

计及储能调节特性的直流微电网优化调度研究

许琼果¹,张炜焘²,刘光伟¹,周斌³

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司, 江苏 苏州 215026;

2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 210016;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210016)

摘要: 具有分布式电源及储能系统的独立直流微电网在提高供电可靠性方面发挥着重要的作用。探讨了不同运行模式下的直流微电网的能源调度优化问题, 包括柴油发电机、燃料电池、微型燃气轮机以及光伏、风电等典型的分布式电源以及电力负荷需求。根据系统模型的运行和维护成本、燃料成本、能源的污染物排放成本以及储能运行成本, 以系统总运行成本最小为目标建立了优化调度模型。采用一种基于天牛群搜索算法的改进智能算法对模型进行求解。通过对含储能设备和不含储能设备两种工作环境进行优化测试, 验证了储能的调节特性对于优化微电网运行以及减小成本方面的重要意义, 同时也证明了所提出调度模型的有效性和优越性。

关键词: 直流微电网; 分布式电源; 成本最小化; 天牛群优化算法; 优化调度

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24055

Research on Optimal Scheduling of DC Microgrid Considering Energy Storage Regulation Characteristics

XU Qiongguo¹, ZHANG Weitao², LIU Guangwei¹, ZHOU Bin³

(1. Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., Suzhou 215026, Jiangsu, China;

2. NARI-TECH Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 210016, Jiangsu, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Independent DC microgrid with distributed power supply and energy storage system plays an important role in improving power supply reliability. The energy scheduling optimization of DC microgrid under different operating modes was discussed, including diesel generator, fuel cell, micro gas turbine, photovoltaic, wind power and other typical distributed power sources and power load requirements. According to the operation and maintenance cost, fuel cost, pollutant emission cost of energy and energy storage operation cost of the system model, the optimization scheduling model was established to minimize the total operating cost of the system. An improved intelligent algorithm based on beetle swarm optimization algorithm was used to solve the model. Through the optimization test of two working environments with and without energy storage devices, the significance of considering energy storage regulation characteristics for optimizing microgrid operation and reducing costs was verified, and the effectiveness and superiority of the proposed scheduling model were also proved.

Key words: DC microgrid; distributed generation; cost minimization; beetle swarm optimization algorithm; optimal scheduling

当前, 电力系统运行中存在着能源短缺和环境污染的问题, 而促进可再生能源的渗透利用成为解决这一问题的有力措施。但由于分布式电

源出力具有间歇性、不可预测性的特点, 如果不加控制地接入电网, 将产生一系列的电压、频率以及谐波问题^[1]。而微电网(microgrid, MG)作为

基金项目: 国家重点研发计划项目: 工业园区多能流综合管控与协同优化(2017YFA0700304)

作者简介: 许琼果(1979—), 男, 本科, 高级工程师, Email: xuqiongguo928@163.com

通讯作者: 周斌(1976—), 男, 硕士, 工程师, Email: zhoubin_1976@163.com

集成分布式能源、负荷、储能装置的系统,可以有效解决分布式电源的出力不确定性问题^[2]。在过去的十年中,直流微电网以其不需要笨重的变压器、更容易并联直流电源、没有功角及频率稳定等诸多优势,展现出了广阔的发展前景^[3-4]。

随着储能技术的发展,直流微网中分布式电源的出力不确定性问题得到了大幅改善,电能质量与系统稳定性也得到了提高。然而,储能系统(energy storage system, ESS)昂贵的投资与运行费用以及严格的运行约束限制必然需要对其合理、经济地利用。且由于分布式电源、储能系统以及负载管理、协调组合的复杂性,使得如何对系统进行优化调度成为当前研究的一个热点问题^[5-7]。

在直流微网的调度模型优化方面,文献[8]针对含蓄电池的多能微网,建立储能系统优化配置模型,提出了并网、孤岛两种运行方式下储能装置的配置方法。文献[9]综合考虑可再生能源出力波动性、负荷预测误差及储能装置实际运行情况,以微网运行经济性、环保性为目标,研究了含储能系统的直流微网孤岛运行模式下的能量优化管理方法。文献[10]通过引入储能单元,有效降低了分布式能源间歇性对系统稳定性、电能质量造成的不利影响,在一定程度上将分布式能源转化为可调度能源。在算法改进方面,文献[11-13]分别使用了收敛粒子群、改进遗传算法和蚁群算法的理论对独立微电网进行实时优化和能量管理,以系统运行的经济性为目标,为微网分布式能源组合及经济效益评估提供参考。然而这些传统的启发式算法往往都存在着收敛速度慢以及局部收敛的问题。

以上文献针对直流微网环境下的能量管理问题和储能元件的调度控制策略问题,提出了一系列优化调度策略,通过选取合理的优化目标、制定科学的控制约束,从而达到安全、经济、稳定、高效的电网运行目标。

本文在总结现有的研究成果的基础上,探讨了不同运行模式下的直流微电网的能源调度优化问题。并基于传统启发式算法的缺陷采用了一种新型的天牛群搜索算法,该算法充分结合天牛须搜索速度快、全局搜索能力强和粒子群精细搜索的特性,具有收敛速度快以及收敛性好的优点。本文的主要贡献可以简单地陈述如下:

1)分析了直流微电网系统及其相关能量组件和负载的运行特性。

2)以系统运行总成本最小为目标将直流微网最优调度问题转化为一个受约束的单目标优化模型,通过调度结果合理安排次日的分布式电源出力,从而降低燃料成本和气体排放。

3)介绍了一种将天牛须搜索算法和粒子群算法结合的新型天牛群搜索算法,利用该算法对模型进行求解。

4)分别在含储能和不含储能的两种典型直流微电网运行环境下应用调度优化模型对系统运行进行优化,并对最终结果进行了比较和研究。

1 微电网系统结构模型

图1为二端口用电架构下的直流微电网的系统结构。整个结构包括作为可再生能源的光伏、风电,及柴油机组、燃气轮机、储能电池、燃料电池等电源作为常规能源供给。

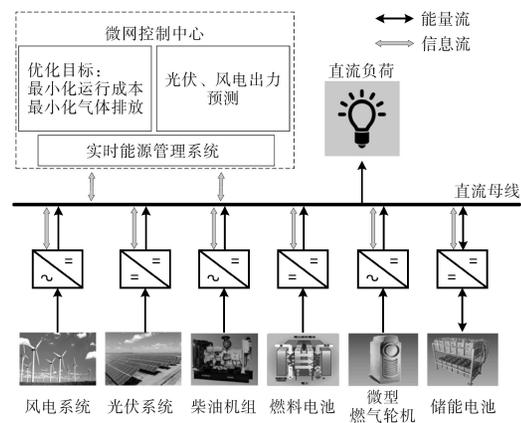


图1 直流微电网系统结构示意图

Fig.1 Schematic of DC microgrid system structure

储能电池作为用于负荷削峰填谷的设备,通过直流变压器与母线相连,在负荷低谷时充电,在负荷高峰时放电,其运行成本与分时电价息息相关。能量组件和中央能量管理系统之间有一个通信网络,以便发送功率参考和交换数据。

各发电系统装机额定功率如表1所示,直流微网各能源成分的说明及其对应的特性和不同燃料消耗率的表达式如下各小节所述。

表1 各发电系统装机功率限制

Tab.1 Restrictions on installed power of each generation system

电源类型	最小出力/kW	最大出力/kW
燃气轮机	90	300
燃料电池	16	400
柴油发电机	0	500
风电机组	0	150
光伏机组	0	140
储能系统	-300	300

1.1 柴油发电机

由于柴油发电机(diesel generator, DG)具有远距离独立运行的能力,电力系统经常使用柴油发电机为本地负载供电,但其运行成本十分昂贵。柴油发电机的燃料成本可以等效建模为其实际输出功率的二次函数^[14]。

柴油发电机的燃料成本函数如下式所示:

$$C_{DG,t}(P(t)) = \sum_{j=1}^N [a_j + b_j P_{DG,j}(t) + c_j P_{DG,j}(t)^2] \quad (1)$$

式中: a_j, b_j, c_j 分别为柴油发电机组燃料成本的常数项、一次项与二次项系数,其数值分别为2.6, 1.4, 0.044; N 为柴油机组数量; $P_{DG,j}$ 为第 j 台机组的输出功率,单位为kW。

1.2 燃料电池

燃料电池(fuel cell, FC)是微电网中常见的分布式电源之一,其效率是电能输出以及燃料输入的功率之比,通过下式可以计算燃料电池的燃料成本:

$$C_{FC} = C_{ng} \sum_{t=1}^{24} \frac{P_{FC,t}}{\eta_{FC}} \quad (2)$$

式中: C_{ng} 为供应燃料电池的天然气成本; $P_{FC,t}$ 为燃料电池在 t 时刻产生的净电功率; η_{FC} 为燃料电池的工作效率,这里设定400 kW燃料电池的效率为0.6。

1.3 微型燃气轮机

微型燃气轮机(micro gas turbine, MT)是微电网中最具竞争力的功能机组之一,具有稳定性高、燃料消耗率低等优点。燃气轮机的成本函数与燃料电池类似。典型燃气轮机的燃料成本可以用下式表示:

$$C_{MT} = C_{ng} \sum_{t=1}^{24} \frac{P_{MT,t}}{\eta_{MT}} \quad (3)$$

式中: $P_{MT,t}$ 为 t 时刻燃气轮机的输出功率; η_{MT} 为燃气轮机的工作效率,这里设定300 kW燃气轮机的工作效率为0.3。

1.4 光伏机组

光伏(photovoltaic, PV)发电具有非线性的特点,其出力受到天气、环境温度、日照强度等气象条件的影响。其输出功率表达式如下式所示^[15]:

$$P_{PV} = \frac{GP_{STC} [1 + k_T (T - T_{STC})]}{G_{STC}} \quad (4)$$

式中: P_{PV} 为光伏电池的输出功率; G 为当前光照强度; P_{STC} 为最大测试功率; k_T 为功率温度系数; T 为光伏电池运行温度; T_{STC} 为环境温度,标准测试

条件:环境温度为25℃,光照强度为1 000 W/m²; G_{STC} 为标准光照强度。

1.5 风电机组

风电机组(wind turbine, WT)的出力模型包含三个非常重要的参数:切入风速、额定风速、切出风速。当实际风速大于切入风速时,风电机组才开始工作。而当风速大于切出风速时,处于对自身设备安全性角度的考虑,风电机组必须停止出力。

风力发电机组的出力具有以下特点^[16]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_N \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_N^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 为实际风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; P_N 为风力发电机额定输出功率; v_N 为额定风速。

2 优化模型构建

本文将在两种不同的微电网运行环境下,来研究直流微网的最优调度问题。

2.1 不加储能的独立系统

在该策略中,直流微电网的负荷需求由其本地发电机组满足,其成本函数可以表示为

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} \left[C_{DG,t} + C_{FC,t} + C_{MT,t} + \sum_{j=1}^N OM_j(P_j(t)) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \beta_k \cdot E_{jk} \cdot P_j(t) \right] \quad (6)$$

式中: t 为所处时刻; N, M 分别为机组数量和排放气体种类的数量; $C_{DG,t}, C_{FC,t}, C_{MT,t}$ 分别为各时刻柴油发电机、燃料电池以及燃气轮机的燃料成本,其计算方法分别如式(1)、式(2)与式(3)所示; $OM_j(P_j(t))$ 为各台机组在出力为 $P_j(t)$ 时的运行及维护成本; β_k 为第 k 种污染气体的排放成本系数; E_{jk} 为机组 j 对于第 k 种污染气体的排放系数。第 k 种污染气体的排放成本系数及排放系数如表2所示。

表2 各类型机组的气体排放成本参数

排放类型	成本系数/ [元·(kg) ⁻¹]	DG排放系数/ [g·(kW·h) ⁻¹]	FC排放系数/ [g·(kW·h) ⁻¹]	MT排放系数/ [g·(kW·h) ⁻¹]
NO _x	2.620	9.890	0.010	0.620
SO ₂	0.620	0.206	0.003	0.008
CO ₂	0.088	649.000	489.000	184.000

除此之外,系统的运营和维护(O&M)费用取决于各台发电机组产生的电功率:

$$OM = \sum OM_j(P_j(t)) = \sum_{j=1}^N C_{OMj} P_j(t) \quad (7)$$

式中: C_{OMj} 为每个发电单元的运维比例常数,其值如表3所示。

表3 机组运行成本参数

Tab.3 Operating cost parameters of each type of unit

机组类型	成本系数/[元·(kW) ⁻¹]
柴油机组	0.775 0
微型燃气轮机	0.251 0
燃料电池	0.352 2

2.2 加储能的独立系统

电池储能用于存储剩余功率,以在MG中低太阳辐射或低风速或负载变化时,维持系统电压及负荷功率稳定。此外,储能系统可以平抑光伏带来的功率波动,提高供能的可靠性。在此运行环境中,MG可以自由与储能系统进行信息交换,在负荷低谷时充电,负荷高峰时放电。与无储能系统相比,其目标函数中添加了储能的运行成本 C_{ess} ,其计算公式如下式所示:

$$C_{ess} = \sum_{t=1}^{24} (P_{ess,t}^{char} - P_{ess,t}^{dischar}) \cdot C_{grid,t} \quad (8)$$

式中: $P_{ess,t}^{char}$ 为各时刻的储能充电功率; $P_{ess,t}^{dischar}$ 为各时刻的储能放电功率,放电时将减小系统的运行成本,充电时将增大系统的运行成本; $C_{grid,t}$ 为 t 时刻的分时电价,其中,谷电价0.365元/kW·h(1:00~8:00),平电价0.687元/kW·h(9:00~17:00)以及22:00~24:00),峰电价0.869元/kW·h(18:00~21:00)。

3 系统约束

3.1 不加储能运行环境下的约束条件

不加储能运行环境下的约束条件主要体现在以下3个方面。

1)发电量和负荷的平衡约束:

$$\sum_{j=1}^N P_j(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) = P_L(t) \quad (9)$$

式中: $P_j(t)$ 为第 j 台机组在 t 时刻的出力; $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷需求; $P_{PV}(t)$, $P_{WT}(t)$ 分别为 t 时刻的光伏与风电出力。

2)各机组出力功率约束。由于分布式电源都会存在一个出力极限,为保证其正常运行,各分布式电源的功率需要满足如下功率约束:

$$P_j^{min} \leq P_j(t) \leq P_j^{max} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中: P_j^{min} , P_j^{max} 分别为第 j 台机组的最小和最大出力功率。

3)运行及启动时间约束:

$$(T_{t-1,j}^{on} - MUT_j)(u_{t-1,j} - u_{t,j}) \geq 0 \quad (11)$$

$$(T_{t-1,j}^{off} - MUT_j)(u_{t,j} - u_{t-1,j}) \geq 0 \quad (12)$$

式中: $T_{t-1,j}^{on}$, $T_{t-1,j}^{off}$ 分别为机组 j 的启动以及停运时刻; $u_{t,j}$ 为 t 时刻机组的关闭以及启动状态,分别为0和1; MUT_j 为 j 机组最小的启动以及停运时间间隔,这里均设置为5h。

3.2 加储能运行环境下的约束条件

加储能运行环境下,原有的约束条件(10)~约束条件(12)仍然成立,但针对储能,还需考虑更多的约束条件。

1)功率平衡约束:

$$\sum_{j=1}^N P_j(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{ess}^{dischar}(t) = P_L(t) + P_{ess}^{char}(t) \quad (13)$$

式中: $P_{ess,t}^{char}$, $P_{ess,t}^{dischar}$ 分别为各时刻的储能充、放电功率; $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷需求。

2)储能电池输出功率约束:

$$P_{ess,min}^{dischar} \leq P_{ess}^{dischar}(t) \leq P_{ess,max}^{dischar} \quad (14)$$

$$P_{ess,min}^{char} \leq P_{ess}^{char}(t) \leq P_{ess,max}^{char} \quad (15)$$

式中:下标“min”,“max”分别为相应变量的下限值和上限值。

3)储能电池SOC状态约束。储能电池应避免过充或过放。 t 时刻的SOC值由 $t-1$ 时刻的SOC值和该时间段的电池电量决定,可以表示如下:

$$SOC(t) = SOC(t-1) - \frac{\eta_{ch} P_{ess}(t)}{C_{ess}} \quad (16)$$

其SOC状态应该维持在一定范围内:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (17)$$

式中: $SOC(t)$ 为储能电池荷电状态; η_{ch} 为电池充电或者放电效率; C_{ess} 为储能电池容量。这里将 SOC_{min} , SOC_{max} 以及 η_{ch} 设定为0.3,0.95以及85%。

4 天牛群搜索算法

天牛群搜索算法是在天牛须算法(beetle antennae search, BAS)的基础之上发展而来的一种新型启发式算法。

天牛须算法模仿天牛的觅食行为,将天牛作为种群中的一个粒子,以天牛左须和右须的方向

和位置分别确定天牛前进的方向和位置,再根据移动步长更新天牛位置^[17]。而天牛群算法将BAS与粒子群(particle swarm optimization, PSO)结合,通过左右须对适应度函数的比较,更新自身位置,避免局部收敛的问题,同时充分结合BAS搜索速度快和全局搜索能力强和PSO精细搜索的特性。

天牛群搜索算法寻优过程如下^[18]:

1)确定搜索开始时天牛的初始朝向:

$$\vec{b} = \frac{\text{rands}(\text{Dim},1)}{\|\text{rands}(\text{Dim},1)\|} \quad (18)$$

式中: \vec{b} 为天牛的一个随机初始朝向; rands 为随机函数; Dim 为解空间维数。

2)确定左须和右须的位置,可表示为

$$x_i^l = x_i - d_i \cdot \vec{b}/2 \quad (19)$$

$$x_i^r = x_i + d_i \cdot \vec{b}/2 \quad (20)$$

式中: x_i 为第 t 时刻天牛质心的位置; x_i^l, x_i^r 分别为左须及右须的位置; d_i 为 t 时刻两须之间的距离。

3)建立天牛搜索迭代模型:

$$x_{i+1} = x_i + \delta_i \cdot \vec{b} \cdot \text{sign}[f(x_i^r) - f(x_i^l)] \quad (21)$$

式中: δ_i 为 t 时刻的搜索步长,该值越大,收敛速度越快,但容易陷入局部收敛,使得最终的调度结果不准确。

4)计算天牛前进后的适应度值,更新天牛两须之间的距离和步长:

$$\delta_i = \text{eta_}\delta \times \delta_{i-1} \quad (22)$$

$$d_i = \text{eta_}d \times d_{i-1} \quad (23)$$

式中: $\text{eta_}\delta, \text{eta_}d$ 分别为天牛搜索步长和两须距离对应的衰减系数,这里均设置为0.95。

5)根据天牛搜索到的个体最优值以及群体最优值,结合BAS与PSO,生成新的速度、位置更新方式:

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (P_i - X_i) + c_2 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (P_g - X_g) + c_3 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot v_1 \quad (24)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + v_i^{k+1} \quad (25)$$

式中: v_i^{k+1} 为第 i 个粒子第 $k+1$ 次迭代后的运动速度; ω 为惯性权重; c_1, c_2, c_3 为学习因子; P_i, P_g 分别为第 k 次迭代时搜索得到的最优解与历史最优解; X_i, X_g 分别为第 k 次迭代时的粒子位置与历史最优位置; X_i^{k+1} 为第 i 个粒子第 $k+1$ 次迭代后的位置; v_1 为粒子更新速率。

天牛群搜索算法流程如图2所示。

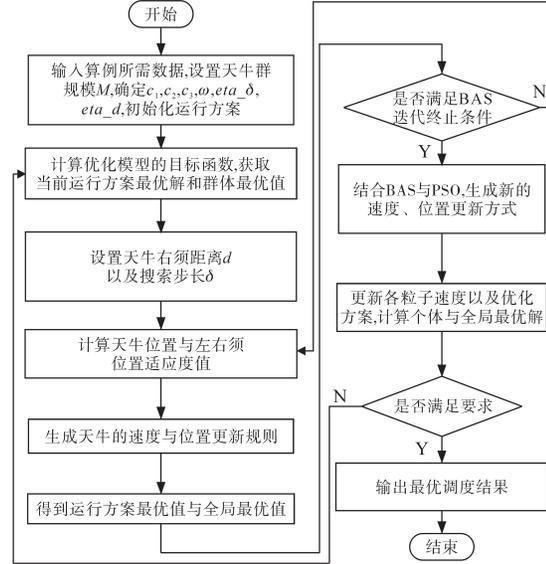


图2 天牛群搜索算法求解流程

Fig.2 Solution process for beetle swarm optimization algorithm

5 仿真结果及分析

应用所提出的优化方案,对300~1 100 kW左右负荷需求下的各机组出力情况进行调度。天牛群算法参数设定为:天牛群规模 $M=20$,最大迭代次数400,惯性权重 $\omega \in [0.4, 0.95]$,学习因子 c_1, c_2, c_3 分别设为0.5, 0.5和1。设定供应燃气轮机和燃料电池的天然气的成本为3元/ m^3 。24 h运行环境下各时刻的负荷需求如图3所示,式(4)与式(5)中光伏和风力发电机的输出功率如图4所示。

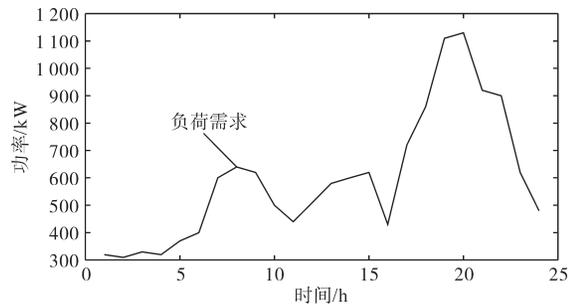


图3 负荷需求曲线

Fig.3 Load power demand curve

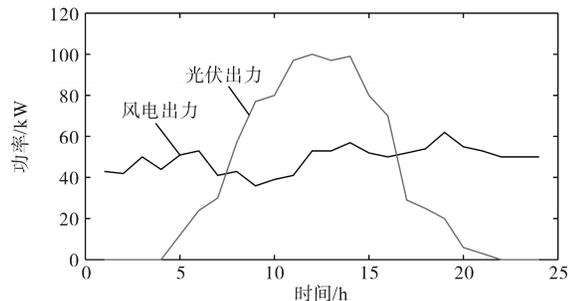


图4 风电光伏出力曲线

Fig.4 Output curves of wind power and photovoltaic

5.1 无储能运行环境下的调度结果

系统在无储能运行环境下,微网负荷需求均由各类型发电机组满足,各分布式电源的出力调度结果曲线如图5所示,各类型机组承担的出力情况如图6所示。

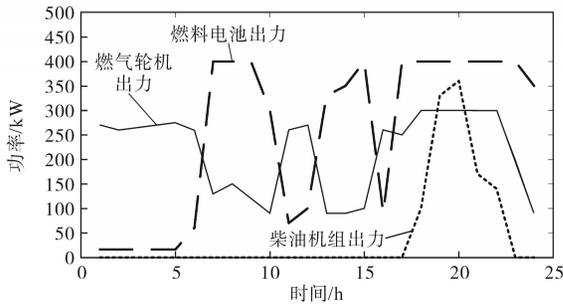


图5 无储能运行环境下各机组出力曲线

Fig.5 Output curves of each unit in operating environment without energy storage

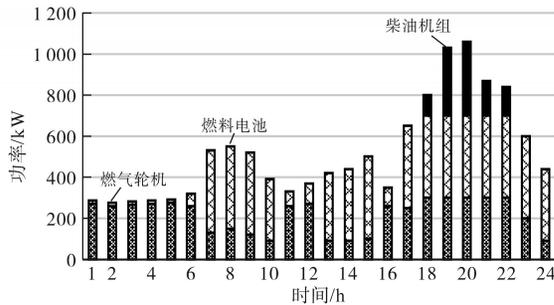


图6 无储能运行环境下各机组出力情况

Fig.6 Output of each unit without energy storage operation environment

由图5可以看出,负荷需求由3种分布式电源机组满足,柴油机组用作最后一种出力电源,因为它的运营成本最高。而燃气轮机也以其运营成本低的优势,在一天中大约有一半的时间出力接近最大功率。燃料电池作为另一种合适的供电电源,在白天为燃气轮机分担供能压力。

5.2 有储能运行环境下的调度结果

在有储能的运行环境下,储能电池将添加到微电网的可用资源中。

正常运行情况下,各机组以及储能的调度结果曲线如图7所示。各类型机组承担的出力情况如图8所示。从图7、图8可以看出,除柴油发电机外,其它电源机组全天都处于启动运行状态。当储能电池处于放电状态时,燃气轮机及燃料电池承担的出力都将减小,如7~11h所示。相比之下,当储能电池处于充电状态时,两者承担的出力将有所增加,如3~5h所示。与无储能运行环境下类似,当燃气轮机、燃料电池以及储能电池的共同出力不足以满足负荷需求时,将

在晚间负荷高峰时刻打开柴油机组以供应剩余负荷。储能电池在-100~140 kW之间进行充电和放电。

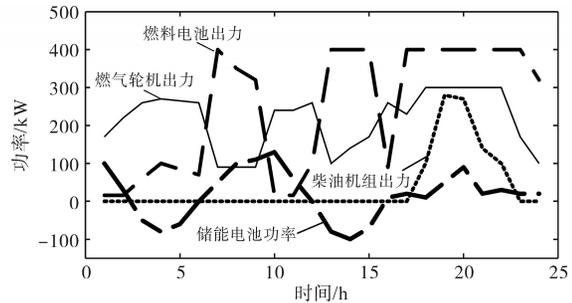


图7 有储能运行环境下各机组出力曲线

Fig.7 Output curves of each unit under energy storage operation environment

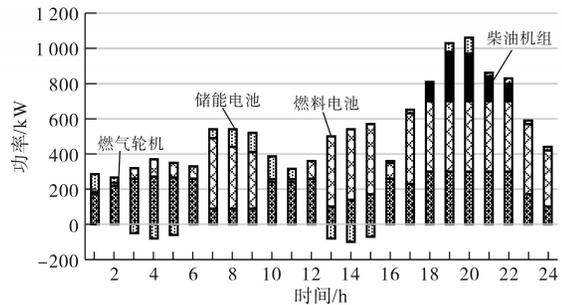


图8 有储能运行环境下各机组出力情况

Fig.8 The output of each unit under the environment of energy storage operation

图9为有储能运行状态下的储能电池的SOC状态,由于储能电池SOC状态的约束,它被限制约在30%~95%的范围内。结合图3所示的负荷需求曲线可以看出,当负荷需求低时,储能电池储存能量,大部分来自于可再生能源。当负荷需求高时,储能电池向直流微网发送能量,从而降低了系统运行的成本。

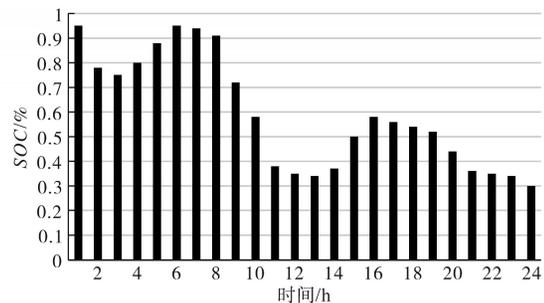


图9 有储能运行环境下储能电池的SOC状态

Fig.9 The SOC state of the energy storage battery under the environment of energy storage operation

图10为在两种运行情况下,系统的总运行成本对比情况。从图10可以看出,有储能的直流微网系统的运行成本要整体小于无储能的系统。在18~22h的负荷高峰时段,储能电池承担部分

出力任务,其结果是降低了系统的总运行成本。无储能运行环境下,各时刻的运行成本在660~2 280元之间,总成本为21 126.6元。有储能运行环境下,各时刻的运行成本在180~1 860元之间,总成本为19 323.3元。还可以看出,在储能电池充电时段,如3~6时,这些时刻的运行成本有所增加。而在负荷峰值时刻,如19~21 h,这些时刻的运行成本显著降低。

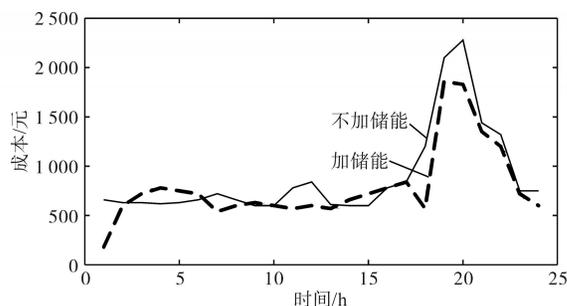


图10 无储能和有储能运行环境下的成本对比

Fig.10 Cost comparison of operating environment without and with energy storage

图11为在无储能、有储能两种运行环境下各类污染气体的排放情况。由图11可以看出,在有储能的运行环境下,各类污染气体的排放量都有所减少,证明储能的引入对减少污染物的排放也发挥着重要作用。

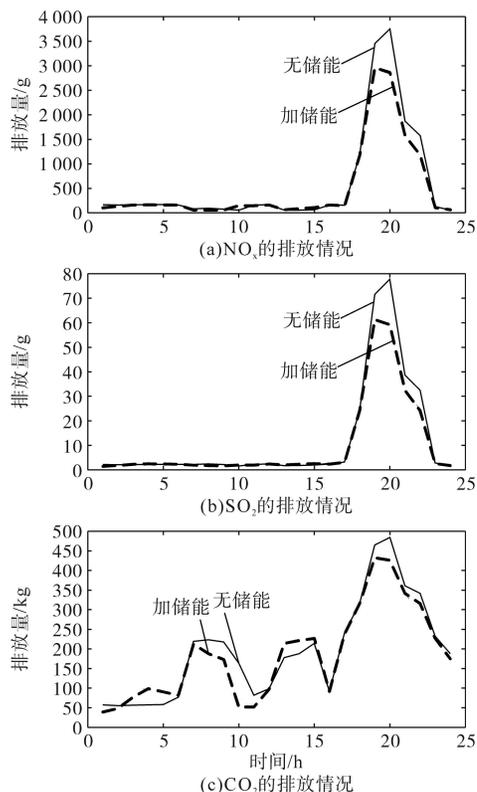


图11 污染气体的排放情况对比

Fig.11 The comparison emission of polluting gases

5.3 算法对比

为验证天牛群算法的优越性,分别使用天牛群算法、天牛须搜索算法、传统粒子群算法对含储能的系统进行求解,所得结果如图12所示。

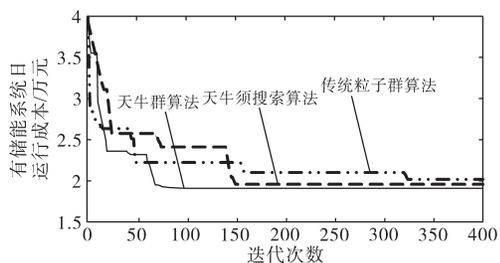


图12 天牛群算法与其他算法的对比曲线

Fig.12 Comparison curves between beetle swarm optimization algorithm and other algorithms

由图12可见,天牛群算法的收敛速度明显优于天牛须搜索算法和传统的粒子群算法,同时,所得收敛结果也更加精确。

6 结论

针对典型的直流微电网结构,本文提出了一种以最小化微电网运行维护成本和排放成本为目标的优化调度策略模型,并采用新型的天牛群算法对模型进行求解。分别在无储能和有储能两种典型的运行环境下进行了仿真分析。该调度结果受到多个因素的影响,包括天气条件、污染排放量、运行维护成本以及实际电力需求。通过对比分析,储能的引入为系统节约了约8.5%的成本。

仿真调度结果表明,储能电池的引入有助于微电网降低生产成本、提高能源利用效率、减少污染气体排放、实现利润最大化。

参考文献

[1] 田璧源,徐海奇,张新燕,等.考虑电价激励需求响应下微电网日前优化调度方法[J].电力需求侧管理,2020,22(6):45-50.
Tian Biyuan, Xu Haiqi, Zhang Xinyan, et al. Day-ahead optimal dispatching method of microgrid considering electricity price incentive demand response[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(6): 45-50.

[2] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66,19.
Chen Jie, Yang Xiu, Zhu Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66, 19.

[3] 王耀雷,周步祥.基于自适应粒子群算法的直流微电网能量优

- 化管理[J].现代电力,2017,34(1):37-43.
- Wang Yaolei, Zhou Buxiang. Energy optimization management of DC microgrid based on adaptive particle swarm algorithm[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1):37-43.
- [4] 王毅,于明,李永刚.基于改进微分进化算法的风电直流微网能量管理[J].电网技术,2015,39(9):2392-2397.
- Wang Yi, Yu Ming, Li Yonggang. Energy management of wind turbine-based DC microgrid using improved differential algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2392-2397.
- [5] 原睿萌,范绚然,姬广龙,等.考虑响应量与风电出力相关性的需求响应优化调度研究[J].电力需求侧管理,2018,20(6):6-11.
- Yuan Ruimeng, Fan Xuanran, Ji Guanglong, *et al.* Study on the optimal of hybrid type demand response load consider the correlation between response quantity and wind power output[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):6-11.
- [6] 张志昌,吴健,骆钊,等.计及储能运行特性的独立型交直流混合微网优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(19):118-125.
- Zhang Zhichang, Wu Jian, Luo Zhao, *et al.* Optimal scheduling for independent AC/DC hybrid microgrid considering operation characteristics of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19):118-125.
- [7] 杜祥伟,沈艳霞,李静.基于模型预测控制的直流微网混合储能能量管理策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):69-75.
- Du Xiangwei, Shen Yanxia, Li Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):69-75.
- [8] 杨秀,陈洁,朱兰,等.基于经济调度的微网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):53-60.
- Yang Xiu, Chen Jie, Zhu Lan, *et al.* Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1):53-60.
- [9] 江渝,黄敏,毛安,等.孤立微网的多目标能量管理[J].高压技术,2014,40(11):3519-3527.
- Jiang Yu, Huang Min, Mao An, *et al.* Multi-objective energy management of isolated microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3519-3527.
- [10] 李蓓,郭剑波.平抑风电功率的电池储能系统控制策略[J].电网技术,2012,36(8):38-43.
- Li Bei, Guo Jianbo. A control strategy for battery energy storage system to level wind power output[J]. Power System Technology, 2012, 36(8):38-43.
- [11] Khan M, Jidin R, Pasupuleti J. Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 112 (Mar.):288-307.
- [12] 陈昌松,段善旭,蔡涛,等.基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J].电工技术学报,2013,28(4):196-201.
- Chen Changsong, Duan Shanxu, Cai Tao, *et al.* Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):196-201.
- [13] Mousa Marzban, Ebrahim Yousefnejad, Andreas Sumper, *et al.* Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone microgrid by using multi-layer ant colony optimization[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 75:265-274.
- [14] Moradi H, Groff D D, Abtahi A. Optimal energy scheduling of a standalone multi-sourced microgrid considering environmental aspects[C]//Innovative Smart Grid Technologies (ISGT 2017), 2017.
- [15] Jiang Xiuli, Wang Jinkuan, Han Yinghua, *et al.* Coordination dispatch of electric vehicles charging/discharging and renewable energy resources power in microgrid[J]. Procedia Computer Science, 2017, 107:157-163.
- [16] 于大洋,宋曙光,张波,等.区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J].电力系统自动化,2011,35(14):24-29.
- Yu Dayang, Song Shuguang, Zhang Bo, *et al.* Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):24-29.
- [17] Jiang X, Li S. BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2017, 1(1):14-17.
- [18] 王强杰,沈达,邬晶,等.基于天牛须-粒子群算法的微电网日经济调度优化[J].上海电机学院学报,2021,24(1):39-46.
- Wang Qiangjie, Shen Da, Wu Jing, *et al.* Daily economic dispatch of micro-grid based on BAS-PSO algorithm[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2021, 24(1):39-46.

收稿日期:2021-11-02

修改稿日期:2021-12-12