

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230389

一种嵌入改进海鸥算法的水光储鲁棒控制研究

王聪¹, 赵杰¹, 李亮², 卢玉舟², 师浩琪¹, 钱晶³, 曹飞³

(1. 国网河北省电力有限公司石家庄供电公司, 河北 石家庄 050051; 2. 国网河北省电力有限公司平山县供电公司, 河北 石家庄 050400; 3. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 光伏发电具有间歇性、波动性和预测难的特性, 因此需要与其他能源进行互补。常用的方法是利用水电机组的快速响应和储能电池灵活高效的补偿来构建水光储微电网系统。然而, 这一系统具有强烈的非线性特性, 其稳定性的一个关键问题是频率控制。针对这一问题, 设计了基于多目标 H_2/H_∞ 理论的混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器, 主要目标是在暂态下抑制频率振荡。在控制器中嵌入海鸥算法, 对海鸥算法进行混沌初始化和参数改进得到一种改进海鸥算法(improved seagull optimization algorithm, ISOA)。利用 ISOA 对 H_2/H_∞ 鲁棒控制的加权矩阵系数和范数权重进行参数优化, 最终获得最优混合 ISOA- H_2/H_∞ 鲁棒控制器。仿真结果表明, 所设计的 ISOA- H_2/H_∞ 鲁棒控制器在功率扰动和系统参数摄动下能保证水光储系统的频率稳定, 并具有满意的动态特性。

关键词: 水光储微电网; 频率控制; 暂态稳定性; ISOA- H_2/H_∞ 混合鲁棒控制器; 改进海鸥算法

Robust control of water and light storage embedded in an improved seagull optimization algorithm

WANG Cong¹, ZHAO Jie¹, LI Liang², LU Yuzhou², SHI Haoqi¹, QIAN Jing³, CAO Fei³

(1. Shijiazhuang Electric Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China;
2. Pingshan County Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050400, China;
3. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Photovoltaic power generation is intermittent, volatile and difficult to predict, so it needs to be complemented with other energy sources. A common approach is to build water-light storage microgrid systems using the fast response of hydro units and the flexible and efficient compensation of energy storage batteries. However, such systems have strongly non-linear characteristics and a key issue for their stability is frequency control. To address this problem, this paper designs a hybrid H_2/H_∞ robust controller based on multi-objective H_∞ theory, with the main objective of suppressing frequency oscillations in transient states. The improved seagull algorithm (ISOA) obtained by chaotic initialization and parameter improvement of the algorithm is embedded in the controller. ISOA is used to optimize the weighted matrix coefficients and norm weights of H_2/H_∞ robust control, and finally the optimal hybrid ISOA- H_2/H_∞ robust controller is obtained. The simulation results show that the designed ISOA- H_2/H_∞ robust controller can ensure the frequency stability of the system under power disturbance and parameter perturbation, and has satisfactory dynamic characteristics.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52269020).

Key words: hydropower-photovoltaic-energy storage microgrid; frequency control; transient stability; ISOA- H_2/H_∞ hybrid robust controller; improved seagull optimization algorithm

0 引言

随着社会对电力需求的不断扩大, 电力行业面

临着建设高成本发电厂和输配网络的问题^[1-2]。利用风、光、水等构成分布式微电网, 实现对本地负荷的供电是解决这一问题的重要方案^[3-6]。由于风、光出力的随机性, 再叠加上负荷侧功率的波动, 容易导致微电网频率振荡, 严重影响区域供电质量^[7-10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52269020)

为了保持微电网频率稳定,传统的方法是基于PID控制原理,如文献[11-12]基于PID控制原理,设计了频率控制器用来维持微电网频率稳定。虽然PID控制器原理简单、易于实现,但控制器的鲁棒稳定性和鲁棒性能并不理想,因此借用一些先进的智能控制是一种常规处理方法,文献[13]利用模糊控制方法设计了一种频率控制器,该方法对系统参数摄动具有较好的鲁棒性,缺点是控制精度不能得到保证。文献[14]给出了滑模控制,文献[15]提出了一种自抗扰控制,这些控制都获得了很好的鲁棒性和动态性能,但计算过程复杂,算法本身的稳定性证明也是一个难点。尽管有各种局限性,但智能算法在微电网频率稳定方面的应用仍然具有广阔的前景。

微电网是一个非线性时变系统,在频率控制上对稳定性以及鲁棒性具有较高要求^[16]。文献[17-19]利用 H_∞ 和 μ 综合的鲁棒原理,设计了相应的频率控制器,有效地抑制了外界功率干扰引起的频率波动。但是,以上提出的鲁棒控制器仅针对 H_∞ 范数的鲁棒性能指标进行了研究,并没有考虑表征系统鲁棒性能指标的 H_2 范数。文献[20]将 H_2 范数与 H_∞ 范数相结合进行控制器设计,获得了良好的鲁棒性和稳定性。在 H_2/H_∞ 鲁棒控制器设计过程中, H_2/H_∞ 的性能评价矩阵和权重系数的选取直接影响着控制性能^[21]。传统的方法是采用经验法或试错法选取,不仅工作量大,且很难寻找到最优解。运用智能算法进行鲁棒控制器参数寻优是近年来重要的优化方向。文献[22-23]采用粒子群算法和微分进化算法对鲁棒控制器进行参数优化,均有效提高了微电网在不同频率波动工况下的鲁棒性和稳定性。

海鸥算法(seagull optimization algorithm, SOA)是近年提出的一种新型群体智能搜索方法^[24]。传统的海鸥算法存在着多样性不足、后期收敛速度慢等缺点^[25]。对此,本文提出了一种改进的海鸥算法(improved seagull optimization algorithm, ISOA),通过改进海鸥算法的初始化方式和寻优过程中的相关参数,来提高算法的后期收敛速度及搜索精度。

基于对海鸥算法实施改进的基础上,本文进一步提出一种基于多目标 H_∞ 理论的混合 H_2/H_∞ 设计方法,采用改进海鸥算法优化 H_2/H_∞ 鲁棒控制的加权矩阵系数和范数权重,最终获得最优混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制策略。本文所提出的方法为水光储和其他微电网的频率控制提供了一种新途径。

1 微电网负荷频率模型的构建

1.1 微电网的整体结构

本文的研究对象为水光储微电网,其结构如图1所示。系统由水轮发电机组、光伏电池、储能电池和用电负荷组成。微电网中的电源通过变压变流器件连接到主母线。双向信息流通过配电管理系统(distribution management system, DMS)和各电源及负荷之间的通信链路传输,水轮发电机组作为微电网二次调频的主调节电源。

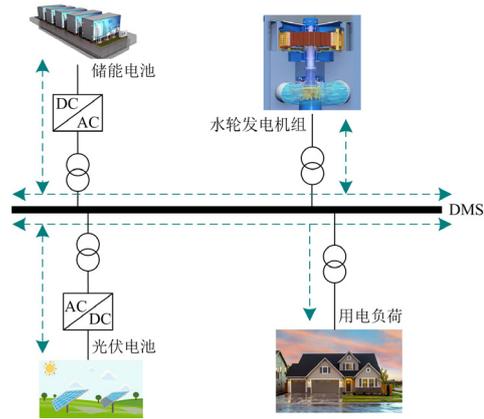


图1 水光储微电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of hydropower-photovoltaic-energy storage microgrid

1.2 水轮发电机组模型

水轮机模型可分为调速器和原动机两部分,调速器动力学模型的特征函数表示为

$$\frac{d\Delta X_g}{dt} = \frac{k_y \Delta u_L}{T_y} - \frac{k_y \Delta f}{RT_y} - \frac{\Delta X_g}{T_y} \quad (1)$$

$$G_y(s) = \frac{\Delta X_g(s)}{\Delta u_y(s)} = \frac{k_y}{T_y s + 1} \quad (2)$$

$$\Delta u_y(s) = \Delta u_L(s) - \frac{\Delta f(s)}{R} \quad (3)$$

式中: ΔX_g 为水轮机调速器执行机构输出量; Δu_L 为低频控制信号; s 表示特征方程中的复数变量; $G_y(s)$ 为调速器特征方程; k_y 和 T_y 分别为水轮机接方器时间常数和增益; Δf 为系统频率偏差; R 为微电网一次调频下垂系数; Δu_y 为施加到水轮机调速器上的控制信号。水轮机原动机环节采用IEEE线性化模型,其特征函数如式(4)。

$$G_w(s) = \frac{\Delta P_{HY}(s)}{\Delta X_g(s)} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 \cdot T_w s} \quad (4)$$

式中: T_w 为水流惯性时间常数; ΔP_{HY} 为水轮机组

输出功率。

1.3 光伏电源模型

光伏电池将太阳能转化为电能, 其动态模型由式(5)表示, 特征方程由式(6)表示。

$$\frac{d\Delta P_{PV}}{dt} = \frac{k_{PV}\Delta S_{PV}}{T_{PV}} - \frac{\Delta P_{PV}}{T_{PV}} \quad (5)$$

$$G_{PV}(s) = \frac{\Delta P_{PV}(s)}{\Delta S_{PV}(s)} = \frac{k_{PV}}{T_{PV}s + 1} \quad (6)$$

式中: T_{PV} 和 k_{PV} 分别为光伏电池 PV 的时间常数和增益; $G_{PV}(s)$ 为光伏电池特征方程; ΔP_{PV} 为光伏电池输出功率; ΔS_{PV} 为太阳能功率。

1.4 储能电池模型

储能电池可以将微电网中多余的电能存储为化学能, 在电能供应不足时提供缺乏的电能。储能电池功率变化信号分析及特征方程表示为

$$\frac{d\Delta P_{Be}}{dt} = \frac{k_{Be}\Delta u_{Be}}{T_{Be}} - \frac{\Delta P_{Be}}{T_{Be}} \quad (7)$$

$$G_{Be}(s) = \frac{\Delta P_{Be}(s)}{\Delta u_{Be}(s)} = \frac{k_{Be}}{T_{Be}s + 1} \quad (8)$$

式中: T_{Be} 和 k_{Be} 分别为储能电池的时间常数和增益; ΔP_{Be} 为输出功率; $G_{Be}(s)$ 为储能电池特征方程; Δu_{Be} 为施加到储能电池上的控制信号。

1.5 微电网的频率变化模型

微电网中的功率变化将导致频率变化。微电网动态模型由式(9)表示。

$$G_{MG}(s) = \frac{1}{K_{MG}(1 + sT_{MG})} = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{Ms + D} \quad (9)$$

$$\Delta P = \Delta P_s - \Delta P_L \quad (10)$$

$$\Delta P_s = \Delta P_{PV} + \Delta P_{HY} + \Delta P_{Be} \quad (11)$$

式中: $G_{MG}(s)$ 为系统特征方程; T_{MG} 和 K_{MG} 分别代表整个系统的时间常数和增益; M 为系统的惯性常数; D 为系统阻尼常数; Δf 为系统频率偏差; ΔP 为系统功率; ΔP_s 为系统总发电量; ΔP_L 为微电网负载。当光伏发电出力波动或负荷变动引起式(10)不平衡时, 采用二次调频控制器来调节水轮发电机组和储能电池的输出功率, 以达到微电网功率的平衡。

由以上元件模型所构建的水光储微电网频率控制线性化模型如图 2 所示。

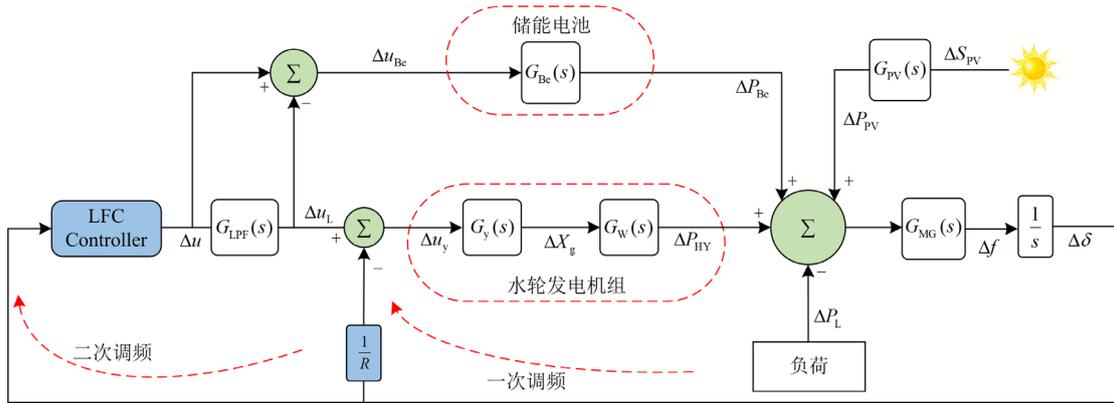


图 2 水光储微电网频率控制线性化模型

Fig. 2 Linear model of frequency control of hydropower-photovoltaic-energy storage microgrid

图 2 中: $G_{LPF}(s)$ 为低通滤波器; Δu 为二次调频控制信号; $\Delta \delta$ 为频率偏差积分量。 $G_{LPF}(s)$ 的特征方程如式(12)所示。

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{T_L s + 1} \quad (12)$$

式中, T_L 为低通滤波器的时间常数。

由图 2 可知, 整个微电网有两个输入变量 ΔS_{PV} 和 ΔP_L , 这两个输入量的变化导致频率波动。为了将频率恢复到期望值, 需要执行两级操作: 一次调频和二次调频。在微电网中, 一次调频由水轮发电机下垂控制完成, 如式(13)所示。

$$\Delta P_{pri} = \Delta f \times \frac{1}{R} \quad (13)$$

式中, ΔP_{pri} 为一次调频增量。图 2 中, 在系统输出频率偏差信号 Δf 之后增加了一个积分环节以消除机组转速的稳态误差。低通滤波器的作用是将鲁棒控制器 LFC 信号进行过滤处理, 从而控制输入到储能电池和水轮发电机组的信号, 使其保持在最佳工作状态。

一次调频可以抑制频率下降, 但频率恢复不到期望值, 因此, 需要二次调频进一步对频率进行调节。本文将在第 2、3 节对二次调频进行深入分析, 并提出基于 ISOA 算法的 H_2/H_∞ 鲁棒控制方法。

2 混合鲁棒 H_2/H_∞ 控制器设计

2.1 电网系统的动力学方程描述

系统的状态空间方程可以表述如式(14)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ y(t) = C_yx(t) + D_{y1}w(t) + D_{y2}u(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: x 为系统状态变量; w 表示扰动变量; u 为控制输入变量; y 表示系统输出; A 为状态空间矩阵; B_1 为系统扰动矩阵; B_2 为系统控制矩阵; C_y 为系统输出矩阵; D_{y1} 和 D_{y2} 分别为系统输出表征的扰动和控制矩阵。其中 x 为图 2 所示的水光储微电网中 7 个变量组成的矩阵。

$$x = [\Delta\delta \quad \Delta f \quad \Delta X_g \quad \Delta P_{HY} \quad \Delta P_{PV} \quad \Delta P_{Bc} \quad \Delta u_L]^T$$

$$w = [\Delta P_L \quad \Delta S_{PV}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{M} & 0 & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_y R} & -\frac{1}{T_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_y} & -\frac{2}{T_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Bc}} & -\frac{1}{T_L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_L} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Bc}} & \frac{1}{T_L} \end{bmatrix}^T$$

$$C_y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_{y1} = [0 \quad 0] \quad D_{y2} = [0]$$

2.2 H_∞ 控制理论

鲁棒 H_∞ 控制理论常被用来解决动态不稳定系统的干扰抑制以及输入/输出解耦等问题。本文采用多目标 H_∞ 设计, 即带闭环极点配置的混合 H_2/H_∞ 综合控制。结合系统方程(14), 得到 H_2/H_∞ 优化控制框图, 如图 3 所示。

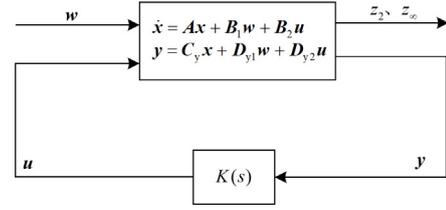


图 3 标准鲁棒混合 H_2/H_∞ 控制框图

Fig. 3 Block diagram of standard robust hybrid H_2/H_∞ control

图 3 中: w 为受控系统外界输入; u 为控制器对受控系统施加的控制; y 代表系统的输出; $K(s)$ 为鲁棒控制器。用 $T_2(s)$ 和 $T_\infty(s)$ 分别表示从 w 到 z_2 和 z_∞ 的闭环系统传递函数。设计输出反馈控制器 $u = K(s)y$, 使其满足 3 个目标条件:

- 1) 将 $T_\infty(s)$ 的 H_∞ 范数保持在某个指定值 $\gamma > 0$ 以下;
- 2) 将 $T_2(s)$ 的 H_2 范数维持在某个规定值 $\nu > 0$ 以下;
- 3) 将闭环极点放置在指定的线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 区域中。

2.3 H_2/H_∞ 控制器的设计

在动力学方程(14)中增加代表动态性能评价的方程, 获得一类具有普遍鲁棒性的控制系统, 状态空间方程如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \\ z_\infty = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ z_2 = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \\ y = C_yx + D_{y1}w + D_{y2}u \end{cases} \quad (15)$$

对 z_2/z_∞ 性能评价函数矩阵 C_1 、 C_2 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21} 、 D_{22} 分别定义为

$$C_1 = \text{diag}([x(1) \quad x(2) \quad x(3) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0])$$

$$D_{11}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12}^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad x(4)]$$

$$C_2 = \text{diag}([x(5) \quad x(6) \quad x(7) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0])$$

$$D_{21}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{22}^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad x(8)]$$

式中的 $x(1)$ 至 $x(8)$ 是加权系数。本文后续利用人工智能优化算法修正加权系数来实现系统稳定性和频率调节精度的最优性能组合。对于式(15)以及图 3 所示的控制系统, 引入鲁棒控制器 $K(s)$ 使得 $u = K(s)y$, 得到相应的闭环系统状态空间方程如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{cl} = \mathbf{A}_{cl}\mathbf{x}_{cl} + \mathbf{B}_{cl}\mathbf{w} \\ \mathbf{z}_\infty = \mathbf{C}_{cl1}\mathbf{x}_{cl} + \mathbf{D}_{cl1}\mathbf{w} \\ \mathbf{z}_2 = \mathbf{C}_{cl2}\mathbf{x}_{cl} + \mathbf{D}_{cl2}\mathbf{w} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{A}_{cl} = \mathbf{A} + \mathbf{B}_2\mathbf{K}\mathbf{C}_y$; $\mathbf{B}_{cl} = \mathbf{B}_1$; $\mathbf{x}_{cl} = \mathbf{x}$; $\mathbf{C}_{cl1} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{D}_{12}\mathbf{K}\mathbf{C}_y$; $\mathbf{D}_{cl1} = \mathbf{D}_{11}$; $\mathbf{C}_{cl2} = \mathbf{C}_2 + \mathbf{D}_{22}\mathbf{K}\mathbf{C}_y$; $\mathbf{D}_{cl2} = \mathbf{D}_{21}$; $\mathbf{K} = \mathbf{K}(s)$ 。

引入 $\mathbf{K}(s)$ 后, 使得被控对象的性能满足:

1) 最优 H_∞ 控制的性能指标: 从 \mathbf{w} 到 \mathbf{z}_∞ 的闭环均方根增益不超过 γ 。该条件采用线性矩阵不等式 LMI 可以表示为当且仅当存在对称矩阵 \mathbf{X}_∞ 使得

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{cl}\mathbf{X}_\infty + \mathbf{X}_\infty\mathbf{A}_{cl}^\top & \mathbf{B}_{cl} & \mathbf{X}_\infty\mathbf{C}_{cl1}^\top \\ \mathbf{B}_{cl}^\top & -\mathbf{I} & \mathbf{D}_{cl1}^\top \\ \mathbf{C}_{cl1}\mathbf{X}_\infty & \mathbf{D}_{cl1} & -\gamma^2\mathbf{I} \end{pmatrix} < 0 \\ \mathbf{X}_\infty > 0 \end{cases} \quad (17)$$

2) 最优 H_2 控制的性能指标: 从 \mathbf{w} 到 \mathbf{z}_2 的闭环传递函数的 H_2 范数不超过 ν 。同样地采用 LMI 可以表示为当且仅当 $\mathbf{D}_{cl2} = 0$ 且存在两个对称矩阵 \mathbf{X}_2 和 \mathbf{Q} 使得

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{cl}\mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_2\mathbf{A}_{cl}^\top & \mathbf{B}_{cl} \\ \mathbf{B}_{cl}^\top & -\mathbf{I} \end{pmatrix} < 0 \\ \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{C}_{cl2}\mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_2\mathbf{C}_{cl2}^\top & \mathbf{X}_2 \end{pmatrix} > 0 \\ \text{Trace}(\mathbf{Q}) < \nu^2 \end{cases} \quad (18)$$

3) LMI 极点配置: 通过将闭环极点配置在适当的 D 区域, 可以保证闭环系统的动态和稳态性能达到预期的效果。

$$\mathbf{D} = \{z \in \mathbb{C} : L + Mz + M^\top \bar{z} < 0\} \quad (19)$$

当 $L = L^\top = \{\lambda_{ij}\}_{1 \leq i, j \leq m}$ 且 $M = [\mu_{ij}]_{1 \leq i, j \leq m}$ 时, 采用 LMI 表示为当且仅当存在满足条件的对称矩阵 \mathbf{X}_{pol} 使得

$$\begin{cases} [\lambda_{ij}\mathbf{X}_{pol} + \mu_{ij}\mathbf{A}_{cl}\mathbf{X}_{pol} + \mu_{ji}\mathbf{X}_{pol}\mathbf{A}_{cl}^\top]_{i \geq 1, j \leq m} < 0 \\ \mathbf{X}_{pol} > 0 \end{cases} \quad (20)$$

对于上述 LMI 框架中的易操纵性, 为了满足一般性, 设定一个单一的 Lyapunov 矩阵 \mathbf{X} 使得 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_\infty = \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_{pol}$ 。通过上述 LMI 方程, 可以得到 H_2/H_∞ 型混合控制系统所要满足的性能要求, 即被控目标闭环极点都在左半开复数域。整体性能通过优化以下函数表示。

$$f(\alpha, \beta) = \min_{\mathbf{K}(s)} \left\{ \alpha \|T_\infty\|_\infty^2 + \beta \|T_2\|_2^2 \right\} \quad (21)$$

给定上述线性矩阵不等式问题的最优解 γ^* 、

\mathbf{Q}^* , 则由式(16)所描述的闭环系统的 H_∞ 和 H_2 性能满足:

$$\begin{cases} \|T_\infty\|_\infty \leq \gamma^* \\ \|T_2\|_2 \leq \sqrt{\text{Trace}(\mathbf{Q}^*)} \end{cases} \quad (22)$$

从上述线性矩阵不等式的求解可以看出, 通过配置不同的 α 和 β 值, 可以得到不同性能的鲁棒控制器。传统的 H_2/H_∞ 控制器通常配置 $\alpha = 0.5$ 和 $\beta = 0.5$ 。为了提高系统的阻尼, 获得更好的控制性能, 本文在第 3 节将讨论采用一种智能优化算法来确定 α 和 β 的值。

3 基于改进海鸥算法的参数优化方法

3.1 基本海鸥优化算法

海鸥算法的原理是对海鸥的迁移行为与攻击过程进行仿真, 在不断地更新海鸥的位置迭代中寻找最优解。迁移行为和攻击过程如下:

1) 迁徙的特征是海鸥为了寻求丰富的食物而季节性地从一处迁移到另一处。该行动包含以下步骤。

(1) 为了防止迁徙过程中的碰撞, 海鸥的初始位置是不同的。

$$\mathbf{C}_s(t) = \mathbf{W} * \mathbf{P}_s(t) \quad (23)$$

式中: $\mathbf{C}_s(t)$ 是一个新的位置点, 不与其他海鸥发生碰撞; $\mathbf{P}_s(t)$ 是海鸥目前所在位置; t 表示迭代数; \mathbf{W} 表示海鸥在给定搜索空间中的运动行为。其中 \mathbf{W} 的计算公式为

$$\mathbf{W} = f_c - t \cdot (f_c / D_{\max}) \quad (24)$$

式(24)中引入 f_c 来控制 \mathbf{W} 的频率, 使 \mathbf{W} 从 f_c 线性递减到 0。 D_{\max} 为最大迭代次数。

(2) 在避免和邻居们的碰撞后, 海鸥将朝着最佳海鸥的方向飞去。

$$\mathbf{M}_s(t) = \mathbf{G} * (\mathbf{P}_{bs}(t) - \mathbf{P}_s(t)) \quad (25)$$

式中: $\mathbf{M}_s(t)$ 是最佳海鸥所在的方向; $\mathbf{P}_{bs}(t)$ 为最佳海鸥所在的位置; \mathbf{G} 代表均衡算法的全局和局部搜寻性能, 其表达式为

$$\mathbf{G} = 2 * \mathbf{W}^2 * rand \quad (26)$$

式中, $rand \in [0, 1]$ 的随机数。

(3) 接近最佳海鸥位置后, 海鸥将更新其相对于最佳海鸥的位置。

$$\mathbf{D}_s(t) = |\mathbf{C}_s(t) + \mathbf{M}_s(t)| \quad (27)$$

2) 海鸥在迁徙过程中进行捕猎时会不停地变换攻击的方向和速度。当它们攻击猎物时, 会在空中盘旋移动。此行为在 x 、 y 和 z 平面中的描述如式(28)所示。

$$\begin{cases} x = r * \cos(\theta) \\ y = r * \sin(\theta) \\ z = r * \theta \\ r = ue^{\theta v} \end{cases} \quad (28)$$

式中： r 为螺旋半径； θ 为随机角度值， $\theta \in [0, 2\pi]$ ； u 和 v 是螺旋形状的关系常量。最终位置 $P_s(t)$ 如式(29)所示。

$$P_s(t) = D_s(t)xyz + P_{bs}(t) \quad (29)$$

3.2 改进的海鸥算法

3.2.1 引入 Logistics 混沌映射

在基本海鸥算法中，初始化的海鸥群体是在给定的上下边界中随机产生的。这种初始化方式会导致海鸥在空间上分布不均，造成算法后期全局搜索能力不足，容易发生早熟现象。混沌具有遍历、随机的特点，利用混沌来实现海鸥种群的初始化可以使原始群体在整个搜寻空间中的初始化更均匀，从而改进算法的收敛性和准确性。

Logistics 混沌映射具有随机性、遍历性和强发散性等特点，其数学表达式如式(30)所示。

$$x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n) \quad (30)$$

式中： $\lambda \in (0, 4]$ ； $x_n \in (0, 1), n = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。

研究表明：当 λ 的取值为3.569 945 6 < $\lambda \leq 4$ 时，特别是在 λ 无限逼近4的条件下，该方法的迭代会呈现出伪随机性，也就是逻辑映射中的混沌。当 $\lambda = 4$ 时，Logistics 混沌映射的概率分布密度函数如式(31)所示。

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}} & 0 < x < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

混沌序列轨迹点的均值为

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i = \int_0^1 xP(x)dx = \frac{1}{2} \quad (32)$$

为了不失一般性，本文中的 λ 取值为4，可以使海鸥种群初始化达到完全混沌状态。设定算法寻优变量空间为

$$L_b < x_i < U_b \quad (33)$$

所以，改进海鸥算法初始化表达式如式(34)。

$$\begin{cases} x_{n+1} = 4x_n(1 - x_n) \\ y_n = \frac{1}{\pi} \arcsin(2x_n - 1) - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (34)$$

海鸥的初始位置经混沌变化后为

$$C_s = (U_b - L_b)y_n + L_b \quad (35)$$

3.2.2 参数 W 和螺旋系数 v 的改进

在基础海鸥算法中，利用 f_c 对 W 进行线性调

整，使 W 的数值由2向0线性递减。但是算法的收敛过程是非线性的，所以采用线性变量 W 的方法不能很好地解决SOA的搜索问题。为了增强算法的整体搜索性能，本文采用基于Beta分布的随机调整数来表示局部干扰 W ，防止算法陷入局部最优。改进的 W 非线性递减公式如式(36)所示。

$$W = \frac{2}{1 + e^{\frac{20t}{D_{\max}} - 10}} + \sigma * \text{betamd}(1, 1) \quad (36)$$

式中： betamd 为随机数生成器； t 为算法当前的迭代数； D_{\max} 为最大迭代次数； σ 为收敛调节因子，经过反复试验，结果表明 $\sigma = 0.1$ 时效果最佳。改进前后的参数 W 对比如图4所示。

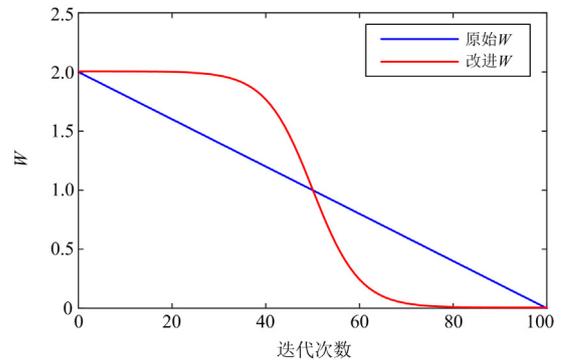


图4 参数 W 的改进前后对比图

Fig. 4 Comparison of parameter W before/after improvement

由图4可知，改进后的参数 W 在算法前期较长时间仍维持较大值，且变化幅度和速度较小，即海鸥长时间以较大的步伐进行搜索，这样可有效提高算法前期的全局搜索能力；在迭代中期，优化后的 W 值的衰减速率明显加快，这对算法的收敛起到了很大的促进作用；在迭代后期，优化后的参数 W 可以维持较低的数值，并且其变化的幅度和速度都很低，从而增强了算法的局部寻优能力。

接下来讨论螺旋系数 v ，在常规海鸥算法中， v 一般取1，在迭代过程中不能进行自适应调节，使海鸥后期飞行半径过大，导致算法在最优解附近出现抖动，不能快速收敛。为此，本文使用了一个余弦函数来改善 v ，其表达式如式(37)所示。

$$v = \cos\left(\pi \times \frac{t}{D_{\max}}\right) \quad (37)$$

在迭代过程中，改进后的螺旋系数 v 由1非线性下降到-1，使海鸥前期的飞行半径较大，从而可以更好地找到最佳位置方向，后期的飞行半径较小，有利于快速获得最优解的准确位置。

3.2.3 寻优性能评价函数

本文将 ISE 指数用于 ISOA 的自适应性评估, 以提高算法寻优效率。

$$F_{\text{fitness}} = \int_0^{T_{\text{ime}}} |\Delta f|^2 dt \quad (38)$$

式中: F_{fitness} 为适应度指标; T_{ime} 为仿真时间。

4 实验仿真

4.1 控制器求解

本文利用 Matlab 仿真实验平台, 建立如图 2 所示的微电网频率控制仿真模型。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

参数	赋值	参数	赋值
$T_y(s)$	0.08	$T_{Be}(s)$	0.1
$k_y(s)$	1	$k_{Be}(s)$	1
$T_w(s)$	0.5	$T_i(s)$	0.1
$T_{pv}(s)$	1.8	$M(\text{p.u./s})$	0.2
$k_{pv}(s)$	1	$D(\text{p.u./Hz})$	0.012

改进海鸥优化算法(ISOA)的参数取值如表 2 所示。本文将其寻优结果和粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、以及常规的海鸥算法(SOA)进行对比, 对比结果如图 5 所示。

表 2 算法参数

参数	f_c	D_{max}	L_b	U_b	u	v
取值	2	50	-1	1	1	1

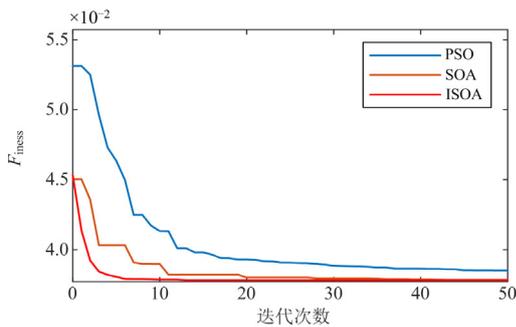


图 5 算法寻优迭代比较图

Fig. 5 Comparison diagram of algorithm optimization iteration

从图 5 中可以看出, 相对于 PSO 算法, SOA 算法无论是迭代收敛的速度还是最终收敛的结果都要表现得更优越。经过改进之后的海鸥算法, 在不到 10 次的迭代计算就已经寻找到了最优解, 相比下 PSO 算法收敛精度比较差, 还容易陷入局部最优。算法寻优频率响应对比如图 6 所示。

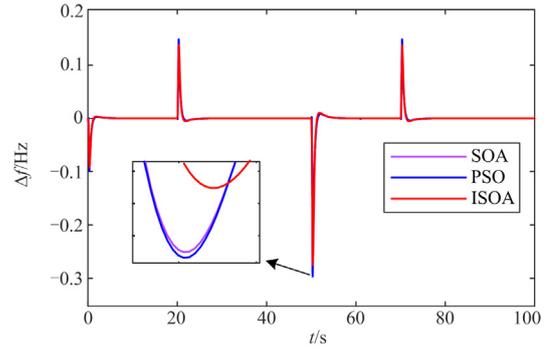


图 6 不同算法下的频率响应

Fig. 6 Frequency response under different algorithms

利用 ISOA 算法对 H_2/H_∞ 鲁棒控制器进行参数寻优, 具体实现流程如图 7 所示。该优化过程可总结为: 1) 基于算法产生海鸥个体群, 个体携带 10 个待求参数; 2) 分配矩阵 C_1 、 D_{12} 、 C_2 、 D_{22} 待定因子和两个权重因子 α 和 β , 计算相应的鲁棒输出反馈控制器 $K(s)$; 3) 在所构成的鲁棒控制器 $K(s)$ 闭环模型中设定相应的性能评估指数; 4) 通过排序筛选最优海鸥个体; 5) 根据最优个体, 继续向着减小适应度值的方向寻优迭代。

迭代计算结果为

$$C_1 = \text{diag}([0.4681 \ 1 \ 0.6553 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0])$$

$$D_{12}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.01]$$

$$C_2 = \text{diag}([1 \ 0.0289 \ 0.0250 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0])$$

$$D_{22}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.01]$$

$$\alpha = 0.5127 \quad \beta = 0.1257$$

鲁棒 H_2/H_∞ 输出反馈控制器 $K(s)$ 为

$$K(s) =$$

$$\frac{n_1 s^7 + n_2 s^6 + n_3 s^5 + n_4 s^4 + n_5 s^3 + n_6 s^2 + n_7 s + n_8}{d_1 s^7 + d_2 s^6 + d_3 s^5 + d_4 s^4 + d_5 s^3 + d_6 s^2 + d_7 s + d_8} \quad (39)$$

式中: $n_1 = -3.077$; $n_2 = -1.62 \times 10^7$; $n_3 = -6.167 \times 10^8$; $n_4 = -8 \times 10^9$; $n_5 = -4.085 \times 10^{10}$; $n_6 = -7.429 \times 10^{10}$; $n_7 = -1.159 \times 10^{11}$; $n_8 = -5.455 \times 10^{10}$; $d_1 = 1$; $d_2 = 212.2$; $d_3 = 1.23 \times 10^5$; $d_4 = 7.255 \times 10^6$; $d_5 = -5.771 \times 10^8$; $d_6 = 1.014 \times 10^{10}$; $d_7 = 1.852 \times 10^{11}$; $d_8 = 9.961 \times 10^{10}$ 。

4.2 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性, 这里对所提出的基于 ISOA 优化的鲁棒 H_2/H_∞ 控制、传统自整定鲁棒 H_2/H_∞ 控制以及优化的 PID 控制三者进行了对比分析。初始参数设计说明如下: 对传统自整

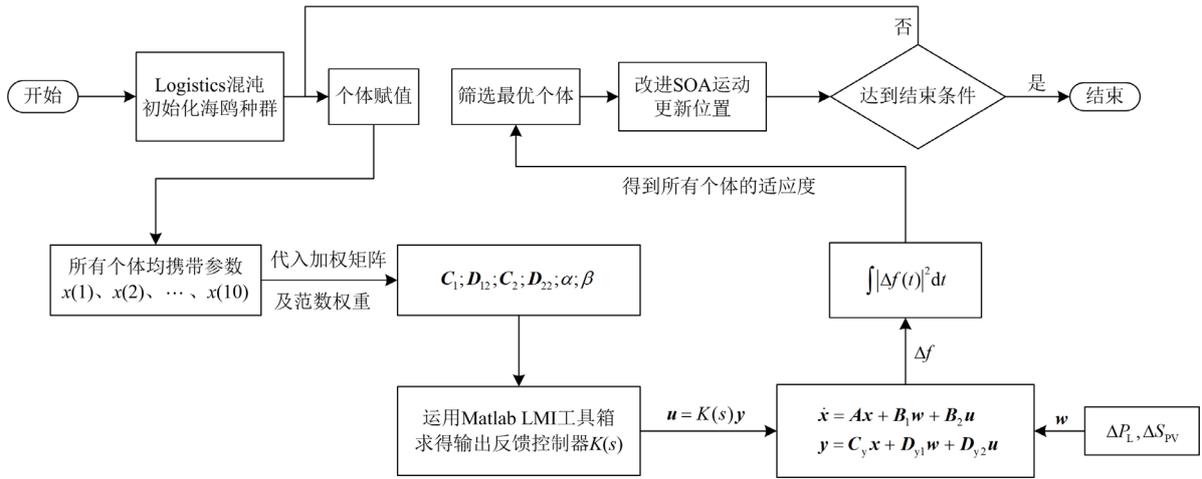


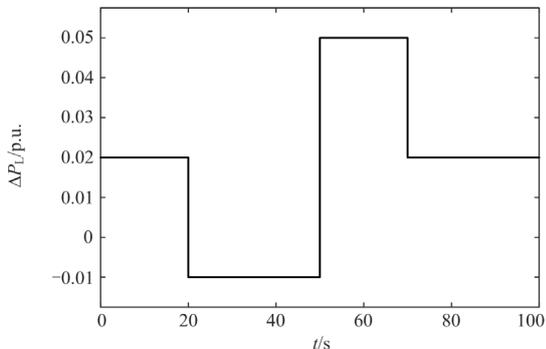
图7 整体的优化流程图

Fig. 7 Overall optimization flowchart

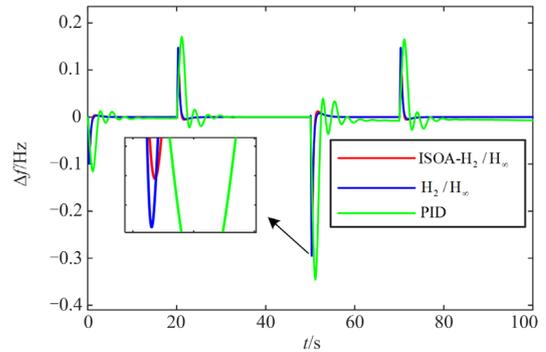
定鲁棒 H_2/H_∞ 控制器加权系数初值 $x(1)$ 、 $x(2)$ 、 $x(3)$ 、 $x(5)$ 、 $x(6)$ 、 $x(7)$ 设置为 1，以确保系统能够有效跟踪负荷变化并对干扰进行抑制，对权向量 $x(4)$ 、 $x(8)$ 设置为 0.01，以限制调节装置负荷定点信号的迅速变化和超调。传统 H_2/H_∞ 性能权重因子配置为 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.5$ 。PID 参数初值：采用 ISOA 优化算法对系统自带 PID 控制器参数进行寻优，优化后的 PID 参数为 $K_p = 0.1515$ ， $K_i = 0.0006$ ， $K_d = -0.0855$ 。对 3 种控制器在相同工况下进行了仿真，仿真对比分析如下。

4.2.1 负荷波动工况

本工况考虑了负载功率 ΔP_L 多次扰动对系统的影响，扰动如图 8(a)所示，其中 ΔP_L 在 0、20、50、70 s 处发生阶跃扰动。图 8(b)为不同控制器下的水光储微电网的频率偏差响应。从图 8 中可以看出，PID 控制下的振荡较大，振荡时间较长，ISOA- H_2/H_∞ 控制下系统振荡最小，能够更快地跟踪期望频率。



(a) 负荷功率变化曲线



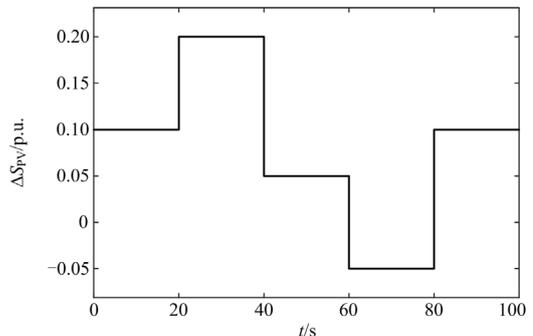
(b) 频率偏差响应曲线

图8 负荷扰动及频率偏差响应曲线

Fig. 8 Load disturbance and frequency deviation response

4.2.2 太阳能波动工况

设太阳辐射波动为 ΔS_{PV} ，太阳辐射功率的多级递减阶跃变化如图 9(a)所示，功率扰动发生在 0、20、40、60 和 80 s。图 9(b)为 3 种控制下的频率响应，从图中不难发现，在太阳能发生波动情况下，PID 控制下的振荡仍然较大，振荡时间较长，ISOA- H_2/H_∞ 效果明显好于 H_2/H_∞ 。



(a) 太阳能功率扰动变化曲线

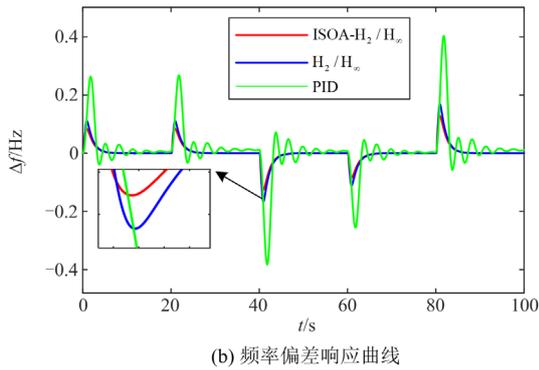


图 9 太阳能扰动及频率偏差响应

Fig. 9 Solar disturbance and frequency deviation response

从上述两类运行工况的比较可以看出, 使用 ISOA 算法配置的混合 H_2/H_∞ 控制器可以缩短系统的频率调整时间, 提高系统的鲁棒性能, 控制器具有更好的调频性能。

4.2.3 扰动叠加工况

考虑在太阳能 ΔS_{pv} 以及负荷 ΔP_L 同时扰动下 3 种控制方法的系统频率响应情况。为了模拟现实功率干扰, 将扰动模拟为阶跃式的随机干扰, 如图 10(a)。相应获得的频率响应如图 10(b)所示。

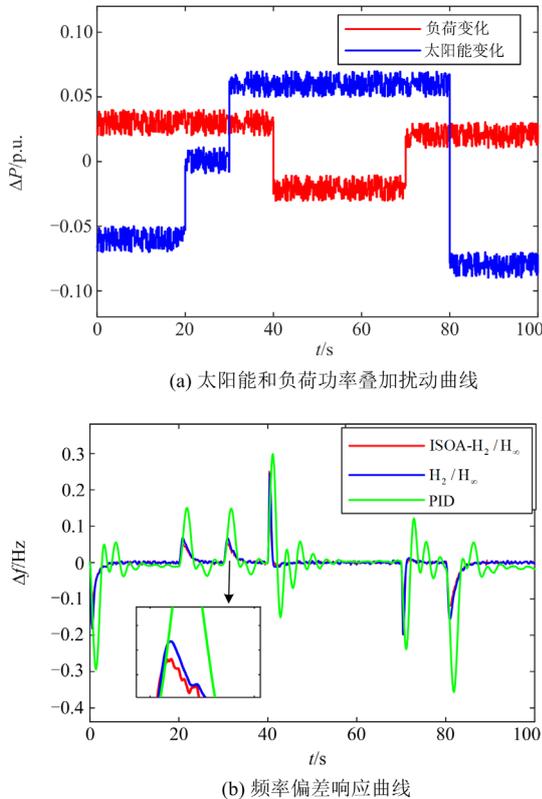


图 10 太阳能和负荷同时扰动及频率偏差响应

Fig. 10 Solar and load simultaneous disturbance and frequency deviation response

从图 10(b)中可以看出, 在叠加扰动工况下, 3 种控制方式的结果与 4.2.1 节和 4.2.2 节的结果类似, ISOA- H_2/H_∞ 控制器具有更好的频率稳定性和收敛速度。

4.2.4 储能电池参与调节

本节研究储能电池参与机组二次调频对系统产生的影响。图 11 为负荷和太阳能功率在 ± 0.01 p.u. 范围内随机变化时, 微电网系统在水电机组单一调节和水电机组与储能电池协同调节两种模式下的系统频率响应。

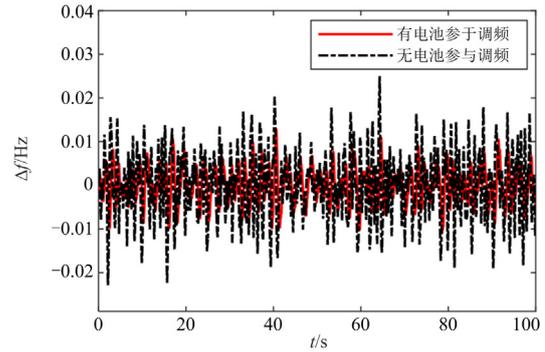


图 11 储能电池参与的系统频率响应

Fig. 11 Frequency deviation response of the system involved by energy storage batteries

图 11 的结果显示, 当储能电池接入后, 在负载及光伏功率叠加扰动下, 储能电池参与调频后其频率波动比水电机组单一调节时明显减小, 因为储能电池的调节速度比水电机组要快得多, 从满足技术指标的角度看, 储能电池特别适用于这类扰动频繁的工况。

综上分析, 系统在 ISOA- H_2/H_∞ 鲁棒控制器的调节下有更短的振荡时间和较小的超调量, 其实质是通过模型的优化和算法的嵌入, 使得系统的等效虚拟阻尼增加, 同时参数的优化带来轨迹优化, 使得控制器更加稳定, 适用性更强。

4.2.5 系统内部参数扰动工况

为了验证所设计控制器的鲁棒性, 进行了内部参数扰动灵敏度分析。图 12 为参数 T_{pv} 和 D 发生扰动下的系统频率响应。

从图 12 可知, 当 T_{pv} 在 $\pm 50\%$ 范围内变化时, 系统的最大频率偏差依旧保持在 ± 0.25 Hz 之内; 当参数 D 在 $\pm 50\%$ 范围内变化时, 频率偏差基本上没有发生显著变化, 仍然可以保持最优的调频效果。所以, 在系统参数发生摄动的情况下, 所设计的 ISOA- H_2/H_∞ 控制器仍具备较好的鲁棒性。

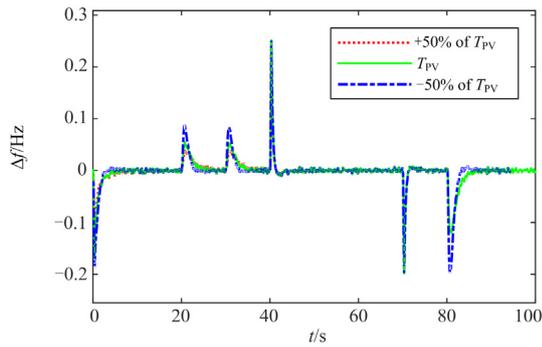
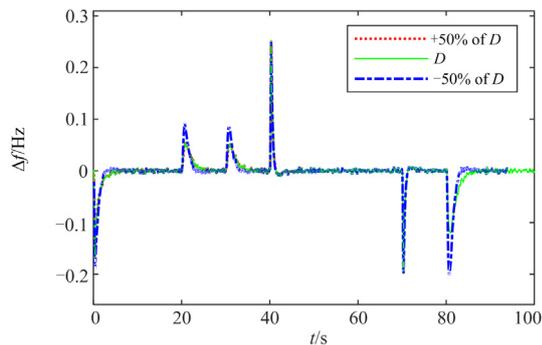
(a) T_{PV} 变化下的灵敏度分析(b) D 变化下的灵敏度分析

图 12 系统参数扰动下的灵敏度分析

Fig. 12 Analysis of adjustment sensitivity under perturbation of system parameters

5 结论

针对水光储微电网中光伏和负荷随机性变化导致的频率振荡问题,本文提出一种嵌入改进海鸥算法的水光储混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制技术,获得了以下结论。

1) 本文所提出 ISOA 算法对 H_2/H_∞ 性能权重的优化分配、对鲁棒控制器相关参数的优化是有效的。和常见的 PSO 算法及未改进的 SOA 算法相比,其效果更好。

2) 对于存在随机扰动的一类微电网,如包含风、光等新能源系统,本文所提出的基于 ISOA- H_2/H_∞ 鲁棒控制器可以有效改善其频率输出特性,其效果优于传统的 H_2/H_∞ 控制器和 PID 控制器控制效果。

3) 将储能装置作为快速补偿调频设备,结合 ISOA- H_2/H_∞ 鲁棒控制器,对抑制含风、光等新能源微电网的暂态效果更加优异。

参考文献

[1] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.

- LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [2] 李东东, 郭天洋, 刘庆飞, 等. 计及光伏发电的新能源电力系统惯量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 174-179.
- LI Dongdong, GUO Tianyang, LIU Qingfei, et al. Inertia estimation of renewable power system considering photovoltaics[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 174-179.
- [3] 孙海霞, 朱立位, 韩钰倩, 等. 基于非合作博弈的微网混合储能容量配置方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 454-463.
- SUN Haixia, ZHU Liwei, HAN Yuqian, et al. Capacity configuration method of hybrid energy storage system in microgrids based on a non-cooperative game model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 454-463.
- [4] 徐艳春, 张进, 汪平, 等. 考虑配电网静态电压稳定性的微电网优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 87-101.
- XU Yanchun, ZHANG Jin, WANG Ping, et al. Optimal configuration of microgrid considering static voltage stability of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 87-101.
- [5] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.
- YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [6] 张坤平, 郝琳. 基于模型预测的微电网频率协调控制策略[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 581-590.
- ZHANG Kunping, HAO Lin. Frequency coordinated control strategy of microgrid based on fuzzy prediction[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 581-590.
- [7] BAGHERI A, JABBARI A, MOBAYEN S. An intelligent ABC-based terminal sliding mode controller for load-frequency control of islanded micro-grids[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 64: 102544.
- [8] DASHTDAR, MASOUD, et al. Frequency control of the islanded microgrid based on optimised model predictive control by PSO[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(10): 2088-2100.
- [9] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.

- WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [10] 李咸善, 董鑫, 程杉, 等. 微电网群频率调整的分层协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 1-14.
- LI Xianshan, DONG Xin, CHENG Shan, et al. Hierarchical coordinated control strategy for frequency adjustment of microgrid groups[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 1-14.
- [11] RAY, PRAKASH K, SR MOHANTY, et al. Proportional-integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(4): 1943-1954.
- [12] DIPAYAN G, ROY P K, BANERJEE S. Equilibrium optimizer-tuned cascade fractional-order 3DOF-PID controller in load frequency control of power system having renewable energy resource integrated[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(1): 12702-12727.
- [13] ANNAMRAJU A, NANDIRAJU S. Robust frequency control in a renewable penetrated power system: an adaptive fractional order-fuzzy approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 181-195.
- [14] KALLA U K, SINGH B, MURTHY S S, et al. Adaptive sliding mode control of standalone single-phase microgrid using hydro, wind, and solar PV array-based generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6806-6814.
- [15] FU C, TAN W. Decentralised load frequency control for power systems with communication delays via active disturbance rejection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1397-1403.
- [16] 米阳, 郎中杰, 何星璐. 孤岛微电网鲁棒自适应协调控制[J]. 控制工程, 2021, 28(5): 924-930.
- MI Yang, LANG Zhongjie, HE Xingtang. Coordinated control for isolated microgrid based on robust adaptive method[J]. Control Engineering, 2021, 28(5): 924-930.
- [17] CHUANG N. Robust load-frequency control in interconnected power systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(1): 67-75.
- [18] 陈金元, 李相俊, 谢巍. 基于 H_∞ 混合灵敏度的微电网频率控制[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2399-2403.
- CHEN Jinyuan, LI Xiangjun, XIE Wei. Microgrid frequency control based on H_∞ mixed sensitivity[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2399-2403.
- [19] BEVRANI H, FEIZI M R, ATAEE S. Robust frequency control in an islanded microgrid: H_∞ and μ -synthesis approaches[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(2): 706-717.
- [20] MOHSENI N A, BAYATI N. Robust multi-objective H_2/H_∞ load frequency control of multi-area interconnected power systems using TS fuzzy modeling by considering delay and uncertainty[J]. Energies, 2022, 15(15): 5525.
- [21] 邹屹东, 钱晶, 张文英, 等. 基于 CPSOGSA 算法的风光-小水电微电网负荷频率最优 H_2/H_∞ 鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 42-51.
- ZOU Yidong, QIAN Jing, ZHANG Wenying, et al. Optimal H_2/H_∞ robust control for the load frequency of a microgrid including wind power-photovoltaic-small hydropower based on CPSOGSA[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 42-51.
- [22] SINGH V P, MOHANTY S R, KISHOR N, et al. Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46: 294-305.
- [23] 李洪跃, 王锡淮, 肖健梅. 差分进化改进微电网负荷频率混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(11): 118-126.
- LI Hongyue, WANG Xihuai, XIAO Jianmei. Differential evolution algorithm improving for micro-grid load frequency mixed H_2/H_∞ robust control[J]. Journal of Electric Machinery and Control, 2019, 23(11): 118-126.
- [24] DHIMAN G, KUMAR V. Seagull optimization algorithm: theory and its applications for large-scale industrial engineering problems[J]. Knowledge Based Systems, 2019, 165: 169-196.
- [25] 盛四清, 关皓闻, 雷业涛, 等. 基于混沌海鸥优化算法的含光伏发电系统负荷模型参数辨识[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 64-72.
- SHENG Siqing, GUAN Haowen, LEI Yetao, et al. Parameter identification of load model of photovoltaic power generation system based on chaotic seagull optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(7): 64-72.

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-06-20

作者简介:

王 聪(1981—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型电力系统、电网规划可研及新能源接入系统。

E-mail: wangcong810@163.com

(编辑 魏小丽)