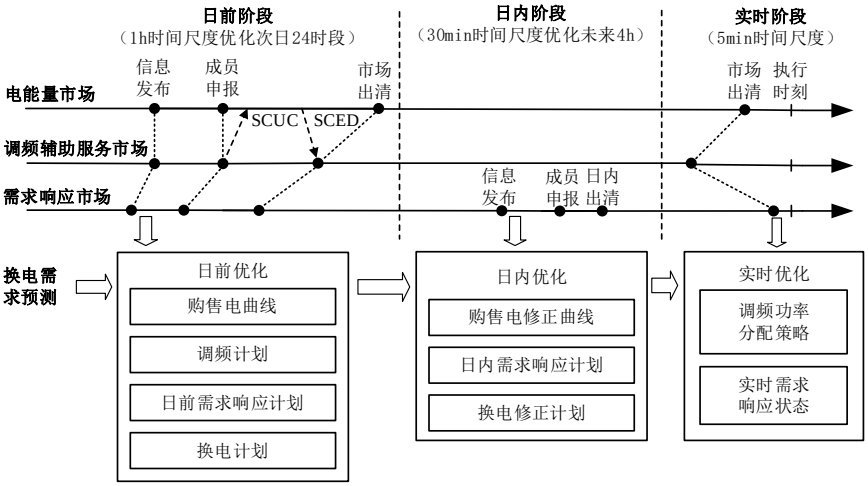


图 A1　电力现货市场环境下 BCSS 的调控流程

Fig.A1　Regulation process of BCSS in electricity spot market environment

附录 B

1.多时间尺度调控模型中的变量定义：

$$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{da}} = [d_t^{\mathrm{da,res}}, d_t^{\mathrm{da,f}}, d_t^{\mathrm{da,num}}] \tag{B1}$$

$$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{in}} = [d_t^{\mathrm{in,res}}, d_t^{\mathrm{in,num}}] \tag{B2}$$

$$\boldsymbol{D}_t^{\mathrm{rt}} = [d_t^{\mathrm{rt,res}}, d_t^{\mathrm{rt,f}}] \tag{B3}$$

式中：$d_t^{\mathrm{da,res}}$ 为 t 时段的需求响应日前邀约，$d_t^{\mathrm{da,f}}$ 为调频容量需求、$d_t^{\mathrm{da,num}}$ 换电需求日前预测值，$d_t^{\mathrm{in,res}}$ 由为 t 时段的需求响应日内邀约、$d_t^{\mathrm{in,num}}$ 为换电需求日内预测值，$d_t^{\mathrm{rt,res}}$ 为 t 时段的需求响应实时邀约，$d_t^{\mathrm{rt,f}}$ 为调频指令。

$$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{da}} = [x_t^{\mathrm{da,res}}, x_t^{\mathrm{da,f}}, x_t^{\mathrm{da,num}}]^{\mathrm{T}} \tag{B4}$$

$$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{in}} = [x_t^{\mathrm{in,res}}, x_t^{\mathrm{in,num}}]^{\mathrm{T}} \tag{B5}$$

$$\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{rt}} = [x_t^{\mathrm{rt,res}}, x_t^{\mathrm{rt,f}}]^{\mathrm{T}} \tag{B6}$$

式中：$x_t^{\mathrm{da,res}}$ 为 t 时段的日前需求响应系数，$x_t^{\mathrm{da,f}}$ 为调频容量分配系数，$x_t^{\mathrm{da,num}}$ 为换电服务系数，$x_t^{\mathrm{in,res}}$ 为 t 时段的日内需求响应系数，$x_t^{\mathrm{in,num}}$ 为换电服务修正系数组成，$x_t^{\mathrm{rt,res}}$ 为 t 时段的实时需求响应系数，$x_t^{\mathrm{rt,f}}$ 为调频响应系数。

2.有效需求响应评估计算公式：

$$R_t^{\mathrm{res}} = \begin{cases} 0 & \left|P_t^{\mathrm{rt}} - P_t^{\mathrm{base}}\right| < z_1 \left|P_t^{\mathrm{call}}\right| \\ E_t^{\mathrm{res}} \cdot \left|P_t^{\mathrm{rt}} - P_t^{\mathrm{base}}\right| & z_1 \left|P_t^{\mathrm{call}}\right| < \left|P_t^{\mathrm{rt}} - P_t^{\mathrm{base}}\right| < z_2 \left|P_t^{\mathrm{call}}\right| \\ E_t^{\mathrm{res}} \cdot \left|P_t^{\mathrm{call}}\right| & z_3 \left|P_t^{\mathrm{call}}\right| < \left|P_t^{\mathrm{rt}} - P_t^{\mathrm{base}}\right| \end{cases} \tag{B7}$$

式中：P_t^{base} 为有效需求响应由基线负荷，P_t^{rt} 为实际负荷，P_t^{call} 为需求响应邀约量，z_1、z_2、z_3 为分段设定边界。

3.电能量申报偏差收益转移计算公式：

$$C_t^{\mathrm{bias}} = \begin{cases} (E_t^{\mathrm{rt}} - E_t^{\mathrm{da}})(P_t^{\mathrm{da}} - P_t^{\mathrm{rt}}(1+\lambda)) & (E_t^{\mathrm{rt}} > E_t^{\mathrm{da}}) \cap (P_t^{\mathrm{da}} > P_t^{\mathrm{rt}}(1+\lambda)) \\ (E_t^{\mathrm{da}} - E_t^{\mathrm{rt}})(P_t^{\mathrm{rt}}(1-\lambda) - P_t^{\mathrm{da}}) & (E_t^{\mathrm{rt}} < E_t^{\mathrm{da}}) \cap (P_t^{\mathrm{da}} < P_t^{\mathrm{rt}}(1-\lambda)) \end{cases} \tag{B8}$$

式中：C_t^{bias} 为偏差惩罚成本；E_t^{rt}、E_t^{da}、P_t^{rt}、P_t^{da} 分别为 t 时段的实时市场电价、日前市场电价、日前市场申报量、实际用电量；λ 为最大允许申报偏差率。

4.日内优化目标的偏差权重矩阵与价格矩阵：

$$\boldsymbol{W}=\mathrm{diag}(w_{\mathrm{soc}}(t),w_{\mathrm{ev}}(t),w_{\mathrm{f}}(t),\cdots,w_{\mathrm{soc}}(t+N_{\mathrm{p}}),w_{\mathrm{ev}}(t+N_{\mathrm{p}}),w_{\mathrm{f}}(t+N_{\mathrm{p}}))\tag{B9}$$

$$\boldsymbol{M}=\left[E^{\mathrm{in,buy}}(t),-E^{\mathrm{ev}}(t),-E^{\mathrm{f}}(t),-E^{\mathrm{in,res}}(t),\cdots,E^{\mathrm{in,buy}}(t+N_{\mathrm{p}}),-E^{\mathrm{ev}}(t+N_{\mathrm{p}}),-E^{\mathrm{f}}(t+N_{\mathrm{p}}),-E^{\mathrm{in,res}}(t+N_{\mathrm{p}})\right]\tag{B10}$$

式中：$w_{\mathrm{soc}}(\cdot)$、$w_{\mathrm{ev}}(\cdot)$、$w_{\mathrm{f}}(\cdot)$分别为输出向量中电池荷电状态、换电电量、调频调用电量等元素对应的偏差权重系数；$E^{\mathrm{in,buy}}(\cdot)$、$E^{\mathrm{ev}}(\cdot)$、$E^{\mathrm{f}}(\cdot)$、$E^{\mathrm{in,res}}(\cdot)$分别为购电价格、换电价格、调频容量价格、日内需求响应价格。

5.日前阶段鲁棒混合整数线性规划问题转换为二阶锥规划问题的推导过程：

日前阶段优化模型基本形式为：

$$\max \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}\tag{B11}$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{A}_{m\times l}\boldsymbol{x}\geq\boldsymbol{b}_{m\times 1}\tag{B12}$$

式中：系数矩阵$\boldsymbol{A}$、向量$\boldsymbol{c}$和$\boldsymbol{b}$中均含随机变量，m、l为矩阵的行、列数。为简化求解，作等价变换形成如下形式。

$$\min\ \omega\tag{B13}$$

$$\text{s.t. } \omega+\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}\geq 0\tag{B14}$$

$$\boldsymbol{A}_{m\times l}\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b}_{m\times 1}y\geq 0\tag{B15}$$

$$y=1\tag{B16}$$

式中：ω、y为辅助变量；约束式(B14)—（B16）可统一成如下形式。

$$\boldsymbol{A}^{*}_{(m+1)\times l}\boldsymbol{x}^{*}\geq\boldsymbol{b}^{*}_{(m+1)\times 1}\tag{B17}$$

式中：$\boldsymbol{A}^{*}_{(m+1)\times l}$、$\boldsymbol{b}^{*}_{(m+1)\times 1}$、$\boldsymbol{x}^{*}$为统一后的系数矩阵、系数向量和决策向量。随机变量均在$\boldsymbol{A}^{*}_{(m+1)\times l}$中。采用椭球不确定集描述其中各行向量$\boldsymbol{a}_i^{*}$的不确定性如下：

$$\boldsymbol{a}_i^{*\mathrm{T}}=\left\{\bar{\boldsymbol{a}}_i^{*\mathrm{T}}+\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{u}\,\middle|\,\|\boldsymbol{u}\|_2\leq\rho\right\}\quad \boldsymbol{P}_i\in R^{l\times l}\quad i=1,\cdots,m+1\tag{B18}$$

式中：$\boldsymbol{P}_i$为i第个约束式的放缩矩阵，表征各不确定性参数在各方向上的变化尺度，可通过各不确定性参数波动范围ξ_t构造；ρ为不确定度控制系数。

进而日前优化模型可转换为如下二阶锥规划问题。

$$\min\omega\tag{B19}$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{a}_i^{*}\boldsymbol{x}-\rho\left\|\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}\right\|_2\geq b_i\quad i=1,\cdots,m+1\tag{B20}$$

附录 C

表 C1　BCSS 的参数

Table C1　Parameters of BCSS

参数类型	设定值	参数类型	设定值
充电机效率/%	95	电池数量/个	100
充电机数量/个	100	荷电状态下限/%	10
充放电功率上限/kW	20	电池容量/(kW·h)	60
换电折合费用/[元 (kW·h)$^{-1}$]	2.0	电池投资成本/[元 (kW·h)$^{-1}$]	1309

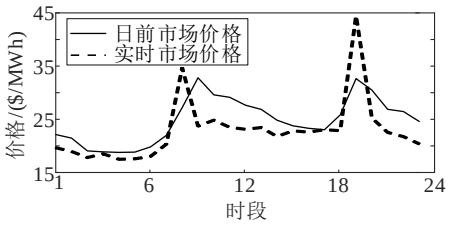


图 C1 现货电能量市场价格

Fig.C1 Electricity price in spot market

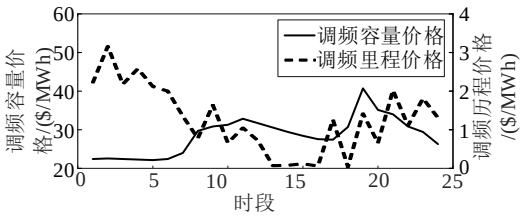


图 C2 调频辅助服务市场价格

Fig.C2 Prices in frequency regulation ancillary services market

表 C2 需求响应价格

Table C2 Price of demand response

响应类型	需求响应价格/[元 (kW·h)$^{-1}$]		
	日前	日内	实时
削峰	5±0.5	7.5±0.75	15±1.5
填谷	2±0.2	3±0.3	6±0.6

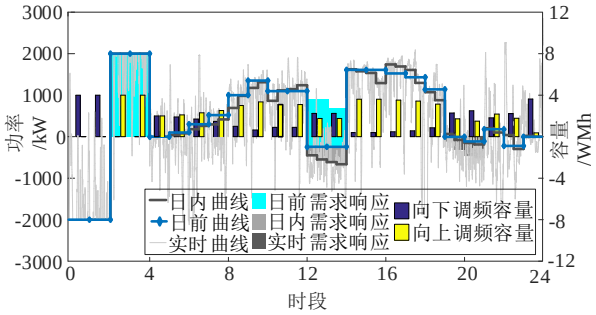
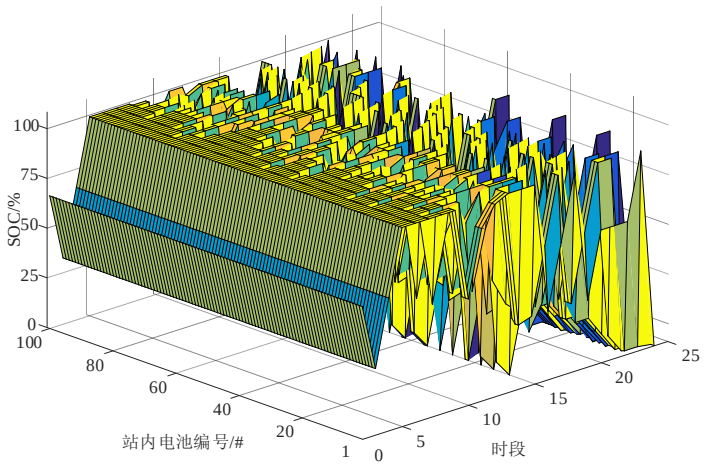
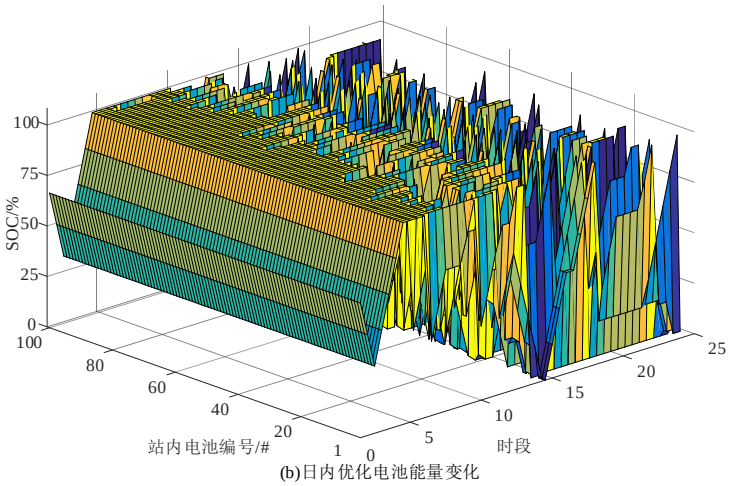


图 C3 三阶段优化调控结果

Fig.C3 Results of three-stage optimal regulation



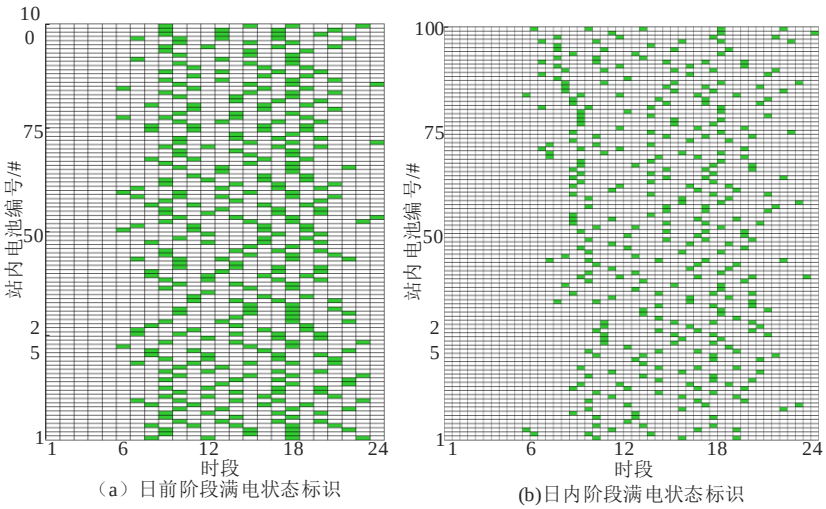
(a)日前优化电池能量变化



(b)日内优化电池能量变化

图 C4　电池荷电状态变化曲线

Fig.C4　Variation curve of battery state of charge



（a）日前阶段满电状态标识　　(b)日内阶段满电状态标识

图 C5　各时段电池满电状态标识

Fig.C5　Indication of battery fully charged status in each period