

# 基于改进鹈鹕算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法

路晓丽<sup>1</sup>, 刘子瑞<sup>1</sup>, 胡江涛<sup>1</sup>, 肖成刚<sup>1</sup>, 冯康康<sup>2</sup>, 靳文星<sup>3</sup>

(1.宁夏回族自治区电力设计院有限公司, 宁夏 银川 750004; 2.南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 210000; 3.东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对多端口配置的交直流柔性互联系统能量管理策略的最优经济运行, 文章基于光伏发电曲线、峰谷电价区间契合度、储能控制等, 提出一种基于改进鹈鹕算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法。以直流母线电压、功率控制单元容量、功率平衡为约束, 构建综合考虑网损最小、经济性最优、储能充/放电状态最佳的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型。基于鹈鹕优化算法求解所构建的模型, 引入随机质量扰动行为提高算法的全局搜索能力, 防止模型求解中陷入局部最优。经过仿真验证, 文章所提方法能够实现多端口交直流柔性联合能量控制系统的最优调度。

**关键词:** 多端口配置; 交直流柔性互联系统; 能量管理; 鹈鹕算法; 随机质量扰动

**中图分类号:** TK51; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)12-1697-08

## 0 引言

随着“双碳”目标的推进, 为解决目前环境污染、资源紧缺问题, 构建大量分布式新能源接入的新型电力系统已经迫在眉睫。此外, 负荷增长迅速, 对用户侧的供电可靠性和电能质量带来了挑战<sup>[1-3]</sup>。直流电网具有传输容量大、供电可靠性高以及适应分布式新能源能力强的优势, 包含直流电网、交流电网架构的交直流混合技术已成为了当前的一个研究热点。柔性互联作为交直流混合系统的一种重要技术, 能够灵活调节潮流分布、优化电能质量<sup>[4-9]</sup>。然而多端口交直流柔性联合模块供电和负荷单元多, 如何联合能量控制系统实现对功率变换单元协调控制是目前的一个难点<sup>[10-12]</sup>。

目前, 针对交直流联合优化研究已经取得了一定的进展。文献[13]提出一种基于降压变压器和换流器协调的交直流优化方法, 综合考虑了电压变化和储能经济运行策略。文献[14]将二阶锥规划模型用于交直流优化调度求解中, 实现潮流稳态下的日最优运行。文献[15]提出了考虑风电不确定的交直流电网就地优化方法, 通过构建的交直流混合电网模型实现分布式优化。文献[16]提出考虑储能和换流站协调的最优调度方法, 实

现了运行成本最低和购电电价最低。文献[17]综合考虑分布式电源接入、储能装置充/放电策略、电容器投切等因素, 以盈利最大为目标, 提出了基于数据驱动交直流电网优化方法。

上述方法只考虑单一线路能量优化, 对于多个柔性互联模块连接的多端口交直流柔性联合能量优化问题, 求解难度较大。近年来随着智能优化算法的快速发展, 遗传算法<sup>[18]</sup>、粒子群算法<sup>[19]</sup>等典型智能算法已经在交直流混合电网优化中得到了一定的应用。鹈鹕优化算法是近年来发展起来的一种元启发算法, 使用鹈鹕狩猎行为求解数学模型, 具有搜索能力强、参数少、收敛精度高和速度快的优点<sup>[20]</sup>, 在求解非线性程度高的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方面具有明显的优势。

本文提出一种基于改进鹈鹕优化算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法, 构建综合考虑网损最小、经济性最优、储能充/放电状态最佳的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型。基于鹈鹕优化算法求解模型, 引入随机质量扰动行为, 提高全局搜索能力。经过仿真验证, 本文所提方法能够实现多端口交直流柔性联合能

收稿日期: 2024-02-22。

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2022BDE93019)。

作者简介: 路晓丽(1987-), 女, 高级工程师, 研究方向为绿色能源、源网荷储一体化等。E-mail: luluxly@163.com

通信作者: 靳文星(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向为综合能源优化、新能源并网运行与控制等。E-mail: 514190638@qq.com

量控制系统的最优调度。

### 1 多端口交直流柔性联合控制系统

多端口交直流柔性联合控制系统经过多个柔性互联模块实现对各个交、直流子网之间的互联,各个交流电网之间通过直流输电线路协调互助,有利于分布式电源、储能装置以及直流负荷即插即用。本文提出的分层式多端口交直流柔性联合能量控制系统架构如图 1 所示。该系统主要包括柔性互联模块、光伏发电装置、储能装置以及交、直流负荷。

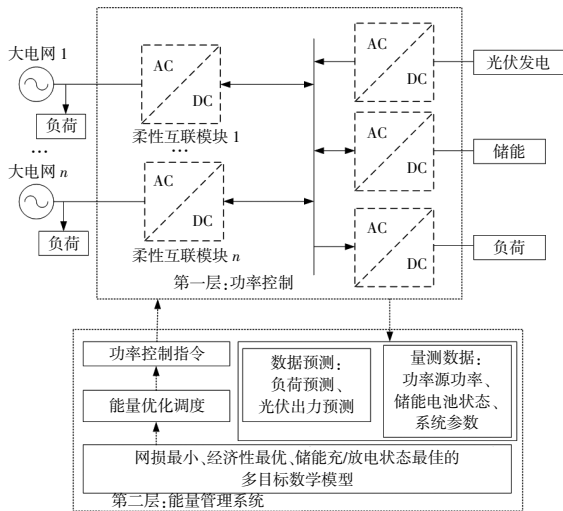


图 1 分层式多端口交直流柔性联合能量控制系统架构  
Fig.1 Architecture of a layered multi terminal AC/DC flexible joint energy control system

多端口交直流柔性联合控制系统使用同直流母线的方式将各个电网联系起来,柔性互联装置提供的多端口有利于各个交流电网、分布式电源、储能以及负荷的安全接入。由图 1 可知:多个柔性互联模块通过相互连接的方式将各个交流电网接到公共直流母线上;光伏发电装置和储能装置经过变换器接入直流母线,并且储能装置能够双向传输能量;交、直流负荷经过 DC/DC 变换器提供的交、直流端口接入直流母线。

柔性互联装置是整个多端口交直流柔性联合控制系统的核心设备,通过协调控制光伏发电装置、储能设备以及柔性互联模块实现光伏设备、储能以及大电网传输功率的控制,有利于各个交、直流子网之间的协调互助。

### 2 能量控制系统优化模型

多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法主要是对正常运行的系统进行优化,将控制对

象、测量对象与顶层控制中心进行通信,以量测数据、光伏出力预测数据和负荷预测数据为基础,综合储能电池健康状况、环保性以及经济性等因素,使用智能优化算法得出光伏设备、储能以及大电网传输功率的调度指令,通过各个功率变换装置实现能量调度。

本文提出的多端口交直流柔性联合能量控制系统属于调度层面,该系统的能量管理包含分布式电源和储能、对大电网送电以及对负荷供电等功率,调度中心将不同电价的子电网连接起来。因此本文将调度中心作为研究对象,构建包含目标函数和约束条件的能量控制系统优化模型。

#### 2.1 目标函数

调度中心下发的控制指令维持系统稳定,提升经济性和环保性。构建最低系统损耗、最高新能源利用率、最低电价以及最佳储能装置状态的多目标优化模型。这 4 个目标函数取值范围、数量纲均不同,为了方便求解多目标优化模型,标准化处理 4 个目标函数,利用层次分析法赋予目标函数各个权值,加权求和多端口交直流柔性联合能量控制系统多目标优化模型,模型的计算表达式为

$$\min(f) = w_1 f_{1s} - w_2 f_{2s} + w_3 f_{3s} + w_4 f_{4s} \quad (1)$$

式中: $f_{1s}$ 、 $f_{2s}$ 、 $f_{3s}$ 、 $f_{4s}$  分别为系统损耗 $f_1$ 、新能源利用率 $f_2$ 、购电价格 $f_3$ 以及储能装置电池状态 $f_4$ 标准化后的值; $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  分别为各个目标函数权重,所有权重和为 1。

各个目标函数重要程度排序为购电价格、储能装置电池状态、系统损耗、新能源利用率,根据不同元素重要程度,设置权重  $w_1=0.2$ 、 $w_2=0.1$ 、 $w_3=0.4$ 、 $w_4=0.3$ 。

#### ① 系统损耗

系统损耗 $f_1$  包含功率变换装置损耗  $P_{loss1}$  和输电线路损耗  $P_{loss2}$ ,表达式为

$$f_1 = P_{loss1} + P_{loss2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{loss1} = \sum_{i=1}^N \eta_i P_i \\ P_{loss2} = \sum_{i=1}^N \frac{P_i^2}{U_i} r_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $N$  为功率变换装置个数; $P_i$ 、 $\eta_i$  分别为第  $i$  个功率变换装置输出的有功功率、损耗系数; $r_i$ 、 $U_i$

分别为第  $i$  个功率源的线路损耗、额定电压。

②新能源利用率

新能源利用率  $f_2$  即光伏发电输出功率  $P_{PV}$ , 表达式为

$$f_2 = P_{PV} \quad (4)$$

③购电价格

总的购电价格  $f_3$  为功率变换装置电费总和, 表达式为

$$f_3 = \sum_i^N (P_i h_i) \quad (5)$$

式中:  $h_i$  为第  $i$  个功率变换装置传输的单位电价, 储能装置和光伏发电装置电价不计。

④储能装置电池状态

储能装置具有经济调度、系统稳定、优化新能源输出的优势, 蓄电池长期过度充、放电会大大降低使用寿命, 与此同时, 还要将电池保留一定的裕度进行控制系统调节。因此, 蓄电池须处于最佳荷电状态才能提高电池利用率。

设定期望的电池荷电状态值, 当实际荷电状态接近这个值时, 储能装置工作状态最优。将荷电状态的实际值  $S$  与期望值  $S^*$  进行差值计算, 对储能装置工作状态做出判断。此外, 当差值越大时, 电池发生故障可能性越高, 极大降低系统的稳定性。故采用差值的平方作为衡量储能装置电池状态的好坏, 表达式为

$$f_4 = (S - S^*)^2 \quad (6)$$

2.2 约束条件

①储能电池荷电状态

若储能装置充、放电效率为 100%, 则电池荷电状态约束条件为

$$\begin{cases} S_{\min} < S < S_{\max} \\ S = S' - \frac{P_B}{P} \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $S_{\min}, S_{\max}$  分别为荷电状态的最小值、最大值;  $S'$  为上一时刻荷电状态值;  $P_B$  为储能装置反馈的传输容量;  $\Delta t$  为充、放电时间;  $P$  为电池额定容量。

②功率平衡

功率平衡约束是为了保持功率变换装置传输功率和负荷相同, 表达式为

$$\sum_i^N P_i = P_L \quad (8)$$

式中:  $P_L$  为直流母线总负荷。

③功率变换装置传输容量

各个功率变换装置传输容量受到最大值、最小值约束, 表达式为

$$\begin{cases} P_{\min} < P_i < P_{\max} \\ Q_{\min} < Q_i < Q_{\max} \\ P_i^2 + Q_i^2 \leq S_i^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $Q_i$  为功率变换装置输送的无功功率;  $P_{\min}, Q_{\min}$  分别为第  $i$  个功率变换装置传输最低的有功功率、无功功率;  $P_{\max}, Q_{\max}$  分别为第  $i$  个功率变换装置传输最高的有功功率、无功功率;  $S_i$  为第  $i$  个功率变换装置输出容量。

④直流母线电压

直流母线电压受到最大值、最小值限制, 约束表达式为

$$U_{dc \min} < U_{dc} < U_{dc \max} \quad (10)$$

式中:  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $U_{dc \min}, U_{dc \max}$  分别为直流母线电压的最小值、最大值。

3 模型求解

本文搭建的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型纬度高、求解难度较大、非线性程度高, 鹈鹕优化算法在处理非线性、高纬度模型时具有一定的优势, 寻优过程中参数少、收敛速度快。因此, 本文将鹈鹕优化算法用于求解多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型。

3.1 初始化

鹈鹕数量和空间维度分别为  $n, m$ , 第  $i$  个位置表达式为

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}] \quad (11)$$

所有的鹈鹕位置为

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对鹈鹕进行初始化得到:

$$x_{ij} = l_j + \alpha(u_j - l_j) \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $i$  个鹈鹕位置相量中的第  $j$  维值;  $\alpha$  为 0~1 随机参数;  $u_j, l_j$  分别为模型求解时第  $j$  维的最大值、最小值。

3.2 第一阶段: 朝猎物移动

鹈鹕在迭代过程中向猎物靠近, 在随机分布搜索空间中寻优, 具有较高的全局搜索能力, 鹈鹕

位置更新表达式为

$$x_{ij}^{p_1} = \begin{cases} x_{ij} + \sigma(P_j - Ix_{ij}), F_p < F_i \\ x_{ij} + \sigma(x_{ij} - P_j), \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $x_{ij}^{p_1}$  为第一阶段后第  $i$  个鹈鹕相量的第  $j$  维值;  $\sigma$  为 0~1 随机参数;  $I$  为取整参数,  $I=1, 2$ ;  $F_p$  为目标猎物;  $P_j$  为猎物位置相量的第  $j$  维值。

当目标函数得到优化时, 鹈鹕位置更新表达式为

$$x_i = \begin{cases} x_i^{p_1}, F_i^{p_1} < F_i \\ x_i, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $x_i^{p_1}$  为第  $i$  个鹈鹕更新后的位置;  $F_i^{p_1}$  为第  $i$  个鹈鹕新的目标函数。

### 3.3 第二阶段: 划过水面

鹈鹕划过水面时会通过翅膀展开的方式提高局部搜索能力, 鹈鹕位置更新表达式为

$$x_{ij}^{p_2} = x_{ij} + R(1-t/T) \cdot (2rand-1)x_{ij} \quad (16)$$

式中:  $x_{ij}^{p_2}$  为第  $i$  个鹈鹕划过水面后更新的第  $j$  维值;  $rand$  为 0~1 随机参数;  $R$  为取整参数,  $R=1, 2$ ;  $t, T$  分别为迭代次数、最大迭代次数。

优化目标函数后的鹈鹕位置更新表达式为

$$x_i = \begin{cases} x_i^{p_2}, F_i^{p_2} < F_i \\ x_i, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $F_i^{p_2}, x_i^{p_2}$  分别为第  $i$  个鹈鹕划过水面后新的目标函数、位置。

### 3.4 随机质量扰动

常规鹈鹕算法只能搜索附近猎物, 无法扩展更宽的视野, 造成算法求解中出现局部现象, 本文通过随机质量扰动的方式解决这一问题。设置一个阈值  $\xi$ , 求解鹈鹕质量和干扰。当某个鹈鹕质量低于  $\xi$  时, 附近很少出现全局最优解, 此时鹈鹕采用莱特飞行的行为远离此位置; 当某个鹈鹕质量高于  $\xi$  时, 附近很大概率出现全局最优解, 此时鹈鹕采用布朗飞行提取周围信息。整个表达式为

$$\begin{cases} q_i = \frac{F_i - F_{\text{worst}}}{\sum F_i - F_{\text{worst}}} e^{F_{\text{rand}}/F_{\text{worst}}} \\ Levy = \lambda^2 \cdot \frac{u}{|v|^{1/\beta}} = 0.01 \\ u = N(0, \sigma_u^2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v = N(0, \sigma_v^2) \\ \sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\beta \cdot \Gamma[(1+\beta)/2] \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta} \\ \sigma_v = 1 \\ \Gamma(w) = \int_0^\infty t^{w-1} e^{-t} dt \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $q_i$  为第  $i$  个鹈鹕质量;  $F_i$  为第  $i$  个总体适应度值;  $F_{\text{worst}}$  为最差的总体适应度值;  $F_{\text{rand}}$  为一个种群适应度随机值;  $\lambda, \beta$  为常数, 取值均为 0.01。

$$\begin{cases} X_{\text{new}} = X_i + Levy(X_i - 2LevyX_{\text{best}}), q_i < 0.05(1-t/T) \\ X_{\text{new}} = X_i + rand(X_i - randX_{\text{best}}), q_i \geq 0.05(1-t/T) \end{cases} \quad (19)$$

### 3.5 模型求解流程

本文提出的基于鹈鹕优化算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型, 以系统损耗最小、新能源利用率最高、电价最低、储能装置电池状态最佳为目标, 对式(1)进行求解。求解过程中将各个功率变换装置传输功率设置为鹈鹕个体, 通过第一阶段的朝猎物移动、第二阶段的划过水面以及随机质量扰动更新鹈鹕位置, 得到最优调度指令。整个求解流程如图 2 所示。

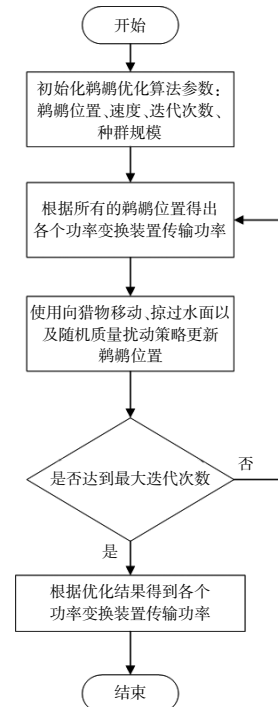


图 2 能量控制系统优化模型求解过程  
Fig.2 The process of solving the optimization model of energy control system

## 4 算例

### 4.1 系统参数

为了验证本文提出的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法的可行性,在 Matlab/Simulink 软件中搭建如图 3 所示的仿真模型。其中:节点 7、节点 26、节点 29 接入公共直流母线;节点 7、节点 26 接入柔性互联装置;节点 9、节点 16、节点 18、节点 31、节点 35 以及节点 38 接入光伏发电装置(PV);节点 1、节点 17 以及节点 29 接入储能装置(ESS)。

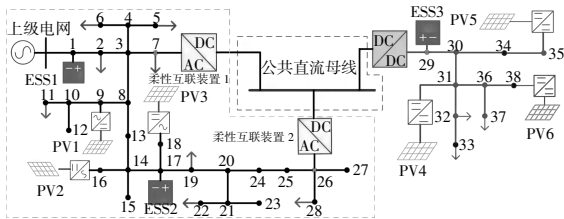


图 3 交直流系统拓扑图

Fig.3 Topology diagram of AC/DC system

光伏发电输出功率和负荷功率分别如图 4、图 5 所示,不同时刻单位电价如图 6 所示,功率变换装置损耗参数、容量范围如表 1 所示。储能装置电池理想荷电状态为 40%~80%,本文将理想荷电状态设为 70%。

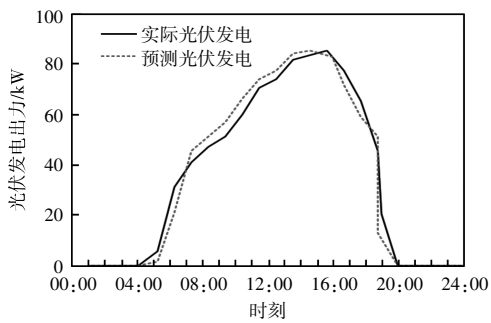


图 4 不同时刻光伏发电设备输出功率

Fig.4 Output power of photovoltaic power generation equipment at different times

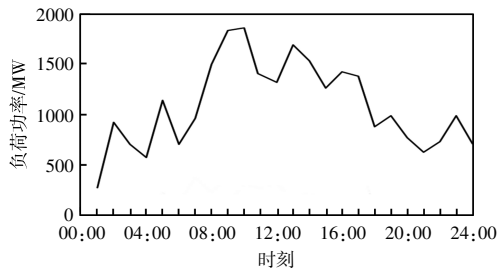


图 5 不同时刻负荷功率

Fig.5 Load power at different times

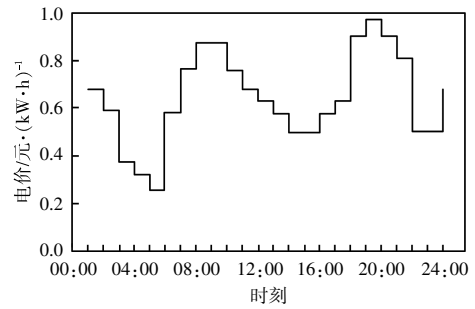


图 6 不同时刻电价

Fig.6 Electricity prices at different times

表 1 功率变换装置参数

Table 1 Power conversion device parameters

节点编号	功率变换装置	功率 kW	线路 电阻/ $\Omega$	损耗率 %
节点 9、节点 16、 节点 18、节点 31、 节点 35、节点 38	光伏发电装置	0~100	0	0
节点 1、节点 17、 节点 29	储能装置	-40~40	0	0
节点 7、节点 26	柔性互联装置	-40~40	2.5	3.5

### 4.2 优化结果

本文提出的基于鹈鹕优化算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型,其不同时刻储能装置传输功率如图 7 所示,优化前、后网损和购电价格对比分别如图 8、图 9 所示。由图 8、9 可

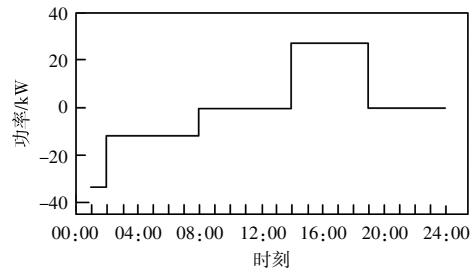


图 7 不同时刻储能装置传输功率

Fig.7 Transmission power of energy storage devices at different times

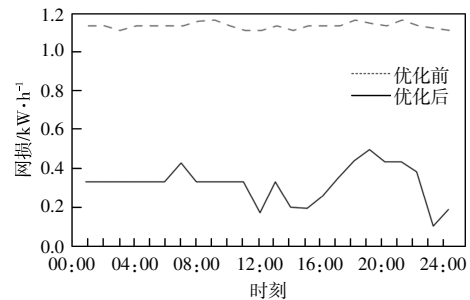


图 8 优化前、后网损

Fig.8 Network loss before and after optimization

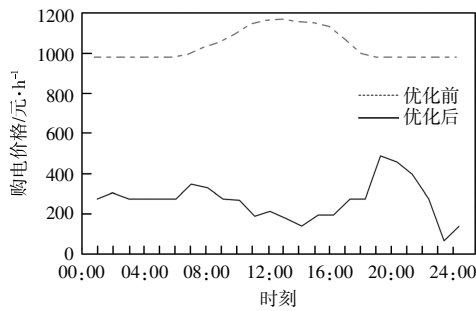


图9 优化前、后不同时刻购电价格

Fig.9 Optimizing electricity purchase prices at different times before and after optimization

知,本文方法能够实现储能装置自适应充、放电策略,提高能量灵活控制能力。每个时刻网络损耗和购电价格均得到明显减少,其中,优化后的网损约降低70%,购电价格约降低75%。说明经过本文方法优化后,式(1)所示的多目标优化结果得到明显改善,验证了能量控制系统优化调度的有效性。

#### 4.3 不同方法对比

为了验证本文所提方法对多端口交直流柔性联合能量控制系统优化的先进性,将本文方法与粒子群算法、遗传算法进行对比,分别对最低系统损耗、最低电价以及多目标优化模型进行求解,求解结果如图10、图11所示。由图10、11可知,本文方法在各个时刻的网损、购电价格最低,与粒子群算法和遗传算法相比,网损分别降低约0.3 kW/h

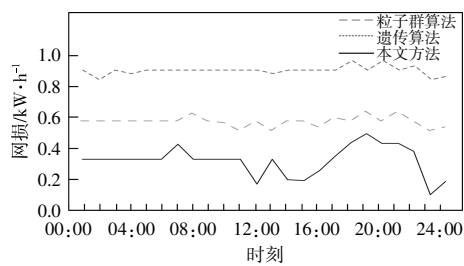


图10 不同方法网损对比

Fig.10 Comparison of network losses using different methods

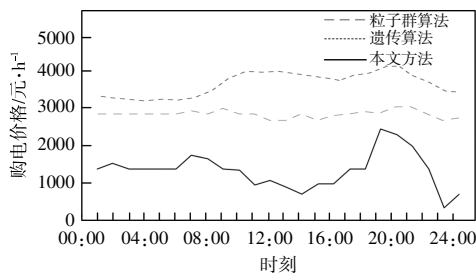


图11 不同方法购电价格对比

Fig.11 Comparison of electricity purchase prices using different methods

和0.6 kW/h,电费分别减少约2700元/h和2000元/h。说明了本文方法具有更优的经济性和资源利用率。

各种方法适应度结果如图12所示,计算时间如表2所示。由图12和表2可知,与粒子群算法、遗传算法相比,本文方法适应度分别降低了8.02,12.35,计算时间分别降低了100,119s,迭代次数分别降低了71,119。这是因为与粒子群算法、遗传算法相比,本文所提出的鹈鹕优化算法参数少、收敛速度快、寻优效率高,在求解多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型中具有明显优势,验证了本文方法的优越性。

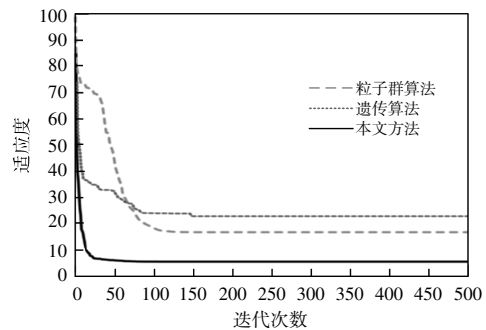


图12 各种方法适应度对比

Fig.12 Comparison of fitness of various methods

表2 不同方法计算时间

Table 2 Calculating time using different methods

方法	计算时间/s	迭代次数
本文方法	84	30
粒子群算法	184	101
遗传算法	203	149

## 5 结论

本文提出了一种基于鹈鹕优化算法的多端口交直流柔性联合能量控制系统优化方法,构建了分层式多端口交直流柔性联合能量控制系统架构。基于改进的鹈鹕优化算法对多端口交直流柔性联合能量控制系统优化模型进行求解,引入随机质量扰动行为提高算法的全局搜索能力。经过仿真验证,本文所提方法实现了多端口交直流柔性联合能量控制系统最优调度,与粒子群算法和遗传算法相比,具有更优的寻优能力和收敛能力,提高了能量控制系统调度的经济性和资源利用率。

#### 参考文献:

[1] 段青,盛万兴,孟晓丽,等.面向能源互联网的新型能

- 源子网系统研究[J].中国电机工程学报,2016,36(2):388-398.
- [2] Keshav S,Rosenberg C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid [J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review,2011,41(1):109-114.
- [3] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):714-727.
- [4] 储琳琳,宗明,朱夏,等.基于柔性互联的配电网电压质量协同优化控制策略[J].可再生能源,2023,41(5):653-659.
- [5] 裴玮,杜妍,李洪涛,等.应对微网群大规模接入的互联和互动新方案及关键技术[J].高电压技术,2015,41(10):3193-3203.
- [6] 张书鑫,赵若凡,刘鸿鹏.模块化高压大容量 DC/DC 变换器综述[J].东北电力大学学报,2024.DOI:10.19718/j.issn.1005-2992.2024-01-0052-09
- [7] 金恩淑,张弼弘,胡晓晨,等.基于限流电抗器电压的柔性直流配电线路单端量保护新方法[J].东北电力大学学报,2024,44(3):64-73.
- [8] 李霞林,郭力,黄迪,等.直流配电网运行控制关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
- [9] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
- [10] 王一振,赵彪,袁志昌,等.柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3551-3560.
- [11] 刘文霞,刘鑫,王荣杰,等.含柔性多状态开关的多端互联配电系统可靠性评估与量化分析[J].高电压技术,2020,46(4):1114-1124.
- [12] 路畅,郭力,刘一欣,等.基于柔性互联的独立微电网分布式优化调度方法[J].电网技术,2019,43(5):1512-1519.
- [13] 张雯雯,魏震波,郭毅,等.含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J].高电压技术,2022,48(2):565-576.
- [14] 马鑫,郭瑞鹏,王蕾,等.基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J].电力系统自动化,2018,42(22):144-150.
- [15] 王家怡,高红均,刘友波,等.考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化运行[J].中国电机工程学报,2020,40(2):550-563.
- [16] 王守相,陈思佳,谢颂果.考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J].电力系统自动化,2017,41(11):85-91.
- [17] 孙旭,邱晓燕,张志荣,等.基于数据驱动的数据驱动交直流配电网分布鲁棒优化调度[J].电网技术,2021,45(12):4768-4778.
- [18] 李争,徐若思,曹欣,等.基于小波变换和 IAGA-BP 神经网络的光伏功率短期预测方法[J].可再生能源,2023,41(7):883-890.
- [19] 李秋红.基于改进粒子群算法的前馈神经网络识别用户窃电行为[J].电气技术,2022,23(11):44-48.
- [20] 张洁.基于鹈鹕优化算法的核环境巡检机器人路径规划[J].机械设计与研究,2023,39(3):27-30,34.

## Optimization strategy for multi terminal AC/DC flexible joint energy control system based on improved Pelican algorithm

Lu Xiaoli<sup>1</sup>, Liu Zirui<sup>1</sup>, Hu Jiangtao<sup>1</sup>, Xiao Chenggang<sup>1</sup>, Feng Kangkang<sup>2</sup>, Jin Wenxing<sup>3</sup>

(1.Ningxia Electric Power Design Institute Co.,Ltd., Yinchuan 750004, China; 2.NR Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Aiming at the optimal economic operation of energy management strategy for multi port configuration of AC/DC flexible interconnection system, this article proposes an optimization method for multi port AC/DC flexible joint energy control system based on improved Pelican algorithm, which is based on photovoltaic power generation curve, high fit between peak and valley electricity price ranges, and energy storage control. Construct an optimization model for a multi terminal oral DC flexible joint energy control system, with constraints on DC bus voltage, power control unit capacity, and power balance, to comprehensively consider the minimum network loss, optimal economy, and optimal energy storage charging/discharging state. Based on the Pelican optimization algorithm, the model constructed is solved by introducing random mass disturbance behavior to improve the global search ability of the algorithm and prevent the model from getting stuck in local optima during solution. After simulation verification, the method proposed in the article can achieve optimal scheduling of multi terminal oral DC flexible joint energy control system.

**Keywords:** multi port configuration; AC/DC flexible interconnection system; energy management; Pelican algorithm; random mass disturbance