

基于 SSA 的微电网负荷频率鲁棒 H_2/H_∞ 控制研究*

曹飞¹, 钱晶^{1,2}, 曾云^{1,2}, 李祥¹, 李立胜¹

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南省高校水力机械智能测试工程研究中心, 云南 昆明 650093)

摘要: 针对微电网中由可再生能源出力波动和负荷变化引起的频率振荡问题, 提出了一种混合 H_2/H_∞ 鲁棒策略的负荷频率控制器。首先建立了具有功率扰动信号的风光柴微电网负荷频率控制模型。然后基于鲁棒 H_∞ 理论设计了鲁棒 H_2/H_∞ 控制器。在控制器的设计中, 使用了樽海鞘群算法 (SSA) 对有关加权矩阵参数和范数权重进行寻优求解, 使控制器的调整性能达到最好。最后仿真结果表明, 相比于传统的鲁棒 H_∞ 控制和 PID 控制, 提出的 H_2/H_∞ 鲁棒控制器在微电网的外界功率干扰以及系统的参数扰动工况下均有较好的控制效果。

关键词: 微电网; 负荷频率控制; 鲁棒控制; 樽海鞘群算法 (SSA)

中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0071-07

doi: 10.12177/emca.2023.058

Research on Load Frequency Robust H_2/H_∞ Control of Microgrid Based on SSA*

CAO Fei¹, QIAN Jing^{1,2}, ZENG Yun^{1,2}, LI Xiang¹, LI Lisheng¹

(1. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Provincial University Hydraulic Machinery Intelligent Testing Engineering Research Center, Kunming 650093, China)

Abstract: Aiming at the problem of frequency oscillation caused by the output fluctuation and load variation of renewable energy in the microgrid, a load frequency controller with hybrid H_2/H_∞ robust control strategy is proposed. Firstly, a load frequency control model of wind-photovoltaic-diesel microgrid with power disturbance signal is established. Then a robust H_2/H_∞ controller is designed based on robust H_∞ theory. In the design of the controller, the salp swarm algorithm (SSA) is used to optimize the relevant weighting matrix parameters and norm weights to achieve the best adjustment performance of the controller. Finally, the simulation results show that compared with the traditional robust H_∞ control and PID control, the proposed H_2/H_∞ robust controller has better control performance under the external power disturbance of the microgrid and the parameter disturbance of the system.

Key words: microgrid; load frequency control; robust control; salp swarm algorithm (SSA)

收稿日期: 2022-12-30; 收到修改稿日期: 2023-02-21

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (52269020; 52079059)

作者简介: 曹飞 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力机组稳定与控制。

钱晶 (1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为发电机组的稳定控制及其对电网的影响。(通信作者)

0 引言

利用风、光等可再生能源进行分布式发电是解决能源问题的重要方案^[1-3]。在远离大电网的乡村和边远地区,大电网供电的费用很高,因此,新能源系统以及其他分布式电力和负荷构成的微电网已被大量开发与使用^[4]。但是由于可再生能源输出功率的不稳定性以及负荷侧用电功率的随机性,微电网系统容易发生功率供需失衡问题,从而导致微电网频率波动,严重影响区域供电质量^[5-7]。

为了保持微电网频率稳定,有关专家进行了大量的研究。文献[8-9]基于PID控制原理设计了微电网频率控制器,该控制器原理简单,易于实现,但是其稳定性和鲁棒性不够好。文献[10]采用低频减载策略控制微电网的频率,但是其暂态稳定性易受限。文献[11]利用模糊控制方法设计了一种频率控制器,该方法对系统参数扰动具有较好的鲁棒性,但不能保证控制精度。鲁棒控制是一种实用性较强的现代控制方法,其可以确保交直流混合微电网的额定性能并具有良好的鲁棒性^[12]。文献[13]针对微电网功率的不确定性,提出了基于鲁棒 H_∞ 方法的负荷频率控制器,有效地抑制了外界功率干扰引起的频率波动。文献[14]设计了一种鲁棒 H_2/H_∞ 控制器对柴油机进行有功调整,以补偿因风力、负载变化造成的电力偏差,从而实现微电网的频率控制。

现有的大部分鲁棒控制均是以状态反馈为基础的,其需要获取完整的状态信息,但实际应用中往往难以实现。在一些状态方程中,部分状态矢量无法测量,而输出量往往是完整的^[15]。传统的鲁棒输出反馈控制器采用加权函数求解,这种方法比较繁杂,运算速度慢。因此,本文采用了求解更为快捷的LMI工具进行鲁棒 H_2/H_∞ 输出反馈控制器的求解^[16]。为了使控制器具有更好的控制性能,引入了收敛速度快、鲁棒性强的樽海鞘群算法(SSA)对鲁棒控制器进行参数寻优。最后通过仿真验证了所提方法的合理性。

1 微电网负荷频率模型的建立

图1为本文研究的风光柴独立微电网示意图。其主体由光伏电池板(PV)、柴油发电机组(DEG)、风力发电机组(WTG)和用电负荷(Load)

组成。微电网中的电源及负荷通过变压器、变流器连接到交流母线。

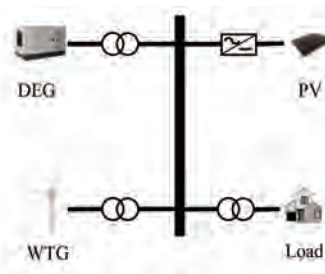


图1 风光柴独立微电网

在微电网中,DEG为主要调频电源。由于WTG和PV出力易受天气影响,这部分功率可视为区域系统中的扰动项。为了维持风光柴微电网系统频率的稳定,系统的总功率变化需满足下式:

$$\Delta P_{Load} = \Delta P_{DEG} + \Delta P_{WTG} + \Delta P_{PV} \quad (1)$$

式中: ΔP_{Load} 为负载功率变化; ΔP_{DEG} 为柴油发电机组输出功率变化; ΔP_{WTG} 为风电机组输出功率变化; ΔP_{PV} 为光伏电池的输出功率变化。

当外部扰动导致式(1)左右不相等时,需要通过设计的频率控制器协调DEG的控制,改变其功率输出使系统频率恢复到平衡状态。在系统输出参数,即频率偏移信号之后增加了一个积分环节,以消除机组转速的稳态误差^[17]。构建的微电网负荷频率调节线性模型如图2所示。图2中, R 为微电网一次调频下垂系数;负荷频率控制器即为下文中的鲁棒 H_2/H_∞ 控制器 $K(s)$; T_g 为柴油机调速器时间常数; T_d 为原动机时间常数; T_{PV} 为光伏发电时间常数; T_{WTG} 为风机时间常数; M 为系统的惯性常数; D 为系统阻尼常数; Δu 为施加在柴油发电机组上的控制信号; ΔX_g 为调速器输出量; Δf 为系统频率偏差; $\Delta \delta$ 为频率偏差积分量; ΔS_{WTG} 为风能功率; ΔS_{PV} 为太阳能功率。

图2所示的动态系统可以使用线性状态空间方程形式来进行描述。详细表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ y = C_y x + D_{y1} w + D_{y2} u \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为系统状态变量; u 为控制输入变量; w 为扰动变量; y 为系统输出; 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。

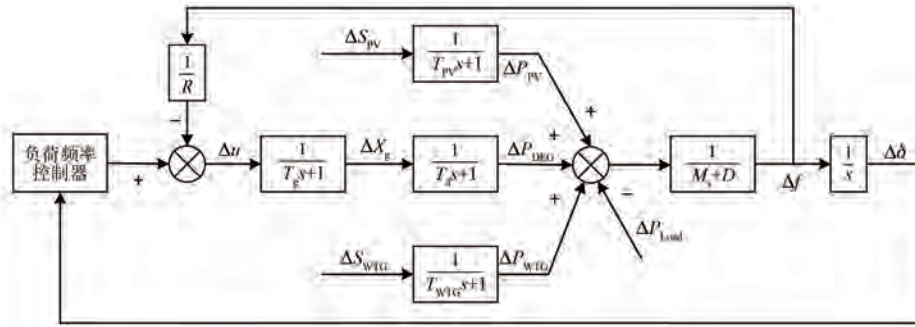


图2 微电网负荷频率调节线性模型

其中: $x = [\Delta\delta \ \Delta f \ \Delta P_{DEG} \ \Delta P_{WTG} \ \Delta P_{PV} \ \Delta X_g]^T$;

$w = [\Delta S_{PV} \ \Delta P_{Load} \ \Delta S_{WTG}]^T$;

$A =$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_d} & 0 & 0 & \frac{1}{T_d} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{WTG}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{PV}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_g R} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{WTG}} \\ \frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_g} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$C_y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $D_{y1} = D_{y2} = [0]$ 。

2 混合鲁棒 H₂/H_∞ 控制器设计

2.1 鲁棒 H₂/H_∞ 控制理论

图3为 H₂/H_∞ 控制问题模型。在此控制系统中,需要设计一种控制器 K(s),使闭环系统

P(s) 渐进稳定。通过最小化控制回路中从 w 到 z₂/z_∞ 的闭环均方根增益实现鲁棒 H₂/H_∞ 控制。分别用 T₂(s) 和 T_∞(s) 表示从 w 到 z₂ 和 z_∞ 的闭环系统传递函数。设计输出反馈控制器 K(s) 需要满足两个目标条件:(1)将 T_∞(s) 的 H_∞ 范数保持在某个指定值 γ>0 以下;(2)将 T₂(s) 的 H₂ 范数维持在某个规定值 v>0 以下。

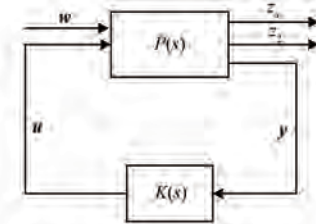


图3 H₂/H_∞ 控制问题模型

2.2 鲁棒 H₂/H_∞ 控制器设计

针对式(2)描述的状态空间函数,增加两组系统的动态性能评价函数 Z₂/Z_∞,即可得到一般鲁棒控制问题的增广被控对象。对动态性能评价信号定义如下:

$$\begin{cases} Z_\infty = C_1 x + C_{11} w + C_{12} u \\ Z_2 = C_2 x + C_{21} w + C_{22} u \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_1 = \text{diag}[q_{11} \ q_{12} \ q_{13} \ 0 \ 0 \ 0]$; $C_2 = \text{diag}[q_{21} \ q_{22} \ q_{23} \ 0 \ 0 \ 0]$; $C_{11} = C_{21} = [0]$; $C_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \mu_1]^T$; $C_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \mu_2]^T$ 。

$C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ 均为加权矩阵; $q_{ij} > 0 (i=1,2; j=1,2,3)$ 和 $\mu_i > 0 (i=1,2)$ 为加权系数。采用不同的权重系数,可以获得不同的系统稳定性和调频精度。根据式(2)和式(3),可以得到混合 H₂/H_∞ 控制原理的增广受控目标为

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \\ C_y & D_{y1} & D_{y2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以通过相应的增广受控目标 P 求解控制器 $K(s)$ 。在 MATLAB 中, LMI 工具包为 H_2/H_∞ 控制问题提供了一个 `hinfmix` 函数, 其可以用来求解 H_2/H_∞ 多目标输出反馈控制器 $K(s)$ 。

针对式(3)以及图3所示的控制系统, 引入输出反馈控制器 $K(s)$ 使 $u = K(s)y$, 得到相应的闭环系统状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{cl} = A_{cl}x_{cl} + B_{cl}w \\ z_\infty = C_{cl1}x_{cl} + D_{cl1}w \\ z_2 = C_{cl2}x_{cl} + D_{cl2}w \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A_{cl} = A + B_2KC_y$; $B_{cl} = B_1$; $x_{cl} = x$; $C_{cl1} = C_1 + D_{12}KC_y$; $D_{cl1} = D_{11}$; $C_{cl2} = C_2 + D_{22}KC_y$; $D_{cl2} = D_{21}$; $K = K(s)$ 。

控制器 $K(s)$ 能够对所有的参数扰动和外界扰动进行稳定, 从而达到闭环系统的性能指标, 如下所示。

(1) 最优 H_∞ 控制的性能指标。从 w 到 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 X_∞ 使:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} A_{cl}X_\infty + X_\infty A_{cl}^T & B_{cl} & X_\infty C_{cl1}^T \\ B_{cl}^T & -I & D_{cl1}^T \\ C_{cl1}X_\infty & D_{cl1} & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \\ X_\infty > 0 \end{cases} \quad (6)$$

(2) 最优 H_2 控制的性能指标。从 w 到 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 $D_{cl2} = 0$ 且存在两个对称矩阵 X_2 和 Q 使:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} A_{cl}X_2 + X_2 A_{cl}^T & B_{cl} \\ B_{cl}^T & -I \end{pmatrix} < 0 \\ \begin{pmatrix} Q & C_{cl2}X_2 \\ X_2 C_{cl2}^T & X_2 \end{pmatrix} > 0 \\ \text{Trace}(Q) < \nu^2 \end{cases} \quad (7)$$

设定一个单一的 Lyapunov 矩阵 X 使 $X_\infty = X_2 = X$ 。结合上述 LMI 方程, 得到了 H_2/H_∞ 混合控制系统的性能目标, 即被控目标闭环极点均在

左半开复数域, 同时使综合性能最小。优化以下函数来表示整体性能, 其表达式为

$$f(\alpha, \beta) = \min_{K(s)} \{ \alpha \| T_\infty \|_\infty^2 + \beta \| T_2 \|_2^2 \} \quad (8)$$

式中: α 和 β 分别反映 H_∞ 性能及 H_2 性能各自权重, 通过配置不同的 α 和 β , 可以得到不同性能的鲁棒控制器。

传统的 H_2/H_∞ 控制器通过配置 $\alpha = 0.5$ 和 $\beta = 0.5$ 获得。本文使用一种智能优化算法来确定微电网频率波动下的 α 和 β 的值。用此方法设计的鲁棒控制器能够在兼顾最佳性能与鲁棒性的前提下, 提高系统的阻尼性。在优化设计过程中, 以系统频率的误差平方积分 (ISE) 的最小化作为算法寻优目标函数, ISE 采用数学公式描述为

$$ISE = \int_0^\infty |\Delta f|^2 dt \quad (9)$$

3 基于 SSA 的参数选取

3.1 SSA 描述

SSA 是 Mirjalili 等^[18] 在 2017 年提出的一种启发式的群内智能搜寻方法。SSA 通过对樽海鞘种群的捕食和运动行为进行仿真, 得到最优值。樽海鞘群中有领导者和追随者, 领导者在樽海鞘群的最前方, 带领着全体成员, 追随者们则跟随者首领, 整个队伍朝着食物的方向移动。

假定樽海鞘群在 j 维搜索中的族群大小为 Q , 那么其位置信息 S 可以用 $j * Q$ 维矩阵来描述。樽海鞘群的首领负责搜寻空间中的食物来源, 带领族群迁移, 其位置的更新公式如下:

$$S_{j,i} = \begin{cases} F_j + c_1(u_j - l_j)c_2 + c_1l_j & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1(u_j - l_j)c_2 + c_1l_j & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $c_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{t_{\max}}\right)}$; $S_{j,i}$ 为第 j 次维度上的首个樽海鞘领袖位置; F_j 为第 j 维食物源的位置; u_j, l_j 分别为第 j 维搜索空间的上、下界; c_1, c_2, c_3 为随机数, $c_1, c_2 \in [0, 1]$ 。

利用收敛因子 c_1 来均衡求解过程的局部和全局搜索能力, 当 $c_1 > 1$ 时, 算法进行全局搜索; 当 $c_1 < 1$ 时, 算法进行局部优化, 从而得到最优的结果。

樽海鞘跟随者呈链状依次跟随领导者移动, 按下列公式进行位置更新:

$$S_{j,i} = \frac{1}{2}(S_{j,i} + S_{j,i-1}) \quad (11)$$

式中: $S_{j,i}(i \geq 2)$ 为第 j 维中第 i 个跟随者的位置; $S_{j,i-1}$ 为第 j 维中第 $i-1$ 个跟随者的位置。

在跟随者位置的变化过程中,引入了线性递减的惯量权重 W ,加速了 SSA 的收敛性, W 表达式如下:

$$W = 0.9 - \frac{(0.9 - 0.2) * (l - 1)}{l_{\max}} \quad (12)$$

式中: l 为当前迭代次数; l_{\max} 为算法最大迭代次数,本文中取 $l_{\max} = 100$ 。

此时的跟随者位置更新数学模型可以描述为

$$S_{j,i} = \frac{1}{2}(WS_{j,i} + S_{j,i-1}) \quad (13)$$

3.2 SSA 优化 H_2/H_∞ 控制器的求解

本文利用 SSA 优化整定线性状态空间模型的 H_2/H_∞ 输出反馈鲁棒控制器 $K(s)$,具体步骤如下。

(1) 由 MATLAB 产生樽海鞘群,个体依次赋值给 $q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{21}, q_{22}, q_{23}, \mu_1, \mu_2, \alpha, \beta$,形成增广矩阵 P_i ;

(2) 将 P_i 输入 MATLAB 内的线性矩阵不等式工具箱得到输出反馈控制器 $K_i(s)$;

(3) 更新系统二次调频信号 $u = K_i(s)y$;

(4) 在固定扰动下运行代入 $K_i(s)$ 的微电网系统频率调节线性模型,输出对应的系统寻优目标函数 $\int_0^\infty |\Delta f|^2 dt$;

(5) 判断算法是否达到最大迭代次数 $l_{\max} = 100$ 且 $K_i(s)$ 整定为性能指标最小时所对应的 $K(s)$, 是则结束,否则更新樽海鞘群,回到步骤(2)继续循环。

4 仿真实验

4.1 控制器的求解

本文利用 MATLAB/Simulink 仿真平台,建立了一个基于图 2 的微电网频率控制仿真模型,表 1 为系统参数。

表 1 系统参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
T_g/s	0.08	R	2.4
T_d/s	0.3	$M/(MW \cdot p.u.^{-1})$	0.167
T_{WTG}/s	2	$D/(MW \cdot p.u.^{-1})$	0.008
T_{PV}/s	1.8		

算法迭代后求得的最优系数矩阵为 $C_1 =$

$$\text{diag}[46.771 \ 2 \ 30.156 \ 0 \ 2.859 \ 7 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C_2 = \text{diag}[73.904 \ 9 \ 25.126 \ 4 \ 0.009 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.001]^T; C_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.001]^T.$$

求得两个鲁棒 H_2/H_∞ 最优权重系数为 $\alpha = 0.001, \beta = 7.377 \ 6$ 。

将求得的系数矩阵代入系统的状态空间方程,利用 LMI 工具箱求解对应的目标条件,可以得到鲁棒 H_2/H_∞ 输出反馈控制器 $K(s)$ 为

$$K(s) = \frac{n_1 s^6 + n_2 s^5 + n_3 s^4 + n_4 s^3 + n_5 s^2 + n_6 s + n_7}{d_1 s^6 + d_2 s^5 + d_3 s^4 + d_4 s^3 + d_5 s^2 + d_6 s + d_7} \quad (14)$$

式中: $n_1 = -0.038 \ 38; n_2 = -3.806 \times 10^{10}; n_3 = -1.338 \times 10^{12}; n_4 = -1.411 \times 10^{13}; n_5 = -4.554 \times 10^{13}; n_6 = -4.306 \times 10^{13}; n_7 = -1.2 \times 10^{13}; d_1 = 1; d_2 = 529.6; d_3 = 1.315 \times 10^7; d_4 = 2.932 \times 10^9; d_5 = 6.87 \times 10^{11}; d_6 = 7.224 \times 10^{11}; d_7 = 1.898 \times 10^{11}$ 。

为了验证所提鲁棒控制器的性能,采用 SSA 对鲁棒 H_∞ 控制和 PID 控制进行优化,对比分析两者的仿真结果。

4.2 单功率扰动下的仿真分析

对微电网系统在出现 10% 单功率扰动下的频率稳定性进行分析。单功率扰动工况是最常见的微电网波动。图 4 是本文提出的 H_2/H_∞ 鲁棒控制与传统 PID 控制方式的系统输出响应对比,由图 4 可知,在相同的扰动条件下,基于 H_2/H_∞ 的鲁棒控制器具有更好的输出响应特性,输出频率偏差最大超调量约为 0.006 4 Hz,在约 2 s 的时间内就已经收敛,而 PID 控制下的系统频率偏差波动最大为 0.013 7 Hz,稳定时间约为 4 s,证明了 H_2/H_∞ 控制在此工况的控制性能优于 PID 控制。

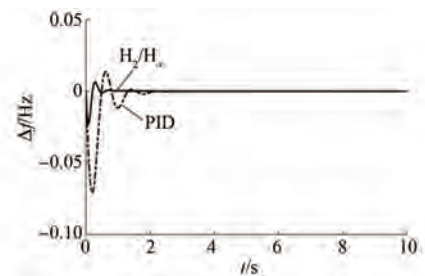


图 4 H_2/H_∞ 控制与 PID 控制的系统输出响应

图 5 为混合 H_2/H_∞ 控制器与 H_∞ 控制器的系

统输出响应对比。由图 5 可知,采用两种性能指数的控制器所获得的控制结果基本一致,但混合 H_2/H_∞ 控制输出响应的系统超调量比 H_∞ 控制低 0.000 5 Hz,且稳定时间比其快 1 s,说明本文所提出的混合控制方法比传统的单 H_∞ 控制有更优越的控制性能。

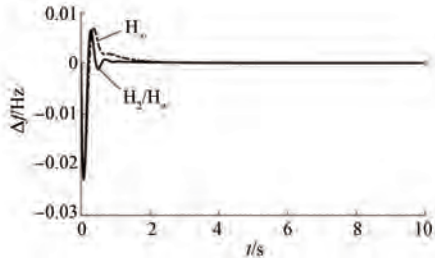


图 5 混合 H_2/H_∞ 控制与 H_∞ 控制的系统输出响应

4.3 多功率扰动下的仿真分析

在多功率扰动下的仿真工况中,考虑在太阳能 ΔS_{PV} 、外界负荷 ΔP_{Load} 以及风能 ΔS_{WTC} 同时波动下的微电网系统频率响应情况。此工况是现实最容易发生的情况。图 6 为仿真时的多功率变化图,图 7 为 H_2/H_∞ 控制与 PID 控制在多功率扰动下的系统输出响应对比。从图 7 中可以看出,在多干扰工况下,本文设计的方法比 PID 控制方法具有明显的优越性。本文方法的输出频率偏差最大超调量约为 0.018 Hz,而 PID 控制下的系统频率偏差波动最大为 0.057 Hz。在整体稳定时间上, H_2/H_∞ 的表现性能也优于 PID 控制。图 8 为混合 H_2/H_∞ 控制与 H_∞ 控制在多功率扰动下的系统输出响应的对比,二者性能虽大致相同,但混合 H_2/H_∞ 控制在稳定速度方面更为优越。

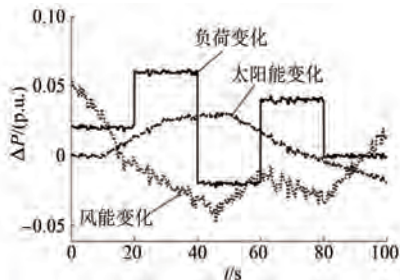


图 6 多功率变化图

4.4 系统内部参数扰动下的仿真分析

为了说明本文所提控制器的鲁棒性,在仿真中通过改变系统参数进行了灵敏度分析。微电网

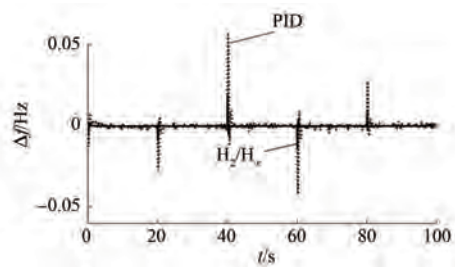


图 7 H_2/H_∞ 控制与 PID 控制在多功率扰动下的系统输出响应

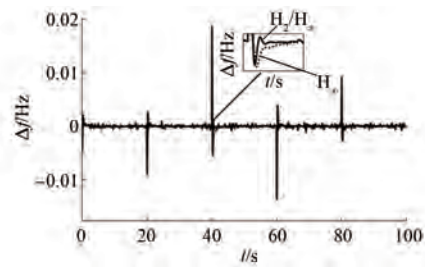


图 8 混合 H_2/H_∞ 控制与 H_∞ 控制在多功率扰动下的系统输出响应

的一次调频调节常数 R 以及微电网的惯性常数 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。在本小节中通过改变系统参数 R 和 M 来观察系统在 10% 功率扰动下的系统频率偏差变化。图 9 为 R 变化下的灵敏度分析。由图 9 可知,当一次调频参数 R 的变化范围在 30% 以内时,系统的最大频率偏差依旧保持在 0.01 Hz 之内,超调量仅上升了约 0.000 1 Hz。图 10 为参数 M 变化下的灵敏度分析。由图 10 可知,当 M 的变化范围在 30% 以内时,频率偏差超调量上升了约 0.000 4 Hz,稳定时间延长了约 0.5 s,依旧可以保持最优的调频效果。可以得出结论:在系统参数改变的情况下,本文设计的 H_2/H_∞ 控制器仍能保持较好的鲁棒性,能够对微电网进行稳定控制。

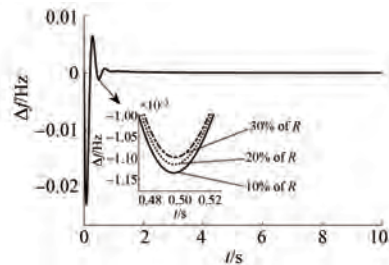
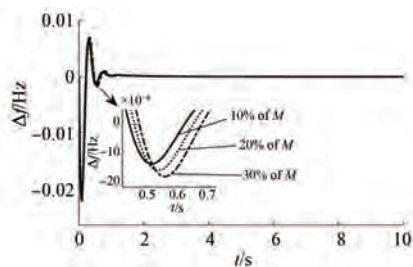


图 9 R 变化下的灵敏度分析

图 10 M 变化下的灵敏度分析

5 结 语

本文以多能源发电的风光柴微电网作为研究对象,研究了在风光出力扰动下的柴油发电机组二次调频控制,提出了基于 SSA 优化的混合 H_2/H_∞ 控制技术,运用 SSA 对控制器的加权系数矩阵以及范数权重参数进行寻优,使控制器在多目标约束的条件下达到最优,并将其应用于风光柴微电网系统的鲁棒有限时间负荷频率控制中。仿真结果表明,采用 SSA 优化的鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的微电网对外界干扰具有较强的鲁棒性,各阻尼特性均优于传统的鲁棒 H_∞ 控制器和 PID 控制器。

【参考文献】

[1] 李建芳,张璐,宋晓辉,等. 含高渗透率分布式电源的配电网多目标无功分区及主导节点选择方法[J]. 可再生能源,2017,35(11): 1664.

[2] 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.

[3] 张惠臻,王刚,夏立,等. 海岛独立微电网多时间尺度能量调度方法研究[J]. 电机与控制应用,2018,45(12): 113.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[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.

[8] RAY P K, MOHANTY S R, KISHOR N. Proportional-integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems[J]. Energy Conversion and Management,2011,52(4): 1943.

[9] 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: 106424.

[10] 沈臣,顾伟,吴志. 孤岛模式下的微电网低频减载策略分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9): 47.

[11] 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(1): 1.

[12] 马显. 交直流混合微网鲁棒控制方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.

[13] 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.

[14] 吴忠强,赵习博,王昕懿. 风柴独立微电网频率 H_2/H_∞ 优化控制研究[J]. 电机与控制学报,2017,21(9): 96.

[15] 徐拴锋,周玲,杜秀华,等. 基于输出反馈的鲁棒控制器优化设计及仿真[J]. 计算机仿真,2010,27(10): 183.

[16] 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.

[17] 寇攀高. 水轮发电机及其调速系统的参数辨识方法与控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[18] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems [J]. Advances in Engineering Software,2017,114: 163.