

配电台区互联共享储能系统优化运行策略

李泽文¹, 范元亮¹, 陈伟铭¹, 王少鹏², 林建利¹, 李凌斐¹

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:在新型电力系统的配电网中,大量新能源发电装置的接入,使得配电网电源侧出力变得不稳定,丧失可控性。为了应对光伏消纳困难等一系列问题,提出了一种配电台区共享储能系统的运行优化策略,旨在最大化降低储能电站的整体运行成本,提高经济效益。该框架考虑了分时电价以及技术约束,如电池容量和充放电效率等因素,开发出一套优化的运行控制策略。数值仿真结果表明这一策略提升了共享储能系统的经济性,促进了整个电力网络的可持续发展。

关键词:配电台区;共享储能;光伏;优化运行

中图分类号:TM73;TP18 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25906

Optimized Operation of Interconnected Shared Energy Storage System in Distribution Station Area

LI Zewen¹, FAN Yuanliang¹, CHEN Weiming¹, WANG Shaopeng², LIN Jianli¹, LI Lingfei¹

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Electric Power Scientific Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: In the distribution network of the new power system, due to the access of a large number of new energy power generation devices, the power supply side output of the distribution network becomes unstable and loses control ability. In order to deal with a series of problems such as the difficulty of photovoltaic consumption, an operation optimization framework of shared energy storage system in distribution station area was proposed, which aims to minimize the overall operation cost of energy storage power station and improve economic benefits. This framework took into account the time-of-use price and technical constraints such as battery capacity and charge-discharge efficiency, and an optimized operation control strategy was developed. The numerical simulation results show that this strategy not only improves the economy of the shared energy storage system, but also promotes the sustainable development of the entire power network.

Key words : distribution station area; shared energy storage; photovoltaic; optimized operation

可再生能源具有的间歇性和波动性,成为限制其发展的关键因素,大规模的光伏接入电网会影响原有电压及频率稳定^[1];可再生能源的功率峰值可能会超过配电网的消纳能力,引起电压波动,甚至是产生光伏功率倒送,引发电压越限,影响电网保护装置的正常工作等危害^[2]。储能技术可以解决上述难题,将随时间波动的光伏电力存储于储能系统之中,即可转变该部分电力为可供电网调度的稳定能源^[3]。尤其是共享储能系统,同时具备“共享”与“独立”的属性,既能通过共享

服务于区域内所有参与主体,又能独立运行控制^[4]。共享储能可以提高11%~32%的设备利用率^[5],缩短投资回收周期,提高了储能项目的收益率,可以促进储能的发展^[6]。

尽管共享储能带来了许多潜在优势,但其在多用户间确实构成了一种复杂的互动关系^[7]。考虑到新能源产出的间歇性和不可预测性,以及电价随时间的波动,共享储能系统的运作需要经过精确的控制和管理^[8]。只有这样,才能确保系统高效运行,实现最大的经济收益。

基金项目:国网福建省电力有限公司科技项目(521304230007)

作者简介:李泽文(1996—),男,硕士,工程师,主要研究方向为低压配电台区智能化、数字化,Email: lzw4535@gmail.com

通讯作者:王少鹏(1999—),男,硕士,主要研究方向为储能运行系统、可再生能源控制策略,Email: 1522514653@qq.com

目前针对共享储能的优化运行策略的研究主要可以分为两大类:容量共享和能量共享。容量共享机制是按照共享储能设备的容量进行划分,并设计方案分配给用户,在调度周期之内每个用户的储能容量不变,并且用户之间不能进行能量共享。这种模型已经有了大量的研究,提出了基于拍卖理论^[9]、多阶段优化^[10]、博弈论^[11]以及 Lyapunov 优化^[12-13]等一系列的储能容量分配机制。在文献[14]中,所有用户共同运营一个集中式共享储能设备,并决定储能容量的分配以及成本分摊,文献[11]进一步讨论了共享储能容量分配机制。文献[15]中,考虑多个家庭组成的社区共享储能,作者提出了一种组合拍卖的方式,将储能容量分配给不同家庭,拍卖的最终目的是使得社会福利最大化,同时在拍卖过程中能保护用户隐私信息。文献[16]提出了一种在线凸优化框架,将智能电网中的储能设备容量分配给多个家庭共享使用,目标是使得消费者的成本最小化,并进一步讨论了集中式和分布式求解方法。以上研究使得共享储能运行优化策略更具有鲁棒性。但由于用户分配的储能容量是固定的,并且他们之间不允许进行能量交换,无法发挥不同用户之间负荷的互补性,容易造成储能空间利用不充分。

本文采用的能量共享机制则更为灵活,它根据不同用户的需求确定利用储能设备的充放电计划,并允许不同用户之间进行能量共享。由于不同的消费者很难有相同的负荷使用习惯,造成他们之间存在差异,创造了一定的互补性,一定程度上减少了他们所需的总储能容量。文献[17]考虑一群互相合作的家庭在并网微电网中集成可再生能源发电的共享储能运行情况,所建立的模型考虑了时变的光伏发电及家庭负荷,旨在最小化家庭总电费支出,并基于 Lyapunov 理论提出一种分布式的实时共享储能优化算法。文献[18]指出社区共享储能相比于单个家庭的储能具有许多优势,并着重关注社区共享储能对于单个家庭的影响,提出的基于智能体的优化模型可以显著减低社区峰值负荷,提高了社区自给自足的能力。文献[19]将社区共享储能优化运行问题表述为多目标的混合整数线性规划问题(mixed integer linear programming, MILP),并比较采用不同的电池技术的效果。然而以上研究均是基于集中式共享储能,与分散式共享储能相比其灵活性

较低,并且为了避免过高的线路损耗,一般集中式共享储能的服务范围不会很大,因此本文研究分散式共享储能。

文献[20]对分散式共享储能和集中式共享储能的运行优化分别进行仿真分析,同时提出一种定价机制对内部利益进行分配。文献[21]指出传统的集中式共享储能存在不能兼顾多种类型的用户,灵活性较差的问题,提出分散式共享储能的优化配置和运行的方法,以用户的净收益最大为目标,通过数值分析结果表明所提的分散式共享储能配置模式在降低用户电费支出和投资费用方面具有先进性。在现有的研究中,尽管对分散式共享储能系统进行了广泛的讨论,但普遍忽略了联络线及器件的功率损耗建模,损耗是影响储能系统效率的重要因素,忽略损耗会导致调度系统对功率平衡出现误判,不仅影响整个系统的稳定,而且若不对损耗加以考虑和控制,会进一步导致更多能源损失,增加运营成本。

为了更好地提高配电台区分散式共享储能系统的运行效率和经济效益,基于上述分析,本文构建一个配电台区分散式互联共享储能系统的模型,考虑了不同台区之间的联络线损耗,以及共享储能系统中的各电力电子器件损耗,所建立的模型更加符合实际情况。以购电费用、功率损耗和储能的寿命损耗最低为目标函数,考虑共享储能运行约束条件,利用 CPLEX 作为优化求解器执行优化计算。通过这项研究工作,为分散式共享储能系统提出一种更加符合实际情况的优化运行策略。

1 配电台区互联共享储能系统的整体框架

配电台区互联共享储能系统的整体框架如图 1 所示,交流侧各变电站的交流母线上均连接有光伏发电装置和负荷,直流侧各电池组均通过 DC/DC 变换器后再与直流母线相连,交直流侧通过 PCS 控制器与交流母线相连。考虑各连接线路的线路阻抗。

本文设定了一个采用分时电价机制的配电台区,其能量需求通过以下来源得以满足:本地光伏发电、共享储能系统的放电(或充电)以及外部电网注入的电力。该台区的储能设施具备调节能力,既能吸收当地光伏产生的过剩电力,也能通过联络线路将多余的太阳能电力转移至其

他区域。

利用分时电价策略的优势,共享储能系统可以在电费较低的时段积累更多的电量,并在电费高峰时段释放,从而减少从外界电网购电的总成本。以天为周期,将一天分割成24个离散的时间点,构建了配电台区内互联共享储能系统的运行

模型,并开发了相应的优化控制策略。

在共享储能操作方面,不仅考虑了电池的容量和充放电效率,还特别关注了通常被忽视的电池容量连续性的约束。对于配电台区本身,研究着重于最大化消纳光伏发电,防止光伏电力倒送,同时力求最小化电力购买成本。

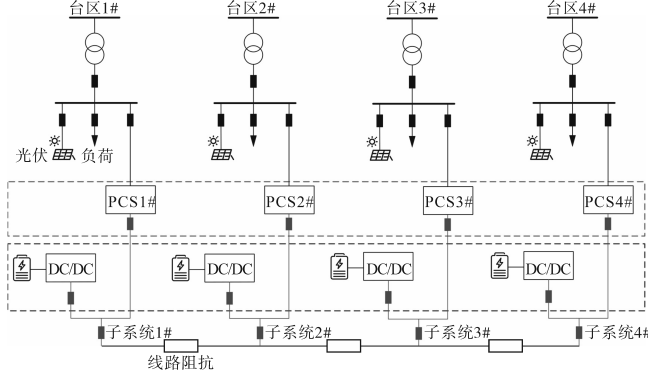


图1 共享储能系统的整体框架

Fig.1 The overall framework of the shared energy storage system

2 配电台区互联共享储能系统运行优化模型

2.1 目标函数

以配电台区共享储能投资者的角度,核心目标在于最大程度降低储能电站的整体运行成本,以达到经济效益的最优化。这一目标涵盖了几个至关重要的方面。首先,通过调整电池的充放电策略,力求减少运行损耗成本,确保储能系统以最有效的方式存储和释放电能。其次,通过智能电能购买计划,旨在以最经济的方式获取电能,尤其是在电价波动较大的时段。这有助于最小化向外部电网购电成本,提升整体经济效益。这种协同作用不仅能够保障共享储能电站获得最佳的经济回报,同时也有助于推动电力系统向更加可持续和经济的方向发展。

储能电站综合运行成本 C_{ess} 包含了向外部电网的购电成本 c_{line} 、共享储能系统运行的功率损耗成本 c_{loss} (包括共享储能电站 PCS, DC-DC 以及直流联络线路的功率损耗成本),以及共享储能系统电池寿命损耗成本 c_{life} ,因此,综合考虑的目标函数如下:

$$\min C_{\text{ess}} = \gamma_1 c_{\text{line}} + \gamma_2 c_{\text{loss}} + \gamma_3 c_{\text{life}} \quad (1)$$

式中: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为权重系数。

1) 外部电网购电成本 c_{line} 计算如下:

$$c_{\text{line}} = \sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^{24} P_{\text{line}}^i(t) \omega_{\text{line}}(t) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{line}}^i(t)$ 为 t 时刻第 i 个台区电网系统输出的功率, $i = 1, 2, 3, 4$; $\omega_{\text{line}}(t)$ 为 t 时刻的电价。

2) 功率损耗成本 c_{loss} 。为了提升模型计算效率,简化问题求解,PCS 和 DC-DC 变换器的损耗通过一个系数来等效描述,用以衡量在能量转换过程中,输入和输出功率的比例关系。因此,功率损耗成本 c_{loss} 表达式如下式所示:

$$c_{\text{loss}} = (P_{\text{pcs,loss}} + P_{\text{dc,loss}} + P_{\text{bat,loss}} + P_{\text{L,loss}}) \Delta t \bar{\omega}_{\text{line}} \quad (3)$$

其中

$$P_{\text{pcs,loss}}^i = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^4 \eta_{\text{pcs}} |P_{\text{pcs}}^i(t)| \quad (4)$$

$$P_{\text{dc,loss}}^i = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^4 \eta_{\text{dc}} |P_{\text{dc}}^i(t)| \quad (5)$$

$$P_{\text{bat,loss}}^i = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^4 (1 - \eta_{\text{bat}}) |P_{\text{bat}}^i(t)| \quad (6)$$

$$P_{\text{L,loss}} = P_{\text{L,loss}}^{12} + P_{\text{L,loss}}^{23} + P_{\text{L,loss}}^{34} \quad (7)$$

$$P_{\text{L,loss}}^{12} = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{P_{\text{L}}^{12}}{U_{\text{dc}}} \right)^2 R_{12} \quad (8)$$

$$P_{\text{L,loss}}^{23} = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{P_{\text{L}}^{23}}{U_{\text{dc}}} \right)^2 R_{23} \quad (9)$$

$$P_{\text{L,loss}}^{34} = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{P_{\text{L}}^{34}}{U_{\text{dc}}} \right)^2 R_{34} \quad (10)$$

式中: $\bar{\omega}_{\text{line}}$ 为平均电价; $P_{\text{pcs,loss}}^i$ 为相应 PCS 损耗的功率; $P_{\text{pcs}}^i(t)$ 为 t 时刻流经第 i 个配电台区 PCS 的功率; η_{pcs} 为 PCS 的损耗系数; $P_{\text{dc}}^i(t)$ 为 t 时刻流经第 i 个配电台区 DC-DC 的功率; $P_{\text{dc,loss}}^i$ 为相应 DC-

DC 损耗的功率; η_{dc} 为 DC-DC 的损耗系数; $P_{bat,loss}^i$ 为电池损耗的功率; $P_{bat}^i(t)$ 为 t 时刻第 i 个配电台区的电池功率, $P_{bat}^i(t)$ 为负表示充电, 为正表示放电; η_{bat} 为电池的充放电效率; $P_{L,loss}^{12}, P_{L,loss}^{23}, P_{L,loss}^{34}$ 分别为台区 12、台区 23、台区 34 之间直流联络线上的功率损耗; U_{dc} 为直流侧电压等级; $P_L^{12}, P_L^{23}, P_L^{34}$ 分别为台区 12、台区 23、台区 34 之间直流联络线上流过的功率; R_{12}, R_{23}, R_{34} 分别为台区 12、台区 23、台区 34 之间直流联络线的电阻。

3) 电池寿命损耗成本 c_{life} 。锂电池的放电深度 (depth of discharge, DOD) 是指其在运行过程中, 电池放出的能量与额定容量的比值。电池的充放电深度与其寿命有很大关系, 一般来说, 电池放电深度越深, 运行寿命越短。结合文献[22]的研究基础, 推导出锂电池循环寿命损耗成本函数为

$$c_{life} = \sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^{24} \frac{C_{inv}^i |P_{bat}^i(t)|}{N_{life} \times 365 \times 24 \times Q_N^i} \Delta t \quad (11)$$

其中

$$C_{inv}^i = c_p P_N^i + c_Q Q_N^i \quad (12)$$

式中: C_{inv}^i 为台区 i 共享储能初始投资费用; N_{life} 为共享储能的使用寿命; Q_N^i 为台区 i 电池的容量; P_N^i 为额定功率; c_p, c_Q 分别为电池的单位容量投资费用和单位功率投资费用。

2.2 约束条件

台区共享储能系统在运行中始终保持功率平衡约束, 实时维持功率平衡, 储能系统能迅速响应负荷波动, 提供实时调节能力。

1) 功率平衡约束:

$$P_{pv}^i + P_{line}^i + P_{pcs}^i = P_{load}^i \quad (13)$$

$$P_{bat}^i = P_{dc}^i + P_{dc,loss}^i \quad (14)$$

$$P_L^{12} = P_{dc}^1 - P_{pcs}^1 + P_{pcs,loss}^1 \quad (15)$$

$$P_L^{23} = P_{dc}^2 - P_{pcs}^2 + P_{pcs,loss}^2 + P_L^{12} - P_{L,loss}^{12} \quad (16)$$

$$P_L^{34} = P_{dc}^3 - P_{pcs}^3 + P_{pcs,loss}^3 + P_L^{23} - P_{L,loss}^{23} \quad (17)$$

$$P_L^{34} - P_{L,loss}^{34} + P_{dc}^4 - P_{pcs}^4 + P_{pcs,loss}^4 = 0 \quad (18)$$

式中: P_{pv}^i 为台区 i 实际吸收的光伏功率, $i = 1, 2, 3, 4$; P_{load}^i 为台区 i 的负荷。

2) 电池 SOC 约束。过充和过放容易引起电池内部化学反应, 降解电极材料, 从而缩短储能系统的使用寿命, 因此要控制储能 SOC 在合理的范围内。为了保证共享储能运行的连续性, 保持调度周期开始和结束时 SOC 一致是合理的要求, 如下式所示:

$$SOC_{min}^i \leq SOC^i(t) \leq SOC_{max}^i \quad (19)$$

$$SOC^i(1) = SOC^i(24) \quad (20)$$

$$SOC^i(t) = SOC^i(t_0) + \sum_{\tau=t_0}^t \frac{P_{bat}^i(\tau) \Delta t}{Q_N^i} \quad (21)$$

$$t = 1, 2, \dots, 24$$

$$-P_N^i \leq P_{bat}^i \leq P_N^i \quad (22)$$

式中: SOC_{min}^i, SOC_{max}^i 为台区 i 电池的 SOC 上下限; $SOC^i(t)$ 为 t 时刻台区 i 的电池 SOC, $SOC^i(1)$ 为台区 i 设定的调度周期初始时刻 SOC。

为了避免光伏功率倒送至上级电网, 影响电网稳定性和电能质量, 需要保持外部注入共享储能系统功率为正值, 实际光伏出力不大于此时其发电的峰值:

$$P_{line}^i \geq 0 \quad (23)$$

$$P_{pvp}^i \leq P_{pvp}^i(t) \quad (24)$$

式中: $P_{pvp}^i(t)$ 为 t 时刻台区 i 光伏发电的峰值。

2.3 求解方法

基于前文所建立的模型, 选择 P_{pcs}^i, P_{bat}^i 以及 P_{pv}^i 为变量, 构建变量矩阵形状为 (12, 24), 仿真平台为 Matlab R2018a, 采用 CPLEX12.8 作为优化求解器, CPLEX 是 IBM ILOG 推出的一款强大的优化求解器, 专门用于解决线性规划、整数规划、混合整数线性规划以及二次规划等问题。它以其高效性、可靠性和易用性而闻名, 在商业和学术研究中被广泛使用。

3 数值仿真

3.1 数据来源

比利时电网的输电系统运营归属 Elia 集团, Elia 集团拥有两个传输系统运营商 (transmission system operator, TSO)——比利时的 Elia 和德国的 50Hertz, 它是欧洲五大领先的输电系统运营商之一。本文采用比利时风光荷一体数据集的一部分, 数据集包含 15 min 颗粒度的风电、光伏和负荷, 数据集时间跨度接近 4 a, 覆盖时间段为 2020-01—2023-08。为了负荷的时间颗粒度, 把同一小时内 4 个光伏或负荷数据取平均值作为该小时内的功率值, 处理后的时间颗粒度为 1 h。

为将数据集应用于本模型, 在同一个月份当中随机选取 4 d 的数据分配给 4 个台区, 同时乘以适当倍数的缩放处理。图 2 和图 3 分别是该数据集的负荷和光伏数据缩放后的曲线图。

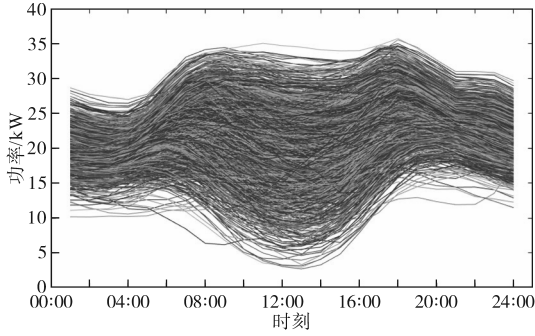


图2 负荷数据

Fig.2 Load data

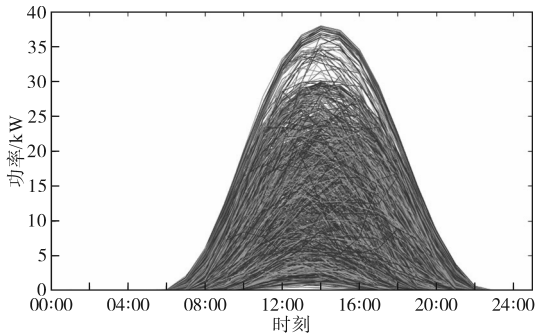


图3 实际光伏数据

Fig.3 Actual photovoltaic data

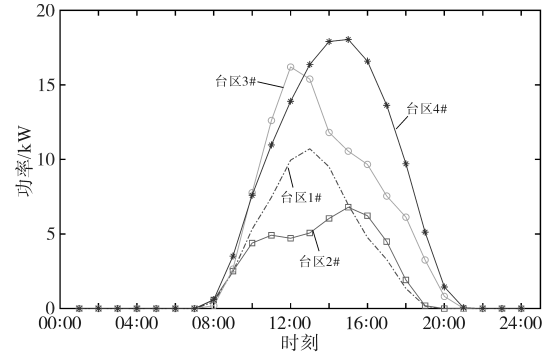
3.2 基于不同季节的配电台区共享储能运行优化分析

为了分析配置共享储能的作用,从以下4种仿真场景对比分析。场景1:春季,台区独立运行,不配置储能。场景2:夏季,台区独立运行,不配置储能。场景3:春季,配置共享储能。场景4:夏季,配置共享储能。

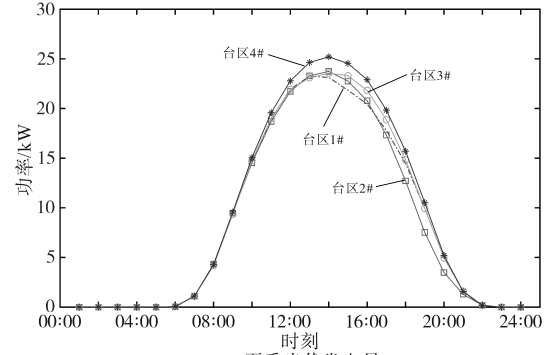
在场景1和场景2当中,不配置共享储能装置,4个台区独立运行,为了防止光伏功率倒送至电网,配电台区的光伏装置只能弃光。没有储能的调节作用,台区功率平衡基本没有可调度空间。在场景3和场景4当中,共享储能配置规模如3.1节所述,均配置储能容量 $Q_N=62.7 \text{ kW}\cdot\text{h}$,额定功率 $P_N=50 \text{ kW}$ 。

以上均分别从春季和夏季不同场景进行分析,春季光伏发电功率较低,一般来说功率峰值不超过负荷值,夏季光伏发电功率普遍较高,一般会超过负荷值,需要配置储能消纳多余光伏功率。数值仿真实验涉及的参数如下: $\gamma_1=3, \gamma_2=1, \gamma_3=1, \eta_{\text{pes}}=5\%, \eta_{\text{dc}}=1\%, \eta_{\text{bat}}=93.5\%, U_{\text{dc}}=750 \text{ V}, R_{12}=0.4 \Omega, R_{23}=0.2 \Omega, R_{34}=0.8 \Omega, \bar{\omega}_{\text{line}}=1.3 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h}), N_{\text{line}}=20 \text{ a}, c_p=320 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h}), c_Q=1000 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h}), P_N=50 \text{ kW}, Q_N=62.7 \text{ kW}\cdot\text{h}, SOC_{\min}=0.1, SOC_{\max}=0.9, SOC^1(1)=0.25, SOC^2(1)=0.3, SOC^3(1)=0.33, SOC^4(1)=0.37$ 。

仿真采用的春季和夏季的光伏发电量分别如图4a、图4b所示。



(a)春季光伏发电量



(b)夏季光伏发电量

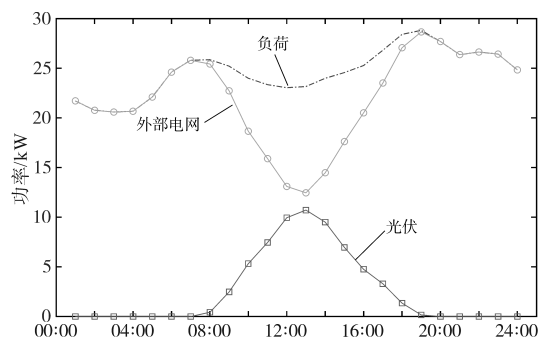
图4 春季与夏季的光伏发电量

Fig.4 Photovoltaic power generation in spring and summer

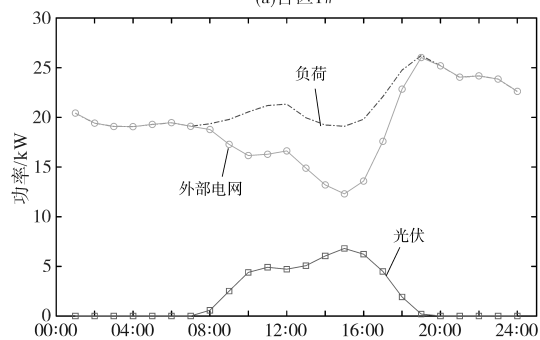
场景1的实验仿真结果如图5所示。在没有配备共享储能系统的情形下,光伏发电直接并入电网。

在这种模式下,当光伏不发电时,系统的负荷完全由外部电网承担。然而,一旦光伏发电量超出当前系统负荷需求,由于缺乏存储机制,超额的光伏电力无法得到利用,不得被舍弃,即发生所谓的“弃光”现象。这不仅浪费了宝贵的可再生能源,还削弱了整个电力系统的经济运行效率。因此,未配置储能解决方案的光伏并网,存在显著的经济性问题,需要通过引入共享储能等技术来优化能源利用,提高系统整体效益。

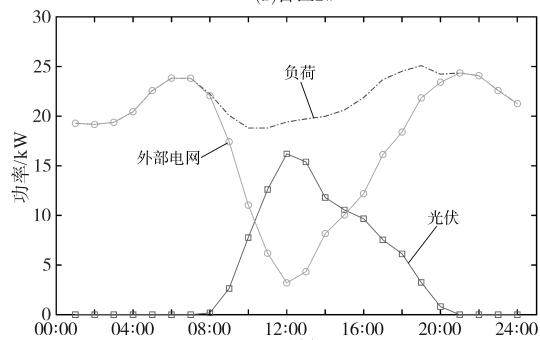
场景2的实验仿真结果如图6所示。夏季与春季在光伏电力产出的模式上有着相似之处,然而,由于夏季阳光更为强烈,导致光伏发电的输出功率达到更高的水平。这一增强的发电能力往往超出了台区负荷的需求,使得“弃光”现象在夏季变得尤为突出。换言之,尽管夏季阳光充沛,提供了更多的发电潜力,但在没有相应储能措施的情况下,这种过剩的绿色能源不得被遗弃,从而导致资源利用的经济性进一步下降。



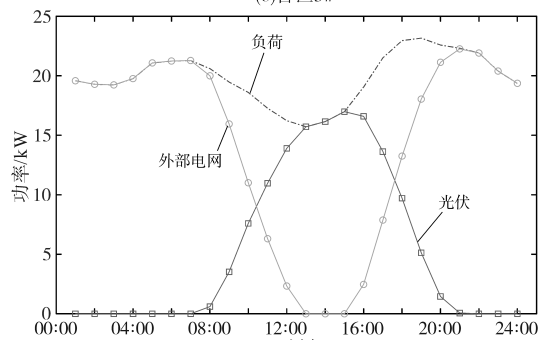
(a)台区1#



(b)台区2#



(c)台区3#

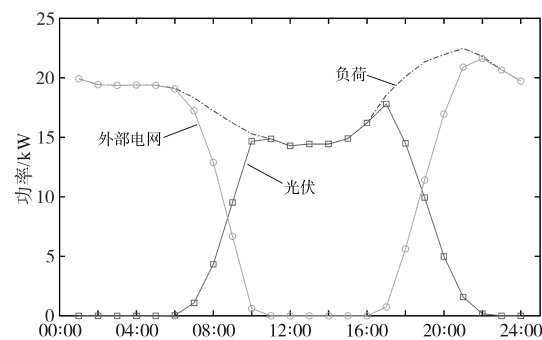


(d)台区4#

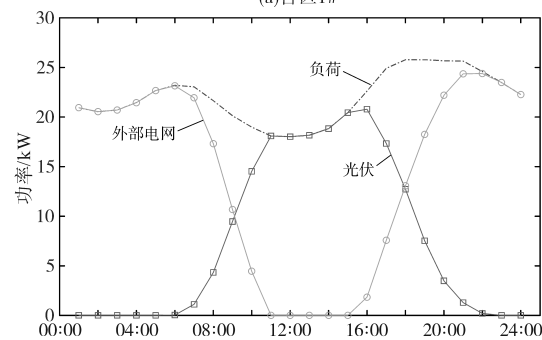
图5 场景1下各台区功率曲线图

Fig.5 The power curve of each station area under scene 1

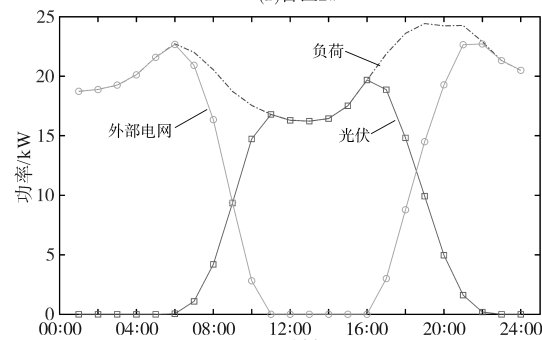
场景3的实验仿真结果如图7所示。春季时各台区光伏发电功率基本都低于所在台区的负荷,此时光伏发电全部被吸收,共享储能主要发挥峰谷套利作用,在图8中,在调度周期初始时刻,各台区储能SOC处于较低水平,此时处于谷时电价阶段,因此01:00—08:00时储能充电,储



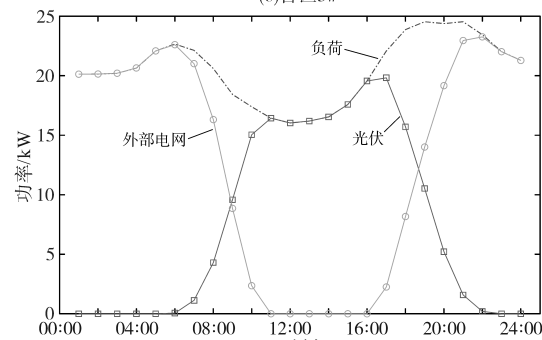
(a)台区1#



(b)台区2#



(c)台区3#



(d)台区4#

图6 场景2下各台区功率曲线图

Fig.6 The power curve of each station area under scene 2

能SOC逐渐上升至最高0.9。在09:00—12:00时,处于峰时电价阶段,4个台区的储能均释放电能。在12:00—17:00时,光伏功率处于较高水平,此时的能量缺口较小,电价处于平时电价阶段,储能选择不充电也不放电,SOC保持不变。在17:00—21:00时,光伏发电降低,负荷增加,又

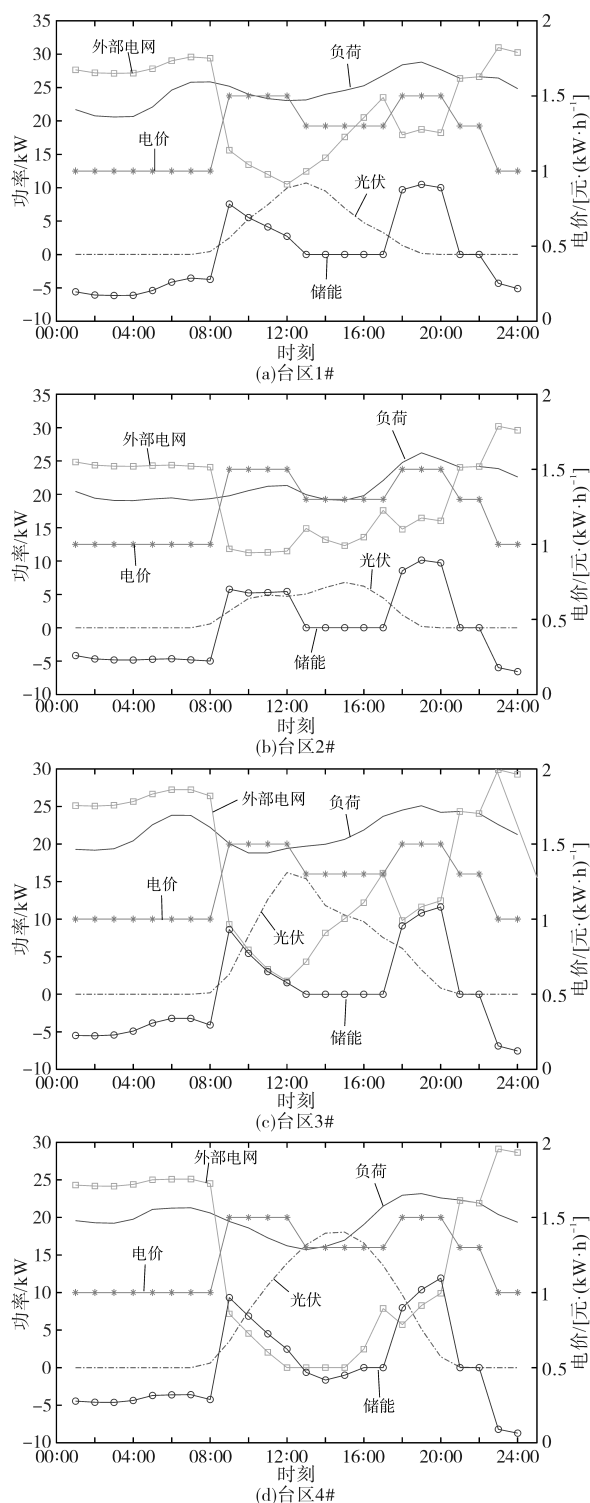


图7 场景3下各台区功率曲线图

Fig.7 The power curves of each station area under scene 3

处于峰时电价阶段,台区储能以较大的功率放电满足负荷,同时SOC降至设定的最低水平0.1,随后在夜间21:00—24:00时段,较低的电价,储能又开始持续充电,以满足下一调度周期的能量需求。

场景4的实验仿真结果如图9所示。夏季的

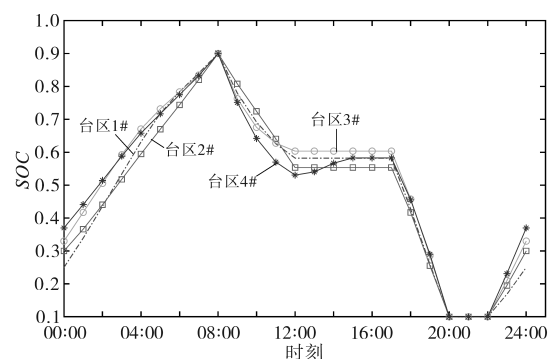


图8 场景3各台区SOC变化曲线

Fig.8 SOC change curves of each station area under scene 3

情况与冬季相差较大,在典型的夏季光伏发电场景中,光伏发电功率峰值会超过当时的负荷。在图10当中,01:00—08:00时各台区依然偏向于充电,但是大多不会将电池充满,这是由于在其后的10:00—16:00时,光伏功率超过了负荷值,使得净负荷为负,共享储能要发挥消纳光伏的作用,因此经过08:00—10:00时的短暂放电(08:00—10:00时为峰时电价)后,共享储能充电,消纳光伏。4个台区的区别在于,台区2#和台区3#需要消纳的多余光伏能量相对较少,因此其并不需要在10:00时保持较低水平的SOC以保证其消纳光伏能力。在16:00—20:00时,随着光伏发电功率下降,负荷的稳步增加,共享储能将其能量释放,满足负荷。

从表1中可以看到,场景2的弃光率要大于场景1,这与前文的分析一致,对于场景3和场景4,虽然配置共享储能会增加额外的电池损耗以及各种功率损耗,但对于目标函数,场景3要小于场景1,场景4小于场景2,这一结果充分表明,配备共享储能系统不仅具有经济上的可行性,而且能显著提高光伏系统的消纳率,轻松实现100%的消纳目标。

对比场景3和场景4,如图7和图8所示光伏功率显著影响台区共享储能系统的运行策略,共享储能设备在夏季由于光伏发电量高于春季,为了消纳多余的光伏功率,电池的充放电过程会更加频繁。这种频繁的充放电会导致电池的损耗增加,从而缩短电池的使用寿命。然而,由于光伏发电量的增加,整体的购电费用反而会降低,因为系统对外部电网的依赖减少。

在场景3中,我们观察到不同台区间的光伏发电功率存在显著差异,特别是台区4#的光伏发电量较高,甚至接近夏季光伏情况。然而得益于

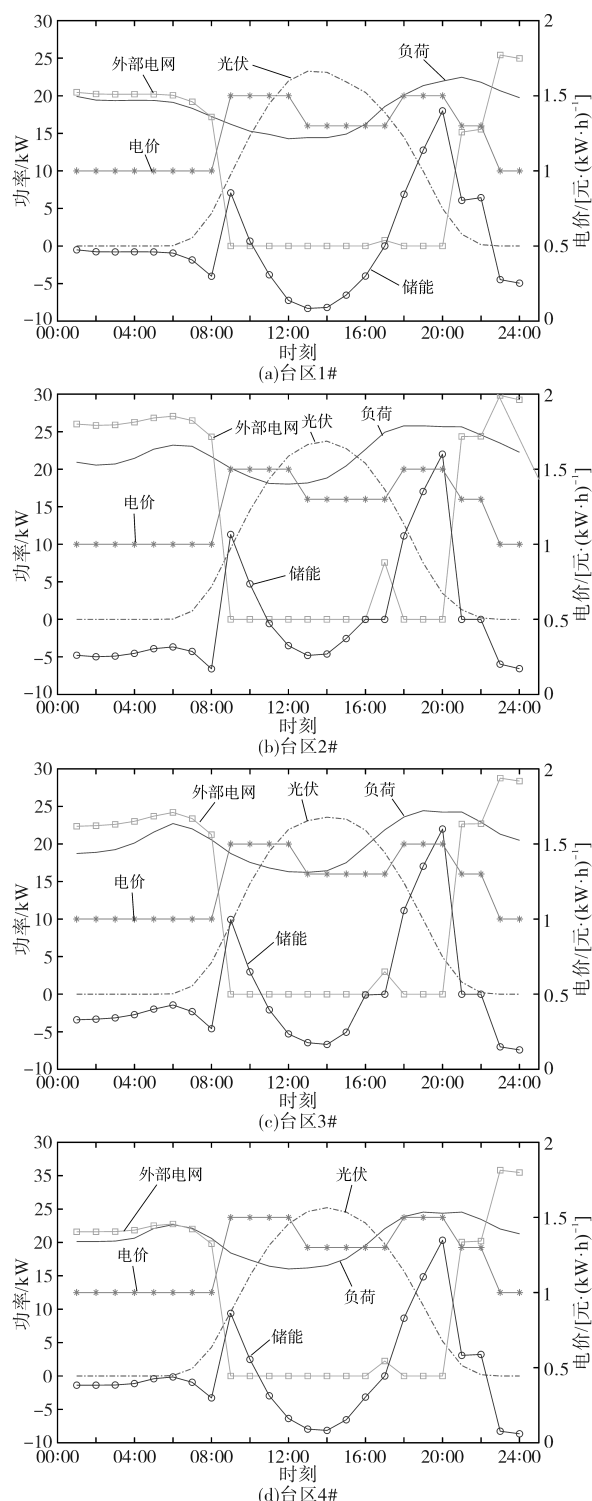


图9 场景4下各台区功率曲线图
Fig.9 Power curves of each station area under scene 4

共享储能系统联络线的转供能力,台区4#不会采取与场景4相类似的运行策略,即独立地优化自身能源消耗。相反,系统将优先保持4个台区的SOC一致性,尽可能确保各台区之间能量平衡,这种策略的实施有助于避免单个台区因频繁充放电而导致的电池损耗加速,可以确保整个储能

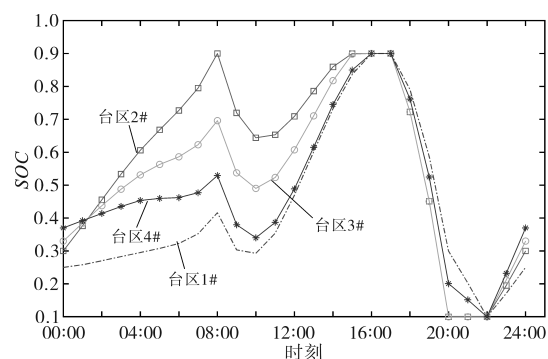


图10 场景4下各台区SOC变化曲线

Fig.10 SOC change curve of each station area under scene 4

系统的电池组能够同时达到其设计寿命,而不是因为单个电池单元的过早老化而影响整个系统的运行,同时可以减少频繁更换电池,从而降低维护成本。通过共享储能系统,各台区可以根据实际需求灵活地相互支援,从而提高整个电网的稳定性和可靠性。

表1 不同场景下各部分成本对比

Tab.1 Cost comparison of each part under different scenarios

	场景1	场景2	场景3	场景4
购电成本/元	2 114.95	1 391.89	2 085.25	1 235.14
电池寿命损耗成本/元	0	0	2.87	3.61
器件功率损耗成本/元	0	0	65.83	82.45
联络线路损耗成本/元	0	0	0.22	0.27
光伏消纳率/%	99	85	100	100
目标函数/元	6 344	4 175	6 325	3 792

4 结论

在新型电力系统中,基于大规模新能源发电装置并网所引发的难题,本文提出了一种配电台区共享储能系统的运行优化策略。该策略通过制定高效的控制模型,旨在平衡光伏电力的波动性和间歇性,防止光伏功率倒送,以维护电网的稳定性并增强光伏能源的本地消纳。模型实现的核心在于最小化从外部电网购买电力的成本和减少系统运行中的能耗,同时考虑到电池使用寿命的延长。通过定义共享储能系统的操作约束,开发了一个优化模型,并使用比利时风光荷数据进行了仿真实验,验证了模型的有效性。结果表明,该策略能够高效地利用太阳能发电满足负载需求,降低用电成本,并提高系统的整体经济性。

在本文的研究中,我们设定了固定的SOC起始点,但尚未对不同SOC起始点对运行策略的影响进行深入探讨。未来的研究可以关注SOC起

始点的变化对系统性能的影响,以期为实际应用提供更为精细化的运行策略。此外,本文提出的优化运行策略虽具有良好的效果,但尚未考虑光伏不确定性的影响。光伏发电受到天气、温度等多种因素的影响,具有一定的不确定性。在未来的研究中,可以考虑引入光伏功率预测、天气数据等,以更准确地模拟实际运行情况,使模型更加符合实际应用。

进一步,未来的研究可以关注以下几个方面:探索基于共享储能的多时间尺度下的能量管理策略,包括日前调度、实时调度和短期预测,以实现更高效能量分配;考虑电网电价波动、市场政策等因素,研究共享储能系统在不同市场环境下的运行策略;探索共享储能系统与其他分布式能源资源(如风能、水能等)的协同优化,提高系统的能源多样性和韧性。通过上述研究方向的拓展,有望进一步提高共享储能系统的运行效率、经济性和可靠性,为我国能源转型和碳中和目标贡献力量。

参考文献

- [1] 郭毅,胡泽春,张洪财,等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2458-2464.
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.
- [2] TANG Yanyan, ZHANG Qi, MCLELLAN Benjamin, et al. Study on the impacts of sharing business models on economic performance of distributed PV-battery systems[J]. Energy, 2018 (161): 544-558.
- [3] 贾龙,胡泽春,宋永华,等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [4] 张哲,林胤,陈子轩,等. 用户侧共享式储能的全生命周期经济效益评估[J]. 浙江电力, 2023, 42(3): 47-54.
ZHANG Zhe, LIN Yin, CHEN Zixuan, et al. Life-cycle economic benefit assessment of user-side shared energy storage[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(3): 47-54.
- [5] 李山山,李华强,金智博,等. 基于共享经济理念的园区分布式能源共享服务机制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 56-71.
LI Shanshan, LI Huaqiang, JIN Zhibo, et al. Distributed energy sharing service mechanism for park based on the concept of sharing economy[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 56-71.
- [6] 王楚通. 不同共享储能模式优化方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2023.
WANG Chutong. Research on optimization methods of different shared energy storage modes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [7] 马佳伊,刘海涛,仲聪,等. 计及共享储能与光伏的园区多用户综合收益优化[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 60-67.
MA Jiayi, LIU Haitao, ZHONG Cong, et al. Optimization of multi-user comprehensive income in the park considering shared energy storage and photovoltaic[J]. Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 60-67.
- [8] 蔡志远. 共享储能参与新型电力系统的优化调度策略研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2024.
CAI Zhiyuan. Shared energy storage participates in the optimal dispatch of new power systems strategy study[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.
- [9] THOMAS D, KAZEMPOUR J, PAPAKONSTANTINOU A, et al. A local market mechanism for physical storage rights[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3087-3099.
- [10] ZHAO D, WANG H, HUANG J, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1112-1123.
- [11] VESPERMANN N, HAMACHER T, KAZEMPOUR J. Access economy for storage in energy communities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 2234-2250.
- [12] XIAO J W, YANG Y B, CUI S C, et al. A new energy storage sharing framework with regard to both storage capacity and power capacity[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118171.
- [13] ZHU H, OUAHADA K, RIMER S. Real time energy storage sharing with load scheduling: a lyapunov-based approach[J]. IEEE Access, 2021, 9: 46626-46640.
- [14] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.
- [15] ZAIDI B H, BHATTI DMS, ULLAH I, et al. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst the households[J]. Journey of Energy Storage, 2018, 19: 291-301.
- [16] XIE K, ZHONG W, LI W, et al. Distributed capacity allocation of shared energy storage using online convex optimization[J]. Energies, 2019, 12(9): 1642.
- [17] ZHU Hailing, OUAHADA Khmaies. A distributed real-time control algorithm for energy storage sharing[J]. Energy Build, 230: 110478.
- [18] DONG S, KREMERSET E, BRUCOLI M, et al. Techno-economic assessment of household and community energy storage in the UK[J]. Pergamon, 2020: 112330.
- [19] TERLOUW T, ALSKAIF T, BAUER C, et al. Multi-objective

(下转第64页)

- LI Xue, FU Yunyue, JIANG Tao, et al. Holomorphic embedding probabilistic power flow calculation method for AC/DC system based on polynomial chaos expansion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 177-188.
- [14] ZHANG X, PANDEY M D, LUO H. Structural uncertainty analysis with the multiplicative dimensional reduction-based polynomial chaos expansion approach[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 3: 1-19.
- [15] LUTHER N, MARELLI S, SUDRET B. Sparse polynomial chaos expansions: literature survey and benchmark[J]. SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification, 2021, 9(2): 593-649.
- [16] 董博, 李鹏, 富晓鹏, 等. 基于改进增广节点方程的柔性互联配电网统一潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 22-31.
- DONG Bo, LI Peng, FU Xiaopeng, et al. Unified power flow calculation method of flexible interconnected distribution network based on modified augmented nodal equation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 22-31.
- [17] XIU D. Numerical methods for stochastic computations: a spectral method approach[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2010: 68-88.
- [18] BLATMAN G, SUDRET B. Adaptive sparse generalized polynomial chaos expansion based on least angle regression[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230: 2345-2367.
- [19] PTA B, XUN H, CS D, et al. Compressive sensing adaptation for polynomial chaos expansions[J]. Journal of Computational Physics, 2019, 380: 29-47.
- [20] ZHANG B, NI Y. A hybrid sequential sampling strategy for sparse polynomial chaos expansion based on compressive sampling and Bayesian experimental design[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 386: 114130.
- [21] BABACAN S D, MOLINA R, KATSAGGELOS A K. Bayesian compressive sensing using Laplace priors[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 19(1): 53-63.
- [22] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust restoration method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(5): 4005-4015.
- 收稿日期: 2024-10-16
修改稿日期: 2024-11-07

(上接第37页)

- optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies[J]. Applied Energy, 239: 356-372.
- [20] 朱宗耀, 王秀丽, 吴雄, 等. 考虑多场景规划的共享储能投资及运营分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 23-31.
- ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Investment and operation analysis of shared energy storage considering multi-scenario planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 23-31.
- [21] 刘亚锦, 代航, 刘志坚, 等. 面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 256-264.
- LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Decentralized shared energy storage configuration and investment benefit analysis for multiple types of industrial users[J]. Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 256-264.
- [22] ZHAO B, ZHANG X, CHEN J, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 934-943.
- 收稿日期: 2024-05-05
修改稿日期: 2024-07-13