

计及负荷侧灵活性资源的微电网低碳优化调度

康家乐,周勋甜,张志刚,岑银伟

(宁波市电力设计院有限公司,浙江 宁波 315000)

摘要:为提高清洁能源利用率以及促进微电网稳定低碳运行,建立一种基于负荷侧灵活性资源的微电网低碳优化调度模型。结合微电网实际运行特征,根据灵活性资源分析,进行微电网负荷侧灵活性资源建模,将低碳效益作为微电网优化运行的子目标之一,通过建立惩罚函数,最大限度地减少微电网运行全程产生的碳排放量。利用基于模拟退火的遗传算法对建立的模型进行求解,验证建立的负荷侧灵活性资源低碳优化调度模型的有效性。结果表明:有效利用微电网中的负荷侧灵活性资源能够有效平抑微电网负荷曲线的波动、提升清洁能源消纳量、增强微电网的环境效益。

关键词:灵活性资源;低碳;微电网;模拟退火;遗传算法

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24278

Low Carbon Optimal Dispatch of Microgrid Based on Load Side Flexible Resources

KANG Jiale, ZHOU Xuntian, ZHANG Zhigang, CEN Yinwei

(Ningbo Electric Power Design Institute Company, Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of clean energy and promote the stable and low-carbon operation of the microgrid, a low-carbon optimal dispatching model based on load side flexible resources was established. According to the flexibility resource analysis, the flexibility resource modeling of load side was carried out, and the low-carbon benefit was regarded as one of the sub objectives of the optimal operation. By establishing the penalty function, the carbon emission generated in the whole process of the microgrid was minimized. The genetic algorithm based on simulated annealing was used to solve the established model to verify the effectiveness of the established low-carbon optimal scheduling model. Experimental results show that the effective use of load side flexibility resources can effectively stabilize the fluctuation of load curve, promote the consumption of clean energy and enhance the environmental benefits of microgrid.

Key words: flexible resources; low-carbon; microgrid; simulated annealing; genetic algorithm(GA)

在大力发展低碳经济的背景下,加快分布式清洁能源发展、促进能源绿色转型^[1],已成为电力行业的发展趋势。微电网作为可再生分布式能源利用的重要形式^[2-4],被认为是服务于能源转型战略、高比例消纳分布式能源、实现电能清洁高效转换与资源协调配置的关键组网形态,但微电网网侧和负荷侧的不确定性,对微电网的广泛应用提出了极大的挑战^[5]。为提高微电网的稳定性,需要在微电网中挖掘灵活性资源的应用潜力。负荷侧灵活性资源作为微电网灵活性的一个重要来源^[6],将更加高频度地参与微电网运行^[7],增强微电网运行稳定性的同时,提升微电网

对分布式能源的消纳能力。目前灵活性资源的相关研究,主要集中在大规模电力系统中的应用,文献[8]在分析系统规划过程中增加系统灵活性量化评价的关键性并指出了规划中存在的主要障碍。文献[9]指出了风电出力的随机性会对系统的稳定运行造成影响,论证了系统应具备足够灵活性资源以应对高比例风力发电接入可能对电力系统造成的影响,保障系统稳定运行。文献[10]建立了含火力发电机组和风电机组的源荷互动分层优化调度模型,合理利用灵活性资源,解决了系统因风电机组出力波动性强而产生的问题。文献[11]从多角度考虑了储能侧灵活性资

基金项目:宁波市电力设计院有限公司科技项目(NBGC21P03A-0831)

作者简介:康家乐(1983—),男,本科,高级工程师,Email:kangjiale@163.com

源在电力系统规划中的积极作用,构建了源、网、储联合规划模型以增加电力系统的备用资源。通过以上研究可以看出,合理应用灵活性资源可以有效解决分布式能源出力波动性强的问题,促进分布式清洁能源消纳量,提升电力系统运行的稳定性。但目前微电网背景下对灵活性资源的相关研究较为缺乏,尤其是缺少对微电网中负荷侧灵活性资源的深入研究,无法有效反映其灵活性供给能力。因此,本文提出了一种基于负荷侧灵活性资源的微电网低碳优化调度模型,利用微电网中负荷侧规模可观的灵活性资源解决微电网中电源出力不稳定等问题,优化微电网负荷曲线、提升微电网中分布式清洁能源的消纳量。模型采用基于模拟退火的遗传算法^[12-13]求解,并建立了三个不同场景进行对比,比较了引入含灵活性资源优化模型前后不同场景下的负荷曲线、分布式能源出力结果、碳排放峰值以及碳排放量量化计算结果,根据国家制定的相关计算标准对方案产生的低碳效益进行量化计算。

1 负荷侧灵活性资源模型

1.1 负荷侧灵活性资源分析

作为灵活性资源的重要来源之一,负荷侧灵活性资源是系统能量供需协同互动的重要纽带。有效利用负荷侧可调能力是实现微电网削峰填谷、能量灵活匹配的关键。电价波动会对用户的用电行为产生影响^[14],本文利用这一特征,引导用户合理安排用电计划以最大程度上提升微电网系统的灵活性,激发负荷侧灵活性资源调度潜力。电力用户对电价的响应程度通常采用电价弹性系数 e_{ij} 描述,表达式如下:

$$e_{ij} = \frac{\Delta P_{D,i}}{P_{D,i}^0} \times \frac{\rho_j^0}{\Delta \rho_j} \quad (1)$$

式中: $P_{D,i}^0$ 为实施需求响应前 i 时刻的负荷; $\Delta P_{D,i}$ 为实施需求响应后 i 时刻的负荷变化量; ρ_j^0 为实施需求响应前 j 时刻的电价; $\Delta \rho_j$ 为实施需求响应后 j 时刻的电价变化量。

当 $i=j$ 时 e_{ij} 为自弹性系数,电力用户只响应当前时段电价变化,当前时段负荷不能转移到其它时段;当 $i \neq j$ 时 e_{ij} 为交叉弹性系数,用户当前时段的负荷能转移到其它时段。

若日前的调度周期为24 h,则弹性系数矩阵表达形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{D,1}/P_{D,1}^0 \\ \Delta P_{D,2}/P_{D,2}^0 \\ \vdots \\ \Delta P_{D,24}/P_{D,24}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,24} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{24,1} & \cdots & e_{24,24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \rho_1/\rho_1^0 \\ \Delta \rho_2/\rho_2^0 \\ \vdots \\ \Delta \rho_{24}/\rho_{24}^0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)结合文献[15-16]对式(2)进一步推导可以得到电价调整前、后与负荷调整前、后对应的比例关系:

$$\frac{P_a/A}{P_b} = \left(\frac{\rho_a}{\rho_b}\right)^e \quad (3)$$

式中: P_a, P_b 分别为需求响应前、后的负荷量; ρ_a 为根据需求调整后的电价; ρ_b 为调整前的实际参考电价。

1.2 负荷侧灵活性资源优化模型

微电网分布式电源出力存在随机性^[17],分布式能源与负荷的随机性叠加后会进一步扩大电力系统净负荷的日峰谷差。因此必须增强电力系统的灵活性,以保证系统稳定运行。本文根据负荷侧可利用的需求响应量预测值和分布式电源的出力建立灵活性资源优化模型,使得负荷侧灵活性资源和分布式电源出力实现更好的协调,在提高系统稳定性的同时,增强清洁能源的消纳能力。模型如下:

$$\min \sum_{t=1}^{24} (P_{L,1}^t - P_{wt,pr}^t - P_{pv,pr}^t)^2 \quad (4)$$

$$P_{L,1}^t = P_{L,p}^t - P_{L,out,1}^t + P_{L,in,1}^t \quad (5)$$

式中: $P_{L,1}^t$ 为优化后的等效负荷; $P_{wt,pr}^t$ 为风力发电机组的预测出力; $P_{pv,pr}^t$ 为光伏发电机组的预测出力; $P_{L,p}^t$ 为优化前的总负荷; $P_{L,out,1}^t$ 为优化过程转出的负荷量; $P_{L,in,1}^t$ 为优化过程转入的负荷量。

优化模型求解得到的结果,将代入微网层的优化调度模型,进行下一步求解。

2 微电网设备模型建模

本文建立微电网模型中主要包含微型燃气轮机、风力发电机组、光伏发电机组、蓄电池等设备。

2.1 风力机组出力模型

风速的不确定性^[18]会导致风力机组输出功率的不确定性,可以利用威布尔分布对风速特性进行描述:

$$f(v) = \frac{\varphi}{\theta} \left(\frac{v}{\theta}\right)^{\varphi-1} e^{-\left(\frac{v}{\theta}\right)^\varphi} \quad (6)$$

式中: v 为风速; φ 为形状参数; θ 为尺度参数。风速 v 的发生概率 $P(v)$ 计算公式为

$$P(v) = \int_{v_a}^{v_b} f(v) dv \quad (7)$$

式中: v_a, v_b 分别为风速 v 的上、下限值。

假设 v_t 为时刻 t 的实际风速, 计算公式为

$$v_t = (v_{a,t} + v_{b,t})/2 \quad (8)$$

则风力机组在 t 时刻发电出力 $g_{w,t}$ 的计算公式为

$$g_{w,t} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t < v_{in} \quad v_t > v_{out} \\ \frac{v_t - v_{in}}{v_{rated} - v_{in}} g_R & v_{in} \leq v_t \leq v_{rated} \\ g_R & v_{rated} \leq v_t \leq v_{out} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $g_{w,t}$ 为风电机组在 t 时刻的出力; v_{in}, v_{out} 为风电机组的切入风速和切出风速; v_{rated} 为额定风速; g_R 为风电机组的额定输出功率。

2.2 光伏发电出力模型

光伏发电机组的出力水平主要取决于水平面日照辐射的强度^[19]。水平面日照辐射的强度可由 Beta 分布函数描述为

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1} & 0 \leq \theta \leq 1 \quad \alpha \geq 0 \quad \beta > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: α, β 为 Beta 分布函数的形状参数; θ 为光伏辐射强度。

α, β 的均值 μ 和标准差 σ 可以利用历史数据的模拟获取:

$$\beta = (1 - \mu) [u(1 + \mu)/\sigma^2 - 1] \quad (11)$$

$$\alpha = \mu\beta/(1 - \mu) \quad (12)$$

由式(10)~式(12)推导出光伏辐射 θ 发生概率:

$$P(\theta) = \int_{\theta_c}^{\theta_d} f(\theta) d\theta \quad (13)$$

式中: θ_d, θ_c 分别为光伏辐射 θ 的上、下限。

由光电转换函数得到光伏出力为

$$g_{PV,t} = \eta_{PV} S_{PV} \theta_t \quad (14)$$

式中: η_{PV} 为光伏机组的发电效率; S_{PV} 为机组的光伏总面积; θ_t 为 t 时刻的光伏辐射强度。

3 微电网低碳优化调度模型

3.1 目标函数

本文优化调度的总体目标是微电网优化运行的总体费用和低碳效益达到一个综合最优值。总体目标函数为

$$F = \min \sum_{t=1}^{24} [C_E(t) + C_{grid}(t) + C_p(t)] \quad (15)$$

式中: $C_E(t)$ 为 t 时刻微电网中总的碳排放惩罚成本。

其中, 为了实现碳排放量的最小化, 直接进行碳排放量计算难以直接参与到微电网优化运行的目标函数设置中, 本文建立了碳排放环境污染惩罚函数, 实现微电网低碳优化运行。

1) 碳排放环境污染惩罚函数。本文考虑了微电网中不同能源出力可能引起的碳排放量以及微电网向电网购得部分电能造成的碳排放量(默认电能由火力发电获得)。

$$C_E(t) = C_{E1}(t) + C_{E2}(t) \quad (16)$$

$$C_{E1}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot Q_i \cdot V \quad (17)$$

$$C_{E2}(t) = P_{grid}(t) \cdot Q_{grid} \cdot V \quad (18)$$

式中: $C_{E1}(t)$ 为 t 时刻微电网中不同电源出力所引起的碳排放惩罚成本; $C_{E2}(t)$ 为向电网购电部分产生的碳排放惩罚成本; n 为不同电源的种类; $P_i(t)$ 为第 i 种分布式电源 t 时刻产生的电量; Q_i 为第 i 种分布式电源输出单位电量会引起的碳排放量; V 为碳排放环境污染惩罚系数; $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻微电网需要向外界获取的功率; Q_{grid} 为单位电网电量产生时会引起的碳排放量。

2) 购售电成本函数。 t 时刻与电网交易产生的购售电成本 $C_{grid}(t)$ 计算公式如下:

$$C_{grid}(t) = k_{grid}(t) P_{grid}(t) \quad (19)$$

式中: $k_{grid}(t)$ 为 t 时刻电网购售电的实时电价。

3) 出力成本。考虑到微电网中各分布式电源发电过程分布式能源发电需要消耗燃料等一系列成本, 对微电网的经济运行产生影响, 建立出力成本函数模型, 表达式如下:

$$C_p(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot c_{p,i} \quad (20)$$

式中: $C_p(t)$ 为 t 时刻的出力总成本; $c_{p,i}$ 为第 i 种分布式电源生产单位电量对应的成本。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束。在微电网优化运行过程中, 各时刻分布式电源的出力以及向电网购得的部分功率之和, 应当与实际负荷的大小达到平衡状态:

$$P'_{L,1} = P'_{grid} + P'_{pv,r} + P'_{wt,r} + P'_{ess} + P'_{\mu g} \quad (21)$$

2) 分布式电源出力约束。微电网中的分布式电源包含光伏、风机、微燃机组, 对应出力满足:

$$\begin{cases} P_{pv}^{\min} \leq P_{pv,r}^t \leq P_{pv}^{\max} \\ P_{wt}^{\min} \leq P_{wt,r}^t \leq P_{wt}^{\min} \\ P_{\mu g}^{\min} \leq P_{\mu g}^t \leq P_{\mu g}^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{pv}^{\min}, P_{pv}^{\max}, P_{wt}^{\min}, P_{wt}^{\max}, P_{\mu g}^{\min}, P_{\mu g}^{\max}$ 分别为光伏、风机、微燃机的最小和最大出力。

3)联络线功率约束如下:

$$P_{grid}^{min} \leq P_{grid}^i \leq P_{grid}^{max} \quad (23)$$

式中: $P_{grid}^{min}, P_{grid}^{max}$ 分别为联络线功率上、下限。

4 模型求解过程

遗传算法(GA)是较为常见的一种寻优智能算法,但其求解过程中会暴露出收敛速度缓慢、求解结果不精确等问题^[20],通过融合模拟退火算法(SA)和遗传算法各自的优点,在遗传算法求解过程的基础上加入模拟退火机制,提升算法局部搜索的能力,可以改善遗传算法的求解能力和效率。算法主体由GA的进化过程和SA的退火过程构成,GA进化操作产生优良种群后加入模拟退火流程,插入Metropolis准则,重复迭代至满足设定的条件。求解流程如图1所示。

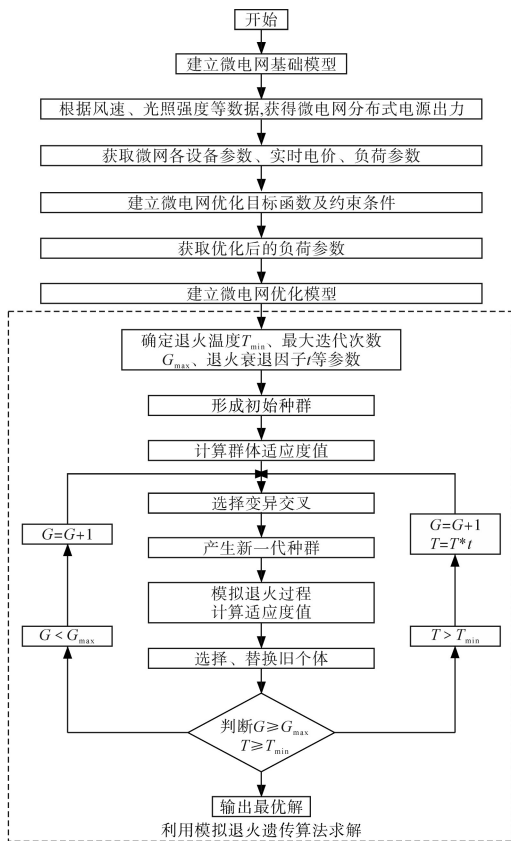


图1 模型求解过程图

Fig.1 Solving procedure for the model

5 模型仿真及分析

5.1 模型基础数据及仿真设计

本文微电网中风电机组、光伏电站额定功率均为100 kW;两台微型燃气轮机的功率上、下限均为40 kW和20 kW;可转移负荷最大转入、转出容量均为40 kW。储能具体参数如下:额定容量

300 kW·h; SOC最小值、最大值和初始值分别为0.2, 0.9和0.6;自放电率0.004;充放电效率0.95;额定功率0.95 kW。微燃机组和火力发电单位电量碳排放量如表1所示。设定优化调度时间尺度为15 min。微燃机和火力发电机组单位发电碳排放量分别为0.112 g/kW和0.229 g/kW。

为了验证灵活性资源在微电网优化调度中的有效性,本文设置了以下三个场景进行对比:场景1:不含灵活性资源负荷优化的微电网优化调度场景;场景2:含灵活性资源负荷优化的微电网优化调度场景;场景3:进行优化调度前的场景。

表1 碳排放参数表

Tab.1 Carbon emissions parameters table

场景	指标	
	碳排放量总量/g	碳排放量峰值/g
场景1	1 826.96	22.32
场景2	1 870.82	23.11
场景3	2 826.97	38.84

5.2 结果分析

1)减碳效益评价。引入本文建立的优化模型前、后碳排放量的变化如图2所示。场景3中,用电高峰时段随着耗电量的增加,碳排放量迅速增多,对环境造成较大的负面影响。场景2则通过合理利用灵活性资源特性,通过用户合理安排用能计划以及清洁能源消纳量的提升,减少了大量原本由火力发电造成的碳排放,实现了微电网的低碳运行,日调度时段内碳排放总量减少了1 000.01 g,日前碳排放量峰值由38.84 g降低至22.32 g。

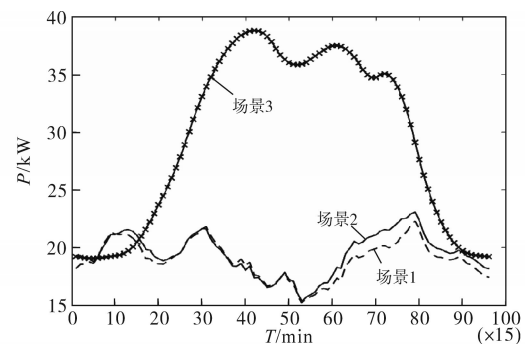


图2 碳排放量曲线

Fig.2 Carbon emissions curves

2)负荷曲线优化效果。负荷侧需求响应灵活性资源参与到微电网优化运行的过程中,成为了微电网可调度资源,与发电侧、储能侧共同应对分布式清洁能源出力的波动性,起到了减小日负荷峰谷差的重要作用,提高了系统的稳定性。图3展示了负荷曲线的优化效果,表2为日负荷参数表。

从图3可以看出,微电网负荷侧灵活性资源

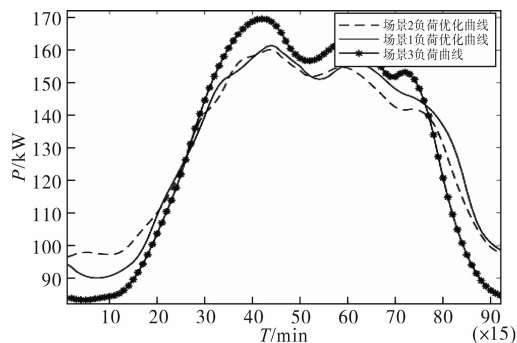


图3 负荷曲线图

Fig.3 Load curves

表2 日负荷参数表

Tab.2 Daily load parameters table

场景	指标		
	日负荷峰值/kW	日负荷谷值/kW	峰谷比
场景1	161.49	90.01	1.79
场景2	160.16	96.44	1.66
场景3	169.59	83.25	2.04

参与到微电网优化运行的过程中,协同发电侧、储能侧,有效解决了分布式清洁能源出力的波动性,平缓日负荷峰谷差,起到提高系统稳定性的重要作用。从图中可看出场景2的负荷曲线整体趋势最为平缓,日负荷峰值低于场景1和场景3的负荷值,日负荷谷值则从优化前的83.25 kW提高至96.44 kW,对比场景1也有了一定程度的提升。将负荷侧可利用资源作为灵活性资源调度后,在调度周期内负荷侧的电力用户改变了各时段用电方式,在电价较高的负荷高峰时期,电力用户为减少电费支付,可将部分可变负荷转移至电价相对较低的负荷低谷期或减少用电,负荷峰谷比由1.79降低至1.66,降低了7.3%,对比进行优化前负荷的削峰填谷效应更是显著。因此,负荷侧灵活性资源通过改变实时电价的方式,使得电力用户在经济利益的驱使下改变原有的用电方式,引导用户合理用电,为电网提供体量相当可观的灵活性资源。

3) 清洁能源出力优化结果。引入灵活性资源优化模型后,不仅改善了峰谷差值过大、负荷波动强等一系列有害于电网安全稳定运行的问题,还能使得负荷更适应分布式能源的出力,提高清洁能源消纳,为解决分布式能源出力不稳定的问题提供解决方案。图4和图5分别展示了优化前、后风电出力和光伏出力的变化情况。

图4和图5中,相较于原始出力和场景1,场景2的光伏发电和风力发电出力都存在相当程度的提升。引入灵活性资源优化模型后,负荷更匹

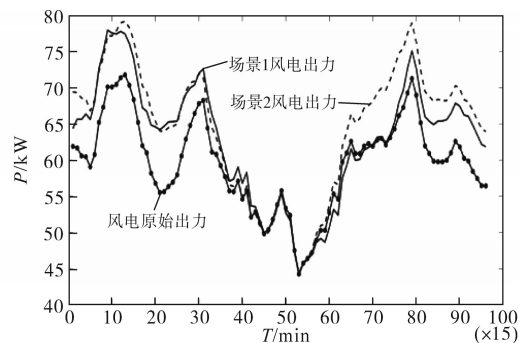


图4 风电出力

Fig.4 Wind power output

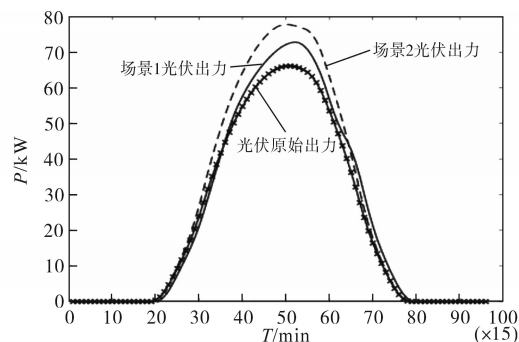


图5 光伏出力

Fig.5 PV power output

配分布式能源的出力,改善了峰谷差值过大、负荷波动强等一系列有害于电网安全稳定运行的问题,有效提升清洁能源消纳量。

6 结论

本文研究了基于负荷侧灵活性资源的低碳微电网优化运行问题,以经济成本最优和微电网总碳排放量最小化为目标,在含风电、光伏出力微电网中加入负荷侧灵活性资源优化运行机制,并以此为基础上设计了微电网优化调度模型,通过模拟退火遗传算法进行求解。仿真结果验证了应用负荷侧灵活性资源能够提高微电网运行过程的稳定性,促进清洁能源的消纳。同时,灵活性资源参与微电网优化调度,日前碳排放总量和碳排放峰值都大幅下降,为促进能源绿色转型提供了可行方案。

参考文献

- [1] 张军,张中丹,王洲,等. 基于数据驱动的微电网双层鲁棒优化调度[J]. 电气传动,2022,52(1):68-75.
ZHANG Jun, ZHANG Zhongdan, WANG Zhou, et al. Double layer robust optimal dispatching of micro-grid based on data-drive[J]. Electric Drive, 2022, 52 (1): 68-75.
- [2] 米阳,纪宏澎,何星璐,等. 多储能独立直流微电网自适应分

- 级协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1980-1989.
- MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-23.
- WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-23.
- [4] YANG Xiaohui, LENG Zhengyang, XU Xiaoping, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ε -constraint method[J]. Renewable Energy, 2021, 172: 408-423.
- [5] YANG Zhao, HU Junjie, AI Xin, et al. Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 4-17.
- [6] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 27-34.
- XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. High penetration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 27-34.
- [7] 张旭, 王洪涛. 高比例可再生能源电力系统的输配协同优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 67-83, 115.
- ZHANG Xu, WANG Hongtao. Optimal dispatch method of transmission and distribution coordination for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 67-83, 115.
- [8] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [9] HOLTINEN H. Impact of hourly wind power variations on the system operation in the system operation in the nordic countries [J]. Wind Energy, 2005, 8(2): 197-218.
- [10] 王海冰, 戚永志, 王承民, 等. 考虑柔性负荷的两阶段随机优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3669-3675.
- WANG Haibing, QI Yongzhi, WANG Chengmin, et al. Two-stage stochastic optimal scheduling model considering flexible load[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3669-3675.
- [11] 王佳颖, 史俊伟, 文福拴, 等. 计及需求响应的光热电站热电联供型微网的优化运行[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 176-185.
- WANG Jiaying, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal operation of CHP microgrid with concentrating solar power plants considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 176-185.
- [12] 黄慧, 顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 64-67, 112.
- HUANG Hui, GU Bo. Application of improved genetic algorithm in the network planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 64-67, 112.
- [13] 邹子君, 杨俊华, 杨金明. 基于多种群遗传算法的波浪发电最大功率跟踪控制[J]. 电测与仪表, 2017, 54(23): 35-40.
- ZOU Z J, YANG J H, YANG J M. Maximum power point tracking control based on multiple population genetic algorithms for wave generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(23): 35-40.
- [14] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2439-2448.
- GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2439-2448.
- [15] 伍栋文, 于艾清. 大规模多源联合外送协调调度中基于核仁理论的利润分配[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2975-2981.
- WU Dongwen, YU Aiqing. Research on nucleolus theory based profit distribution method for joint delivery system of large-scale hybrid power generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2975-2981.
- [16] 米阳, 李战强, 吴彦伟, 等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1899-1906.
- MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, et al. Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1899-1906.
- [17] 杨媛媛, 杨京燕, 夏天, 等. 基于改进差分进化算法的风电并网系统多目标动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 24-29, 35.
- YANG Yuanyuan, YANG Jingyan, XIA Tian, et al. Multi-objective dynamic economic dispatch in wind power integrated system based on an improved differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 24-29, 35.
- [18] BAI Linquan, LI Fangxing, JIANG Tao, et al. Robust scheduling for wind integrated energy systems considering gas pipeline and power transmission N-1 contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1582-1584.
- [19] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3103-3114.
- CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of Wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3114.
- [20] 段玉倩, 贺家李. 遗传算法及其改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 43-56.
- DUAN Yuqian, HE Jiali. Genetic algorithm and its modification [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1998, 10(1): 43-56.

收稿日期: 2022-03-31

修改稿日期: 2022-04-07