第 50 卷 第 12 期：5621-5631 高电压技术 Vol.50, No.12: 5621-5631
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231668

基于连续时间尺度的储能运行提升光储型园区需量防守能力

刘峰伟，陈佳佳，魏延康，徐丙垠，赵艳雷
（山东理工大学电气与电子工程学院，淄博 255000）

摘　要：工商业园区配置光伏和储能可大幅减少用电成本，光储电站必然会成为新型电力系统用户侧重要组成部分。但特殊场景下负荷激增或光伏发电骤减，极易引发园区需量防守失败，影响光储电站收益最大化。在此背景下，该文提出一种连续时间尺度的储能运行策略，用以提升特殊场景下光储型园区需量防守能力。首先，推导出区间归一化 Bernstein 多项式，以获取连续时间尺度下储能能量状态和充放电功率。然后，基于区间归一化 Bernstein 多项式，构建了连续时间尺度下储能运行模型。最后，综合考虑电度电费、需量电费及系统约束，提出了基于区间归一化 Bernstein 多项式的光储型园区需量防守策略，并以淄博某光储型园区的数据进行仿真分析，结果表明所提方法明显优于传统基于离散运行的储能优化策略，有利于提升光储型园区经济效益。

关键词：需量防守；Bernstein 多项式；两部制电价；光储型园区；连续运行

Energy Storage Operation Based on Continuous Time Scale to Improve the Demand Defense Capacity of Photovoltaic and Energy Storage Integrated Park

LIU Fengwei, CHEN Jiajia, WEI Yankang, XU Bingyin, ZHAO Yanlei
(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The configuration of photovoltaic and energy storage in a park can greatly reduce the cost of electricity consumption, and the optical storage park is bound to become an important part of the new power system. However, the surge of load or the sudden decrease of photovoltaic power generation in special scenarios can easily lead to the failure of park demand defense and affect the profit maximization of optical storage power stations. Under this background, this paper proposes a continuous time-scale energy storage operation strategy to improve the defense capability of optical storage park in special scenes. Firstly, the Bernstein polynomial based on interval normalization is derived to obtain the energy storage state and charge-discharge power at continuous time scale. This method extends the application of Bernstein polynomials in continuous optimal scheduling in arbitrary closed intervals. Then, based on the interval normalized Bernstein polynomials, a continuous time scale energy storage operation model is constructed. Finally, after electricity, electricity demand and system constraints being taken into consideration, a defense strategy of optical storage park demand based on Bernstein polynomial based on interval normalization is proposed, and the simulation analysis is carried out with the data of an optical storage park in Zibo city of China. The results show that the proposed method is obviously better than the traditional energy storage defense strategy based on discrete operation.

Key words: demand defense; Bernstein polynomial; two-part electricity price; photovoltaic and energy storage integrated park; continuous optimization

0　引言

在“双碳”目标驱动下，光伏发电、储能正在推动电力技术发生一场革命性的变化[1-2]。目前光伏发电成本已低于火电上网电价，工商业园区利用其厂房、屋顶、车棚等资源安装光伏，实现自发自用、余量上网，既能降低电度电费支出，又可减少碳排放、缓解供电紧张状况。而园区储能的应用，则可进一步降低电度电费和需量电费支出、提升光伏发电就地消纳比例，提高电网设备利用效率，还能够保障园区孤岛运行重要负荷的不间断供电。

国家发展改革委、国家能源局发布的[2021]1051 号文，鼓励在工业园区、大数据中心、5G 基

基金资助项目：国家自然科学基金(52377110)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52377110).

站、微电网等终端用户中应用储能系统。国家发展改革委发布的[2021] 1093 号文，提出进一步完善峰谷电价机制，持续拉大峰谷电价价差、提高尖峰电价，鼓励工商业用户通过配置储能降低高峰时段用电负荷、增加低谷时段用电量[3]。在此背景下，用户侧光储型园区必然会成为新型电力系统的重要组成部分，在吸引社会资本参与新能源项目投资、优化能源结构、助力碳达峰与碳中和等方面也起到积极作用[4]。因此，如何在光伏发电和负荷动态变化过程中及时调整储能充放电功率，实现园区光储电站收益最大化，是亟待解决的关键问题。

目前，关于光储型园区储能运行控制的研究已经取得了一些研究成果，主要集中于峰谷套利、促进光伏就地消纳及降低需量电费。例如，在峰谷套利模式中，文献[5]依据分时电价和荷电状态信息确定储能充放电起止时刻，根据负荷实际需求确定其充放电功率，实现光储型园区的经济运行。文献[6]研究表明，在具备光伏的用户侧配置储能能够提升光伏就地消纳比例，减低用户的电费支出，同时增加投资者的利润。文献[7]提出一种需量管理捆绑峰谷套利的园区储能评估与优化方法，深入研究了需量防守的经济性。总体而言，在峰谷套利方面，储能谷时电价充电、峰时电价放电，通过权衡套利收益与运维费用确定储能每日最优充放电次数，运行模式简单，技术挑战性较小。在光伏就地消纳方面，考虑光伏上网电价较低，当光伏发电大于园区负荷时，多余的光伏发电优先对储能进行充电，场景比较简单，实现方式也相对容易。

在目前广泛应用的两部制电价下，工商业园区每月的需量电费等于关口表每月 15 min 最大取电功率平均值乘以需量电价。一般来说，光储型园区通过预测方法或历史数据获取未来一个月的光伏发电和负荷需求曲线，然后以运行成本最小化为目标优化储能充放电，确定每月需量最大值，即月需量防守值。而实际工程中，园区光伏发电和负荷曲线难以精确预测，尤其是极端天气、园区线路故障、园区大功率实验设备突然启动等特殊场景[8]。以山东为例，1~10 kV 以及 20 kV 工商业用户需量电价为 38.4 元/(kW·月)，需量每增加 1 kW 的费用为 1.28 元，高于山东尖峰电价 1.137 元/kW。因此，如何在光伏发电和负荷随机变化过程中动态调整储能充放电功率，对需量进行有效防守是光储型园区储能运行控制面临的主要挑战[9]。

虽然细化时间尺度运行方法能在一定程度缓解园区需量防守压力，比如 15 min 级或分钟级储能优化，但该类方法存在以下不足：①只能获得某一时间断面内储能的荷电状态，难以准确捕捉该时间断面内储能的运行状态，导致储能容量需求不准确；②不能准确反映储能能量的爬坡过程，极易引起某一时间断面能量的供需不匹配。近年来，基于函数逼近的连续时间优化模型在电力系统调度中引起广泛关注。

目前研究中的连续时间控制策略可以对连续函数拟合后嵌入优化问题，连续时间控制策略已成功应用于灵活性提升、储能配置和随机调度等领域。文献[10]提出了基于 Bernstein 多项式的灵活性提升模型，旨在挖掘电力系统中潜在的灵活性资源。文献[11]提出了连续时间尺度下的鲁棒优化模型用以研究在高渗透率风力发电的情况下，储能装置的最优配置问题。在文献[12]中，作者针对发电机组和储能建立了一个基于连续时间的随机优化模型，用于对发电机组和储能装置提供的电能和灵活性储备进行协同优化。上述研究中的优化时段都是固定的 1 h、15 min 等长度。然而当负荷突增或故障发生时优化区间的长度往往都是非固定的，上述文献中所用的连续函数拟合方法难以捕捉时间间隔变化时应急调度中的动态信息。

综上所述，为了避免因为当前储能离散运行策略无法获得断面内的荷电状态而不能准确反映储能爬坡过程，以及当前现有连续时间控制策略无法捕捉优化区间长度变化时的动态信息，进而引起需量防守失败问题，本文提出一种基于连续时间尺度的储能运行策略。通过推导区间归一化 Bernstein 多项式构建连续储能运行模型，建立特殊场景下光储型园区需量防守策略，有效提高园区需量防守能力。首先，为了获取任意闭区间内储能连续的能量状态和充放电功率，在传统 Bernstein 多项式的基础上推导出区间归一化 Bernstein 多项式的基本性质。其次，将储能模型构建为基于区间归一化 Bernstein 多项式的连续时间尺度运行模型。当负荷突增或故障发生时，准确捕捉任意时间断面内储能的运行状态。最后，在当前两部制电价下，通过建立光储型园区日前运行模型与应急运行模型，提出基于连续时间尺度的储能运行来提升光储型园区需量防守能力策略。以淄博某光储型园区进行仿真分析，结果表明本文所提策略明显优于传统离散运行的储能需量防

守方法。

1 区间归一化 Bernstein 多项式

实际上，基于 Bernstein 多项式逼近的连续优化方法已成功地应用于电力系统灵活性提升、储能配置、随机调度等领域[13]。但传统的 Bernstein 多项式仅适用于单位闭区间[t, t+1]内函数的连续逼近，而特殊场景下负荷激增或光伏发电骤减的区间长度不一定满足该条件。也就是说，传统基于 Bernstein 多项式的连续逼近难以应用于特殊场景下光储型园区需量防守。

为了解决这一问题，本文提出一种基于区间归一化的 Bernstein 多项式，该方法拓展了 Bernstein 多项式在任意闭区间内连续优化调度中的应用。以下给出了区间归一化 Bernstein 多项式的定义和相关性质。

1.1 区间归一化 Bernstein 多项式定义

Δt 为优化运行的时间间隔。如果函数 $f_t(x)$ 在 $x\in\left[(t-1)\Delta t,t\Delta t\right]$、$\forall\Delta t$ 上连续，设 $a=(t-1)\Delta t$、$b=t\Delta t$，则该区间可按式(1)转换为归一化区间：

$$x=a(1-r)+br,r\in[0,1] \tag{1}$$

式中：$f_t(x)$ 在 $x\in[a,b]$上连续。$f_t(x)$ 在 $x\in[a,b]$的区间归一化 Bernstein 多项式定义如下：

$$B_n^x=\sum_{i=0}^{n}f_t\left(a+\frac{i}{n}(b-a)\right)\mathrm{C}_n^i\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^i\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^{n-i} \tag{2}$$

式中：B_n^x 表示连续函数 $f_t(x)$ 的区间归一化 Bernstein 多项式；n 为多项式的阶数。以多项式函数 $f_t(a+(i/n)(b-a))$ 作为控制点，便可得到 $f_t(x)$ 在 $x\in[a,b]$上区间归一化 Bernstein 多项式的连续逼近曲线。

基于区间归一化的 Bernstein 多项式 B_n^x 具有在任意闭区间上逼近连续函数 $f_t(x)$ 的性质。当区间归一化 Bernstein 多项式的阶数无限增加时，多项式 B_n^x 一致收敛到连续函数 $f_t(x)$[14]。

1.2 区间归一化 Bernstein 多项式导数性质

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}B_n^x}{\mathrm{d}r}=&\sum_{i=0}^{i-1}\mathrm{C}_{n-1}^i\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^i\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^{n-1-i}\frac{n}{b-a}\cdot\\&\left(f_t\left(a+\frac{i+1}{n}(b-a)\right)-f_t\left(a+\frac{i}{n}(b-a)\right)\right)\end{aligned} \tag{3}$$

由式(3)可知，求导后区间归一化 Bernstein 多项式的阶数从 n 降到 n−1。

1.3 区间归一化 Bernstein 多项式积分性质

$$\begin{aligned}&\int_a^b B_n^x\mathrm{d}x=\int_a^b\sum_{i=0}^{n}f_t\left(a+\frac{i}{n}(b-a)\right)\mathrm{C}_n^i\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^i\cdot\\&\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^{n-i}\mathrm{d}r=\frac{(b-a)\sum_{i=0}^{n}f_t\left(a+\frac{i}{n}(b-a)\right)}{n+1}\end{aligned} \tag{4}$$

式(4)表明区间归一化 Bernstein 多项式的积分值取决于多项式函数 $f_t(a+(i/n)(b-a))$ 和阶数 n。

1.4 区间归一化 Bernstein 多项式约束约简性质

根据区间归一化 Bernstein 多项式的定义，多项式可转化为如下行向量与列向量相乘的形式：

$$\begin{aligned}B_n^x=&\sum_{i=0}^{n}f_t\left(a+\frac{i}{n}(b-a)\right)\mathrm{C}_n^i\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^i\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^{n-i}=\\&\left[f_t(a),f_t\left(a+\frac{(b-a)}{n}\right),\cdots,f_t(b)\right]\cdot\\&\begin{bmatrix}\mathrm{C}_n^0(x-a)^0(b-x)^{n-0}\\\mathrm{C}_n^1(x-a)^1(b-x)^{n-1}\\\vdots\\\mathrm{C}_n^n(x-a)^n(b-x)^{n-n}\end{bmatrix}\left(\frac{1}{b-a}\right)^n\end{aligned} \tag{5}$$

由式(5)可知，在区间归一化 Bernstein 多项式的逼近过程中，可以在约束中消除相同的列向量[15]，此时等式和不等式约束可约简为仅剩多项式函数的形式。

2 基于区间归一化 Bernstein 多项式的储能连续时间尺度运行模型

2.1 连续时间尺度的储能运行模型

储能充放功率管理是光储型园区实现峰谷套利、光伏就地消纳、提升经济效益的关键[16]。在连续时间尺度下，园区第 k 个车间储能在充放电过程中需满足以下约束：

$$\begin{cases}-P_{\max}^{\mathrm{ES}}\le P_{t,k}^{\mathrm{ES}}(x)\le P_{\max}^{\mathrm{ES}} & \text{(a)}\\\dfrac{\mathrm{d}S_{t,k}^{\mathrm{soe}}(x)}{\mathrm{d}x}=P_{t,k}^{\mathrm{ES}}(x) & \text{(b)}\\S_{\min}^{\mathrm{soc}}\le S_{t,k}^{\mathrm{soc}}(x)=\dfrac{S_{t,k}^{\mathrm{soe}}(x)}{E_k}\le S_{\max}^{\mathrm{soc}} & \text{(c)}\\\displaystyle\int_1^T\left(\int_{(t-1)\Delta t}^{t\Delta t}P_{t,k}^{\mathrm{ES}}(x)\mathrm{d}x\right)\mathrm{d}t=0 & \text{(d)}\end{cases} \tag{6}$$

式中：式(a)为储能充放电功率极限约束，$x\in[(t-1)\Delta t,t\Delta t]$，$P_{t,k}^{\mathrm{ES}}$ 为第 k 个车间储能在 t 时刻充放电功率，$P_{\max}^{\mathrm{ES}}$ 为储能最大充放电功率；式(b)表示储能能量状态与充放电功率关系，$S_{t,k}^{\mathrm{soe}}$ 为第 k 个车间储能在时段 t 的能量状态；式(c)为储能在 t 时

段的荷电状态约束，$S_{t,k}^{\mathrm{soc}}$ 为第 k 个车间储能在时段 t 的荷电状态，E_k 为第 k 个车间储能容量，$S_{\max}^{\mathrm{soc}}$ 和 $S_{\min}^{\mathrm{soc}}$ 分别为储能荷电状态的最大值和最小值；式(d)表示储能在一天 T 个时间段内的能量守恒约束。

2.2 基于区间归一化 Bernstein 多项式的储能连续时间尺度运行模型

依据区间归一化 Bernstein 多项式的性质，储能连续时间尺度的运行模型可表示为式(7)—(10)形式。具体地，利用式(5)，储能的连续充放电约束、荷电状态约束分别等价为式(7)和式(9)；利用式(3)，储能的能量状态约束等价为式(8)；利用式(4)，储能一个周期内功率约束等价为式(10)。

$$-P_{\max}^{\mathrm{ES}} \le P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}} \le P_{\max}^{\mathrm{ES}} \tag{7}$$

$$S_{t,k,i}^{\mathrm{soe}} - S_{t,k,i-1}^{\mathrm{soe}} = P_{t,k,i-1}^{\mathrm{ES}} \tag{8}$$

$$S_{\min}^{\mathrm{soc}} \le S_{t,k,i}^{\mathrm{soc}} = S_{t,k,i}^{\mathrm{soe}} / E^k \le S_{\max}^{\mathrm{soc}} \tag{9}$$

$$\Delta t\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=0}^{n} P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}} \Big/ (n+1) = 0 \tag{10}$$

式中：$P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}$ 为第 k 个车间储能在 t 时段的 i 阶充放电功率；$S_{t,k,i}^{\mathrm{soe}}$、$S_{t,k,i}^{\mathrm{soc}}$ 分别为第 k 个车间储能在 t 时段的 i 阶能量状态与荷电状态；

3 基于连续时间尺度的储能运行提升光储型园区需量防守能力模型

本文中的需量防守过程是基于园区日前运行的数据，因此给出园区的正常调度周期与特殊场景下的周期划分，如图 1 所示。图 1 中，x_s 表示特殊场景发生的时刻，此时一天 96 个时间段(15 min 间隔，即 Δt=15 min)变成 97 个时段。$[1,t_{\mathrm{c}}]$ 为特殊场景发生前的时段，$[t_{\mathrm{h}},97]$为特殊场景发生后的时段，每个时段的区间长度记为 $L_t=[\Delta t,\Delta t,\cdots,x_s-x_1,x_2-x_s,\cdots,\Delta t]$。

3.1 基于连续时间尺度的日前运行模型

基于区间归一化 Bernstein 多项式，本文以园区用电电费最小为目标，建立两部制电价下园区日前优化运行模型，优化目标包括电度电费、储能运维费用、光伏上网收益和需量电费，即：

$$\min\Big(\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\Delta t\Big(\sum_{i=0}^{n}\frac{C_t^{\mathrm{G}}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}}{n+1}+C^{\mathrm{ES}}\Big|\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}}{n+1}\Big|-C^{\mathrm{on}}\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{on}}}{n+1}\Big)+\frac{C^{\mathrm{DC}}P_0^{\mathrm{G,max}}}{30}\Big) \tag{11}$$

式中：第 1 项为光储型园区向电网缴纳的电度电费，K 为园区车间数量，C_t^{G} 为电网分时电价，$P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}$ 第 k 个车间在 t 时段向电网购买的 i 阶功率；第 2 项为储能运维成本，C^{ES} 为储能的运维成本系数，$P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}$ 为第 k 个车间储能在时段 t 的 i 阶充放电功率；第 3 项为光伏上网收益，C^{on} 为光伏上网价格，$P_{t,k,i}^{\mathrm{on}}$ 为车间 k 在时段 t 的 i 阶光伏上网功率；第 4 项为日平均需量电费，C^{DC} 为单位功率需量电价，$P_0^{\mathrm{G,max}}$ 为日前运行的最大需量防守值。基于区间归一化 Bernstein 多项式的积分性质，园区整个运行周期内的最大需量由式(12)给出，其中 t 时段的需量功率由该时段从电网取电的平均功率表征。

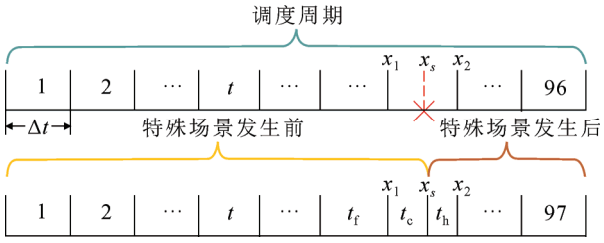


图 1 特殊场景发生时刻示意图

Fig.1 Schematic diagram of the occurrence time of extreme scenario

$$P_0^{\mathrm{G,max}} = \max\Big(\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{n}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}} \Big/ (n+1)\Big) \tag{12}$$

园区电能在运行过程中，由于各车间之间、车间与电网之间需要满足功率交互约束，基于区间归一化 Bernstein 多项式约束约简性质，电能交互约束可表示为式(13)—(15)形式。其中，式(13)、(14)为车间与电网之间的功率交互约束，式(15)为车间之间的功率交互约束。K 是园区内的车间总数。

$$0 \le \sum_{k=1}^{K}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}} \le P_{\max}^{\mathrm{G}} \tag{13}$$

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{on}} \ge 0 \tag{14}$$

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{in}} = \eta^2 P_{t,k,i}^{\mathrm{out}},\ P_{t,k,i}^{\mathrm{in}} \ge 0,\ P_{t,k,i}^{\mathrm{out}} \ge 0 \tag{15}$$

式中：$P_{\max}^{\mathrm{G}}$ 为车间电力变压器的最大容量；$P_{t,k,i}^{\mathrm{in}}$、$P_{t,k,i}^{\mathrm{out}}$ 分别为车间 k 与其他车间电能交互过程中输入、输出的 i 阶有功功率；η 为车间之间能量传输效率，本文主要考虑变压器损耗，即$(1-\eta)$为车间变压器损耗。

在光储型园区运行过程中，各车间的功率平衡约束如下：

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}} - P_{t,k,i}^{\mathrm{in}} + P_{t,k,i}^{\mathrm{on}} + P_{t,k,i}^{\mathrm{out}} - \eta P_{t,k,i}^{\mathrm{G}} - P_{t,k,i}^{\mathrm{V}} + P_{t,k,i}^{\mathrm{d}} = 0 \tag{16}$$

式中：$P_{t,k,i}^{\mathrm{V}}$、$P_{t,k,i}^{\mathrm{d}}$ 分别为车间 k 在 t 时段的 i 阶光伏出力与负荷需求。考虑车间之间功率交互存在变压

器损耗，$\eta P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}$ 为 t 时段实际流向车间 k 的 i 阶功率。为了确保光储型园区连续运行，t−1 时段的 n 阶功率需与 t 时段的 0 阶功率相等，即：

$$\begin{cases} P_{t-1,k,n}^{\mathrm{ES}}=P_{t,k,0}^{\mathrm{ES}} \\ P_{t-1,k,n}^{\mathrm{G}}=P_{t,k,0}^{\mathrm{G}} \\ P_{t-1,k,n}^{\mathrm{on}}=P_{t,k,0}^{\mathrm{on}} \\ P_{t-1,k,n}^{\mathrm{in}}=P_{t,k,0}^{\mathrm{in}} \\ P_{t-1,k,n}^{\mathrm{out}}=P_{t,k,0}^{\mathrm{out}} \end{cases} \tag{17}$$

正常运行条件下，光储型园区需量防守模型由式(7)—(17)组成，通过对该数学模型求解，能够在保证光储型园区经济运行的同时，提升需量防守能力。

3.2 基于连续时间尺度的应急运行模型

特殊场景(暴雨、冰雹或大功率设备突然启动等)下光伏发电骤减或负荷激增[17-18]，极易引发园区需量防守失败，及时做出应急决策是必要的。本节在介绍园区正常运行的基础上，给出特殊场景下园区应急运行策略。

3.2.1 基于连续时间尺度的正常运行模型

在应急运行前，需要计算如式(18)—(21)所示 t_{c} 时段之前的园区用电费用：

$$\begin{aligned} C^{n}=&\sum_{t=1}^{t_{\mathrm{c}}-1}\sum_{k=1}^{K}\Delta t\Big(\sum_{i=0}^{n}\frac{C_t^{\mathrm{G}}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}}{n+1}+C^{\mathrm{ES}}\Big|\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}}{n+1}\Big|- \\ &C^{\mathrm{on}}\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{on}}}{n+1}\Big)+\sum_{k=1}^{K}\big(C_{t_{\mathrm{c}}}^{\mathrm{G}}S_k^{\mathrm{G}}+C^{\mathrm{on}}S_k^{\mathrm{on}}+ \\ &C^{\mathrm{ES}}\big|S_k^{\mathrm{ES}}\big|\big) \end{aligned} \tag{18}$$

式中：C^n 为特殊场景发生前园区用电费用；S_k^{G}、S_k^{on}、S_k^{ES} 分别 t_{c}时段之前第 k 个车间向电网购买的电量、光伏上网电量、储能充放电量，其计算式分别为：

$$S_k^{\mathrm{G}}=\int_{x_1}^{x_s}\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{G}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x}{b-a}\Big)^{n-i}\mathrm{d}x \tag{19}$$

$$S_k^{\mathrm{on}}=\int_{x_1}^{x_s}\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{on}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x}{b-a}\Big)^{n-i}\mathrm{d}x \tag{20}$$

$$S_k^{\mathrm{ES}}=\int_{x_1}^{x_s}\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{ES}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x}{b-a}\Big)^{n-i}\mathrm{d}x \tag{21}$$

3.2.2 基于连续时间尺度的应急运行模型

应急运行旨在通过对园区储能进行应急响应来应对光伏发电急剧下降或负荷激增引起的需量防守问题，目标函数包括特殊场景发生后的电度电费、储能运维成本、光伏上网收益、需量电费和特殊场景发生前的园区用电电费，即：

$$\begin{aligned} \min\Big(&\sum_{t=t_{\mathrm{h}}}^{T+1}\sum_{k=1}^{K}L_t\Big(\sum_{i=0}^{n}\frac{C_t^{\mathrm{G}}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}}{n+1}+C^{\mathrm{ES}}\Big|\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}}{n+1}\Big|+ \\ &C^{\mathrm{on}}\sum_{i=0}^{n}\frac{P_{t,k,i}^{\mathrm{on}}}{n+1}\Big)+\frac{C^{\mathrm{DC}}P_0^{\mathrm{G,max}}}{30}+C^{\mathrm{n}}\Big) \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{cases} P^{\mathrm{G,max}}\ge\max\Big(\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{n}P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}\Big/(n+1)\Big),t\in[t_{\mathrm{h}}+1,97] \\ P^{\mathrm{G,max}}\ge\Big(\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{n}L_{t_h}P_{t_{\mathrm{h}},k,i}^{\mathrm{G}}\Big/(n+1)+\sum_{k=1}^{K}S_k^{\mathrm{G}}\Big)\Big/\Delta t \\ P^{\mathrm{G,max}}\ge P_0^{\mathrm{G,max}} \end{cases} \tag{23}$$

式中：$P^{\mathrm{G,max}}$ 为园区整个运行周期的最大需量。由式(23)可知，特殊场景下园区最大需量不小于正常运行的需量防守值。

特殊场景下光伏出力急剧下降或负荷急剧增加，各车间的功率平衡约束可表示为：

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{ES}}+P_{t,k,i}^{\mathrm{on}}+P_{t,k,i}^{\mathrm{out}}+\beta P_{t,k,i}^{\mathrm{d}}=\eta P_{t,k,i}^{\mathrm{G}}+\alpha P_{t,k,i}^{\mathrm{V}}+P_{t,k,i}^{\mathrm{in}} \tag{24}$$

式中：α、β 分别为特殊场景下光伏出力系数和负荷需求系数。

依据区间归一化 Bernstein 多项式定义，应急运行的初始值计算式为：

$$P_{t_{\mathrm{h}},k,0}^{\mathrm{ES}}=\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{ES}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x_s-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x_s}{b-a}\Big)^{n-i} \tag{25}$$

$$P_{t_{\mathrm{h}},k,0}^{\mathrm{on}}=\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{on}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x_s-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x_s}{b-a}\Big)^{n-i} \tag{26}$$

$$P_{t_{\mathrm{h}},k,0}^{\mathrm{in}}=\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{in}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x_s-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x_s}{b-a}\Big)^{n-i} \tag{27}$$

$$P_{t_{\mathrm{h}},k,0}^{\mathrm{out}}=\sum_{i=0}^{n}P_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{out}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x_s-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x_s}{b-a}\Big)^{n-i} \tag{28}$$

$$S_{t_{\mathrm{h}},k,0}^{\mathrm{soe}}=\sum_{i=0}^{n}S_{t_{\mathrm{c}},k,i}^{\mathrm{soe}}\mathrm{C}_n^i\Big(\frac{x_s-x_1}{b-a}\Big)^i\Big(\frac{x_2-x_s}{b-a}\Big)^{n-i} \tag{29}$$

综上，本文提出的储能连续运行提升园区需量防守模型由式(7)—(10)、(13)—(15)、(17)—(29)组成，通过对该数学模型求解，可在保证园区经济运行的同时，提升特殊场景下园区需量防守能力。

4 案例分析

本文对淄博某光储型园区进行仿真分析，园区结构如图 2 所示。园区内包含 2 个车间，每个车间均配有一台光储电站，变压器损耗设为 0.02，储能充放电效率为 90%。各车间的负荷、光伏出力、储能参数及分时电价由附录 A 图 A1、A2、A3 给出，其中，负荷和光伏出力为园区 2021 年 11 月某日数据。为满足实际工程需要，也为与传统离散模型对

比，本文将一天分为 96 个时段，每个时段的长度为 15 min，采用 5 阶区间归一化 Bernstein 多项式对园区进行连续逼近，利用 Gurobi 求解器以 0.1%的误差进行求解。

在特殊场景发生之前，各车间执行日前运行策略。本文首先分别利用传统的离散优化策略和基于区间归一化 Bernstein 多项式的连续优化策略对光储型园区的日前运行模型进行优化，图 3 分别给出了不同运行策略下园区车间 1 和车间 2 的日前最优运行曲线。

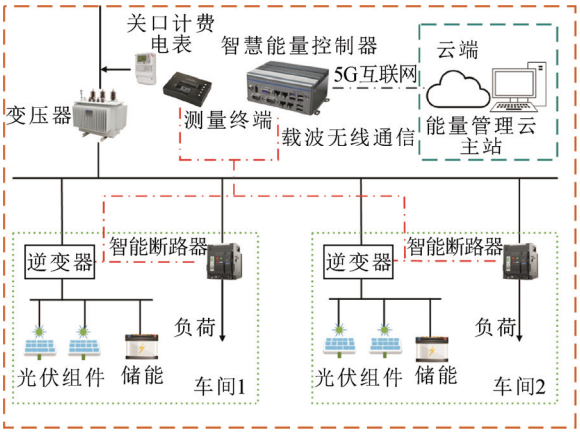


图 2 淄博某光储型园区系统结构图

Fig.2 System structure diagram of a photovoltaic and energy storage integrated park in Zibo city

其中，DT 为传统基于 96 个运行点的离散优化策略，CT 为本文提出的基于连续时间尺度的储能运行提升园区需量防守能力策略。值得注意的是，图 3 CT 运行策略中的负荷、交互功率等是基于式(25)—(29)的连续时间模型获取的，实际负荷的总量与均值相同。从图 3 可以看出，在 CT、DT 运行策略下，储能能够在电网电价较低或光伏出力较大的时段进行充电，在电网电价较高或光伏出力较小的时段放电，实现峰谷套利。此外，由于车间 2 的负荷相对较小，为了充分利用本地光伏资源，车间 2 在电能充裕时段会向车间 1 传输电能，实现分布式光伏的就地消纳。此外，相对于车间 1，车间 2 的上网电量、交互电量均高于用户 1。在 CT 模型下，车间 2 在 40~50 时段之间虽然出现了较大的功率尖峰，但并没有超过 15 min 对应的最大需量值，不会带来额外的需量费用。

为验证 Bernstein 多项式 CT 运行策略的逼近精度，表 1 给出了在 DT、CT 运行策略下光储型园区各项用电费用对比。从表 1 可以看出，基于 CT 运行策略的园区日前用电费用与基于 DT 运行策略的园区用电费用基本一致。因此，区间归一化 Bernstein 多项式具有可靠的逼近精度。

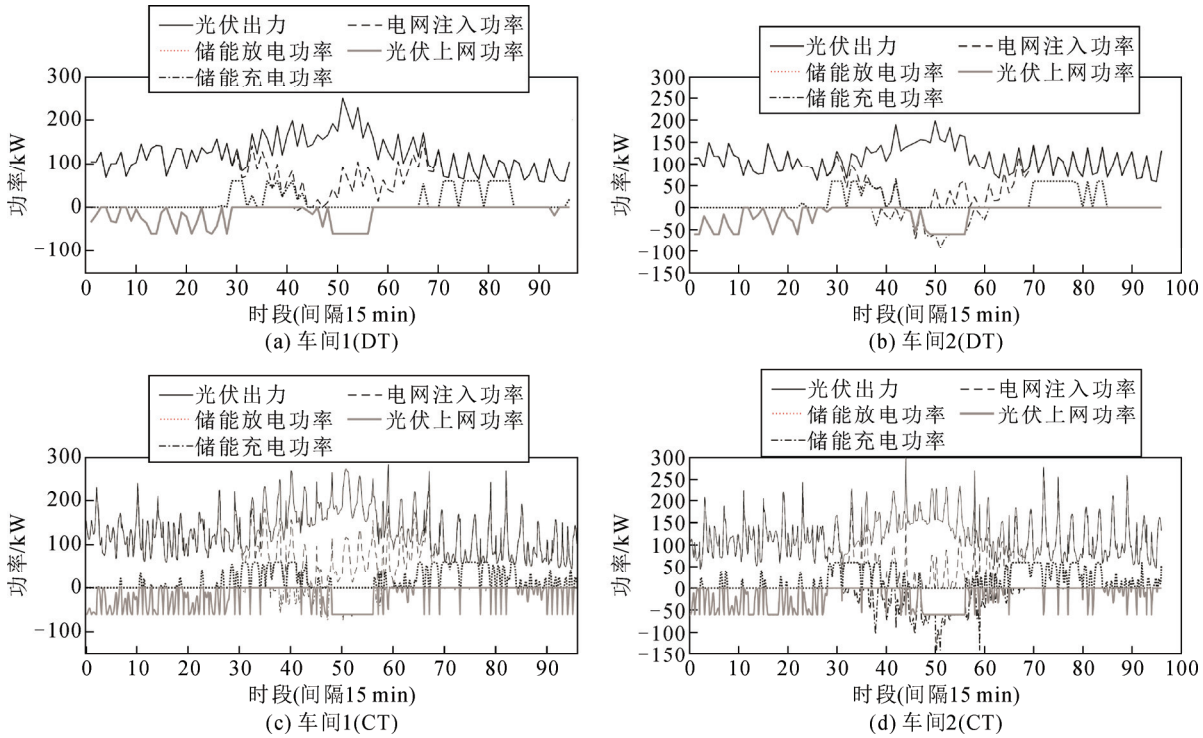


图 3 基于 CT 和 DT 策略的光储型园区日前运行曲线

Fig.3 Day-ahead operation curves of photovoltaic and energy storage integrated park under CT and DT strategies

表 1 基于 CT 和 DT 策略的光储型园区用电费用

Table 1 Operating costs of photovoltaic storage park under CT and DT strategies

运行策略	电度电费/元	上网收益/元	储能运维/元	需量电费/元
DT	2 057.7	0	68.2	279.3
CT	2 057.4	0	68.3	279.3
误差/%	0.015	0	0.15	0

与 DT 运行策略相比，CT 运行策略在保证可靠逼近精度的基础上，能够捕捉任意时间断面下储能的连续运行状态，准确反映储能能量的爬坡过程。而 DT 运行策略只能得到某一时间断面的储能运行状态，当在某一时断面内园区的运行状态突然变化时，DT 运行策略无法获取该时间断面内储能的能量状态，不能做出准确的应急响应，极易引起园区需量防守失败，影响园区光储电站收益最大化。

园区特殊场景包括极端天气下光伏发电骤减或大功率设备突然启动(尤其是实验设备)负荷激增，此场景发生的时间与功率缺额日前无法精准预测[19]。特殊场景下园区与电网交互功率突然大幅增加，极易引起月度需量防守失败，增加园区月需量电费。假设特殊场景持续时间为园区运行间隔 15 min，不失一般性，本文以特殊场景下光伏发电下降 10%作为研究对象[20]。附录 A 图 A4 给出了特殊场景发生在不同时刻时，基于 DT 和 CT 最优运行策略的园区最大需量，可以看出，当特殊场景发生在 12:30—12:45 时段时，该时段为日前运行的第 51(12:30—12:45)时段，根据特殊场景发生时刻的储能能量状态，DT 和 CT 运行策略均能通过调整储能充放电功率，对激增的需量进行成功防守。当特殊场景出现在 12:33—12:48 或 12:36—12:51 时段时，由于以上 2 个时段分别介于 51(12:30—12:45)与 52(12:45—13:00)时段之间，基于 DT 的运行策略不能获取该时间断面内储能的能量状态，此时的功率缺额由上级电网注入，园区的最大需量增加。相比之下，基于 CT 的运行策略能够依据特殊场景发生时刻的储能荷电状态来制定应急响应计划，从而成功进行需量防守。

当特殊场景出现在 12:39—12:54 之间时，由于该时刻介于 51(12:30—12:45)与 52(12:45—13:00)时段之间，在 DT 运行策略下园区在该时刻的功率缺额均由上级电网注入。值得注意的是，由于特殊场景在 51 时段内持续的时间较短，该时间断面内储能的荷电状态对 DT 运行策略影响较小，使得该场景下电网注入功率未突破最大需量防守值。由此可知，当特殊场景出现在日前某一运行时刻内的后半段时，基于 DT、CT 的最优运行策略均未突破园区最大需量防守值。

为了进一步分析 CT 运行策略对园区应急响应的影响，图 4 给出了特殊场景出现在不同时刻时基于 CT 运行策略的光储型园区应急运行响应对比。

由图 4 可知，当出现特殊场景时，光伏出力急剧下降，为了避免最大需量急剧增加，车间 1 与车间 2 均采取了适当的应急响应。车间 1 及时将储能由充电转为放电，进而减少了功率缺额，避免了最大需量的增加。车间 2 一方面及时将储能由充电转为放电，另一方面及时减少与车间 1 的功率交互(向车间 1 传输功率)，从而避免最大需量的增加。

表 2 给出了特殊场景出现在不同时刻时基于 CT 和 DT 运行策略的电力园区用电费用和需量电费对比。由表 2 可知，当特殊场景出现在 12:30—12:45 时段时，基于 DT 和 CT 运行策略的园区总用电费用基本相同，其中需量电费相同。当特殊场景发生在其他时刻时，与 DT 运行策略相比，CT 运行策略具有更好的需量防守能力，可降低约 0~20%的需量电费，随着特殊场景发生时刻距离该时段起始时刻越近，基于 DT 运行策略的最大需量增幅越大。当特殊场景发生时刻距离该时段起始时刻较远、DT 运行策略不突破需量防守值时，需量电费无变化。

综上所述，针对特殊场景下光伏发电骤降问题，本文提出的基于区间归一化 Bernstein 的连续运行策略能够及时控制储能充放电，在一定程度上避免了园区最大需量的增加，提升了园区需量防守能力，为特殊场景下光储型园区的经济运行提供了解决思路。

5 结论

1）提出了基于连续时间尺度的储能运行提升光储型园区需量防守能力策略，该策略能够获取储能任意时间断面内的能量状态，准确反映储能能量的爬坡过程。

2）与传统基于 DT 的运行策略相比，本文提出的基于区间归一化的 Bernstein 多项式的 CT 运行策略能够在保证逼近精度的同时，提升光储型园区需量防守能力，需量防守成功率达 100%，最高可节约 20%的需量电费，为特殊场景下光储型园区的需量防守提供了一种新的解决思路。

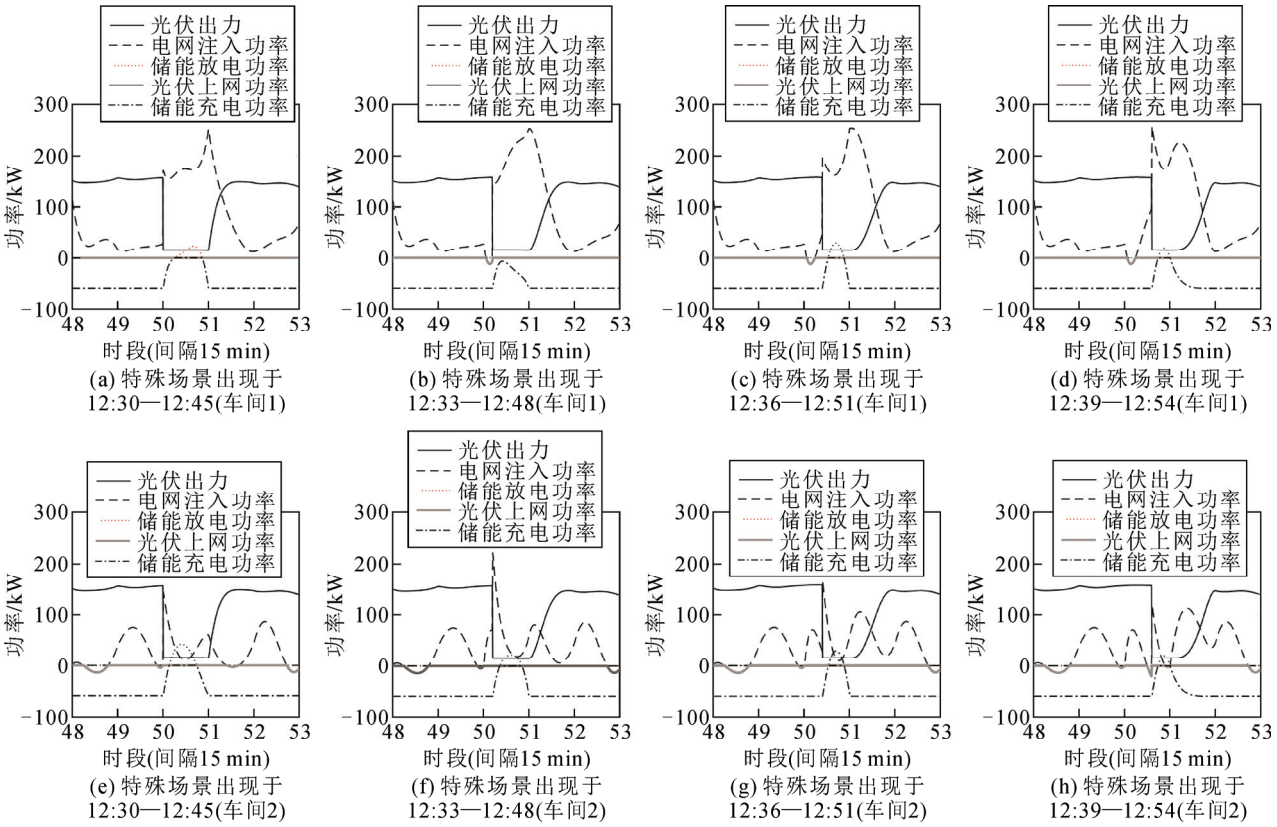


图 4 特殊场景下基于 CT 运行策略的园区应急响应

Fig.4 Emergency response of power park based on CT operation strategy when extreme scenario occurs

表 2 特殊场景下基于 CT 和 DT 策略的园区费用对比

Table 2 Cost comparison of park under CT and DT strategies when extreme scenario occurs

运行策略	特殊场景时刻	总费用/元	需量电费/元
DT	12:30—12:45	2 448.1	279.3
	12:33—12:48	2 495.6	338.1
	12:36—12:51	2 456.6	299.4
	12:39—12:54	2 435.3	279.3
CT	12:30—12:45	2 447.5	279.3
	12:33—12:48	2 434.9	279.3
	12:36—12:51	2 431.5	279.3
	12:39—12:54	2 429.2	279.3

3）该方法解决了传统 Bernstein 多项式只能在长度为 1 的闭区间内进行连续优化的问题，拓展了 Bernstein 多项式在任意闭区间内连续优化调度中的应用，可应用于电力系统韧性与灵活性提升、储能配置、随机调度等领域。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 谢小荣，马宁嘉，刘 威，等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：158-168.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168.

[2] 黄雨涵，丁 涛，李雨婷，等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报，2021，41(增刊 1)：28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(Supplement 1): 28-51.

[3] 欧阳森，许伟东. 考虑外部环境信息的电网故障识别与原因分析方法[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1075-1082.
OUYANG Sen, XU Weidong. Power grid fault identification and cause identification method considering external environmental information[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1075-1082.

[4] 陈永龙，朱金大，杨冬梅，等. 基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J]. 高电压技术，2021，47(1)：102-110.
CHEN Yonglong, ZHU Jinda, YANG Dongmei, et al. Research on economic optimization operation technology of park-level integrated energy system based on multi-party interest game[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 102-110.

[5] 刘 沆，赵海彭，文 明，等. 考虑负荷灵活分配的综合能源系统站-网-荷协同规划方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：118-127.
LIU Hang, ZHAO Haipeng, WEN Ming, et al. Station-grid-load collaborative planning method for integrated energy system considering flexible distribution of load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 118-127.

[6] PENG P, LI X M, SHEN Z. Energy storage capacity optimization of residential buildings considering consumer purchase intention: a mutually beneficial way[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104455.

[7] 陈丽娟，吴甜恬，柳惠波，等. 基于需量管理的两阶段大用户储能优化模型[J]. 电力系统自动化，2019，43(1)：194-200.
CHEN Lijuan, WU Tiantian, LIU Huibo, et al. Demand management based two-stage optimal storage model for large users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 194-200.

[8] CAO D, ZHAO J B, HU W H, et al. Robust deep Gaussian process-based probabilistic electrical load forecasting against anomalous events[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(2): 1142-1153.

[9] 孙玉树，杨 敏，师长立，等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术，2020，46(1)：80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.

[10] KHATAMI R, PARVANIA M. Stochastic multi-fidelity scheduling of flexibility reserve for energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1438-1450.

[11] ZHENG C, FANG J K, WANG S R, et al. Energy flow optimization of integrated gas and power systems in continuous time and space[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2611-2624.

[12] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Continuous-time co-operation of integrated electricity and natural gas systems with responsive demands under wind power generation uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3156-3170.

[13] 周 博，艾小猛，方家琨，等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报，2021，36(7)：1456-1467.
ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1456-1467.

[14] 李 鹏，周益斌，李明哲，等. 基于谈判博弈的含储能站利益主体的多能源站协同优化运行方法[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1666-1673.
LI Peng, ZHOU Yibin, LI Mingzhe, et al. Cooperative optimal operation method of multiple energy stations with stakeholder of energy storage station based on negotiation game[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1666-1673.

[15] KHATAMI R, PARVANIA M, KHARGONEKAR P P. Scheduling and pricing of energy generation and storage in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4308-4322.

[16] 石锦凯，鲍 谚，陈 振，等. 计及充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(20)：49-58.
SHI Jinkai, BAO Yan, CHEN Zhen, et al. Robust optimization configuration method of energy storage for charging stations considering charging load uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 49-58.

[17] 吴 鸣，孙丽敬，寇凌峰，等. 考虑需求侧响应的主动配电网电池梯次储能的容量配置方法[J]. 高电压技术，2020，46(1)：71-79.
WU Ming, SUN Lijing, KOU Lingfeng, et al. Capacity configuration method for second-use electric vehicle batteries of active distribution network based on demand side response[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 71-79.

[18] 张淑婷，陆 海，林小杰，等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.

[19] 陈艳波，高瑜珑，赵俊博，等. 综合能源系统状态估计研究综述[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2281-2292.
CHEN Yanbo, GAO Yulong, ZHAO Junbo, et al. Review on integrated energy system state estimation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2281-2292.

[20] 王秀丽，武泽辰，曲 翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：15-21.
WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 15-21.



刘峰伟
1993—，男，硕士生
研究方向为智能配电网韧性提升
E-mail: liufengwei1997@163.com

LIU Fengwei



陈佳佳(通信作者)
1987—，男，博士，副教授，硕导
研究方向为用户侧储能规划与控制、智能配电网韧性与灵活性提升等
E-mail: jjchen@sdut.edu.cn

CHEN Jiajia
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2023-09-11 修回日期 2024-01-11 编辑 程子丰

附录 A

表 A1　储能参数

Table A1　Parameters of energy storage device

参数	C^{ES}/(元·kWh^{-1})	E_k/kWh	δ_{SOE0}/kWh	P^{ES}_{max}/kW	δ_{SOEmax}/kWh	δ_{SOEmin}/kWh
取值	0.05	215	21.5	60	215	21.5

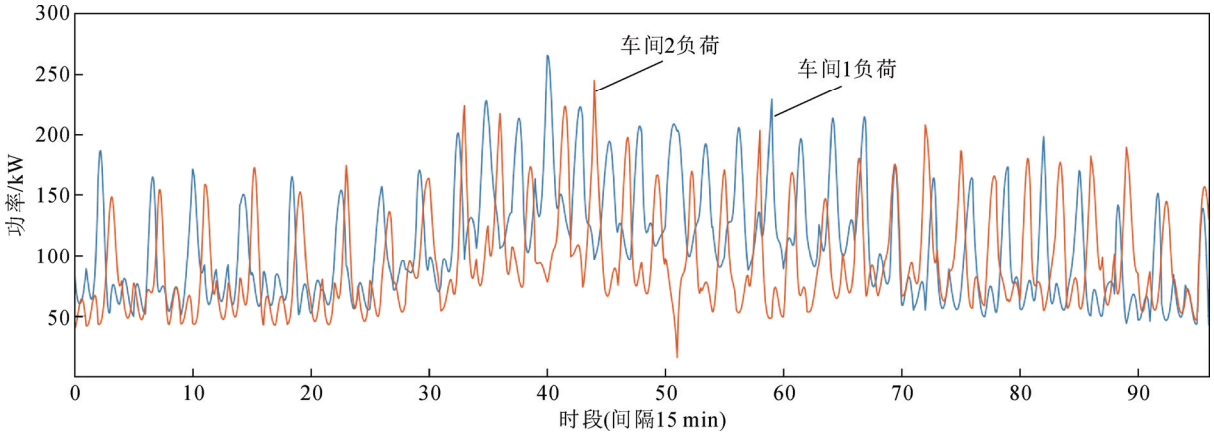


图 A1　电力园区的负荷需求

Fig.A1　Load demand of power park

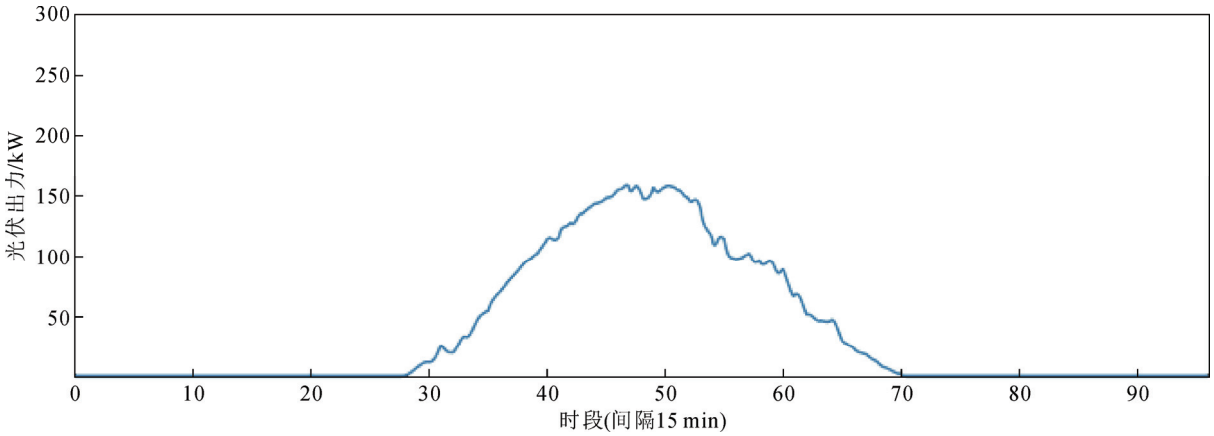


图 A2　电力园区的光伏出力

Fig.A2　Photovoltaic output of power park

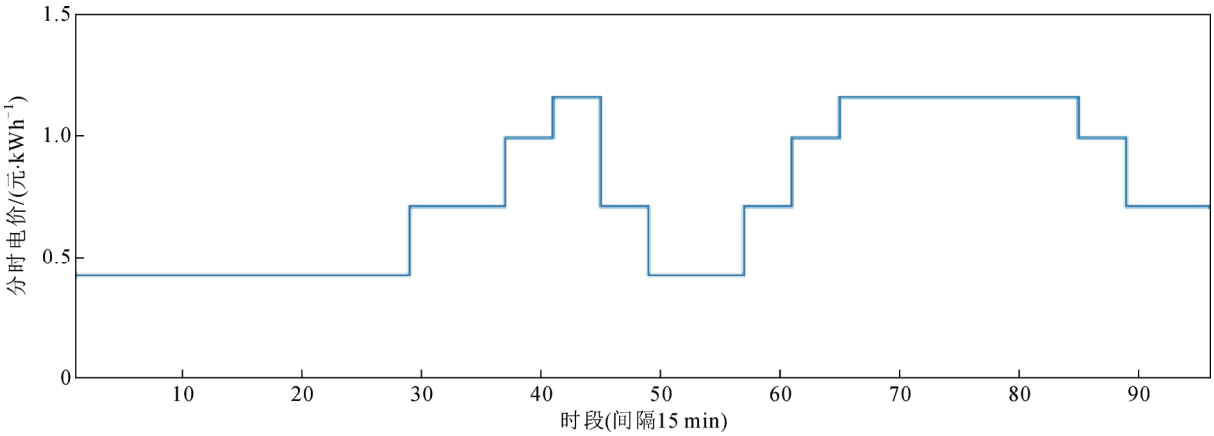
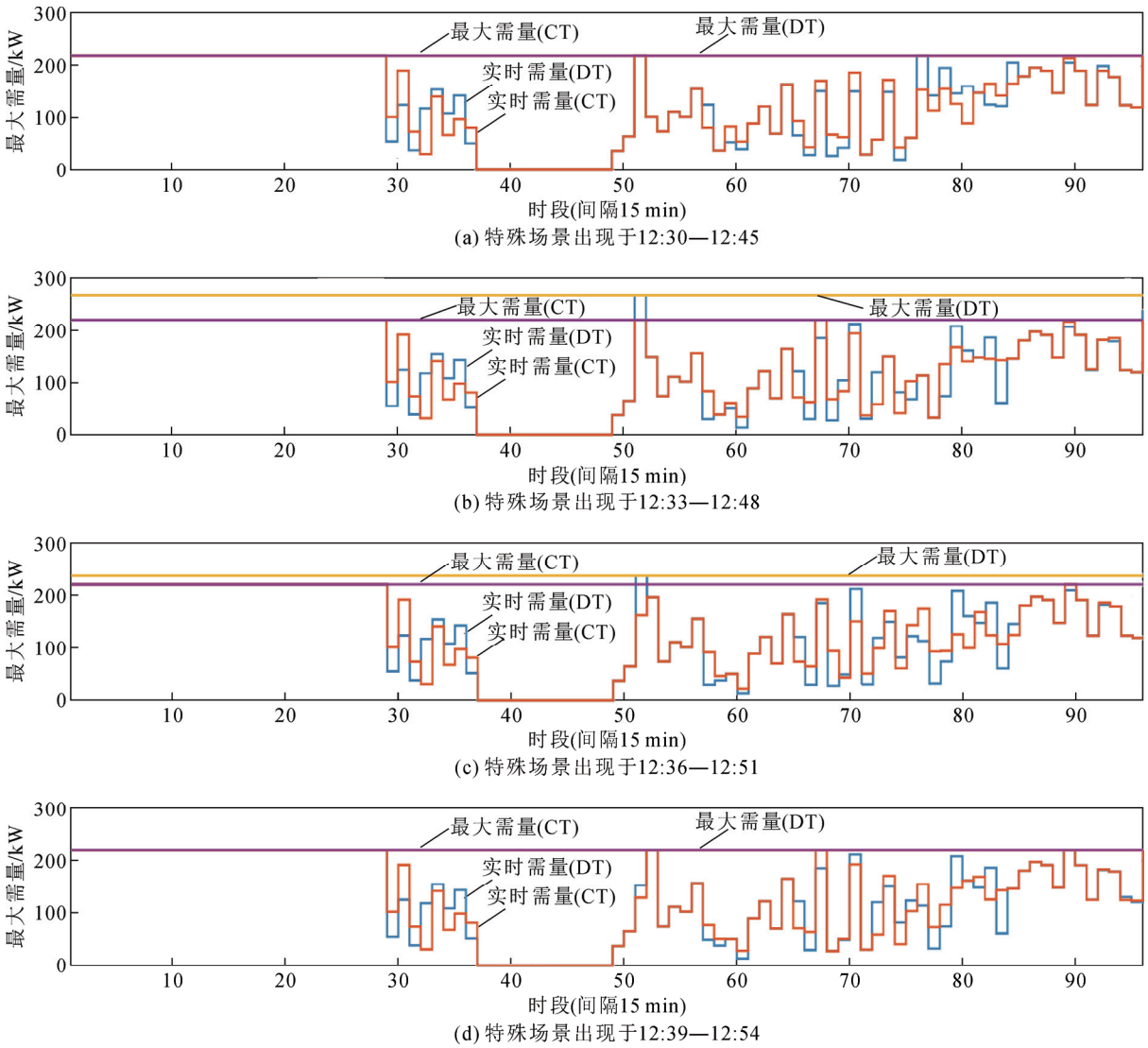


图 A3　电网分时电价

Fig.A3　Time-of-use price of power grid



(a) 特殊场景出现于12:30—12:45

(b) 特殊场景出现于12:33—12:48

(c) 特殊场景出现于12:36—12:51

(d) 特殊场景出现于12:39—12:54

图 A4　特殊场景发生在不同时刻下基于 DT 和 CT 的最优运行策略

Fig.A4　Optimal operation strategies obtained by DT and CT after extreme scenario under different periods