

基于并行优化算法的独立和并网DC-MGs运行优化研究

杨 强, 李青峰, 杜秀举, 隆孝斌, 郭 明

(贵州电网有限责任公司安顺供电局, 贵州 安顺 561000)

摘要: 为了提高直流微电网的可持续性和运行效率, 电网的运行方式需要进行优化才能最大程度地利用可再生能源。为了实现这一目标, 构建了一个考虑多种关键因素的数学模型, 以确定最佳的发电操作策略。首先, 基于元启发式算法, 采用并行方式得到并行粒子群优化(PPSO)、并行旋涡搜索算法(PVSA)和并行蚁狮优化器(PALO)等优化策略。之后, 应用基于逐次逼近的每小时潮流法(HPFSA)迭代过程以评估目标函数和约束条件的性能。基于以上解决方案, 在独立网络与并网网络中进行了大量模拟实验。实验结果表明, PVSA 在独立运行的直流微电网中表现出色, 而 PALO 方法在并网连接的直流微电网中取得结果最佳。同时, 在两种不同的测试系统中, 优化算法显著改善了两个微电网的技术、经济和环境条件。因此, 对于实现可持续、高效的微电网运营方式具有重要意义。

关键词: 直流微电网; 并行优化算法; 运行优化

Research on operation optimization of independent and grid-connected DC-MGs based on parallel optimization algorithm

YANG Qiang, LI Qingfeng, DU Xiuju, LONG Xiaobin, GUO Ming

(Anshun Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Anshun 561000, China)

Abstract: In order to improve the sustainability and operational efficiency of DC microgrids, the operation of the grid needs to be optimized in order to maximize the use of renewable energy resources. To achieve this goal, this study constructs a mathematical model that considers several key factors to determine the optimal generation operation strategy. First, this study uses a parallel approach based on meta-heuristic algorithms to obtain optimization strategies such as Parallel Particle Swarm Optimization (PPSO), Parallel Vortex Search Algorithm (PVSA) and Parallel Ant-Lion Optimizer (PALO). After that, an iterative process based on the hourly tidal current method of successive approximation (HPFSA) is applied in order to evaluate the performance of the objective function and constraints. Based on the above solutions, this study conducts a large number of simulation experiments in both standalone and grid-connected networks. The experimental results show that the PVSA method performs well in standalone DC microgrids, while the PALO method achieves the best results in grid-connected DC microgrids. Meanwhile, the optimization algorithm significantly improves the technical, economic and environmental conditions of both microgrids in two different test systems. Therefore, this study is important for the realization of more sustainable and efficient microgrid operation methods.

Key words: DC microgrid; parallel optimization algorithm; operation optimization

0 引言

随着电力需求的不断增加以及可再生能源的广泛推广,微电网系统在能源领域扮演着日益重要的角色。微电网系统的兴起,使得多种能源能够高效整合,从而为电力系统提供更灵活、更可靠的解决方案。电池储能系统是微电网系统的重要组成部分,具备显著的性能提升潜力。其独特的能量存储方式赋予了微电网系统更大的自主性,能够在不同的运行模式和工作条件下提供可靠的电能支持。这种灵活性对于适应不断变化的电力需求和能源供应格局至关重要,使微电网系统能够在不同情境下保持高效运行^[1]。

然而,如何实现电池储能系统的最优运行,面临着一系列挑战。这些挑战源于微电网的多样性,包括不同的运行模式、负载需求、能源资源和运营目标^[2]。文献[3]提出了一种基于离散傅里叶变换的控制优化策略,抑制了电功率的波动。文献[4]通过为储能系统中的电池配置合理的运行方式,提高了储能系统的经济性。文献[5]提出使用平滑时间常数和功率限幅的方法对电池储能系统进行保护。但是,上述研究未实现对直流微电网中的电池储能系统的最优管理。因此,为了在独立运行和与并网连接的微电网中能够实现最佳电池储能系统运行,需要采用高效的优化方法,以综合考虑各种约束条件和性能指标。

为了解决这个问题,本文提出了一种基于并行元启发式优化算法的电池储能系统优化算法。元启发式算法已广泛应用于解决复杂的优化问题,具有搜索能力强、适应性高等优势^[6-7]。在本研究中,使用了多个并行元启发式算法,能够有效地探索和评估最优电池储能系统运行策略。此外,本文还研究了独立直流微电网和并网连接直流微电网的电池储能系统最优运行方案。在独立运行模式下,微电网需要满足负载需求,并维持系统的稳定性;而在并网连接模式下,微电网可以通过与电网的交互来实现能源的互补和存储,以达到经济性和可靠性的最优平衡。

1 电池储能系统优化管理模型

本节建立了一个数学模型,用于解决DC-MGs中电池储能系统优化管理问题,所提出的数学模型考虑了24 h内用户的可变光伏发电量和需求。

1.1 降低运营成本目标函数

降低传统发电机的能源采购成本和光伏分布式发电系统(PV DGs)的维护成本,即降低运营成本。通过式(1)计算每个时间段内直流微电网的能源采购成本 $C_{EE}(t)$ 。根据电网的种类,位于母线 i 的传统发电机的能源购买成本 $C_{CGi}(t)$ 具有两个不同的值。在并网连接的直流微电网中,这个成本包括从电网购买电力以供给母线 i 的成本,该成本可以是固定的,也可以是可变的。在独立运行的微电网中,能源采购成本是根据位于母线 i 的柴油发电机发电的成本计算的,因此电力成本是固定的。

$$C_{EE}(t) = \sum_{i \in N} (C_{CGi}(t) P_{CGi}(t)) \quad (1)$$

式中, $P_{CGi}(t)$ 为时间段 t 内母线 i 的传统发电机产生的功率; N 为直流微电网中母线的集合。

直流微电网中安装的光伏分布式发电机和电池的总维护成本 $C_M(t)$ 计算式为

$$C_M(t) = \sum_{i \in N} (C_{MDGi}(t) P_{DGi}(t) + C_{MBi}(t) P_{Bi}(t)) \quad (2)$$

式中, $C_{MDGi}(t)$ 和 $C_{MBi}(t)$ 分别为光伏分布式发电机和电池储能系统的维护成本; $P_{DGi}(t)$ 和 $P_{Bi}(t)$ 分别为在时间段 t 内母线 i 的光伏分布式发电机产生的功率和电池储能的功率。

通过这两个变量进一步考虑了分布式能源的电力管理对总维护成本的影响。直流微电网的总运营成本的计算式为

$$C(t) = C_{EE}(t) + C_M(t) \quad (3)$$

式中, $C(t)$ 为每个时间段中能源采购成本和维护成本的总和。

因此可以得到最小化运营成本的目标函数OF1计算式为

$$OF1 = \min \left(\sum_{t=1}^{24} C(t) \right) \quad (4)$$

1.2 降低功率损耗目标函数

减少与DC-MGs中的能源传输相关的功率损耗，即降低功率损耗。每个时间段内DC-MGs中的功率损耗 $P_{\text{loss}}(t)$ 计算式为

$$P_{\text{loss}}(t) = \sum_{i \in N} (P_{\text{CGi}}(t) + P_{\text{DGi}}(t) \pm P_{\text{Bi}}(t) - P_{\text{di}}(t)) \quad (5)$$

$$= \sum_{i \in N} \left(\sum_{j \in N} G_{ij} V_i(t) V_j(t) - G_{i0} V_i^2(t) \right)$$

式中， $P_{\text{di}}(t)$ 为在时间段 t 内母线 i 连接的负载所需的功率； $V_i(t)$ 和 $V_j(t)$ 分别为时间段 t 内母线 i 和母线 j 的电压； G_{ij} 为连接总线线路的电导矩阵的分量； G_{i0} 为电导矩阵中包含的恒定电阻负载，它不会产生与能量传输相关的功率损耗。

进一步可得最小化功率损耗的目标函数OF2计算式为

$$\text{OF2} = \min \left(\sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(t) \right) \quad (6)$$

1.3 减少CO₂排放量目标函数

第三个目标函数是在每个时间段 t 内减少与常规发电机运行相关的CO₂排放量 $E(t)$ 。CO₂排放量计算式为

$$E(t) = \sum_{i=1}^n (\gamma_{\text{CGi}} P_{\text{CGi}}(t)) \quad (7)$$

式中， γ_{CGi} 为常规发电机的CO₂排放因子，该参数根据安装在母线 i 处的能源种类不同而改变； $P_{\text{CGi}}(t)$ 为与柴油发电机相关的CO₂排放值，表示每个时间段内系统的CO₂排放量。

OF3为最小化CO₂排放量的目标函数，即

$$\text{OF3} = \min \left(\sum_{t=1}^{24} E(t) \right) \quad (8)$$

1.4 约束条件

为解决直流微电网中电池储能系统优化管理问题，提出下列约束条件。

1) 功率平衡条件为

$$P_{\text{CGi}}(t) + P_{\text{DGi}}(t) \pm P_{\text{Bi}}(t) - P_{\text{di}}(t) = V_i(t) \sum_{j \in N} G_{ij} V_j(t) \quad \forall i, j \in N, \quad \forall t \in H \quad (9)$$

2) 直流微电网母线上常规发电机的发电容量限制为

$$P_{\text{CGi}}^{\min} \leq P_{\text{CGi}}(t) \leq P_{\text{CGi}}^{\max} \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (10)$$

式中， $P_{\text{CGi}}^{\min}$ 为允许的最小发电容量； $P_{\text{CGi}}^{\max}$ 为允许的最大发电容量。

3) 在时间段 t 内安装在直流电网中的光伏分布式发电系统功率限制为

$$P_{\text{DGi}}^{\min}(t) \leq P_{\text{DGi}}(t) \leq P_{\text{DGi}}^{\max}(t) \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (11)$$

式中， $P_{\text{CGi}}^{\max}(t)$ 为最大功率限制； $P_{\text{CGi}}^{\min}(t)$ 为最小功率限制。

4) 母线 i 处的电池在时间段 t 内的储能和供电容量限制为

$$P_{\text{Bi}}^{\text{char_max}} \leq P_{\text{Bi}}(t) \leq P_{\text{Bi}}^{\text{disch_max}} \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (12)$$

式中， $P_{\text{Bi}}^{\text{char_max}}$ 为允许的电池充电最大功率； $P_{\text{Bi}}^{\text{disch_max}}$ 为允许的电池放电最大功率，具体取决于位于母线 i 处的电池类型。

5) 位于母线 i 处的电池充电和放电功率限制为

$$P_{\text{Bi}}^{\text{char_min}} = -\frac{C_{\text{Bi}}}{t_{\text{CBi}}} \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$P_{\text{Bi}}^{\text{disch_max}} = \frac{C_{\text{Bi}}}{t_{\text{dBi}}} \quad \forall i \in N \quad (14)$$

式中， C_{Bi} 为节点 i 处电池的实际容量； t_{CBi} 和 t_{dBi} 分别为安装在母线 i 处的电池的充电和放电时间。

6) 在时间段 t 内安装在母线 i 处的电池充电状态(SOC)计算式为

$$\text{SOC}_{\text{Bi}}(t) = \text{SOC}_{\text{Bi}}(t-1) - (\phi_{\text{Bi}} P_{\text{Bi}}(t)) \Delta t \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (15)$$

式中， $\text{SOC}_{\text{Bi}}(t)$ 为时间 t 时母线 i 处电池的SOC； ϕ_{Bi} 为安装在母线 i 处的电池的充电/放电因子； Δt 为时间段 t 的持续时间。

7) ϕ_{Bi} 的计算式为

$$\phi_{\text{Bi}} = \frac{1}{t_{\text{CBi}} P_{\text{Bi}}^{\text{char_min}}} = \frac{1}{t_{\text{dBi}} P_{\text{Bi}}^{\text{disch_max}}} \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (16)$$

为改善电池储能系统优化管理模型对技术、经济和环境的影响，本研究确定安装在直流电网中的电池充电状态方程为

$$\text{SOC}_{\text{Bi}}(1) = \text{SOC}_{0i} \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$\text{SOC}_{\text{Bi}}(24) = \text{SOC}_{fi} \quad \forall i \in N \quad (18)$$

式中, SOC_{0i} 为初始充电状态; SOC_{fi} 为最终充电状态。

8) 安装在母线 i 处的电池的 SOC 限制为

$$SOC_i^{\min} \leq SOC_{Bi}(t) \leq SOC_i^{\max} \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (19)$$

式中, $SOC_i^{\min}$ 和 $SOC_i^{\max}$ 分别为微电网的电池种类所允许的最小和最大 SOC。本研究考虑的是锂离子电池, 这两个参数的值分别为 0.1 和 0.9。

9) 直流电网的电压和电流限制为

$$V_i^{\min} \leq V_i(t) \leq V_i^{\max} \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (20)$$

$$I_{ij}(t) = \frac{|V_i(t) - V_j(t)|}{R_{ij}} \leq I_{ij}^{\max} \quad \forall i, j \in N, \forall t \in H \quad (21)$$

式中, $V_i^{\min}$ 和 $V_i^{\max}$ 分别为母线 i 处所允许的最小和最大电压; R_{ij} 为连接母线 i 和 j 的线路电阻; $I_{ij}(t)$ 为连接母线 i 和母线 j 的线路在时间 t 处的电流; $I_{ij}^{\max}$ 为母线 i 和母线 j 之间线路允许的最大电流。

1.5 适应度函数

为满足直流微电网优化运行问题的所有约束条件, 本研究使用了适应度函数 (FF) 进行评估, 即

$$FF = OFi + \beta \times PF \quad \forall i \in 1, 2, 3 \quad (22)$$

式中, OFi 为上述所定义的目标函数; β 为调节惩罚的规范化因子, 以一种启发式计算, 最终值为 1 000; PF 为目标函数的惩罚因子。

这个适应度函数确保了所提出的优化方法在迭代过程结束时都是可行的, 降低了对解决方案空间探索所需的处理时间。

2 电池储能系统优化方案

本研究提出了三种不同的主从方法, 以解决直流微电网中电池储能系统的最佳运行问题。并行蚁狮优化器 (PALO)、并行旋涡搜索算法 (PVSA) 和并行粒子群优化算法 (PPSO) 在解决直流电网的最优功率流问题时表现出色, 具有较好的可重复性和处理时间性能, 因此用于直流微电网寻找最佳解决方案。

2.1 电池运行连续编码

电池储能系统中电池的运行需要连续编码, 本研究采用了一个大小为 $1 \times (NB \times |H|)$ 的连续向

量进行编码, 如图 1 所示。

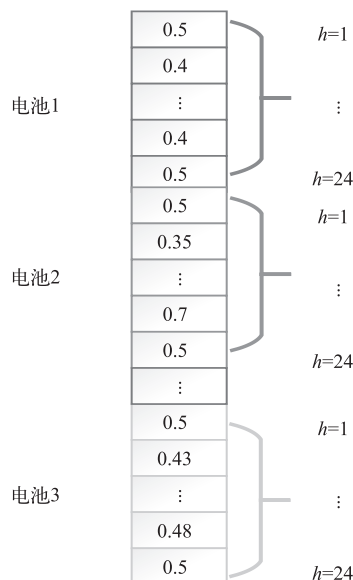


图 1 直流电网中的电池连续编码

Fig. 1 Continuous coding of batteries in DC power grid

其中, NB 表示安装在 DC-MGs 中的电池数量, $|H|$ 表示时间跨度内的时间段数量。对于电网中的每个电池, 编码表示与每个时间段相关联的充电状态。在本研究中, 电池的 SOC 从 50% 开始, 并结束于 50%。例如, 电池 1 的 SOC 从 50% 开始, 在第 2 个小时, 电池放电至 40%; 在第 23 个小时, SOC 为 40%。最后, 充电在操作日结束时达到 50% 的 SOC。此方法可根据电池的 SOC 模拟安装在 DC-MGs 的电池中运行。

2.2 主阶段: 优化阶段

本文实施了三种优化方法的并行版本。为了控制这三种方法对解决方案空间的探索, 应用了两个停止准则: 最大迭代次数和最大非改进迭代次数。如果满足这两个停止准则中的任何一个, 则算法的迭代过程结束。

(1) 并行蚁狮优化算法 (PALO)

PALO 充分利用了蚁狮获取食物的捕猎策略。获取初始参数后, PALO 使用图 1 中提出的电池运行编码, 以随机方式生成蚁狮的初始种群。然后由从属阶段评估构成初始种群个体的适应性函数。为了充分利用并行处理, 使用计算机 CPU 的不同核心同时评估整个种群的适应性函数, 从

而减少处理过程的种群数量。

(2) 并行旋涡搜索算法 (PVSA)

涡流搜索算法模拟了在搅拌流体中产生的涡旋，生成了非同心的超球的行为。

与PALO类似，首先PVSA通过读取有关电气系统的参数开始迭代过程。然后使用分配给问题变量的最大值和最小值，即可生成超球的初始半径和中心。随后使用该数值和高斯分布获得初始种群，从而将个体分布在解空间中并确保对称探索。最后通过并行处理，使用从属阶段评估种群的适应性函数。

(3) 并行粒子群优化算法 (PPSO)

粒子群优化 (PSO) 算法利用鸟群和鱼群寻找食物的捕食行为进行求解。PPSO的迭代过程始于读取电力系统参数。然后，算法使用图1中的编码，为连续变量设定最大值和最小值，随机生成初始种群。随后，对组成群体的每个粒子的适应性函数进行评估。最后，确定在群体中的最佳粒子和最佳解，并将最佳解选定为下一次迭代中问题的初始参数。

在确定了并行粒子群优化算法的初始条件之后，迭代过程以更新粒子在解空间中的位置为起点。为实现这一目标，该算法利用粒子和整个群体在搜索过程中达到的最佳位置，以及一系列控制算法来探索和收敛性能的随机参数、认知因子、社会因子以及惯性常数。通过并行处理评估每个粒子的适应性函数。随着评估的进行，将触发更新过程，以获取每个粒子和整个群体的最佳解。

2.3 从属阶段：评估阶段

如前面所述，基于图1的电池编码可以用来生成直流微电网中电池储能系统优化问题的解决方案。因此，这种按小时进行的编码需要实施按小时进行的潮流计算，以评估所分析的每个时间段内每个时间段供电和储存电能对适应性函数的影响。下面将描述本文使用的基于逐次逼近的每小时潮流法 (HPFSA) 的迭代过程。

该方法首先读取电力系统参数和潮流参数。

在定义了输入数据之后，迭代过程从分析整个时间跨度 (24 h) 开始。在每个小时内，HPFSA读取直流微电网中的负载、光伏分布式发电、电池的发电功率和需求功率。然后，使用逐次逼近法解决潮流问题。接下来，使用获得的电压曲线和电力系统的数据计算适应度函数。在分析了所有时间段之后，将每个时间段获得的FF值相加，将总的FF返回给主阶段。

3 测试系统与运行条件

本文研究了独立直流微电网与并网直流微电网中电池储能系统的最佳运行状态，以改善技术、经济和环境条件。为此，本文使用了南方某省的两个测试系统，分别为独立运行的27节点系统与并网连接运行的33节点系统。

3.1 独立运行系统

该独立运行直流微电网测试系统由27个节点、20条线路、1台柴油发电机和连接到直流电网中不同母线的功率负载组成，如图2所示。基线电压为23 kV，基线功率为100 kW。

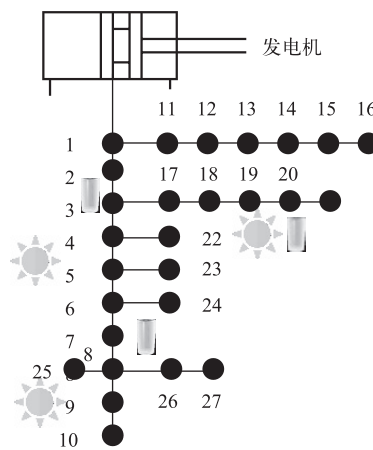


图2 独立直流微电网电气配置

Fig. 2 Electrical configuration of independent DC microgrid

3.2 并网连接运行系统

本研究使用的并网连接直流微电网测试系统的基本结构包括33个节点、32条线路、1个传统的发电机和多个负载。该测试系统的电气配置如图3所示。在这个测试系统中，基线电压为

12.66 kV，基线功率为100 kW。

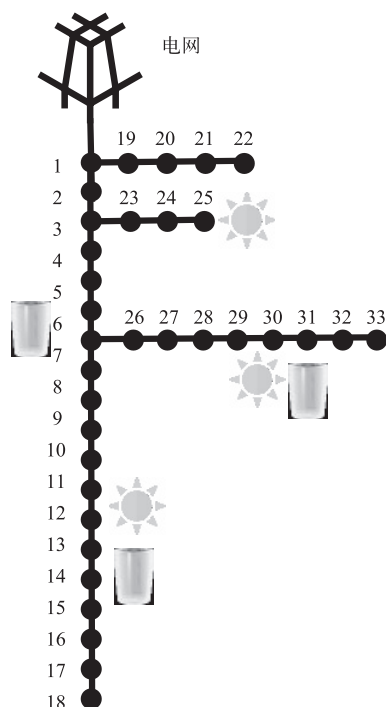


图3 并网直流微电网电气配置

Fig. 3 Electrical configuration of grid connected DC microgrid

3.3 分布式能源在测试系统中的位置

每个测试场景（即独立直流微电网和与并网连接直流微电网）将3个光伏分布式发电系统（PV DGs）和3个锂离子电池作为分布式能源。PV DGs在每个测试系统中的节点位置以及功率评级（ P_{DG} ）见表1。由于本文侧重于电池的运行，PV DGs假定为在其最大功率点运行，同时考虑与太阳辐射、环境温度和PV技术类型相关的功率变化。本文考虑了三种不同类型的锂离子电池A、B和C。两个测试系统中电池的位置和特性见表2。

表1 每个测试系统 PV DGs 的位置和额定功率

Tab. 1 Location and rated power of PV DGs for each testing system

	独立运行		并网连接	
	节点	P_{DG}/kW	节点	P_{DG}/kW
1	5	1 012.5	12	1 125
2	9	1 188	25	1 320
3	19	899.1	30	999

表2 两个测试系统中电池的位置和特性

Tab. 2 Location and characteristics of batteries in two testing systems

独立运行网络					
电池	节点	类型	P_B/kW	t_c/h	t_d/h
1	3	C	2 000	5	5
2	8	A	1 000	4	4
3	19	B	1 500	4	4
并网连接网络					
电池	节点	类型	P_B/kW	t_c/ch	t_d/h
1	6	C	2 000	5	5
2	14	A	1 000	4	4
3	31	B	1 500	4	4

3.4 目标函数使用参数

独立直流微电网和并网连接直流微电网与经济和环境相关的四个参数：安装在电网中的传统发电机的特定能源采购成本（ C_{CGi} ）；光伏式发电机的维护成本（ C_{MDGi} ）、电池储能系统的维护成本（ C_{Mbi} ）和CO₂排放系数（ γ_{CGi} ）。在独立直流微电网中，能源采购成本是基于柴油发电机的发电量计算的，CO₂排放系数依赖于发电技术类型。在并网连接的直流微电网中，能源采购成本与该地的电网确定的能源成本相关联，CO₂排放系数取决于电网中使用的发电技术类型。电池和发电机维护的成本假定都是相同的。光伏式发电机的CO₂排放系数等于零。

4 模拟测试结果分析

本研究中的所有模拟测试都是在以下计算机上进行的：Intel(R) Xeon(R) E5-1660 v3 3.0-GHz CPU、16-GB DDR4 RAM、2.5英寸480-GB固态硬盘、Windows 10 Pro操作系统及MATLAB 2022a。为了确定哪种方法在优化技术、可重复性和处理时间方面产生最佳结果，每种方法都执行了1 000次，以使用目标函数、处理时间和标准差获得的平均值进行评估。

所使用的遗传算法使用了40个个体和400次迭代进行参数调节，优化算法进行调整的参数以及调整的结果见表3。

表3 优化算法的优化参数

Tab. 3 Optimization parameters of the optimization algorithm

优化算法	优化参数	参数值
PALO	粒子数	32
	最大迭代次数	428
	最大非改进迭代次数	349
PVSA	粒子数	129
	最大迭代次数	1 049
	最大非改进迭代次数	544
PPSO	半径减小间隔 (x)	0.027
	粒子数	191
	最大迭代次数	1 928
PPSO	最大非改进迭代次数	860
	认知组件	0.706 3
	社交组件	1.809 8
	最小惯量	0.2
	最大惯量	0.723 1

4.1 独立直流微电网系统实验结果

如图4所示,在独立运行的直流微电网中,PVSA相对于PALO和PPSO,在三个目标函数上获得了显著的减少。结果显示,在独立直流微电网中,PVSA是最好的优化方法,在电网的经济、技术和环境条件方面取得了最大的改进。在每个算法执行了1 000次之后,标准差显示了优化算法的可重复性。相对于PPSO,PVSA的Ecost、Eloss和Emissions标准差分别减少了22.419 7%、80.639 3%和78.211 1%。与PALO相比,PVSA的Ecost、Eloss和Emissions标准差分别减少了43.922 2%、27.931 4%和57.616 3%。就技术、经济和环境条件而言,PVSA的标准差值最小,在优化算法可重复性方面表现出优势。在处理时间方面,PVSA排名第二,PPSO是其中最快速的解决方法,但它在目标函数方面表现出最差的结果。这表明较短的处理时间是因为对解决方案空间的探索有限。

综上所述,在独立运行的直流微电网中,PVSA是最佳的优化方法,针对电池储能系统优化问题,能够提供最好的解决方案质量、可重复性和处理时间。

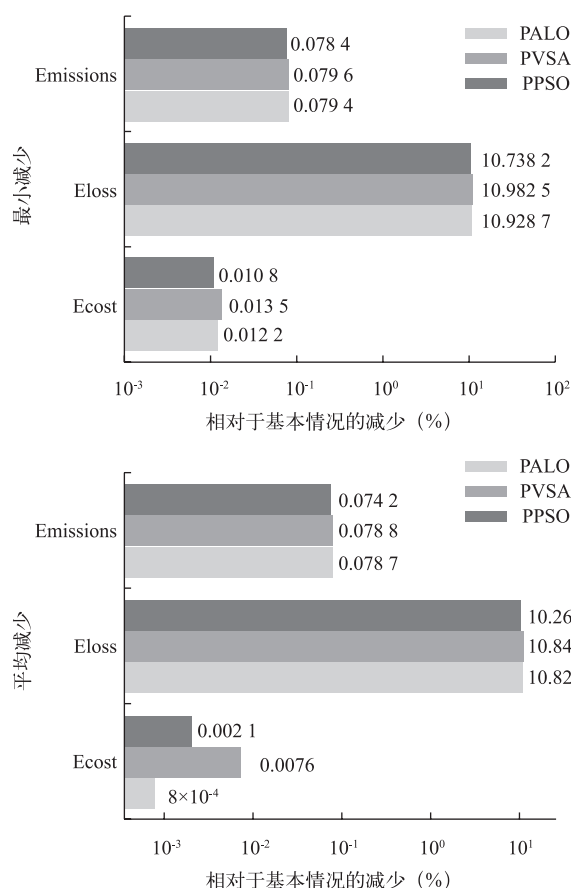


图4 独立直流微电网系统实验结果

4.2 并网直流微电网系统实验结果

如图5所示,三种优化方法在Fixed Ecost、Var Ecost、Eloss和Emissions上与基本情况相比都获得了减少。从结果可以得到,PALO在三种优化算法中表现最佳。为了计算三种优化算法的标准偏差,每个算法都执行了1 000次。通过分析,PALO使Fixed Ecost、Var Ecost、Eloss和Emissions的标准差值分别降低了66.585 9%、60.292 1%、84.455 2%和86.925 3%。因此,PALO可以在并网直流微电网中重复使用,它在优化算法质量方面取得了最佳效果,标准偏差更低。在平均处理时间上,PALO排名第三,位于PVSA之后。值得注意的是,与独立系统一样,PPSO是最快的方法,但在并网直流微电网的目标函数方面表现最差。因此,不认为它是适合研究问题的解决方案。

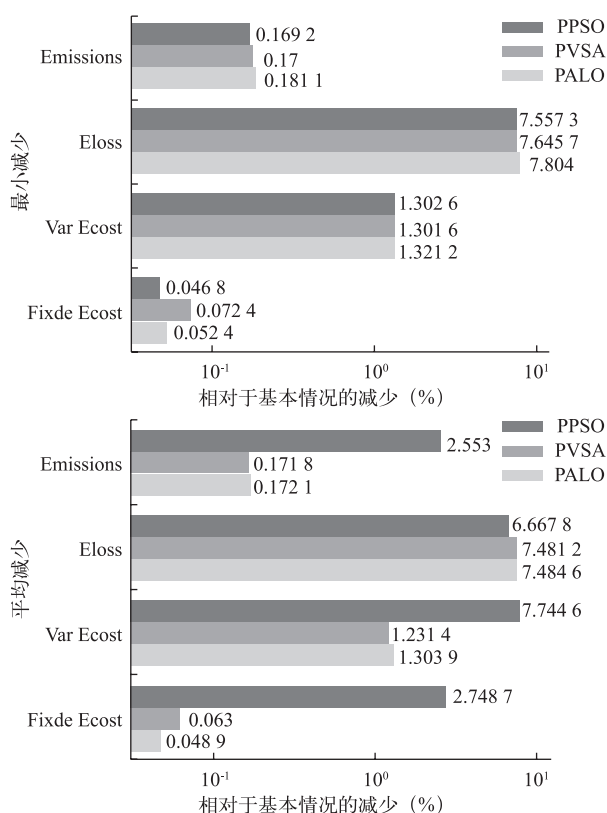


图5 并网连接的直流微电网通过三种优化算法相对于基本情况获得的目标函数值最小减少(%)和平均减少(%)

综上所述, PALO在解决并网直流微电网电池储能系统优化问题中表现最佳。而在独立直流微电网中, PVSA是最佳优化算法。两种方法的性能都非常出色, 它们能在短时间内显著改善两个微电网的技术、经济和环境条件。

5 结束语

本文提出了三种不同的并行优化方法(即PPSO、PALO和PVSA), 用于解决直流微电网的电池储能系统优化问题, 找到并网和独立直流微电网的最佳运行方式。上述三种方法在这两个测试系统中进行了验证, 每个算法执行1 000次, 以评估其在最小解、平均解、标准偏差和平均处理时间方面的有效性。

结果显示, 在降低运营成本、能源损失和CO₂排放方面, PVSA在独立直流微电网中实现了最佳性能。这种求解方法在求解质量和可重复

性方面也是最好的, 它在算法每次执行1 000次后获得了最佳的最小解和平均解, 其标准偏差值低于1.12%, 且处理时间短。另一方面, 在并网直流微电网中, PALO在目标函数最小减少和平均减少方面获得了最好的结果。这些结果表明, 本文提出的能源管理系统在技术和经济方面取得了优异的成果。

参考文献

- [1] JUSTO J J, MWASILU F, LEE J, et al. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 387-405.
- [2] 邢毓华, 侯静茹, 支娜. 功率互济的多独立微电网运行优化及分析[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(3): 33-42.
- [3] 谷青发, 饶宇飞, 李朝晖, 等. 基于离散傅里叶变换和实时风电功率平抑的电池储能系统优化控制策略[J]. 电气应用, 2019, 38(10): 10-16.
- [4] 朱永强, 张璐, 张少谦, 等. 基于有序充放电的电池储能系统优化调度策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 23-29.
- [5] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄, 等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
- [6] 赵秋红, 肖依永, 穆拉雅诺维奇 Mladenovic, N. 基于单点搜索的元启发式算法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] 陈小潘, 党兰学, 孔云峰. 一种求解大规模校车调度问题的元启发式算法[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(6): 8.

作者简介

杨强(1977—), 男, 高级技师, 主要研究方向: 电力调度运行和管理。

李青峰(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力调度运行和管理。

(收稿日期: 2023-09-20)