

基于多点分布式储能协调控制的配电网时序承载力优化仿真研究

周文俊¹, 徐艺敏², 曹毅¹, 唐春生³, 施涛³

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 江苏 镇江 212000;

3. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 分布式储能是配电网中重要的灵活调节资源, 对于提高配电网消纳间歇性清洁能源的承载力具有重要的作用。研究定义配电网时序承载力的量化评估指标, 并提出一种基于多点分布式储能控制的配电网时序承载力优化方法。该方法以多点分布式储能控制代价最小化为优化目标, 兼顾时序场景下分布式光伏发电的消纳需求和配电网承载力约束, 实现高渗透率分布式光伏接入下配电网时序潮流的优化分布。结合典型案例进行仿真分析, 验证所提方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 分布式光伏发电; 储能; 时序潮流; 承载力

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0103-05

Optimization Research on Optimization of Sequential Carrying Capacity of Distribution Network Based on Multi-point Distributed Energy Storage Coordinated Control

ZHOU Wen-jun¹, XU Yi-min², CAO Yi¹, TANG Chun-sheng³, SHI Tao³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024 China;

2. Zhenjiang Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Zhenjiang 212000 China;

3. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023 China)

Abstract: Distributed energy storage is an important flexible resource in the distribution network, which plays an important role in improving the capacity of the distribution network to absorb intermittent clean energy. In this paper, the quantitative evaluation index of the sequential carrying capacity of the distribution network is defined and an optimization method for sequential carrying capacity of distribution network based on multi-point distributed energy storage is proposed. This method aims to minimize the cost of multi-point distributed energy storage, taking into account the accommodation demand of distributed photovoltaic power generation and the carrying capacity constraints of distribution network. On this basis, it achieves the optimization of sequential power flow under high penetration of photovoltaic generation integrated into distribution network. The feasibility and effectiveness of the above methods are verified by the simulation analysis of typical examples.

Keywords: distribution network; distributed photovoltaic power generation; energy storage; sequential power flow; carrying capacity

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要技术路径。其中, 分布式光伏发电的接入已成为当前配电网消纳清洁能源主要形式。根据国家能源局公布的最新统计结果, 2022年全国光伏新增装机达8 741万千瓦, 其中, 光伏电站3 630万千瓦, 分布式光伏5 111万千瓦。分布式光伏占光伏新增总量的58.47%。大规模分布式光伏的接入无疑将增加配电网规划建设 and 调度运行的复杂性。一方面, 配电网扩容改造

投资成本大, 建设周期长, 无法迅速满足局部地区分布式光伏发电爆发式增长的消纳需求。另一方面, 光伏发电出力的间歇性、随机性和波动性, 造成配电网负荷情况在时间上分布的严重不均衡, 高峰时段网络承载力紧张, 光伏发电受限; 低谷时段则设备利用率不高。而当前分布式储能系统的建设和规模化应用为解决上述问题提供了潜在的调节资源。利用多点分布式储能系统的灵活调节能力和聚合效应, 既可以避免在荷载高峰时段, 配用电设备出现重载或过载问题, 保证高渗透率分布式光伏接入下配电网运行的安全裕度; 又可以实现电能供需在时间上的平移, 提高分布式光伏发电消纳水平的同时, 也提高

*基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022122)

收稿日期: 2023-07-04

了配用电设备的利用率。

针对高渗透率分布式光伏接入下的配电网运行控制问题,国内外学者已开展了一些相关的研究。文献[1-3]针对新能源消纳问题,对分布式储能优化配置的各类数学模型及优化算法进行了较为全面的综述与总结。文献[4]针对光伏出力的间歇性,提出了优化的特征光伏曲线的选择算法,考虑了未来因素对储能配置的影响,将储能的容量分配至不同的用户,取得了较好的仿真结果。文献[5]针对典型日负荷曲线,提出基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置和容量优化配置方法,可最大化实现功率就地平衡、降低配电网网损和降低配电网节点电压波动。文献[6]兼顾储能运行的经济性,建立储能系统选址定容双层优化模型,有效提升了配电网电压质量和经济效益。文献[7]提出基于联合时序场景和源-网-荷协同的分布式光伏发电(distributed photovoltaic, DPV)与储能系统联合优化配置方法,兼顾配电网经济性,并验证了所提方法的有效性。文献[8-9]探讨了大型电池储能系统的能量管理、运行控制方法和应用场景。文献[10]对并网型光伏-储能微电网在不同储能策略下接入建筑时的经济性和可靠性进行了对比分析。文献[11]通过对分布式储能系统技术形态和载体的分析,为进一步研究分布式储能汇聚协调控制技术提供理论指导。文献[12]提出了一种分布式储能网络化运营平台架构和一种分层分区电能优化调配策略,可满足市场化背景下分布式储能与电网深化互动运营需求,实现平台运营商和分布式储能系统所有者各方效益最优化。文献[13]根据各区域光伏电池输出功率与储能单元荷电状态的不同,将系统分为5种运行模式,给出了不同运行模式下的能量管理策略。文献[14]提出一种基于能量路径分解的新型能量管理策略,可以准确地识别复杂系统内的能量交换流。文献[15]针对传统能量管理策略经济性差、调峰能力弱的问题,提出一种基于分布式发电的储能系统能量管理策略,实现了用电成本与负荷峰均的优化。

在上述研究的基础之上,本文提出一种计及配电网时序承载力的多点分布式储能协调控制方法,该方法以多点分布式储能控制代价最小化为目标,兼顾时序场景下分布式光伏发电的消纳需求和配电网时序承载力约束,通过对分布式储能系统充放电策略的灵活调整,实现高渗透率分布式光伏接入下配电网时序潮流和网络承载力的优化。

1 分布式光伏发电模型

分布式光伏发电是配电网承载力的重要影响要素,其功率输出特性与环境温度和辐照度有关,可采用工程

近似计算公式,如下所示:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \cdot G_{AC}(t) \cdot [1 + k(T_c - T_r)] / G_{STC} \quad (1)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时段光伏发电输出功率; G_{AC} 为 t 时段的辐照强度; P_{STC} 为标准测试条件(辐照强度 1 kW/m^2 ,环境温度为 25°C)下的最大输出功率; G_{STC} 为标准测试条件下的光照强度,取值 1 kW/m^2 ; k 为功率温度系数,其值为 $-0.47\%/K$; T_c 为光伏组件工作温度; T_r 为参考温度,其值为 25°C (计算时需要换算到开尔文单位)。

2 分布式储能系统模型

分布式储能设施的建设有助于提高系统的灵活调节能力,优化配电网的潮流分布,提升高渗透率分布式光伏发电接入下配电网的承载力。目前应用最为广泛的是电池储能技术,其能量存储和释放特性如下所示:

能量存储:

$$S_1 = (1 - \delta) \cdot SOC(t-1) \quad (2)$$

$$S_2 = P_c(t) \cdot \Delta t \cdot \zeta_c / E_c \quad (3)$$

$$SOC(t) = S_1 + S_2 \quad (4)$$

能量释放:

$$SOC(t) = (1 - \delta) \cdot SOC(t-1) - \frac{P_d(t) \cdot \Delta t}{E_c \cdot \zeta_d} \quad (5)$$

式中: $SOC(t)$ 为第 t 个时段结束时分布式储能系统的剩余能量; $SOC(t-1)$ 为第 $t-1$ 个时段结束时分布式储能系统的剩余能量; δ 为分布式储能系统自放电率; $P_c(t)$ 为第 t 个时段分布式储能系统充电功率; $P_d(t)$ 为第 t 个时段分布式储能系统放电功率; ζ_c, ζ_d 分别为分布式储能系统能量存储和释放效率; E_c 为分布式储能系统额定容量。

3 配电网时序承载力评估指标

对于配电网自身而言,并不具备能量变换和功率爬坡调节能力。因此,配电网承载力主要体现在其所能承受的供电容量及其功率属性上,而配电网的功率属性又取决于每一条支路的供电容量和整个网络的拓扑结构。因此,配电网的承载力主要受网络中各个支路供电安全裕度的影响,其裕度越大,可用于电能供应和承载负荷的能力越大。配电网在运行过程中需要在母线电压、线路电流、变压器荷载等方面满足一定的限值约束,如下所示:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}, i = 1 \cdots N \quad (6)$$

$$I_j \leq I_{j,\max}, j = 1 \cdots M \quad (7)$$

$$S_k \leq S_{k,\max}, k = 1 \cdots K \quad (8)$$

式中, U_i 为节点的母线电压; $U_{i,\min}$ 为节点 i 的母线电压下限; $U_{i,\max}$ 为节点 i 的母线电压上限; N 为节点数目; I_j 为线路 j 的电流; $I_{j,\max}$ 为线路 j 的电流限值; M 线路数目; S_k 为

变压器 k 的运行容量; $S_{k,max}$ 为变压器 k 的运行容量限值,一般取额定容量。

考虑高渗透率分布式光伏发电在不同时段的间歇性,随机性和波动性,定义配电网时序承载力指标为:

$$\eta_j(t) = \left(1 - \frac{I_j(t)}{I_{j,max}}\right) \times 100\%, j = 1 \cdots M \quad (9)$$

$$\eta_k(t) = \left(1 - \frac{S_k(t)}{S_{k,max}}\right) \times 100\%, k = 1 \cdots K \quad (10)$$

$$\eta_t = \min\{\eta_j(t), \eta_k(t)\} \quad (11)$$

$$\lambda_t = (1 - \eta_t) \times 100\% \quad (12)$$

$$\eta_T = \min_{t \in T} \{\eta(t)\}, T = \{t_1, \dots, t_n\} \quad (13)$$

$$\lambda_T = (1 - \eta_T) \times 100\% \quad (14)$$

式中: $\eta_j(t)$ 为 t 时段第 j 条线路的承载力裕度; $\eta_k(t)$ 为 t 时段第 k 台变压器的承载力裕度; η_t 为 t 时段系统的承载力裕度; λ_t 为 t 时段系统的承载度; T 为配电网时序承载力评估周期; η_T 为该周期内对应的配电网时序承载力裕度; λ_T 为该周期内对应的配电网时序承载度。

4 分布式储能协调控制策略

4.1 优化模型

利用分布式储能系统优化高渗透率分布式光伏发电接入下配电网的时序潮流,以使配电网的承载力裕度在安全范围内,定义目标函数为:

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N |P_{ES,i,t}| \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中: f 为优化目标,此处以整个优化周期 T 内储能系统的充放电电量之和来表征储能系统的控制代价; $P_{ES,i,t}$ 为节点 i 处分布式储能在第 t 时段的充放电功率; N 为分布式储能的数目; Δt 为单位时段的时间长度。

(1) 电力平衡约束

$$P_G + P_{PV} + P_{ES} = P_L + P_{Loss} \quad (16)$$

式中, P_G 为网供电力有功功率; P_{PV} 为分布式光伏发电有功功率; P_{ES} 为分布式储能的充放电功率; P_L 为电力负荷有功功率; P_{Loss} 为配电网网损。

对于多点分布式储能系统而言, P_{ES} 为各点的分布式储能在时间 T 内的充放电策略,即

$$P_{ES} = \begin{bmatrix} P_{ES,1,1} & \cdots & P_{ES,i,1} & \cdots & P_{ES,N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{ES,1,t} & \cdots & P_{ES,i,t} & \cdots & P_{ES,N,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{ES,1,T} & \cdots & P_{ES,i,T} & \cdots & P_{ES,N,T} \end{bmatrix} \quad (17)$$

(2) 储能充放电约束

$$|P_{ES,i,t}| \leq P_{ES,i,rate} \quad (18)$$

$$Soc_{i,min} \leq Soc_i(t) \leq Soc_{i,max} \quad (19)$$

式中: $P_{ES,i,rate}$ 为节点 i 处的分布式储能的额定功率; $Soc_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 处的分布式储能的荷电状态。

(3) 节点电压安全约束

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (20)$$

式中: U_i 为节点 i 处的电压; $U_{i,min}$, $U_{i,max}$ 为节点 i 处的电压限值。

(4) 配电网时序承载力约束

$$\eta_T \geq \eta_{alarm} \quad (21)$$

式中: η_{alarm} 为配电网时序承载力裕度告警值,即在整个问题周期 T 内配电网的各支路的承载力裕度不得小于 η_{alarm} 。

4.2 算法流程

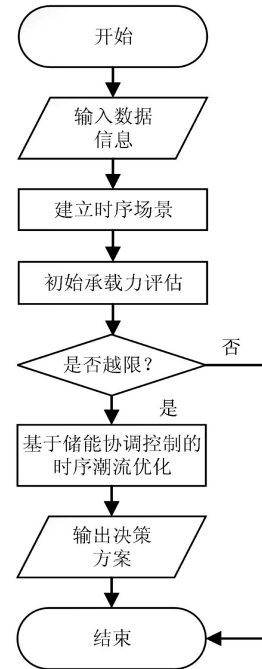


图1 基于储能的时序潮流优化控制流程图

计及配电网时序承载力约束的多点分布式储能协调控制决策流程如图1所示,主要包括以下步骤:

(1) 输入控制决策基础信息,具体包括:分布式光伏发电功率,负荷功率,配电网拓扑及其参数,分布式储能的位置和容量,包含承载力约束在内的系统运行安全约束信息等。

(2) 基于分布式光伏发电功率和负荷功率的预测信息,建立多点分布式储能控制决策的时序场景。

(3) 基于初始输入信息,评估该时序场景下配电网的承载力是否满足约束条件。如果满足,无需利用分布式储能优化配电网的时序潮流分布,程序结束;如果不满足,则继续下一步。

(4) 基于时序潮流计算求解多点分布式储能的协调控制方案。本文此处利用遗传算法,以时序周期内多点

分布式储能控制代价最小化为目标,通过基于时序潮流计算的种群迭代,进行寻优求解。

(5) 输出寻优后的控制决策方案及其对应配电网时序承载力量化评估结果,程序结束。

5 仿真分析

以IEEE 3机9节点为例,进行仿真分析,系统基准容量100 MVA,电压等级100 kV,如图2所示。节点1、2、3为发电机节点;其中,节点1处为同步发电机G1,装机容量300 MW,设为平衡节点;节点2、3处为光伏发电PV1、PV2。节点5、6、8为负荷节点D1、D2、D3,同时配置储能ES1、ES2、ES3,其物理系统参数如表1所示。系统当前运行方式如表2所示,各点分布式储能处于浮充状态。

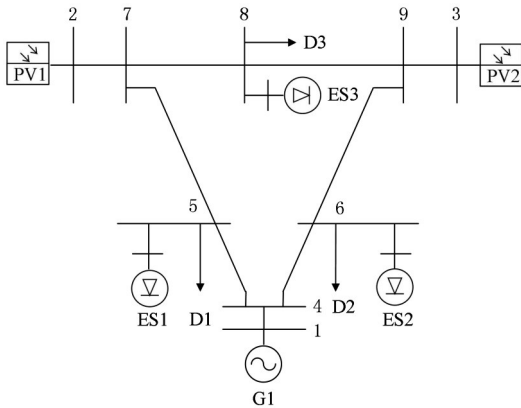


图2 IEEE 3机9节点系统

表1 储能配置参数

名称	节点位置	额定容量/(MW/MWh)	SOC _{min}	SOC _{max}
ES1	5	10/20	0.2	0.8
ES2	6	10/20	0.2	0.8
ES3	8	10/20	0.2	0.8

表2 支路阻抗参数

序号	首端节点	末端节点	线路阻抗/p.u.	对地导纳/p.u.
L1	8	7	0.008 5+0.072 i	0.145 i
L2	8	9	0.011 9+0.100 8i	0.209 i
L3	5	7	0.032+0.161 i	0.306 i
L4	6	9	0.039+0.17i	0.358 i
L5	4	5	0.01+0.085 i	0.176 i
L6	4	6	0.017+0.092 i	0.158 i
L7	1	4	0.057 6i	0
L8	2	7	0.062 5i	0
L9	3	9	0.058 6i	0

表3为某典型日分布式光伏发电与电力负荷时序特性。在不考虑时序潮流优化的情况下,受各时段分布式光伏发电出力 and 负荷特性随机波动的影响,各支路的时序承载程度(设置95%为重载告警阈值,即=5%)。如图3所示。

设配电网时序承载力告警值为95%,即配电网时

序承载力裕度必须小于5%。由图3可知,如果不考虑时序潮流优化,系统将在第9、14、15时段出现重载和过载现象。

采用本文所提出的基于储能协调的配电网时序承载力优化方法,此时通过计算,多点分布式储能的时序控制方案如图4所示。

表3 典型日光伏发电与电力负荷特性/kW

时段	PV1	PV2	D1	D2	D3
1	0.00	0.00	121.80	87.70	97.44
2	0.00	0.00	105.76	76.15	84.61
3	0.00	0.00	96.22	69.28	76.97
4	0.00	0.00	79.53	57.26	63.63
5	0.00	0.00	71.40	51.41	57.12
6	0.00	0.00	85.53	61.58	68.42
7	0.00	0.00	85.15	61.30	68.12
8	7.98	4.00	88.20	63.50	70.56
9	26.67	13.35	95.45	68.73	76.36
10	106.89	53.52	107.67	77.52	86.14
11	128.52	64.35	149.56	107.68	119.65
12	135.24	67.72	146.24	105.29	116.99
13	194.88	97.58	144.44	104.00	115.55
14	181.65	90.95	130.58	94.02	104.47
15	199.71	100.00	135.16	97.32	108.13
16	186.48	93.37	138.10	99.43	110.48
17	132.30	66.24	136.31	98.14	109.05
18	52.08	26.08	139.25	100.26	111.40
19	24.99	12.51	132.49	95.39	105.99
20	0.00	0.00	146.62	105.57	117.29
21	0.00	0.00	149.05	107.32	119.24
22	0.00	0.00	141.38	101.79	113.11
23	0.00	0.00	136.42	98.22	109.13
24	0.00	0.00	128.36	92.42	102.69

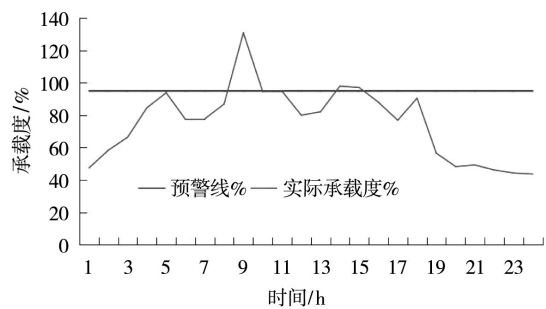


图3 未优化前配电网时序承载度

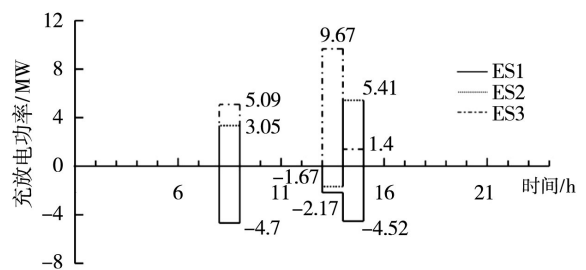


图4 储能充放电方案

在多点分布式储能的协同作用下,系统时序潮流实

现了均衡分布,避免了分布式光伏发电出力 and 负荷特性的波动,带来的配电网出现重载和过载问题。以第9时段为例,此时支路3、4过载;通过储能系统的协同控制实现了配电网潮流的优化,使所有支路的承载度都控制在告警值95%之内。优化前后配电网的承载度对比分析如表4所示。

表4 优化后配电网承载情况(t=9)

名称	承载度λ/(优化前)	承载度λ/(优化后)
L1	58.25	11.28
L2	77.63	80.03
L3	131.00	13.41
L4	126.88	61.10
L5	11.38	94.49
L6	15.25	93.53
L7	24.50	3.61
L8	3.50	25.67
L9	2.63	2.66

时序潮流优化后的配电网整体时序承载度分布如图5所示。结果显示,在储能的协同控制下,优化后配电网时序承载力均保持在大于等于5%的安全裕度范围之内。不但满足了分布式光伏的消纳和用户的供电需求,同时也使得整个系统运行在安全裕度合理的范围之内,验证了第4节中所提的模型和方法的有效性。

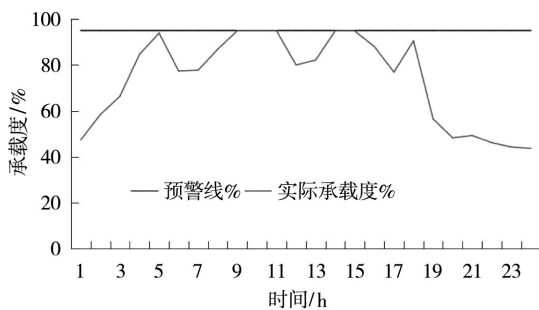


图5 优化后配电网时序承载度

6 结束语

高渗透率分布式光伏的接入增加了配电网调度运行的复杂性,光伏发电出力的间歇性、随机性和波动性造成了配电网负荷在时空分布上的不均衡性,甚至在某些时段造成配电网重载或过载。针对上述问题,本文定义了配电网时序承载力的量化评估指标,提出了一种基于储能协调控制的配电网时序承载力优化方法。该方法以多点分布式储能总控制代价最小化为目标,兼顾时序场景下分布式光伏发电的消纳需求和配电网承载力约束。仿真结果表明,该方法能够实现了系统时序潮流均衡分布,避免了高渗透率分布式光伏接入造成配电网在某些时段出现重载和过载问题。与此同时,储能系统的调

节需考虑一定的成本要素和激励机制,后续将进一步深入研究辅助服务市场环境下分布式储能聚合参与电力系统灵活调节的调控模式和竞价机制。

参考文献:

- [1] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等.分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术,2022,41(2):67-74.
- [2] 李相俊,马会萌,姜倩.新能源侧储能配置技术研究综述[J]. 中国电力,2022,55(1):13-25.
- [3] 张东辉,康重庆,卢洵,等.高比例新能源系统中储能配置规模论证[J]. 南方电网技术,2022,16(4):72-79.
- [4] 方保民,李红志,孔祥鹏,等.含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(2):121-129.
- [5] 杜鹏,米增强,贾雨龙,等.基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6):103-109.
- [6] 王一飞,董新伟,杨飞,等.基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电,2020,49(8):126-133.
- [7] 李勇,姚天宇,乔学博,等.基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J]. 电工技术学报,2022,37(13):3289-3303.
- [8] Li X, Wang S. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 7(5): 1026-1040.
- [9] Rosewater D M, Copp D A, Nguyen T A, et al. Battery energy storage models for optimal control[J]. IEEE Access, 2019(7):178357-178391.
- [10] 王典,李义强,王惠,等.并网型光伏-储能微电网优化配置研究[J]. 太阳能,2019,300(4):41-46, 29.
- [11] 李建林,靳文涛,徐少华,等.用户侧分布式储能系统接入方式及控制策略分析[J]. 储能科学与技术,2018,7(1):80-89.
- [12] 赵伟,肖祥,郑耀东,等.分布式储能网络化运营平台架构与控制策略[J]. 高电压技术,2019,45(10):3256-3262.
- [13] 李培强,段克会,董彦婷,等.含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(13):42-48.
- [14] Aznavi S, Fajri P, Asrari A, et al. Energy management of multi-energy storage systems using energy path decomposition[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2019:5747-5752.
- [15] 李继方,冯硕,石晓阳,等.基于分布式发电的储能系统能量管理策略[J]. 太阳能学报,2023,44(3):1-10.

作者简介:周文俊(1986-),男,高级工程师,研究方向:电力系统调度管理与控制技术。

通信作者:施涛(1982-),男,博士,副教授,研究方向:新能源与储能并网运行控制技术。