

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211105

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

邹屹东¹, 钱晶¹, 张文英², 梅宏³, 陈家焕¹, 曾云¹

(1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650000; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;
3. 昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650000)

摘要: 提出在优化过程中考虑 H_2/H_∞ 范数权重来设计最优混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器的方法, 并将其应用在含风电、光伏以及小水电三个分布式电源的微电网负荷频率控制上。在对所建立的微电网负荷频率控制器优化中以系统的频率波动平方积分最小作为最优化目标, 并综合 H_2/H_∞ 两个范数所表述的鲁棒性能, 设计了具有最优的混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器。采用基于收缩系数的粒子群引力搜索算法(CPSOGSA)对反映系统 H_2 性能、 H_∞ 性能的权重值以及输出鲁棒性能的有关加权矩阵进行选优, 从而能够使得控制器在满足约束条件下达到最优。通过仿真验证可知, 所提的方法对该微电网的负荷频率在外部扰动和系统内部参数扰动下具有更好的动态性能。

关键词: 微电网; 小水电; 负荷频率控制; 鲁棒控制; 混沌粒子群引力搜索算法

Optimal H_2/H_∞ robust control for the load frequency of a microgrid including wind power-photovoltaic-small hydropower based on CPSOGSA

ZOU Yidong¹, QIAN Jing¹, ZHANG Wenying², MEI Hong³, CHEN Jiahuan¹, ZENG Yun¹

(1. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;
2. School of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
3. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: This paper proposes a method to design the optimal hybrid H_2/H_∞ robust controller considering the H_2/H_∞ norm weight in the optimization process and applies it to the load frequency control of the microgrid, including wind turbine, photovoltaic and small hydropower. Based on the established microgrid load frequency model, the controller optimization takes the minimum square integral of the frequency fluctuation of the system as the optimization objective, integrates the robust performance expressed by the two H_2/H_∞ norms, and designs an optimal hybrid H_2/H_∞ robust controller. The particle swarm gravitation search algorithm based on contraction coefficient (CPSOGSA) is used to optimize the relevant weighting matrix reflecting the system H_2/H_∞ performance weight value, and output robust performance. The controller can achieve optimization under constraint conditions. The simulation results show that the proposed method has better dynamic performance for the load frequency of the microgrid under external disturbance and system internal parameter disturbance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51869007).

Key words: microgrid; small hydropower; load frequency control; robust control; CPSOGSA

0 引言

微电网是一种将分布式电源、负荷、储能装置、

变流器以及监控保护装置有机整合在一起的小型发配电系统^[1-5]。随着大规模可再生能源(风能、光伏等)在微电网中的应用, 其成为当前提高能源利用率以及节能减排的重要方法与手段^[6]。国际电工委员会(IEC)在《2010-2030 应对能源挑战白皮书》中明

确将微电网技术列为未来能源链的关键技术之一。但是微电网当中的可再生能源输出功率容易受到外界环境的影响, 负荷侧用电功率存在随机性, 这些因素都会造成微电网系统功率不平衡, 导致系统频率发生波动^[7]。频率是微电网运行的重要指标, 严重的频率波动与偏离会对接入系统的用户造成不良影响^[8]。因此, 设计一个性能优异的负荷频率控制器, 确保微电网系统频率稳定十分重要^[9-10]。

针对微电网系统负荷频率的调节, 相关研究人员做了大量的工作。PID 控制由于具有结构简单以及易于实现的特点, 成为了普遍采用的控制器。为了提高 PID 控制器的性能, 文献[11-12]采用改进的智能算法对 PID 控制的参数进行寻优操作来达到目的。因此, 可以对 PID 控制器结构进行改造来优化控制性能, 文献[13-14]提出采用分阶的 PID 控制器来对负荷频率进行控制, 也取得了不错的效果。但是对于系统参数摄动, PID 控制器不能够保证具有满意的鲁棒性能。文献[15]提出采用虚拟发电机技术, 在直流侧将电源等效为同步发电机来提高微电网稳定性。文献[16]采用滑模控制来提高微电网频率稳定性。这些文献没有在理论角度详细说明控制策略的鲁棒性能。同时, 这些微电网中主力电源采用的是柴油发电机, 通常柴油发电机模型可以作为一阶或者多阶惯性环节。这给 PID 控制器以及其他控制器的设计带来极大的便利。然而水电机组是非最小相位及多变量系统^[17], 这给带有水电机组的微电网系统负荷频率控制器的设计带来了一定的挑战。

微电网在负荷频率控制上对稳定性以及鲁棒性具有较高的要求。因此, 通过鲁棒控制理论进行其控制策略的设计, 被认为是解决微电网在环境条件和负载扰动的情况下实现良好运行的最佳方案之一^[18-19]。同时, 通过鲁棒理论也可以对原有诸如模型预测控制^[20]以及分阶控制^[21]的性能进行较大的改进。此外, 通过同时综合表征系统性能的 H_2 范数与表征鲁棒性能的 H_∞ 范数来设计具有多目标约束条件的混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器在微电网频率控制上也具有十分明显的优势^[22]。文献[23]指出对于通常情况下实现闭环系统的多目标控制要求, 对反映 H_2 和 H_∞ 性能各自权重值取同样的 50% 就能兼顾最优性能和鲁棒性能。在本文中, 通过人工智能优化算法来调整 2 个 H_2 和 H_∞ 性能权重系数, 并使表征系统外界扰动与性能指标之间的传递函数值范数最小来获得较好的鲁棒稳定性和动态性能。

本文着重于应用鲁棒控制理论来改善包含光伏、风能以及小水电的孤岛微电网的频率调节性能。结合 CPSOGSA 优化算法对相关系数进行优化。该

方法设计出来的鲁棒控制器可以很好地将微电网负荷频率波动稳定在较小的范围内。最后通过仿真实验验证了所提方法的有效性。

1 负荷频率模型的建立

如图 1 所示, 本微电网供电侧由小水电机组、风力发电机组、光伏电池板组成, 其中小水电承担供电侧大部分输出功率。本网中的风电和太阳能输出性能容易受到环境的扰动, 输出功率具有不确定性, 因此将这两部分视作系统的不确定扰动项。

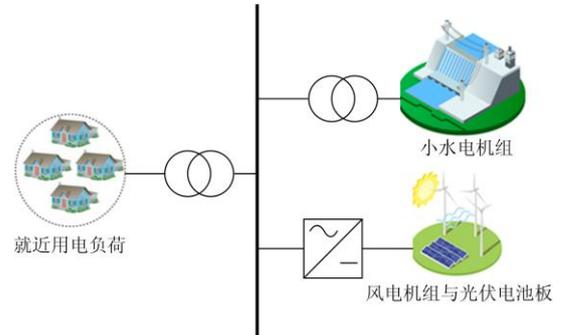


图 1 微电网系统结构图

Fig. 1 Microgrid system structure diagram

系统的分布式电源的总发电量包括小水轮发电机 P_H 、风电机组 P_W 以及光伏电池板 P_S , 其功率偏差可以表示为

$$\Delta P_{\text{Load}} = \Delta P_H + \Delta P_W + \Delta P_S \quad (1)$$

当外界扰动导致式(1)所描述的功率关系不平衡时, 需要通过设计的控制器对水轮发电机进行控制, 使得供需功率之间能够平衡, 从而系统频率恢复到平衡状态。

项目借鉴文献[24]的思想, 在系统输出变量, 即频率偏差信号的后面添加一个积分环节, 用于增强消除机组转速的稳态误差。综上所述, 本文所研究的微电网的负荷频率动态模型可以用图 2 来表示。

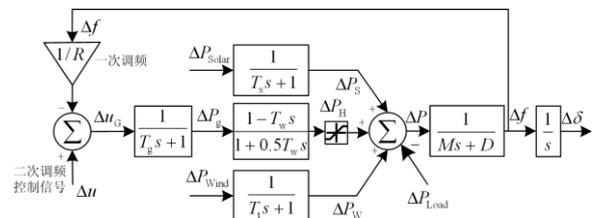


图 2 负荷频率线性模型

Fig. 2 Load frequency linear model

线性化状态空间模型是将鲁棒控制理论应用于负荷频率调节的必要条件。在本文当中, 选取系统频率 $\Delta f(t)$ 、频率积分量 $\Delta \delta(t)$ 、风电机组输出功

率 $\Delta P_w(t)$ 、光伏输出功率 $\Delta P_s(t)$ 、小水电机组输出功率 $\Delta P_H(t)$ 、执行机构输出量 $\Delta P_g(t)$ 这些易测量的量作为系统状态向量 $x(t)$ 中元素。选取输入系统的负荷功率 $\Delta P_{load}(t)$ 、风能功率 $\Delta P_{Wind}(t)$ 以及太阳能功率 $\Delta P_{Solar}(t)$ 作为扰动向量 $w(t)$ 中的元素。那么, 该

动态系统就能够以式(2)的线性状态空间形式来进行描述。系统状态空间模型的详细表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ y(t) = C_yx(t) \end{cases} \quad (2)$$

即:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}(t) \\ \Delta \dot{\delta}(t) \\ \Delta \dot{P}_w(t) \\ \Delta \dot{P}_s(t) \\ \Delta \dot{P}_H(t) \\ \Delta \dot{P}_g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & 0 & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_s} & 0 & 0 \\ \frac{2}{RT_g} & 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{T_w} & \frac{2T_g + 2T_w}{T_w T_g} \\ -\frac{1}{RT_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f(t) \\ \Delta \delta(t) \\ \Delta P_w(t) \\ \Delta P_s(t) \\ \Delta P_H(t) \\ \Delta P_g(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_w} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{Load}(t) \\ \Delta P_{Wind}(t) \\ \Delta P_{Solar}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{2}{T_g} \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ y(t) = \Delta f(t) \end{cases}$$

2 鲁棒 H_2/H_∞ 控制理论

对于如图 3 所示的控制系统, 如何设计一个控制器 K 能够同时满足 H_∞ 控制问题以及 H_2 控制问题所描述的两个要求, 这样的控制问题称作 H_2/H_∞ 控制问题。

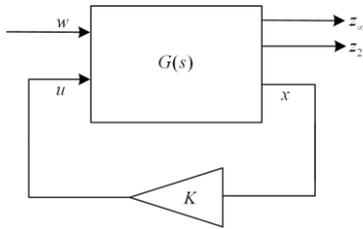


图 3 标准控制结构框图

Fig. 3 Standard control structure block diagram

对于式(2)所描述的状态空间函数, 增加两组系统的动态性能评价函数, 即可得一般鲁棒控制问题的增广被控对象。这是鲁棒控制问题的关键所在。

$$\begin{cases} z_\infty = C_1x(t) + D_{11}w(t) + D_{12}u(t) \\ z_2 = C_2x(t) + D_{21}w(t) + D_{22}u(t) \end{cases} \quad (3)$$

本文中, 动态性能评价函数中矩阵 C_1 、 C_2 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21} 、 D_{22} 的有关系数矩阵定义为

$$C_1 = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{11} = 0;$$

$$D_{12}^T = [0 \quad 0 \quad \mu_{13}];$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \mu_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{21} = D_{11};$$

$$D_{22}^T = [0 \quad 0 \quad \mu_{23}].$$

其中, 常数权重 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{13} 和 μ_{21} 、 μ_{22} 、 μ_{23} 通过智能算法进行选定, 利用最好的权重组合来引入合适的虚拟输出, 使得外界干扰对系统频率和控制偏差的影响最小, 并用虚拟输出 $\mu_{13}\Delta u(t)$ 和 $\mu_{23}\Delta u(t)$ 来满足负荷调节的实际物理约束。在权值选取过程中, 需要在多个性能要求中进行协调平衡。诸如参数 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{21} 、 μ_{22} 对被控输出端权向量设定系统性能目标, 即追踪负荷变化和抑制干扰; 而权向量 μ_{13} 、 μ_{23} 限制了对调节器负荷定点信号快速变化以及超调的控制。权重的选取方法是将各权进行综合使用, 结合智能算法对权重进行寻优操作, 完成各种最优控制的设计。在优化设计过程中, 以系统频率的误差平方积分 (ISE) 的最小化作为系统的目标函数, ISE 可以采用数学公式描述为

$$ISE = \int_0^{T_{sim}} |\Delta f(t)|^2 dt \quad (4)$$

对于式(2)以及(3)所描述的如图 3 所示的控制系统, 引入状态反馈控制器 $u(t) = Kx(t)$, 即可得一个闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + B_2K)x(t) + B_1w(t) \\ z_\infty = (C_1 + D_{12}K)x(t) + D_{11}w(t) \\ z_2 = (C_2 + D_{22}K)x(t) + D_{12}w(t) \end{cases} \quad (5)$$

令 $A_{cl} = (A + B_2 K)$; $C_{cl1} = (C_1 + D_{12} K)$; $C_{cl2} = (C_2 + D_{22} K)$; $D_{11} = 0$, 则式(5)可以写为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{cl}x(t) + B_1 w(t) \\ z_\infty = C_{cl1}x(t) + D_{11}w(t) \\ z_2 = C_{cl2}x(t) + D_{12}w(t) \end{cases} \quad (6)$$

最优 H_∞ 控制所要满足的性能指标: 当且仅当存在对称矩阵 X_∞ 时, 从 $w(t)$ 到 $z_\infty(t)$ 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

$$\begin{bmatrix} A_{cl}X_\infty + X_\infty A_{cl}^T & B_1 & X_\infty C_{cl1}^T \\ B_1^T & -I & D_{11}^T \\ C_{cl1}X_\infty & D_{11} & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

$$X_\infty > 0 \quad (8)$$

此时, H_∞ 这一范数极小化, 系统频率响应最大奇异值的峰值最小化。

最优 H_2 控制所要满足的性能指标: 如果存在两个对称矩阵 X_2 和 Q 使得从 w 到 z_2 的闭环 H_2 范数不超过 ν 。同样地采用 LMI 可以表达为

$$\begin{bmatrix} A_{cl}X_2 + X_2 A_{cl}^T & B_1 \\ B_1^T & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Q & C_{cl2}X_2 \\ X_2 C_{cl2}^T & X_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

$$\text{Trace}(Q) < \nu^2 \quad (11)$$

令 $X_\infty = X_2 = X$, 同时为了满足一般性, $\gamma = 1$, 不限制 ν , 极点配置采用默认的极左区域, 联立上式这些 LMI, 优化求解混合 H_2/H_∞ 控制所要满足的性能指标为被控对象的闭环极点全部位于左半开复平面, 同时使得综合性能最小, 即优化以下表达综合性能的函数, 其表示为

$$\Gamma(\alpha, \beta) = \min_{K(s)} \{ \alpha \|T_{wz_\infty}(s)\|_\infty^2 + \beta \|T_{wz_2}(s)\|_2^2 \} \quad (12)$$

α 和 β 分别反映 H_∞ 性能及 H_2 性能各自权重, 可通过设置不同的 α 、 β 参数值来体现对控制器性能要求的侧重方面的不同, 通常可取 α 和 β 各一半, 可以解得一般意义上的 H_2/H_∞ 鲁棒控制器^[25-26]。而本文采用优化算法在频率波动的 ISE 指标最小化过程中确定 α 和 β 的值。通过此方法求出的鲁棒控制器在提高系统阻尼的同时又兼顾了最优性能与鲁棒性。

3 智能算法 CPSOGSA

CPSOGSA 算法是一种混合优化技术, 由 CPSO

算法和 GSA 算法组成。CPSO 算法用于获得最佳候选解决方案, 而 GSA 算法则保证了全局搜索解决方案。本节将分别详细介绍 CPSO 算法、GSA 算法以及 CPSOGSA 算法。

3.1 基于收缩系数的 PSO 算法

粒子群算法 PSO 是 Kennedy 和 Eberhart 开发的优化算法^[27], 是一种基于群体智能的优化算法。算法包括两个因素, 分别称为个体最优解 p_{best} 和全局最优 g_{best} 。在第 $k+1$ 次迭代下的 PSO 算法中第 x 个粒子在第 d 维上的速度 $v_x^d(k+1)$ 和位置 $x_x^d(k+1)$ 更新如式(13)、式(14)所示。

$$v_x^d(k+1) = \omega(k) \cdot v_x^d(k) + c_1 \cdot r_{x1} \cdot (p_{best_x} - x_x^d(k)) + \quad (13)$$

$$c_2 \cdot r_{x2} \cdot (g_{best} - x_x^d(k))$$

$$x_x^d(k+1) = x_x^d(k) + v_x^d(k+1) \quad (14)$$

式中: c_1 、 c_2 为学习常数; r_{x1} 、 r_{x2} 为 $[0, 1]$ 的随机数。

为了提高 PSO 中粒子性能, 可以对 PSO 引入收缩系数, 从而得到 CPSO 优化算法。各种 CPSO 的参数如式(15)一式(17)所示。

$$\varphi_1 = 2.05, \varphi_2 = 2.05 \quad (15)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (16)$$

$$\kappa = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4}} \quad (17)$$

粒子的寻优路径由参数 φ 、 φ_1 、 φ_2 来确定, 而参数 κ 则为收缩系数。另外, 惯性因子 $\omega(k) = \kappa$, 因子 $c_1 = \kappa\varphi_1$, $c_2 = \kappa\varphi_2$ 。

在 PSO 中速度更新表达式中引入收缩系数即为 CPSO 的速度表达式, 该式用数学表达式可以描述为

$$v_x^d(k+1) = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4}} v_x^d(k) + \kappa\varphi_1 r_{x1} (p_{best_x} - x_x^d(k)) + \kappa\varphi_2 r_{x2} (g_{best} - x_x^d(k)) \quad (18)$$

3.2 引力搜索算法

引力搜索算法 GSA 是 Rashedi 等人开发的一种群体智能优化算法, 其灵感来自 Newtown 的重力和运动理论^[28]。在 GSA 中, 种群粒子相当于空间中的运动个体, 这些个体在引力的作用下彼此吸引, 其中个体质量是评价粒子好坏的标准, 质量越大的个体吸引其他粒子的作用力也越强, 对应着更好的解, 整个种群靠粒子之间的相互引力进而进行运动从而实现朝向最优区域进行搜索。GSA 的操作步骤简要总结如下。

GSA 优化过程的第一步是对种群的初始化, 接

着计算种群中某两个个体 x 、 y 之间的引力大小 f_{xy} ，计算可以通过式(19)完成。

$$f_{xy} = G(k) \frac{m_{px}(k)m_{ay}(k)}{R_{xy}(k) + \varepsilon} (x_x^d(k) - x_y^d(k)) \quad (19)$$

式中： $m_{ay}(k)$ 和 $m_{px}(k)$ 分别是粒子 y 和粒子 x 的质量； ε 是一个极小的常数； $R_{xy}(k)$ 是粒子 y 和粒子 x 之间的欧式距离； $G(k)$ 是 k 时刻的万有引力常数。

对 $G(k)$ 的定义为

$$G(k) = G_0 e^{(-a \frac{k}{MI})} \quad (20)$$

其中： MI 为进化参数； G_0 为初始时刻的引力常数。

在 k 时刻，粒子 x 在 d 维上受到来自其他粒子的合力大小为

$$f_x^d(k) = \sum_{y=1, y \neq x}^m \gamma_y F_{xy} \quad (21)$$

式中， γ_y 为[0, 1]的随机数。

根据 Newton 运动定律，定义在 k 时刻粒子 x 在 d 维上的加速度公式为

$$\sigma_x^d(k) = \frac{F_x^d(k)}{m_{ix}(k)} \quad (22)$$

在进化过程中，粒子的速度和位置的更新方式按照式(23)、式(24)进行。

$$v_x^d(k+1) = \gamma_y v_x^d(k) + \sigma_x^d(k) \quad (23)$$

$$x_x^d(k+1) = x_x^d(k) + v_x^d(k+1) \quad (24)$$

粒子的质量与优化过程中求得的适应度值大小有关，质量越大的粒子越接近最优，并且该粒子与其他粒子的作用力相应地更大，但会使得粒子的移动速度变化。粒子质量的计算公式为

$$m_x(k) = \frac{fit_x - worst(k)}{best(k) - worst(k)} \quad (25)$$

$$M_x(k) = \frac{m_x(k)}{\sum_{y=1}^m m_x(k)} \quad (26)$$

式中： fit_x 为粒子 x 的适应度值； $worst(k)$ 为质量最小的适应度值； $best(k)$ 为质量最大的适应度值。

在计算个体所受的引力合力时，算法考虑质量较大的个体产生的引力。引力较大时，或者有质量比较大的个体，或者两个个体之间的距离较小。质量较大的个体要占据较优的位置，因为这代表了较好的解。从以上分析可知，算法对来自质量较大的个体引力，可以消除距离较小而造成引力较大的影

响，使得其他个体向质量较大的个体方向移动，完成优化的目标^[29]。

3.3 改进粒子群引力搜索算法(CPSOGSA)

文献[30]将粒子群算法PSO与引力搜索算法相结合提出CPSOGSA算法，通过在GSA算法中引入PSO能够显著改善算法的寻优性能，提高算法的搜索效率。同样地，CPSOGSA结合了CPSO的快速收敛以及GSA的多样性等优点。该算法可以表示为

$$V_x^d(k+1) = \left(\frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4}} \right) V_x^d(k) + \kappa \varphi_1 r_{x1} (\sigma_x^d(k) - x_x^d(k)) + \kappa \varphi_2 r_{x2} (g_{best} - x_x^d(k)) \quad (27)$$

式中： $V_x^d(k)$ 表示群体粒子的速度； $\sigma_x^d(k)$ 为粒子的加速度； g_{best} 表示种群中最佳个体。

粒子 $X_x^d(k)$ 位置可以按照公式(28)来进行更新。

$$X_x^d(k+1) = X_x^d(k) + V_x^d(k+1) \quad (28)$$

4 性能验证

4.1 控制器的求解

利用 CPSOGSA 对 H_2/H_∞ 鲁棒控制器的参数进行优化设计，其过程如图 4 所示。优化过程大致可以表示为：CPSOGSA 产生个体群，将该个体群依次赋值给矩阵 C_1 、 C_2 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21} 、 D_{22} 中的待定系数以及 α 和 β 两个权重系数，再计算相应的 LMI 解得鲁棒控制器的状态反馈系数 K ，并在当前计算所得的反馈系数 K 所形成的闭环模型中引入各种波动后得到对应的控制性能指标，该性能指标作为 CPSOGSA 中该个体的适应值，最后判断是否退出算法。

采用 CPSOGSA 优化算法对控制器寻优操作，寻优过程以公式(5)所描述的函数的最小化为优化目标，优化迭代次数为 100，迭代过程如图 5 所示。从图 5 中可以看出，尽管迭代次数设置为 100 次，但是 CPSOGSA 算法大约在第 20 次左右就接近收敛了。PSOGSA、GSA 算法则大约在第 80、30 次左右才收敛，而且 GSA 算法陷入了局部最优。这说明了 GSA 进行优化后能够提高该算法在本优化过程中的性能。在图中不难发现，传统优化算法 GSA 和 PSOGSA 在优化鲁棒控制器过程中都陷入了局部最优。因此，采用 CPSOGSA 算法在优化本问题过程中具有较高的工作效率以及较为精确的计算结果。

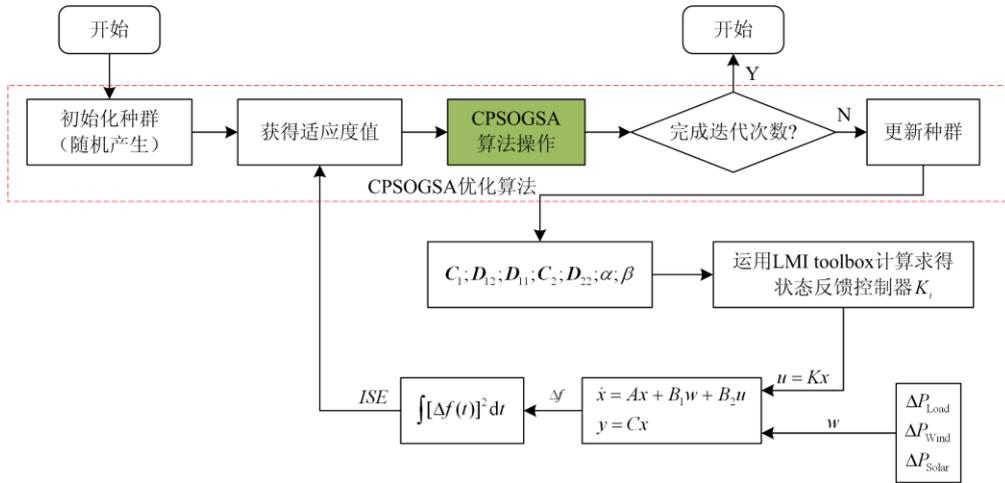


图 4 优化流程图

Fig. 4 Optimization flow chart

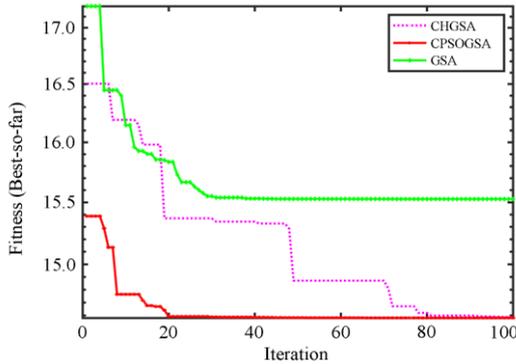


图 5 优化迭代过程

Fig. 5 Optimize the iterative process

求得的最优系数矩阵为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 18.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 45.78 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{11} = 0; \quad D_{12}^T = [0 \quad 0 \quad 14.57];$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0.009 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50.00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{22}^T = [0 \quad 0 \quad 48.31]; \quad \alpha = 35.41; \quad \beta = 1.127.$$

结合该系统的状态空间方程, 通过求解相应性能的线性矩阵不等式 LMI 可以得到 H_2/H_∞ 鲁棒控制器的状态反馈为

$$K = -[k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6] \quad (29)$$

式中: $k_1 = 6.884$; $k_2 = 6.384$; $k_3 = 17.24$; $k_4 = 13.06$; $k_5 = 7.062$; $k_6 = 15.03$ 。

为了对比验证所提鲁棒控制器的性能, 同样用

优化算法 CPSOGSA 对 PID 控制器寻优操作。

4.2 仿真分析

基于 Matlab/Simulink, 搭建该发电系统的负荷频率模型, 对所设计的鲁棒控制器进行仿真验证。本节介绍了存在风能 ΔP_{Wind} 、太阳能 ΔP_{Solar} 以及负荷 ΔP_{Load} 单独变化以及三者同时变化时作为扰动的微电网频率时域仿真。在仿真中比较了本文中所提的优化 H_2/H_∞ 控制以及以同样方法优化得到 PID 控制器两者的性能。对于给定的系统, 应用本文所提的 H_2/H_∞ 控制策略可以最佳地平衡基准跟踪和干扰抑制两个度量, 保持所设计的发电系统运行的最优。在本节当中频率响应仿真执行了 5 个仿真测试工况。

4.2.1 风能波动工况

在本工况中考虑到风能 ΔP_{Wind} 的阶跃变化对本发电系统的频率的影响。

图 6 显示了风力阶跃变化, 图 7 显示了在此工况下系统在各控制器作用下的频率响应输出。

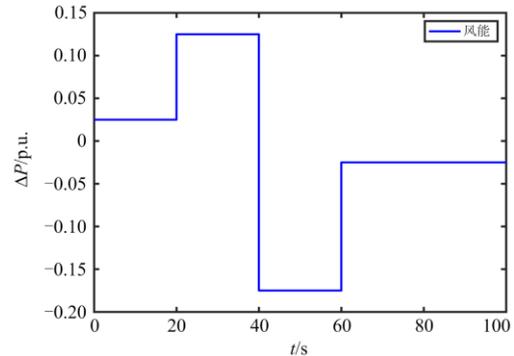


图 6 风能功率阶跃波动曲线

Fig. 6 Wind power step fluctuation curve

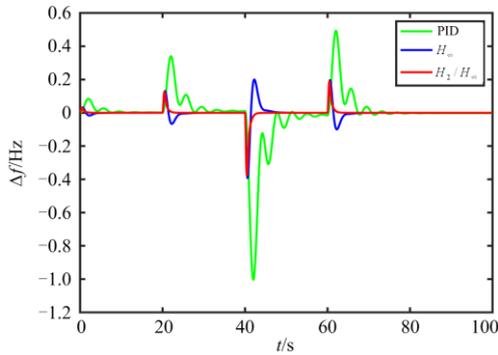


图 7 系统频率响应曲线

Fig. 7 System frequency response curve

4.2.2 负荷波动工况

在此工况中考虑外界负荷功率 ΔP_{Load} 多级阶跃扰动对该发电系统的影响。如图 8 所示， ΔP_{Load} 在第 0 s、20 s、40 s 以及 70 s 发生阶跃变化。图 9 比较了三个最优控制器下的微电网频率响应。

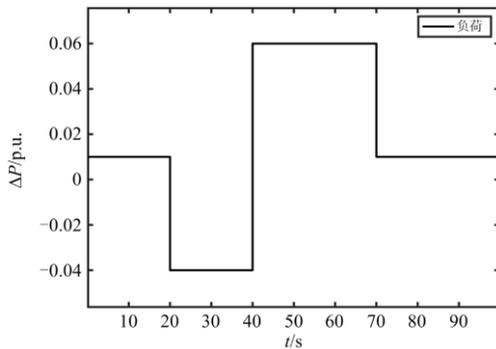


图 8 外界负荷变化曲线

Fig. 8 External load power change curve

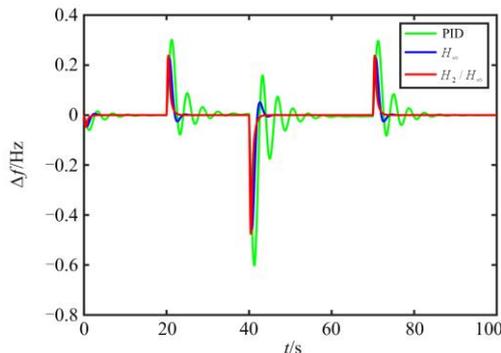


图 9 该工况下的系统频率响应曲线

Fig. 9 System frequency response curve under the condition

4.2.3 太阳能波动工况

工况 3 考虑太阳能 ΔP_{Solar} 作为另一项微电网运行过程的响应。如图 10 所示，在 1 s、10 s、20 s、

30 s、40 s 和 50 s 处应用了多步递减阶跃来反映太阳能的功率变化。图 11 表示所设计控制器的微电网频率时域响应曲线。

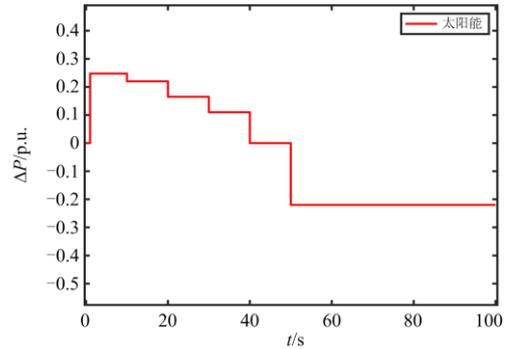


图 10 太阳能功率变化曲线

Fig. 10 Solar power change curve

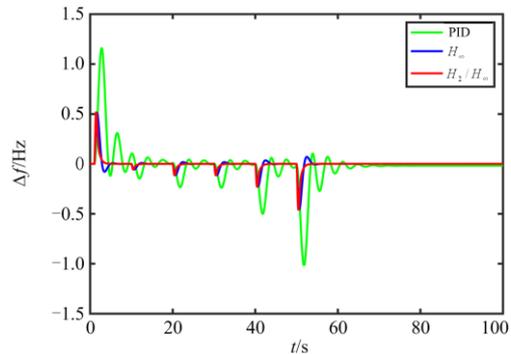


图 11 该工况下的系统频率响应曲线

Fig. 11 System frequency response curve under the condition

4.2.4 同时波动工况

通过上面三个存在单一扰动的工况的仿真可知，本文所提的控制器具有较好的控制性能。在最后一个仿真工况当中考虑风能 ΔP_{Wind} 、太阳能 ΔP_{Solar} 以及外界负荷 ΔP_{Load} 同时波动下的微电网系统频率响应情况。图 12 显示了风能、太阳辐射和负荷的混合变化。图 13 显示了该工况微电网频率响应。

从所有的频率响应图中可知，本文提出的控制器能够更好地平稳微电网频率波动。同时从图中可知，系统在鲁棒控制器的调节下能够以更短的时间恢复到额定频率。从图 13 中第 40 s 这部分可知，本文所提出的鲁棒控制器能够增加系统的阻尼，减少系统频率的振荡次数。此外，从图 14 中可看出，CPSOGSA 与同类的 PSOGSA、GSA 算法进行对比，其优势不仅体现了其迭代收敛快，而且在优化效果方面仍具有优势。

从以上的仿真结果来看， H_2/H_∞ 控制器比 PID 控制器具有更好的性能。通过采用优化算法不仅要

对 z_2 、 z_∞ 性能输出的加权矩阵中的参数进行优化, 也要对混合综合性能的权重参数进行优化。

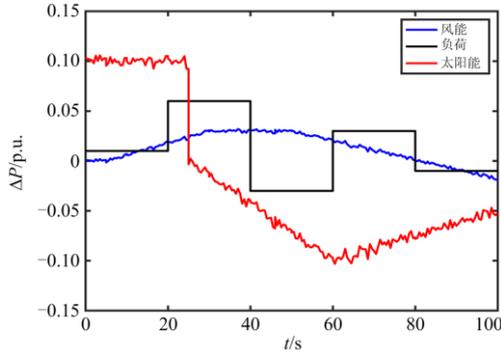


图 12 外界功率的变化曲线

Fig. 12 Change curve of external power

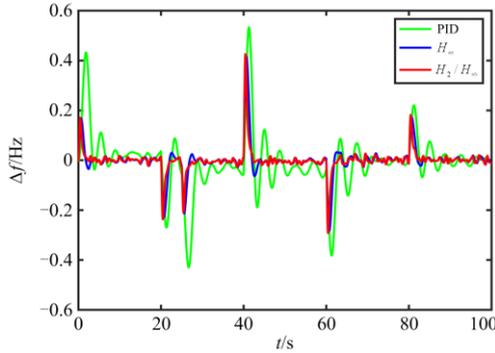


图 13 该工况下的系统频率响应曲线

Fig. 13 System frequency response curve under the condition

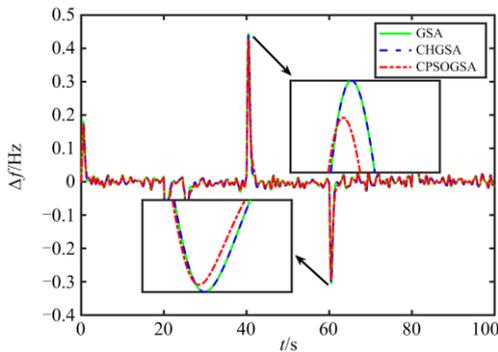


图 14 不同算法下的频率响应

Fig. 14 Frequency response under different algorithms

4.2.5 内部参数扰动工况

通过改变运行负载条件和系统参数来说明所设计控制器的鲁棒性能。

微电网的一次调频调节常数 R 以及微电网的总惯量 M 对系统的动态稳定性有一定的影响。频率偏差随着系统参数的变化而不同。从图 15、图 16

中可知: 当 M 变化量最大达到 50% 时, 区域的最大偏差频率仍然低于 0.2 Hz; R 变化量在 10%~50% 之间时对系统频率偏差基本没有影响。从这部分的结果可以得出结论, 当某些系统参数发生变化时, 本文所提出的 H_2/H_∞ 控制器具有鲁棒性, 可以实现对本文所提微电网负荷频率的稳定控制。

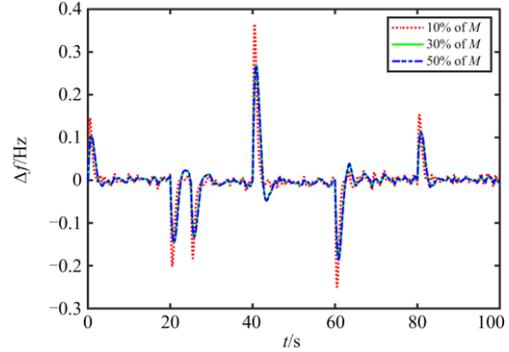


图 15 M 变化下的灵敏度分析

Fig. 15 Sensitivity analysis of the change of M

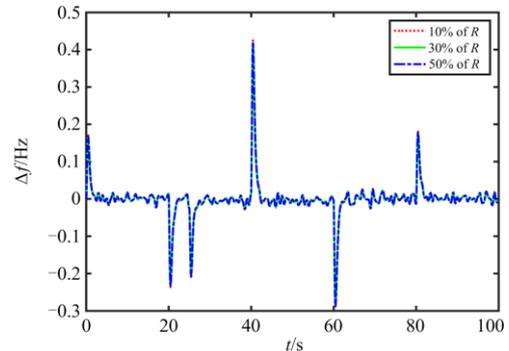


图 16 R 变化下的灵敏度分析

Fig. 16 Sensitivity analysis of the change of R

5 结论

本文以光伏、风电以及小水电多能源发电的微电网作为研究对象, 研究了在光伏、风电参与下的小水电机组二次调频控制。在综合考虑 H_2/H_∞ 范数表征下的 H_2 系统性能指标和 H_∞ 范数表征的鲁棒性能指标下, 设计混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器。采用 CPSOGSA 算法对控制器的加权系数矩阵以及反映范数权重的参数矩阵进行选取, 使控制器在多目标约束的条件下达到最优。通过仿真实验, 验证了所提出方法在满足系统稳定性和鲁棒性能的基础上, 具有较好的控制输出性能。未来将对模型的非线性特性以及多区域微电网上做更深入的研究。

参考文献

- [1] 于芑, 刘兴华, 孙树敏, 等. 高可再生能源渗透率海岛

- 微电网运行控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 779-788.
- YU Peng, LIU Xinghua, SUN Shumin, et al. Operation control of island microgrid with high renewable energy penetration rate[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 779-788.
- [2] 葛健, 杨晨, 杨景刚, 等. 基于通用电能路由器的微电网架构及其控制方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 123-130.
- GE Jian, YANG Chen, YANG Jinggang, et al. A micro-grid architecture based on universal energy router unit and its control method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 123-130.
- [3] 陈龙超, 范宏, 郭翔, 等. 含 EV 充电站的园区微电网孤岛运行可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 100-108.
- CHEN Longchao, FAN Hong, GUO Xiang, et al. Reliability evaluation of park microgrid with EV charging station running in islanding state[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 100-108.
- [4] 帅轩越, 王秀丽, 黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 382-392.
- SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, HUANG Jing. Optimal configuration of shared energy storage capacity under multiple regional integrated energy systems interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 382-392.
- [5] 卢操, 管霖, 陈恒安, 等. 考虑储能调度的可再生能源独立微电网电源规划[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 84-91.
- LU Cao, GUAN Lin, CHEN Heng'an, et al. Generation planning for renewable energy isolated micro-grid considering energy storage dispatching[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 84-91.
- [6] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview of microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [7] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
- LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Research review of power system frequency regulation under high wind power penetration rate[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [8] BEVRANI H. Robust power system frequency control [M]. Springer, 2009.
- [9] PILLAI A G, SAMUEL E R, UNNIKRISHNAN A. Optimal load frequency control through combined state and control gain estimation for noisy measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 248-259.
- [10] 姚建华, 胡晟, 王冠, 等. 基于强化学习的孤岛微电网多源协调频率控制方法[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 69-75.
- YAO Jianhua, HU Sheng, WANG Guan, et al. Multi-source coordinated frequency control method based on reinforcement learning for island microgrid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 69-75.
- [11] JALALI N, RAZMI H, DOAGOU-MOJARRAD H. Optimized fuzzy self-tuning PID controller design based on Tribe-DE optimization algorithm and rule weight adjustment method for load frequency control of interconnected multi-area power systems[J]. Applied Soft Computing, 2020, 93.
- [12] VEDIK B, KUMAR R, DESHMUKH R, et al. Renewable energy-based load frequency stabilization of interconnected power systems using quasi-oppositional dragonfly algorithm[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, 32(1): 227-243.
- [13] GUHA D, 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).
- [14] GUHA D, ROY P K, BANERJEE S. Adaptive symbiotic organism search algorithm optimized 3DOF-PID controller for load frequency control of hybrid power system[C] // 2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, May 6-9, 2009, Chonburi, Thailand.
- [15] 路小娟, 段江涛. 一种基于 VSG 技术的混合微电网控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 243-250.
- LU Xiaojuan, DUAN Jiangtao. A hybrid microgrid control strategy based on VSG technology[J]. Acta Solar Energy, 2021, 42(3): 243-250.
- [16] 郭欢, 王锡淮. 改进多区域互联电力系统负荷频率滑模控制[J]. 控制工程, 2021, 28(5): 944-948.
- GUO Huan, WANG Xihuai. Improved load frequency sliding mode control of multi-area interconnected power systems[J]. Control Engineering, 2021, 28(5): 944-948.
- [17] ZOU Y, QIAN J, ZENG Y, et al. Eigen-structure

- assignment-based differential evolution algorithm for TS fuzzy control tuning applied to water-turbine governing system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39322-39332.
- [18] GUERRERO J M, LOH P C, LEE T-L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2012, 60(4): 1263-1270.
- [19] 王晓兰, 侯天玉, 宫玮丽, 等. 基于 Tube 不变集的直流微电网鲁棒模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 9-17.
WANG Xiaolan, HOU Tianyu, GONG Weili, et al. Robust model predictive control of a DC microgrid based on a tube invariant set[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 9-17.
- [20] 张虹, 杨杨, 王迎丽, 等. 基于 PDNN 的含风电互联电网负荷频率 Tube-RMPC 设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 137-146.
ZHANG Hong, YANG Yang, WANG Yingli, et al. Design of tube-RMPC for load frequency of wind power interconnected grid based on PDNN[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 137-146.
- [21] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/superconducting hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [22] 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 to improve microgrid load frequency hybrid H_2/H_∞ robust control[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2019, 23(11): 118-126.
- [23] 汤华, 王渝红, 魏亮, 等. HVDC 孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1066-1072.
TANG Hua, WANG Yuhong, WEI Liang, et al. Design of additional frequency robust controller for HVDC island operation[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1066-1072.
- [24] 寇攀高, 周建中, 张孝远, 等. 基于滑模变结构控制的水轮机调节系统[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 157-162.
KOU Pangao, ZHOU Jianzhong, ZHANG Xiaoyuan, et al. Hydraulic turbine governing system based on sliding mode variable structure control[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 157-162.
- [25] PAL B C, COONICK A H, JAIMOUKHA I M, et al. A linear matrix inequality approach to robust damping control design in power systems with superconducting magnetic energy storage device[J]. IEEE Transactions on power systems, 2000, 15(1): 356-362.
- [26] SCHERER C, GAHINET P, CHILALI M. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(7): 896-911.
- [27] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia.
- [28] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: a gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [29] 毕晓君, 刁鹏飞, 王艳娇, 等. 求解动态优化问题的改进多种群引力搜索算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3325-3331.
BI Xiaojun, DIAO Pengfei, WANG Yanjiao, et al. Improved multi-group gravitational search algorithm for solving dynamic optimization problems[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2015, 46(9): 3325-3331.
- [30] 田壁源, 刘琪, 张新燕, 等. 基于 APSO-GSA 和相关向量机的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 107-114.
TIAN Biyuan, LIU Qi, ZHANG Xinyan, et al. Short term wind power prediction based on APSO-GSA and correlation vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 107-114.

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-12-11
作者简介:

邹屹东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力机组稳定与控制; E-mail: 842671826@qq.com

钱晶(1967—), 女, 通信作者, 教授, 研究方向为水轮发电机组稳定与控制、多能互补模型下水电机组的协同控制; E-mail: qj0117@163.com

张文英(1976—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: kmzwyang@sina.com

(编辑 葛艳娜)