

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.12.008

风光储微电网储能系统容量优化配置

Optimal configuration for energy storage system capacity of wind-solar-storage microgrid

周成伟¹, 李鹏^{1,2}, 俞斌², 俞天杨¹, 孟伟¹

ZHOU Chengwei¹, LI Peng^{1,2}, YU Bin², YU Tianyang¹, MENG Wei¹

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 南京 210044; 2. 无锡学院, 江苏 无锡 214105)

(1. Automation college, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Wuxi University, Wuxi 214105, China)

摘要: 太阳能、风能等分布式能源具有间歇性与波动性的特点, 储能技术可有效地减少输出功率的波动性, 提高能源的可控性。在分析风光储微电网系统出力特性的基础上, 以系统总投资成本、年负荷缺电率、弃风弃光率最小为优化目标, 建立风光储微电网储能系统容量优化配置模型。在不同约束条件和运行策略下, 采用非支配排序遗传算法(NSGA)对模型进行求解, 得到最优容量配置方案。算例结果表明, 采用储能能量调度策略和NSGA对风光储微电网系统进行容量配置, 显著降低了系统投资成本, 提高了系统的供电可靠性和能源利用率。

关键词: 分布式能源; 微电网; 储能系统; 非支配排序遗传算法; 储能能量调度; 容量优化配置

中图分类号: TK 01⁹: TM 61

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)12-0056-06

Abstract: Due to the intermittent and fluctuating characteristics of distributed energies such as solar energy and wind energy, energy storage technology is taken to effectively reduce their output fluctuations and improve their controllability. Based on the analysis on the characteristics of a wind-solar-storage microgrid's output, an optimal capacity allocation model taking the minimum total investment cost, lowest annual load power shortage rate and optimal wind and solar energy abandonment rate of the microgrid system as the optimization objectives is established. The model's optimal capacity allocation schemes under different constraints and operation strategies are obtained by non-dominated sequencing genetic algorithm (NSGA). The results show that the wind-solar-storage microgrid system optimized by the optimal energy storage capacity allocation scheme and NSGA is of a lower total investment cost, and higher power-supply reliability and energy utilization rate.

Keywords: distributed energy; micro-grid; energy storage system; NSGA; optimal energy storage capacity allocation; capacity optimization configuration

0 引言

在国家能源战略布局的影响下, 风电、光伏等分布式电源高比例接入电网, 一方面缓解了电力供需矛盾, 另一方面积极响应了绿色发展的理念^[1-2]。但太阳能和风能的波动性和随机性对电力系统的抗冲击能力、电能质量等提出了新挑战, 电网调度也面临压力^[3-5], 新能源消纳问题成了风电、光伏快速发展的瓶颈^[6-7]。因此, 为了减少新能源发电中的弃光弃风现象, 利用储能容量优化配置技术促进可再生能源接入电网成为目前的研究热点^[8-10]。

国内外学者对微电网储能容量配置问题已进

行了一定研究, 大致可分为3类: (1) 关注新能源发电功率与负荷功率的不确定性, 如Hu等^[11]利用数学中概率统计方法对微电网中的输出特性进行分析, 建立微电网各单元数学概率模型, 求得容量配置结果和可靠性指标, 但其随机性概率大, 与实际数据有差异; (2) 提出利用储能平抑出力波动性的方法, 如周喜超等^[12]对波动功率分频, 低频信号波动平滑直接用来并网, 次高频功率信号利用蓄电池进行吸收消纳, 但没有考虑频繁充放电对蓄电池使用寿命的不利影响; (3) 研究储能混合模型应用, 如吴倩等^[13]提出利用超级电容和蓄电池进行混合储能平抑功率波动的控制方法, 平抑效果较好, 减少了充放电循环次数, 延长了蓄电池使用寿命, 但其控制结构稍显复杂, 投资过大。

以上研究多针对可再生能源的波动性, 但对储

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-11-05

基金项目: 江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2015692)

能能量调度策略关注较少。本文针对以上问题,提出风光储并网微电网结构,以总投资成本、年负荷缺电率、弃风弃光率3个指标最小为优化目标,通过算法改进求解模型;采用能量调度配置策略,克服传统蓄电池储能系统成本高及寿命短的缺点;最后利用微电网实验室的实际数据,按照优化算法同比例进行储能容量配置,验证其新能源消纳效果和方案的正确性。

1 并网微电网系统拓扑结构

并网微电网系统拓扑结构主要由分布式能源发电系统、储能系统、用电负荷和控制中心组成^[14-15],如图1所示。

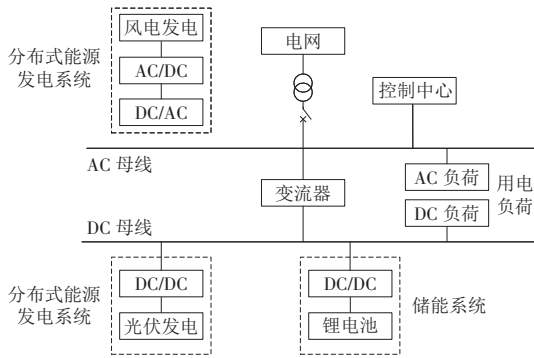


图1 并网微电网系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of the grid-connected micro-grid system

2 微电网系统模型

2.1 光伏发电出力模型

光伏发电(Photovoltaic, PV)输出功率与光照强度和环境温度相关,其表达式^[16-17]为

$$P_{PV} = N_{PV} P_{STC} \frac{E_c}{E_{STC}} [1 + \mu(t_c - t_{STC})], \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为光伏发电系统在工作点的输出功率,kW; N_{PV} 为光伏板数量; P_{STC} 为光伏阵列标准条件下的额定输出功率,kW; E_c 为工作点实际太阳辐照度,kW/m²; E_{STC} 为标准条件下的太阳辐照度,kW/m²; μ 为功率温度系数,取值为-0.004 3/°C; t_c 为工作点温度,°C; t_{STC} 为标准条件下温度,°C。

2.2 风力发电出力模型

风力发电机组(Wind Turbine, WT)输出功率与风速之间的关系可用如下分段函数^[18-19]表示

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ P_e \frac{v - v_{ci}}{v_e - v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_e \\ P_e & v_e \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases}, \quad (2)$$

式中: P_{WT} 为风电机组输出功率,kW; v, v_{ci}, v_e, v_{co} 分别

为实际风速、切入风速、额定风速和切出风速,m/s; P_e 为风电机组额定功率,kW。

2.3 储能系统模型

本文采用锂电池(Lithium Battery)中的能量型电池——磷酸铁锂电池作为储能电池,储能系统是风光储微电网系统的核心之一。

储能系统的能量是不断变化的,锂电池的荷电状态值(State of Charge, SOC)由其充放电功率决定,可表示为^[20-21]

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t_0) + \frac{\eta P_{LB}}{C_{LB} U_{LB}} \Delta t, \quad (3)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为 t 时刻锂电池的SOC值; P_{LB} 为锂电池充放电功率(充电时取正值,放电时取负值),kW; C_{LB} 为锂电池额定容量,kA·h; U_{LB} 为锂电池额定电压,V; η 为充放电效率(充电时取0.65~0.85,放电时取1.00); Δt 为采样时间段。

3 储能容量优化配置模型

3.1 目标函数

规划设计微电网需要综合考虑系统经济性、供电可靠性和弃风弃光率等因素,本文以微电网总投资成本、年负荷缺电率、弃风弃光率最小为目标,建立多目标函数,表达式为

$$\min F = \sum_{i=1}^T (C_A, \eta_{LPSP}, \eta_{EWR})_{\min}, \quad (4)$$

式中: C_A 为系统总成本; η_{LPSP} 为负荷缺电率; η_{EWR} 为弃风弃光率。

3.1.1 系统总投资成本

(1)固定成本。购买光伏板、风力发电机以及储能锂电池所支出的费用为固定成本,是投资费用最多的一部分,表达式为

$$C_0 = N_{PV} p_{PV} + N_{WT} p_{WT} + N_{LB} p_{LB}, \quad (5)$$

式中: C_0 为系统固定成本,万元; p_{PV}, p_{WT}, p_{LB} 分别为光伏板、风电机组、锂电池的单价,万元; N_{WT}, N_{LB} 分别为风电机组、锂电池的数量。

(2)运行维护成本。系统运行过程中需要定期对发电单元进行维护管理,以保证光伏板、风电机组及锂电池能够正常稳定运行,期间所支出的费用称为维护费用,表达式为

$$C_m = \left[\sum_{t=1}^{8760} N_{PV} C_{PVu} P_{PV}(t) + N_{WT} C_{WTu} P_{WT}(t) + N_{LB} C_{LBu} P_{LB}(t) \right] \Delta t, \quad (6)$$

式中: C_m 为系统年运行维护成本; $C_{PVu}, C_{WTu}, C_{LBu}$ 分别为光伏板、风电机组、锂电池单位容量维护成本。

(3)主网购电成本。在用户侧电量需求增加、

分布式能源和锂电池储能系统发出电能不足时,需要向主网购电,以保证整个系统稳定运行,购电产生的费用即主网购电成本

$$C_{np} = \sum_{t=1}^{8760} E_{buy}(t) p_{av}, \quad (7)$$

式中: C_{np} 为从主网购电费用,元; $E_{buy}(t)$ 为 t 时段向主网的购电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; p_{av} 为峰谷期平均购电价格,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

(4) 售电收益。系统将分布式能源发出的多余电量供给负载所获得的收入为售电收益,其表达式为

$$C_{in} = p_{in} \left[\sum_{t=1}^{8760} N_{PV} P_{PV}(t) + N_{WT} P_{WT}(t) \right] \Delta t, \quad (8)$$

式中: p_{in} 为售电价格,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); $P_{PV}(t)$, $P_{WT}(t)$ 为光伏、风电机组 t 时刻供给负载的功率, kW 。

因此,风光储微电网系统的总成本为

$$C_A = C_0 + C_m + C_{np} - C_{in}. \quad (9)$$

3.1.2 系统供电可靠性

为了保证用户负荷能够正常运行,以负荷缺电率 η_{LPSP} 表征系统供电可靠性,通常情况下, η_{LPSP} 在一个系统允许范围即可,其表达式为

$$\eta_{LPSP} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{UL}(t_i) - P_g(t_i)) \Delta t}{\sum_{i=1}^N P_{UL}(t_i) \Delta t} < \eta_{LPSP, \max}, \quad (10)$$

$$P_g(t_i) = P_{PV}(t_i) + P_{WT}(t_i) + P_{LB}(t_i) > 0, \quad (11)$$

式中: $P_g(t_i)$ 为系统发电功率; $P_{PV}(t_i)$, $P_{WT}(t_i)$, $P_{LB}(t_i)$, $P_{UL}(t_i)$ 分别为 t_i 时刻光伏、风电、锂电池和用户负荷的功率, kW ; N 为计算时段内的采样点数; $\eta_{LPSP, \max}$ 为负荷最大允许缺电率, η_{LPSP} 越小,供电可靠性越高。

3.1.3 弃风弃光率

当风光资源较好时,发电量供大于求,用户侧和储能系统都无法全部消纳当天的发电量,呈现弃风弃光现象,则微电网系统在 t 时刻的弃风弃光率 η_{EWR} 为

$$\eta_{EWR} = \frac{\sum_{t=1}^T [P_g(t) - P_{UL}(t)] \Delta t}{\sum_{t=1}^T [P_{PV}(t) + P_{WT}(t)] \Delta t}. \quad (12)$$

若 $P_g(t) > P_{UL}(t)$,表明满足用户负荷正常运行后,能源发电量仍有盈余,产生浪费。若 $P_g(t) \leq P_{UL}(t)$,表明能源发电量和储能系统电量全部被用户负荷吸收,能源浪费率为 0,但需要电网输出电能,保证充足的备用容量,维持整个系统正常运行。 η_{EWR} 越小,能量利用率越高。

3.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。微电网实际运行过程中,需要时刻保持功率平衡以满足电能质量要求,其表达式为

$$P_g(t) = P_{UL}(t) + P_{loss}(t), \quad (13)$$

式中: $P_{loss}(t)$ 为微电网运行过程中损耗的功率。

(2) 储能电池 SOC。为了延长储能电池的寿命,防止过度充放电对电池造成伤害,锂电池 SOC 应该设置上下限,其表达式为

$$S_{OC, \min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC, \max}, \quad (14)$$

式中: $S_{OC, \min}$ 和 $S_{OC, \max}$ 分别为锂电池 SOC 的上、下限,能量型电池 SOC 最大值为 0.9,最小值为 0.1。

(3) 锂电池储能系统的容量、充放电功率、一天充放电次数约束,其表达式为

$$S_{BESS, \min} \leq S_{BESS}(t) \leq S_{BESS, \max}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{c, \min} \leq P_{BESS}(t) \leq P_{c, \max} \\ P_{d, \min} \leq P_{BESS}(t) \leq P_{d, \max} \end{cases}, \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \lambda(t) \leq \lambda_{\max}, \quad (17)$$

式中: $S_{BESS, \min}$ 和 $S_{BESS, \max}$ 分别为锂电池储能系统最小、最大容量; P_{BESS} 为锂电池储能系统充放电功率; $P_{c, \min}$, $P_{c, \max}$, $P_{d, \min}$, $P_{d, \max}$ 分别为锂电池储能系统最小充电功率、最大充电功率、最小放电功率、最大放电功率; $\lambda_{\max}$ 为一天内最大允许充放电次数。

(4) 风光能源的功率及安装数量约束。

$$\begin{cases} P_{PV, \min} \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV, \max} \\ P_{WT, \min} \leq P_{WT}(t) \leq P_{WT, \max} \end{cases}, \quad (18)$$

$$\begin{cases} N_{PV, \min} \leq N_{PV} \leq N_{PV, \max} \\ N_{WT, \min} \leq N_{WT} \leq N_{WT, \max} \\ N_{LB, \min} \leq N_{LB} \leq N_{LB, \max} \end{cases}, \quad (19)$$

式中: $P_{PV, \min}$, $P_{PV, \max}$ 分别为光伏发电输出功率的最小、最大值; $P_{WT, \min}$, $P_{WT, \max}$ 分别为风电机组输出功率的最小、最大值; $N_{PV, \min}$, $N_{WT, \min}$, $N_{LB, \min}$ 分别为光伏板、风电机组、锂电池的最小安装数量,一般设置为 0; $N_{PV, \max}$, $N_{WT, \max}$, $N_{LB, \max}$ 分别为光伏板、风机组、锂电池根据实际场地确定的最大安装数量。

3.3 微网运行策略

为了维持微电网系统的稳定,需要进行能量管理来保证系统的可靠性。微电网全年(8760 h)并网运行过程中,风光能源输出不可控,当风光能源功率输出大于用户负荷时,能量控制系统给储能锂电池下达充电命令,储能锂电池处于充电状态,吸收太阳能、风电等分布式能源发出的多余电能;反之,当光伏、风力发电不能满足用户负荷需求时,能量控制系统给储能锂电池下达放电命令,储能电池

处于放电状态,通过变流器向电网或负载放电。

本文提出一种微电网能量调度策略,在满足微电网基本功率平衡的基础上,尽量减少对高成本储能系统的调度,以提高微电网经济性。系统能量调度策略流程如图 2 所示。

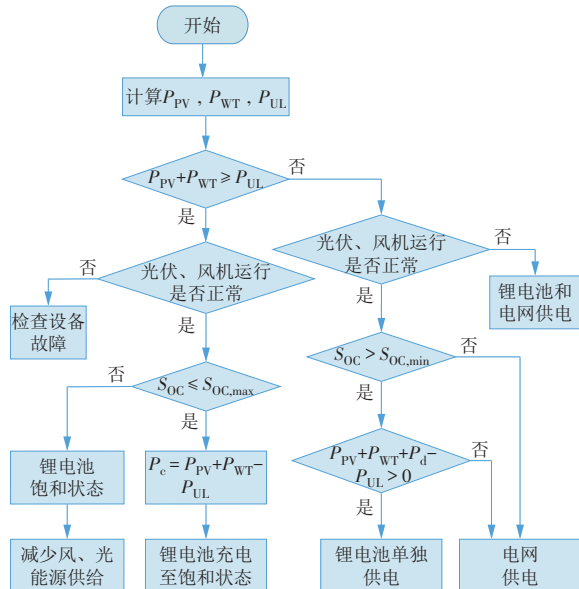


图 2 能量调度策略流程

Fig. 2 Flow of energy scheduling strategy

4 模型求解方法

并网风光储微电网系统中,由于光伏、风力资源以及用户负荷具有很强的随机性,其容量优化配置是一个典型的非线性优化问题,很难通过传统方法进行求解。本文采用非支配排序遗传算法(NSGA)对模型进行求解,如图 3 所示(图中: g 为进化代数; X 为非支配解集)。

5 算例分析

本文以某并网运行的风光储微电网实验室为研究对象,实验室光伏装机容量为 30 kW,风机装机容量为 5 kW,储能容量为 10 kW,实验室 24 h 太阳能、风能、储能系统出力以及用户负荷如图 4 所示。

以总投资成本、年负荷缺电率、弃风弃光率为目标函数,在 Matlab 中采用 NSGA 进行仿真,设定种群规模为 100,最大迭代次数为 150,以实验室微电网出力数据为基础,以 1 h 为步长,模拟微电网不同的运行情况,获得系统不同的配置方案。3 个方案的容量优化配置结果见表 1。

由表 1 可知,方案 1 没有配置储能系统,微电网实验室的投资成本为 5.85 万元,接入的光伏板、风机数量分别为 10 块、1 台,但仍需要花费 1.50 万元向电网购电,而且负荷缺电率为 10%,说明光伏、风

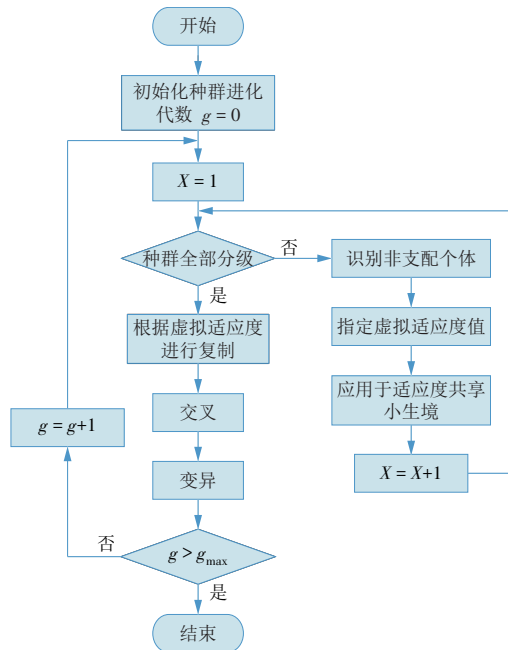


图 3 模型求解流程

Fig. 3 Algorithm flow

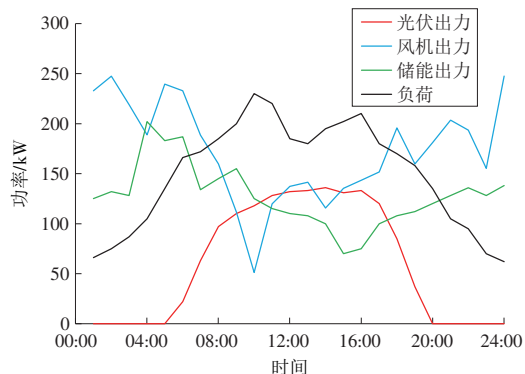


图 4 实验室分布式能源出力及负荷

Fig. 4 Distributed energy output and load characteristics of the laboratory

机发电量消纳能力差,导致弃光弃风率高达 30%。

方案 2 保持峰谷负荷不变,接入少量储能系统并采用储能系统能量调度策略,其投资成本为 5.63 万元,接入光伏板、风机、储能电池的数量分别为 10 块、1 台、5 块,购电费用明显减少,相应的负荷缺电率和弃光弃风率有所下降,说明有部分光伏、风机多发的电量存储在储能系统中。

在储能能量调度策略和 NSGA 的支持下,方案 3 的投资成本为 5.54 万元,基本无需购电,接入的光伏板、风机和储能电池数量分别为 15 块、1 台、10 块,系统负荷缺电率和弃风弃光率仅为 5% 和 10%,说明储能系统不仅收集并储存了多余电量,还能在负荷高峰时放电,提升能源的综合利用率。

综合几种方案模拟结果,方案 3 的容量配置结果最优。方案 3 的储能系统出力拟合曲线和储能系统 SOC 状态分别如图 5、图 6 所示。

表 1 容量优化配置结果

Table 1 Capacity optimal configuration schemes

方案	光伏电池板/块	风力发电机/台	储能电池/块	固定成本/万元	维护成本/万元	购电成本/万元	售电收益/万元	总投资成本/万元	负荷缺电率/%	弃风弃光率/%
1	10	1	0	4.40	0.15	1.50	0.20	5.85	10	30
2	10	1	5	5.40	0.23	0.80	0.80	5.63	8	15
3	15	1	10	6.60	0.34	0.10	1.50	5.54	5	10

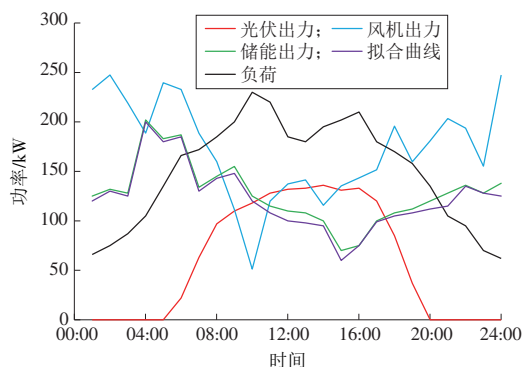


图 5 储能系统出力拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the energy storage system output

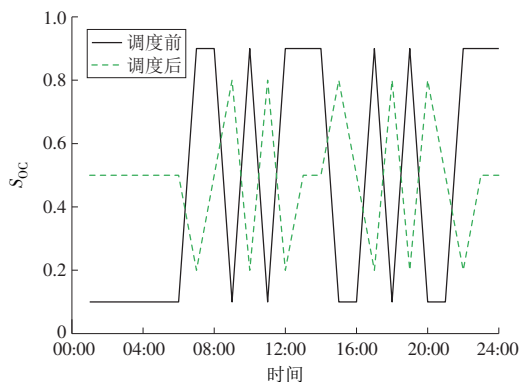


图 6 方案 3 的储能系统 SOC

Fig. 6 SOC of the energy storage system taking scheme 3

由图 5、图 6 可知,储能系统对光伏和风机发出的多余电量进行管控,进行快速充放电,实现了大功率动态调节,减少了外部条件对新能源发电系统的影响,实现了新能源电力的可控,减少了对电网的冲击,大大提高了能源的利用率。

6 结论

本文提出了风光储微电网储能系统拓扑结构,搭建以微电网系统的总投资成本、负荷缺电率和弃风弃光率三者最小为目标的数学模型,并采用储能能量调度策略和 NSAG 对所提模型进行求解,得到以下结论。

(1)系统的可靠性是经济成本最重要的影响因素。对于相同容量的储能系统,采用储能能量调度策略,缺电负荷率从 10% 降到 8%,可有效降低系统总投资成本,提高微电网的经济性。

(2)以并网运行的风光储微电网实验室为硬件

基础,加入 NSGA 配合储能能量调度策略运行,储能系统出力在高峰时段下降 5%,储能 SOC 趋于平衡,避免了过充过放。

(3)弃风弃光率从 30% 降到 10%,表明新能源消纳能力提高,改善了弃风弃光现象,大大提高了能源的利用率。

参考文献:

- [1]徐超,柏筱飞.分布式电源并网特性分析[J].大众用电, 2022,37(5):51-53.
XU Chao, BAI Xiaofei. Analysis on characteristics of distributed power grid connection [J]. Popular Utilization of Electricity, 2022, 37(5): 51-53.
- [2]李琼慧,叶小宁,胡静,等.分布式能源规模化发展前景及关键问题[J].分布式能源,2020,5(2):1-7.
LI Qionghui, YE Xiaoning, HU Jing, et al. Outlook and critical issues of large-scale development on distributed energy resources [J]. Distributed Energy, 2020, 5 (2) : 1-7.
- [3]田军强.新能源发电与分布式发电及其对电力系统的影响[J].通信电源技术,2019,36(12):131-132.
TIAN Junqiang. New energy generation and distributed generation and their influence on power system [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36 (12): 131-132.
- [4]王晗雯,鲁胜,周照宇.光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析[J].华电技术,2020,42(4):31-36.
WANG Hanwen, LU Sheng, ZHOU Zhaoyu. Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 31-36.
- [5]王俊杰,孙嘉,徐猛,等.电源侧储能参与电网调频的容量配置研究[J].电器与能效管理技术,2020(10):84-89.
WANG Junjie, SUN Jia, XU Meng, et al. Research on capacity design of power-side energy storage participating in grid frequency modulation [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020 (10) : 84-89.
- [6]胡之荣.微电网与分布式电源的现状与趋势分析[C]//第八届云南省科协学术年会论文集——专题六:工业与信息技术,2018:178-184.
- [7]陈沛光,胡维国,程永生.基于源荷协同的新能源消纳综合效益测度指标体系构建[J].中国市场,2020(4):61-

- 62,96.
- [8]王鑫,陈祖翠,卞在平,等.基于粒子群优化算法的智慧微电网风光储容量优化配置[J].综合智慧能源,2022,44(6):52-58.
- WANG Xin, CHEN Zucui, BIAN Zaiping, et al. Optimal allocation of a wind-PV-battery hybrid system in smart microgrid based on particle swarm optimization algorithm [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 52-58.
- [9]蒋文坤,韩颖慧,薛智文,等.多能互补能源系统中储能原理及其应用[J].综合智慧能源,2022,44(1):63-71.
- JIANG Wenkun, HAN Yinghui, XUE Zhiwen, et al. Energy storage technologies and their applications in multi-energy complementary power system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 63-71.
- [10]张兴科,魏朝阳,王康平,等.面向高比例光伏并网的火电爬坡压力缓解策略[J].综合智慧能源,2022,44(1):1-8.
- ZHANG Xingke, WEI Chaoyang, WANG Kangping, et al. Strategies for relieving ramp pressure of thermal power units with high-proportion photovoltaic power connecting to the grid [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 1-8.
- [11]HU X, SHU Z, MING N. Microgrid development in China: A method for renewable energy and energy storage capacity configuration in a megawatt-level isolated microgrid [J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(2): 28-35.
- [12]周喜超,孟凡强,李娜,等.电池储能系统参与电网削峰填谷控制策略[J].热力发电,2021,50(4):44-50.
- ZHOU Xichao, MENG Fanqiang, LI Na, et al. Control strategies of battery energy storage system participating in peak load regulation of power grid [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 44-50.
- [13]吴倩,王洋,王琳媛,等.计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J].电测与仪表,2020,59(4):112-119.
- WU Qian, WANG Yang, WANG Linyuan, et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system in wind-solar-battery system considering fluctuation smoothing and economy [J]. Electric Measurement and Instrumentation, 2020, 59(4): 112-119.
- [14]甘霖,陈瑜玮,刘育权,等.含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):275-281.
- GAN Lin, CHEN Yuwei, LIU Yuquan, et al. Coordinative optimization of multiple energy flows for microgrid with renewable energy resources and case study [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 275-281.
- [15]高强,周洪青,高骞,等.基于源荷和光储特征的小区多微电网系统工程设计[J].电子测量技术,2020,43(2):64-67.
- GAO Qiang, ZHOU Hongqing, GAO Qian, et al. Based on the characteristics of source load and light storage, the multi-micro grid system engineering design of residential area [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(2): 64-67.
- [16]MAO M, JIN P, CHANG L, et al. Economic analysis and optimal design on microgrids with SS-PVs for industries [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1328-1336.
- [17]陈若奇,钟建伟,罗春景,等.基于混合储能的光伏微电网控制策略研究[J].电工材料,2021(4):26-28.
- CHEN Ruoji, ZHONG Jianwei, LUO Chunjing, et al. Thunderstorm cloud prediction with DBSCAN and LS-SVM algorithm [J]. Electrical Engineering Materials, 2021(4): 26-28.
- [18]窦晓波,袁简,吴在军,等.并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J].电力自动化设备,2016,36(3):26-32.
- DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 26-32.
- [19]常超,史阳.基于超级电容储能的直流风电机组协调控制[J].现代电力,2017,34(6):65-70.
- CHANG Chao, SHI Yang. Coordinated control of DC wind power generator based on super capacitor energy storage [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 65-70.
- [20]严海波,康林贤,周冬.考虑随机性的微电网日前调度与储能优化模型[J].电网与清洁能源,2019,35(11):61-65.
- YAN Haibo, KANG Linxian, ZHOU Dong. Optimal model of day-ahead dispatching and energy storage for micro-grid considering randomness [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 61-65.
- [21]MA X, ZHANG C H, LI K, et al. Optimal dispatching strategy of regional micro energy system with compressed air energy storage [J]. Energy, 2020, 212: 118557.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

周成伟(1996),男,在读硕士研究生,从事新能源发电技术等方面的研究,1031912401@qq.com;

李鹏(1966),男,教授,博士,从事智能微电网状态监测与控制等方面的研究,1063380501@qq.com;

俞斌(1984),男,副教授,硕士,从事智能微网、综合能源管理等方面的研究,15152212913@163.com;

俞天杨(1998),男,在读硕士研究生,从事综合能源管理等方面的研究,2537154646@qq.com;

孟伟(1998),男,在读硕士研究生,从事新能源发电技术等方面的研究,357961393@qq.com。