

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230898

基于MVO算法与改进目标函数的电力系统负荷频率控制

李谟发^{1,2}, 张志文¹, 胡斯佳¹, 练红海²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南电气职业技术学院风能工程学院, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 针对风电并网时的随机波动功率、负荷频率控制(load frequency control, LFC)系统参数变化所引起的电力系统频率稳定问题, 提出了一种基于智能优化算法与改进目标函数的互联电网LFC系统最优PID控制器设计方法。首先, 分析了基于PID控制的含风电互联电力系统LFC闭环模型。其次, 在时间乘误差绝对值积分(integral of time multiplied absolute error, ITAE)性能指标的目标函数中考虑了区域控制器的输出信号偏差, 对优化目标函数进行改进。采用性能优良的多元宇宙优化(multi-verse optimizer, MVO)算法先计算后验证的思路, 寻优获得最优PID控制器参数。最后, 以两区域4机组互联电力LFC系统为例, 仿真验证了基于MVO算法结合改进目标函数所获得的PID控制器, 比基于MVO算法所获得的PID控制器, 对阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、风电功率偏差扰动以及系统的参数变化, 具有相对较好的鲁棒性能。并且, 对控制器参数也具有相对较好的非脆弱性指标。

关键词: 多元宇宙优化算法; 风电; 负荷频率控制; 目标函数; 互联电力系统; 渗透率

Load frequency control of power systems based on an MVO algorithm and improved objective function

LI Mofa^{1,2}, ZHANG Zhiwen¹, HU Sijia¹, LIAN Honghai²

(1. School of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Wind Energy Engineering, Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan 411101, China)

Abstract: There is a problem of power system frequency stability caused by random fluctuating power and load frequency control (LFC) system parameter changes when wind power is connected to the grid. Thus an optimal PID controller design method based on an intelligent optimization algorithm and improved objective function for an interconnected power grid LFC system is proposed. First, the LFC closed-loop model of an interconnected power system with wind power generation based on PID control is analyzed. Secondly, in the objective function of the performance index of the integral of time multiplied absolute error (ITAE), the output signal deviation of the regional controller is considered, and the optimization objective function is improved. The optimal PID controller parameters are obtained with excellent performance by using the multi-verse optimizer (MVO) algorithm which is calculated first and verified later. Finally, taking the interconnected power LFC system of 4 generators in two regions as an example, the PID controller based on the MVO algorithm, which is obtained by improving the objective function, is verified by simulation. The simulation results show that the PID controller combined with improved objective function has relatively better robustness to step load, random load and wind power deviation disturbances and system parameter change than the PID controller based on the MVO algorithm. It also has a relatively good non-vulnerability index for controller parameters.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52061130217).

Key words: multi-verse optimizer algorithm; wind power; load frequency control; objective function; interconnected power system; permeability

0 引言

截至2021年年底, 我国水电、风电和光伏发电

的装机容量均居世界第一^[1]。随着“双碳”指标建设的推进, 我国明确了“双碳”目标, 即2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。2022年4月国家发改委、能源局等9部门联合印发了《“十四五”可再生能源发展规划》^[2]。该规划中明确指出将继续大力发展太阳能、风能等可再生能源, 逐步构建以新能源发电为主体的新型电力系统。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52061130217); 湖南省科技重大专项资助(2020GK1013); 湖南省自然科学基金项目资助(2023JJ60177, 2022JJ6003)

发电能源结构将会发生重大转变,预计到 2035 年,我国新能源发电装机容量将超过火电,后续还会进一步增长,新能源发电将成为第一大能源^[3],其中主要以风电和光伏为主。

由于风电和光伏等新能源发电的接入,导致新型电力负荷频率控制(load frequency control, LFC)系统具有如下几个显著特征。1) 由于风电和光伏等新能源发电的分布式接入和难以预测性,使 LFC 系统中的随机扰动量增加^[4]。2) 现有新能源发电一般通过电力电子变换器与电网连接,其源侧控制方式主要是基于最大功率跟踪的相关方法,且其网侧功率控制与电网频率完全解耦,使其无法主动为电网提供惯量支撑和参与频率调控^[5]。新能源发电的高渗透率,将导致系统在低惯量下运行^[6],负荷扰动将引发系统较大的频率波动甚至失稳^[7]。为维持电力系统有功功率的平衡,同时使风电场以最大出力输出功率,以保证风电场的经济性,目前最直接的手段是采用先进的调频方案,充分利用现有电力系统的调频能力,来保证电力系统的频率稳定,以此来满足更大的风电容量接入^[8-9]。

确保含规模化风电互联电力系统的频率稳定性,已成为互联电力系统负荷频率控制研究的一个重要课题。针对风电出力的随机性及其大规模接入导致系统参数的不确定性,基于传统控制理论的 PI/PID 控制器难以满足具有负荷多样性、低惯量以及系统参数变化的新型互联电力系统的控制要求^[10]。为此,新的 LFC 策略相继被提出,如可通过控制过程中的反馈校正与滚动优化来减少外部环境和建模参数等不确定性对系统影响的模型预测控制方法^[11-12]、将被控对象视为一个标准能控型系统的自抗扰控制方法^[13-14]、对系统参数摄动不敏感的自适应和变结构控制方法^[15-16]、基于线性矩阵不等式的鲁棒控制方法^[17-18]、基于神经网络或模糊控制的智能控制方法^[19-20]、复合控制方法^[21-22]等。这些控制方法虽然在一定程度上弥补了传统 PI/PID 型 LFC 控制器存在的缺点,但是,大都采用分散式的控制方式,不能对 LFC 系统中的控制器参数进行集中优化,对随机扰动以及系统参数变化仍存在一定的缺陷。而智能优化算法在优化电力系统 LFC 控制器参数方面具有较好的优势^[23],它不需要推导复杂的数学模型,只需根据系统传递函数在 Simulink 中搭建仿真模型、设置优化目标函数,就可以得到较好性能的 PI/PID 控制器参数。

近年来,在电力系统的 LFC 研究中,利用新的智能算法优化 PID 的控制方法^[24-26]成为了研究热点。由文献[23-26]中所获控制器的动态特性仿真结

果可知,不同的优化算法在应用中也各有优劣。所以,选择性能优良的智能优化算法、对智能优化算法进行改进以及在优化算法的基础上选择不同的目标函数是该领域的三大研究方向。文献[27]提出的多元宇宙优化(multi-verse optimizer, MVO)算法是一种新型智能优化算法。相比于基于遗传进化原理的生物群体算法, MVO 算法由于实现原理简单、参数相对较少以及收敛速度快等优点,在相关数值实验中表现出了较樽海鞘优化算法(salp swarm algorithm, SSA)、鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)和正余弦算法(sine-cosine algorithm, SCA)等优化方法具有更优的性能^[28]。并已在电力系统经济调度^[29]、机械结构优化设计^[30]与短期电力负荷预测^[31]等领域得到应用,且取得了较好的控制效果。

综上所述,本文针对风电并网时的随机波动功率、LFC 系统参数变化所引起的电力系统频率稳定问题,提出了一种基于 MVO 算法与改进目标函数的互联网 LFC 系统最优 PID 控制器设计方法。首先,分析了基于 PID 控制的含风电互联电力系统 LFC 闭环模型。其次,在时间乘误差绝对值积分(integral of time multiplied absolute error, ITAE)性能指标的目标函数中考虑了区域控制信号输出偏差,对优化目标函数进行改进。采用性能优良的 MVO 算法先计算后验证的思路,寻优获得最优 PID 控制器参数。最后,以两区域 4 机组互联电力 LFC 系统为例,仿真验证了基于 MVO 算法结合改进目标函数所获得的 PID 控制器,相比基于 MVO 算法所获得的 PID 控制器,其对阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、风电功率的偏差扰动以及系统的参数变化具有相对较好的鲁棒性能,并且,对控制器参数也具有相对较好的非脆弱性指标。

1 系统 LFC 动态模型

本节先就风电的接入模式进行分析并得到风电接入电力系统的 LFC 连续模型。其次,阐述了 LFC 系统带滤波系数的 PID 控制结构。然后,详细分析了考虑控制信号偏差的改进目标函数,并对改进 ITAE 指标下的控制器参数优化模型进行了介绍。

1.1 系统 LFC 连续模型

规模化风电接入电力系统,缓慢的风电功率波动和总平均功率变化对功率不平衡和频率偏差有负面影响,在 LFC 控制方案中需要加以考虑。负荷、风能的功率输出和联络线功率的变化将通过发电单元输出功率的增加/减少来补偿。虽然风力发电有着高阶的频率响应动态模型,但是在不主动参与调频

ITAE 是一种对绝对误差积分指标的改进, 以 ITAE 作为优化指标, 可以反映系统的快速性和准确性, 且它的瞬态响应超调量小, 振荡有足够大的阻尼。目前, 基于智能优化算法的 LFC 方案中, 主要选取该类指标作为优化目标函数。ITAE 的表达式为

$$Q(a) = \int_0^T |e(t)| dt \quad (7)$$

式中: T 为仿真持续时间; t 为时间变量; $e(t)$ 为误差。

式(7)的目标函数中, 缺乏对系统控制信号 $u(t)$ 的考虑。那么, 系统中控制器的输出值会呈现过大的调节幅度或者巨大的振荡。因此, 将系统的控制信号输入量加入到积分项中, 并对两者赋一定的权重值, 对目标函数进行修正, 得到改进的目标函数, 如式(8)所示。

$$Q(a) = \int_0^T [\lambda_1 \cdot t |e(t)| + \lambda_2 \cdot |u(t)|] dt \quad (8)$$

式中: λ_1 为系统区域 1 和 2 的频率偏差绝对值与联络线功率偏差绝对值之和对时间积分在目标函数中的权重值; λ_2 为系统区域 1 和 2 的控制器输出信号偏差绝对值之和对时间积分在目标函数中的权重值。

在电力 LFC 系统中, 对控制器参数的优化指标为多目标优化问题, 包括每个区域的频率偏差与互联系统区域间的联络线功率偏差。优化的本质是: 当系统受到外部扰动后, 找到一组合适的 PID 控制参数, 使得频率偏差与联络线功率偏差尽快恢复到稳态值附近。研究 LFC 方法的目标是: 找到更合适的控制参数, 当系统受到外部扰动或是系统参数变化后, 系统恢复到稳定的准确性与快速性更优。

1.4 控制器参数优化模型

采用智能优化算法优化设计电力系统 LFC 控制器参数的目的是: 当系统在一定扰动下, 优化所得的最优 LFC 控制器参数, 能使系统内各区域的频率偏差和联络线功率偏差以小的偏差和短的调节时间恢复到平衡值。尤其是系统的频率偏差, 因为频率偏差是系统电能质量的一项重要指标。在优化时, 通常可采用系统内各区域频率偏差和联络线功率偏差信号的 ITAE 性能指标作为优化问题的目标函数。控制器参数优化问题可描述为在一定的参数空间内, 寻找一组最优的 K_p 、 K_I 、 K_D 值, 使得 ITAE 指标最小。由此, 得到两区域互联电力系统 LFC 控制器参数设计问题的优化目标函数, 如式(9)所示, 此时的性能指标为常规 ITAE 指标, 记为 J_1 。

$$\text{Minimize: } J_1 = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + \gamma |\Delta P_{tie,12}|) \cdot t dt \quad (9)$$

式中, γ 为加权系数, 本节取值 $\gamma = 1$ 。

使用改进的目标函数后, 两区域互联电力系统

LFC 控制器参数设计问题的优化目标函数如式(10)所示, 此时的性能指标为改进后的 ITAE 指标, 记为 J_2 。

Minimize:

$$J_2 = \int_0^T [\lambda_1 (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + \gamma |\Delta P_{tie,12}|) \cdot t + \lambda_2 (|\Delta p_{c1}| + |\Delta p_{c2}|)] dt \quad (10)$$

式中: Δp_{c1} 为区域 1 控制器的输出信号偏差; Δp_{c2} 为区域 2 控制器的输出信号偏差。

采用 PID 控制器时, 其约束条件为

$$\begin{cases} K_p^{\min} \leq K_p \leq K_p^{\max} \\ K_I^{\min} \leq K_I \leq K_I^{\max} \\ K_D^{\min} \leq K_D \leq K_D^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_p^{\max} 、 K_p^{\min} 、 K_I^{\max} 、 K_I^{\min} 、 K_D^{\max} 、 K_D^{\min} 分别为待求变量 K_p 、 K_I 、 K_D 的上下限。

2 MVO 算法的应用

多元宇宙中存在黑洞、白洞和虫洞, 黑洞有极大的引力, 可吸收宇宙中的物体; 而白洞有极大的斥力, 只会释放物体; 虫洞连接着不同的宇宙, 可在不同宇宙之间进行物体传输。在多元宇宙的随机创建过程中, 多元宇宙种群通过白洞和黑洞间的物体传输、通过虫洞传输物体这两种机制的共同作用, 经过一定周期的演化, 使多元宇宙趋于稳定。下面分别对 MVO 算法理论、MVO 算法优化 LFC 系统 PID 参数方法与流程予以分析。

2.1 MVO 算法基本原理

每个宇宙中的物体拥有不同的膨胀率, 对应每个宇宙有不同的膨胀率。膨胀率高的宇宙中易产生白洞, 膨胀率低的宇宙中易产生黑洞。在多元宇宙中, 通过白洞发送-黑洞接收物体的传输机制, 使宇宙膨胀率趋于一致。在任意两个宇宙之间可以建立白洞/黑洞隧道, 保证搜索空间。并且, 虫洞会无视膨胀率的存在, 随机出现在任一宇宙中。虫洞使目前最优宇宙向其余的宇宙传输物体, 加速多元宇宙趋于最优宇宙。

在 MVO 算法中, 多元宇宙中每个宇宙均视为优化问题的候选解, 解的适应度对应该宇宙的膨胀率。每个宇宙中的物体对应候选解的变量, 多元宇宙群体为种群。假定随机创建的宇宙矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^d \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: U_i 表示第 i 个宇宙; d 表示物体(变量)个数, 对应宇宙的空间维度; η 表示宇宙数量(候选解)。

为了保证 MVO 算法在解空间搜索的高效性, 每一次迭代中, 计算每个宇宙膨胀率并归一化处理, 再采用轮盘赌机制选择出宇宙中高膨胀率的物体, 其数学模型如(13)所示, 该物体将通过白洞-黑洞隧道传送到当前最优宇宙。

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < N_1(U_i) \\ x_i^j & r_1 \geq N_1(U_i) \end{cases} \quad (13)$$

式中: x_i^j 为第 i 个宇宙的第 j 个变量; $N_1(U_i)$ 为第 i 个宇宙的归一化膨胀率; r_1 为 $[0,1]$ 范围内的随机数; x_k^j 表示经轮盘赌机制被选择出来的第 k 个宇宙的第 j 个物体。

为保证宇宙迭代过程中的多样性, 多元宇宙中会随机生成虫洞。虫洞存在概率和虫洞旅行距离率将按式(14)和式(15)构建虫洞传输物体机制, 该机制可实现当前最优宇宙向其余宇宙传输物体, 提高其余宇宙的膨胀率, 避免算法陷入局部最优。

$$\omega_j = (u_j - l_j) \times r_4 + l_j \quad (14)$$

$$x_i^j = \begin{cases} x_j + K_{\text{TDR}} \times \omega_j & r_3 < 0.5 \\ x_j - K_{\text{TDR}} \times \omega_j & r_3 \geq 0.5 \\ x_i^j & r_2 \geq K_{\text{WEP}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: u_j 和 l_j 分别表示变量 x_j 所处动态边界的上下边界; x_j 表示当前最优宇宙的第 j 个物体; r_2 、 r_3 和 r_4 均为 $[0,1]$ 范围内的随机数; K_{WEP} 参数表示宇宙空间虫洞存在的可能性, 能体现算法的开发性能; K_{TDR} 参数表示物体通过虫洞向最优宇宙移动的步长, 体现了算法的局部搜索能力。 K_{WEP} 和 K_{TDR} 是 MVO 算法中两个最为重要的参数, 寻优迭代中, 随着 K_{WEP} 和 K_{TDR} 的变化, 可在最优宇宙中得到更精确的全局/局部搜索结果。两个参数的自适应公式分别如式(16)和式(17)所示。

$$K_{\text{WEP}} = K_{\text{WEP}_{\min}} + h \times \left(\frac{K_{\text{WEP}_{\max}} - K_{\text{WEP}_{\min}}}{H} \right) \quad (16)$$

$$K_{\text{TDR}} = 1 - \frac{h^{1/p}}{H^{1/p}} \quad (17)$$

式中: $K_{\text{WEP}_{\min}}$ 为 K_{WEP} 的最小值, 表示虫洞存在的最小概率, 本文取值为 0.2; $K_{\text{WEP}_{\max}}$ 为 K_{WEP} 的最大值, 表示虫洞存在的最大概率, 本文取值为 1; h 为当前迭代次数; H 为最大迭代次数; p 为 K_{TDR} 的限制参数, 表示算法中的开发精度, 本文取值为 6。

2.2 基于 MVO 算法的 LFC 控制器参数优化流程

根据 MVO 算法的基本原理, 采用 MVO 算法优化设计 LFC 系统 PID 控制参数的主要步骤如下。

Step1: 定义优化目标函数或对象, 随机初始化多元宇宙矩阵(种群) U , 并定义变量(η 、 d 、 h)和初始参数(H 、 $K_{\text{WEP}_{\min}}$ 、 $K_{\text{WEP}_{\max}}$ 、 p);

Step2: 开始计算宇宙个体适应度, 并归一化膨胀率 $N_1(U_i)$, 选出当前最优宇宙;

Step3: 进入循环迭代计算, 由式(16)与式(17)随机更新 K_{WEP} 和 K_{TDR} 两个参数;

Step4: 由式(13)的轮盘赌机制选出白洞宇宙;

Step5: 由式(14)和式(15)计算参数更新后的个体适应度, 并与当前个体适应度进行比较, 更新最优宇宙;

Step6: 若达到最大迭代次数, 则退出迭代, 反之则返回 Step2, 直到满足迭代结束条件, 输出最优宇宙和最优适应度值。

2.3 算法寻优性能分析

为了评估 MVO 算法相对已有算法在电力系统 LFC 中对 PID 控制参数优化的优越性, 针对两区域 4 机组的 6 个 PID 控制参数优化, 两区域电力 LFC 系统的参数见附录 A 表 A1。当 $t=10$ s 时, 加入 $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = 0.05$ p.u. 的负荷扰动, 当 $t=20$ s 时, 加入 $\Delta P_{w-1} = \Delta P_{w-2} = -0.04$ p.u. 的风电功率阶跃扰动, 采用 MVO 算法与 SCA^[24]、灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)^[26]进行对比分析, 选择式(9)作为优化目标函数, 设置仿真时长为 100 s, 寻优计算 20 次, 获得 J_1 的最优目标值。统计其最大值、最小值、平均值和标准差如表 1 所示。

表 1 优化算法目标稳健性指标对比

Table 1 Comparison of objective robustness indexes of optimization algorithm

优化算法	最大值	最小值	平均值	标准差
SCA ^[24]	3.6813	3.5383	3.601 63	0.072 559
GWO ^[26]	3.5233	3.5108	3.517 56	0.000 179
MVO(本文)	3.5192	3.5103	3.510 96	0.000 092 5

从表 1 所得结果来看, 当系统受到上述较大阶跃扰动后, 在每次寻优中, SCA、GWO 算法和 MVO 算法寻优得到的 J_1 值都较小, 说明这 3 种算法的寻优精度性能都较好。相比 SCA 与 GWO 算法, MVO 算法的寻优精度性能也只有小幅提升。但是, 从标准差来看, GWO 算法的稳健性较 SCA 算法有很大的提升, 而 MVO 算法较 GWO 算法又有很大的提升, 即 MVO 算法比 GWO 算法寻优得到的 J_1 值波动性更小, 搜索到的控制器参数变化也会更小。说

明 MVO 算法具有相对较强的稳健性,也说明了 MVO 算法所获控制参数值更稳定。

优化算法所需时间也是值得关注的问题,在智能控制器中,当外部发生扰动后,能够在短时间内优化控制器参数并实施控制效果,也是体现优化算法快速性的一项指标。在硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i5-4200u cpu@1.60 GHz/4 GB 内存的个人计算机环境下,经过 20 次仿真,得出 MVO 算法与 SCA、GWO 算法优化控制器参数所需的最长时间、最短时间与平均时间对比如表 2 所示。从表 2 可知,SCA 优化所需时间最长,GWO 算法次之,MVO 优化所需时间最短。

表 2 优化算法所需时间对比

Table 2 Comparison of time required by optimization algorithms

优化算法	最长时间	最短时间	平均时间
SCA	141.72	131.71	134.114
GWO	139.65	131.42	133.212
MVO	138.80	130.94	132.58

对比这 3 种算法寻优控制参数的稳健性与快速性可知,MVO 算法的综合性能相对更优。MVO 算法能在优化过程中自适应调整寻优步长,提高了算法的全局搜索能力与局部寻优精度。下文将对 MVO 算法结合 J_2 指标优化所得的 PID 控制器,与 MVO 算法结合 J_1 指标优化所得的 PID 控制器进行对比分析,验证 MVO 算法结合改进的优化目标函数优化所得的 PID 控制器的有效性与优越性。

3 实例研究

为验证所提 MVO 算法结合改进目标函数式(10)优化 PID 控制器参数的有效性,对典型的两区域 4 机组互联电力 LFC 系统进行仿真分析。利用 Matlab/Simulink 搭建互联电力系统 LFC 模型,在系统参数没有变化的情形下,就阶跃负荷扰动、随机扰动、风电功率偏差扰动以及叠加扰动进行实验。在风电渗透率上升到 30%时,对风电加负的功率偏差扰动、负荷加正的阶跃扰动进行大扰动实验;对风电加随机偏差扰动、负荷加较大阶跃扰动,进行叠加扰动实验。仿真过程中,与 MVO 算法结合目标函数式(9)所优化的 PID 控制器参数进行对比,验证本文所提方案的有效性和优越性。当风电渗透率达到 30%后,即系统惯性减少(inertial reduction, IR)30%时,记为 30%IR,根据文献[5]中所提方法得到变化后的 LFC 系统参数见附录 A 表 A2。

在对系统进行动态分析之前,需先确定改进目标函数中 λ_1 和 λ_2 的值。本文采用试凑的方法,经过多次实验来确定 λ_1 和 λ_2 的值。先取 $\lambda_1 = 0.5$ 、 $\lambda_2 = 0.5$;其次, λ_1 每次增加 0.1, λ_2 每次减少 0.1,依次试验到 $\lambda_1 = 0.9$ 、 $\lambda_2 = 0.1$;然后, λ_1 每次减少 0.1, λ_2 每次增加 0.1,依次试验到 $\lambda_1 = 0.1$ 、 $\lambda_2 = 0.9$;每次实验中,假设在 $t \geq 0$ s 时,两个区域中的阶跃负荷扰动情况为: $\Delta P_{d1} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.01$ p.u.。观察系统频率偏差的调节时间与最大偏差,通过对比分析,在不同的取值情形下,性能都有所改善,但取 $\lambda_1 = 0.3$ 、 $\lambda_2 = 0.7$ 时,系统动态性能提升最为明显。

3.1 参数优化结果的稳健性分析

MVO 算法的初始参数取值为:最大迭代次数 $H = 50$;种群规模 $\eta = 20$;求解变量维数 $d = 6$,对应两个控制区域 PID 控制器的 6 个参数。假设在 $t \geq 0$ s 时,两个区域中的阶跃负荷扰动与风电功率阶跃扰动情况为: $\Delta P_{d1} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{w-1} = -0.02$ p.u., $\Delta P_{w-2} = -0.02$ p.u.。仿真计算 20 次,目标函数式(9)所得的值记为 J_1 ,目标函数式(10)所得的值记为 J_2 。由于改进型的目标函数中增加了两个控制区域控制信号的输出量,那么所得的 J_2 值会大于 J_1 的值。下面只对两种情形下所得 J_1 与 J_2 值的稳健性进行分析。

由表 3 可知,从最大值减去最小值来看 $J_1 = 0.001$; $J_2 = 0.001$ 。从标准差来看,使用改进后的目标函数,MVO 算法寻优参数的稳健性相对较好。这也将 3.4 节中对控制器参数的非脆弱性分析中得到验证。所以,从这 20 组控制器参数中任意选取其中一组参数,在系统区域中受到不同扰动后,对系统区域 1、2 中的频率偏差进行动态特性分析。 J_1 指标下获得的控制器命名为 K_1 ; J_2 指标下获得的控制器命名为 K_2 。控制器 K_1 、 K_2 的具体参数如表 4 所示。下面对系统在装载控制器 K_1 、 K_2 后,系统受到不同扰动后的动态特性进行对比验证。

表 3 不同性能指标下优化算法目标稳健性指标对比

Table 3 Comparison of objective robustness indexes of optimization algorithms under different performance indicators

性能指标	最大值	最小值	平均值	标准差
J_1	0.1197	0.1187	0.118 88	0.000 092 4
J_2	4.1608	4.1598	4.160 23	0.000 060 5

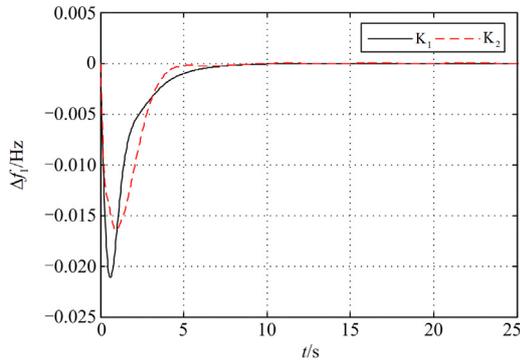
表 4 不同性能指标下获得的 PID 控制器参数
Table 4 PID controller parameters obtained under different performance indicators

区域	K ₁			K ₂		
	K _p	K _i	K _D	K _p	K _i	K _D
1	0.01	2.0	0.3018	0.01	1.9746	0.7356
2	0.01	2.0	0.1862	0.01	2.0	0.9039

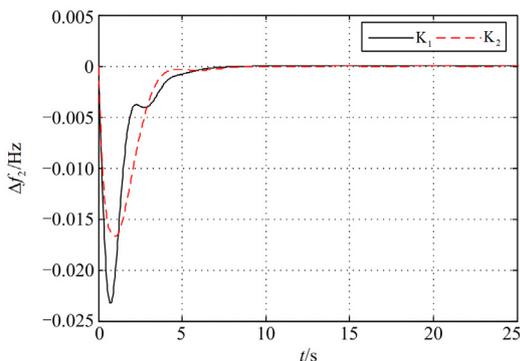
3.2 动态性能响应分析

3.2.1 阶跃负荷扰动实验

通过 Simulink 仿真测试控制器 K₁、K₂ 的动态性能, 进行阶跃负荷扰动实验。假设在 $t \geq 0$ s 时, 两个区域中的阶跃负荷扰动与风电功率阶跃扰动情况如下: $\Delta P_{d1} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{w-1} = -0.02$ p.u., $\Delta P_{w-2} = -0.02$ p.u.。当受到上述阶跃负荷扰动时, 在控制器 K₁、K₂ 的作用下, 系统的频率偏差响应曲线如图 3 所示。在系统动态性能仿真中, 主要以区域频率偏差的调节时间和最大偏差来判别控制器性能的优劣。因此, 在两种控制器作用下, 只对区域频率偏差的性能指标进行对比分析。



(a) 区域1的频率偏差



(b) 区域2的频率偏差

图 3 阶跃负荷扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比
Fig. 3 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under step load disturbance

从图 3 可知, 当系统受到外部阶跃扰动后, Δf_1 和 Δf_2 在控制器 K₁、K₂ 作用下, 所需调节时间和最大偏差的动态性能指标如表 5 所示。

由表 5 可知, 使用 J_1 性能指标作为优化目标函数, MVO 优化所得的控制器 K₁, 使区域 1、2 的频率偏差能以较小的偏差、较快的速度收敛。相比控制器 K₁, 在控制器 K₂ 的作用下, Δf_1 的调节时间缩短了 2.36 s, 最大偏差减少了 0.004 65 Hz; Δf_2 的调节时间缩短了 1.69 s, 最大偏差减少了 0.006 57 Hz。由此可见, 通过改进的 J_2 性能指标作为优化目标函数, 所得的控制器参数更优, 使区域 1、2 的频率偏差能以相对更小的调节时间与偏差恢复到平衡值, 得到更为理想的控制效果。

表 5 不同控制器下系统频率偏差的动态特性

Table 5 Dynamic characteristics of system frequency deviation under different controllers

控制器	调节时间/s		最大偏差/Hz	
	Δf_1	Δf_2	Δf_1	Δf_2
K ₁	7.38	6.20	-0.021 11	-0.023 25
K ₂	5.02	4.51	-0.016 46	-0.016 68

3.2.2 随机负荷扰动实验

为测试控制器 K₁、K₂ 在随机负荷扰动下的控制性能, 给系统引入如图 4 所示的随机负荷扰动, 进行随机负荷扰动实验, 在控制器 K₁、K₂ 的作用下, 系统的频率偏差响应曲线如图 5 所示。

由图 5 可知, 在随机负荷扰动下, Δf_1 在控制器 K₁ 作用下, 最大的正负偏差分别为 0.0234 Hz、-0.018 57 Hz; 而在控制器 K₂ 作用下, 最大的正负偏差分别为 0.015 55 Hz、-0.012 31 Hz。 Δf_2 在控制器 K₁ 作用下, 最大的正负偏差分别为 0.024 47 Hz、-0.019 42 Hz; 而在控制器 K₂ 作用下, 最大的正负偏差分别为 0.016 61 Hz、-0.013 16 Hz。可以看出, 在随机负荷扰动下, 相比控制器 K₁, 控制器 K₂ 所

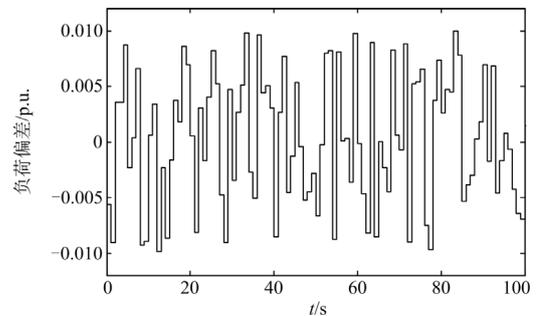


图 4 随机负荷扰动

Fig. 4 Random load disturbance

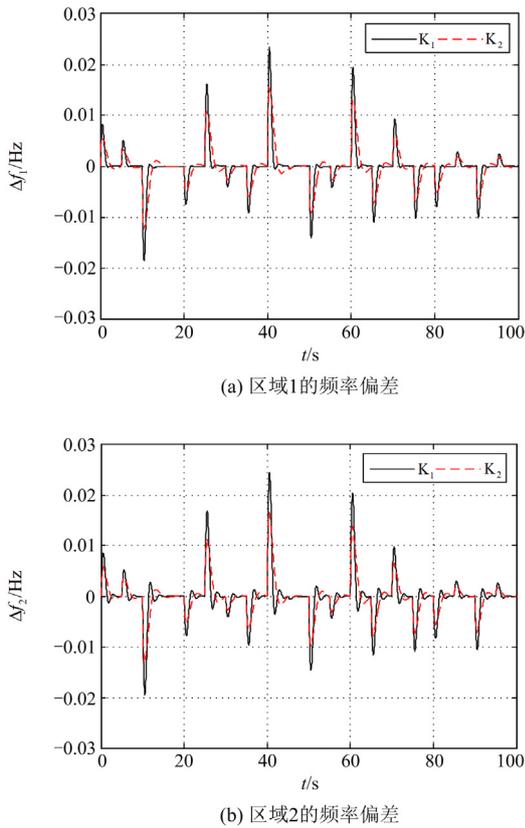


图5 随机负荷扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比
 Fig. 5 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under random load disturbance

得频率的正负偏差都有不同程度的降低，有更优的控制表现，有效地抑制了系统的频率波动。

3.2.3 风电功率偏差扰动实验

假设两个区域受到如图6所示的风电功率偏差扰动。在控制器 K_1 、 K_2 的作用下，系统的频率偏差响应曲线如图7所示。

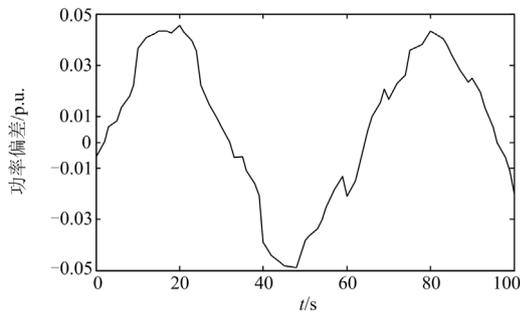


图6 风电功率偏差扰动
 Fig. 6 Wind power deviation disturbance

由图7可以看出，尽管风电功率以接近 ± 0.05 p.u.的偏差输入系统，在控制器 K_1 、 K_2 的作用下，系

统频率能以较快的速度、较小的偏差跟随风电功率偏差扰动。可知，控制器 K_1 、 K_2 能保持对风电功率偏差扰动的有效控制。但是，相比控制器 K_1 ，控制器 K_2 所得频率偏差的正负偏差值也有一定程度的降低。在减小风电功率偏差扰动时，具有相对较好的控制性能。

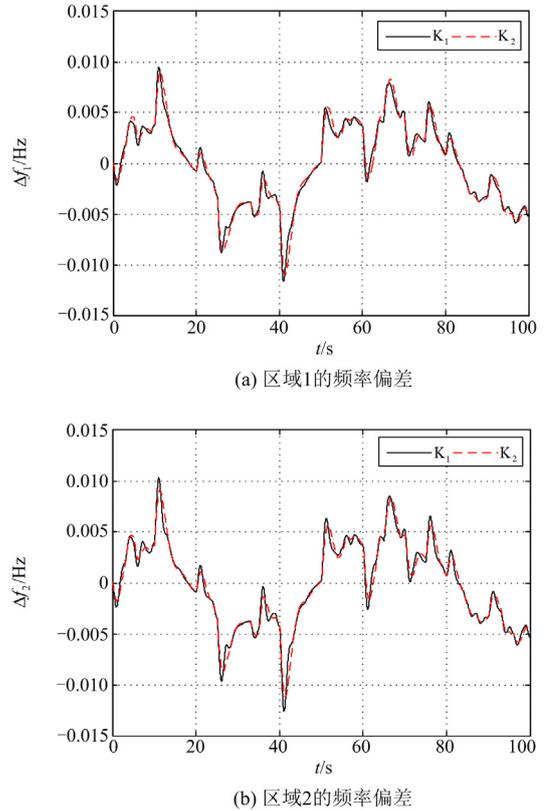


图7 风功率偏差扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比
 Fig. 7 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under wind power deviation disturbance

3.2.4 叠加扰动实验

下面就控制器 K_1 、 K_2 对阶跃负荷扰动和风电功率偏差扰动叠加的情形进行实验。假设在 $t \geq 0$ s时，两个区域中的阶跃负荷扰动情况如下： $\Delta P_{d1} = 0.01$ p.u.， $\Delta P_{d2} = 0.01$ p.u.，并叠加风电功率的随机扰动，其功率偏差输入如图6所示。在控制器 K_1 、 K_2 的作用下，系统的频率偏差响应曲线如图8所示。

从图8可以看出，当 $t \geq 0$ s时，系统受到外部的叠加扰动后，第一个下降周期中， Δf_1 在控制器 K_1 的作用下，最大的偏差为 -0.01611 Hz；而在控制器 K_2 的作用下，最大的偏差为 -0.0107 Hz。 Δf_2 在控制器 K_1 的作用下，最大的偏差为 -0.01707 Hz；而

在控制器 K_2 的作用下, 最大的偏差为 -0.01164 Hz。可知, 相比控制器 K_1 , 在控制器 K_2 的作用下, 系统 Δf_1 的最大偏差减少了 0.00541 Hz, 系统 Δf_2 最大偏差减少了 0.00543 Hz。后期的仿真曲线基本上与风电功率偏差扰动实验时的频率输出曲线一致。可知, 在负荷扰动和风电功率偏差扰动的叠加扰动工况下, 在 J_1 与 J_2 两种性能指标下, 采用 MVO 算法优化所得的 PID 控制器, 能较好地处理负荷不确定性和风电不确定性对互联电力系统频率稳定的影响, 且改进目标函数下所得控制器 K_2 的性能相对较优。

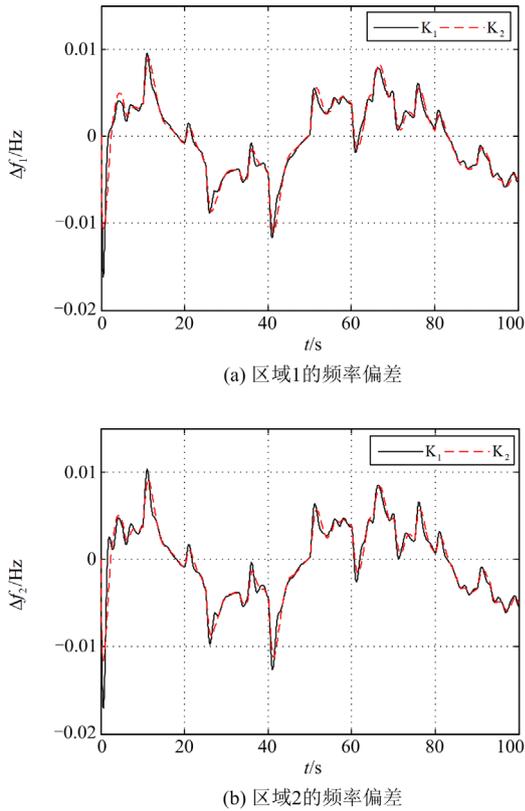


图 8 叠加扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比

Fig. 8 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under superposition disturbance

3.3 控制器对系统参数变化的鲁棒性分析

随着风电的渗透率按一定比例提升后, 系统的惯性系数与频率偏差因子将按一定的方式减小, 而下垂系数将按一定的方式增大。下面分别就 30%IR 时, 选取较大的负荷与风电功率阶跃扰动, 较大的阶跃负荷扰动叠加风电功率偏差扰动进行实验。进一步对比验证控制器 K_1 、 K_2 对系统参数和外部扰动的鲁棒性。

3.3.1 较大的阶跃扰动实验

假设在 $t \geq 0$ s 时, 两个区域中的阶跃负荷扰动

情况如下: $\Delta P_{d1} = 0.05$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.05$ p.u., $\Delta P_{w-1} = -0.1$ p.u., $\Delta P_{w-2} = -0.1$ p.u.。30%IR 时, 当受到上述较大的阶跃扰动后, 在控制器 K_1 、 K_2 的作用下, 系统的频率偏差响应曲线如图 9 所示。

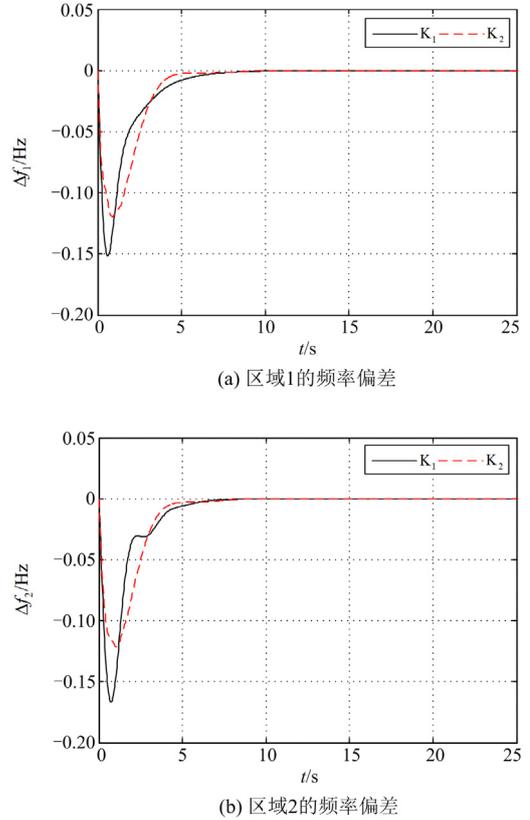


图 9 30%IR 时大扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比
Fig. 9 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under large disturbance with 30%IR

从图 9 可知, 当 $t \geq 0$ s 时, 系统受到较大的外部阶跃扰动后, Δf_1 和 Δf_2 在控制器 K_1 、 K_2 的作用下, 所需调节时间和最大偏差的动态性能指标如表 6 所示。

表 6 30%IR 时不同控制器下系统频率偏差的动态特性
Table 6 Dynamic characteristics of system frequency deviation under different controllers with 30%IR

控制器	调节时间/s		最大偏差/Hz	
	Δf_1	Δf_2	Δf_1	Δf_2
K_1	7.11	6.13	-0.1515	-0.1669
K_2	4.94	5.05	-0.1196	-0.1215

由表 6 可知, 使用 J_1 性能指标作为优化目标函数, MVO 优化所得的控制器 K_1 使区域 1、2 的频率偏差能以较小的偏差、较快的速度收敛。相比控制器 K_1 , 在控制器 K_2 的作用下, Δf_1 的调节时间缩短

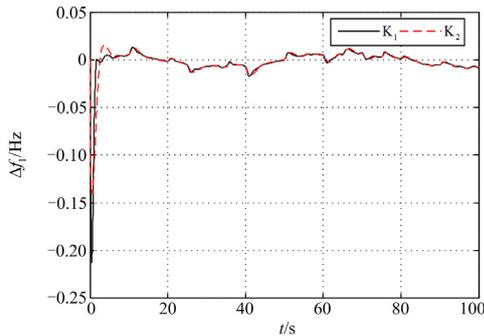
了 2.17 s, 最大偏差减少了 0.0319 Hz; Δf_2 的调节时间缩短了 1.08 s, 最大偏差减少了 0.0454 Hz。由此可见, 通过改进的 J_2 性能指标作为目标函数, 所得控制器参数的性能更优, 使区域 1、2 的频率偏差能以相对更少的调节时间与更小的偏差恢复到平衡值, 得到更为理想的控制效果。

当采用恒功率控制模式的风电接入电网时, 随着风电比例的提升, 电力系统相对惯性系数等参数变化时, 无论是采用 J_1 性能指标为目标函数, 还是采用 J_2 性能指标为目标函数, 使用 MVO 算法优化所得的 PID 控制器, 都能以较小的超调量、较快的收敛速度使频率偏差恢复到平衡值, 得到较好的控制效果。基于 MVO 算法优化所得的 PID 控制器参数对系统参数具有较低的敏感性, 即对系统参数具有较好的鲁棒性能。

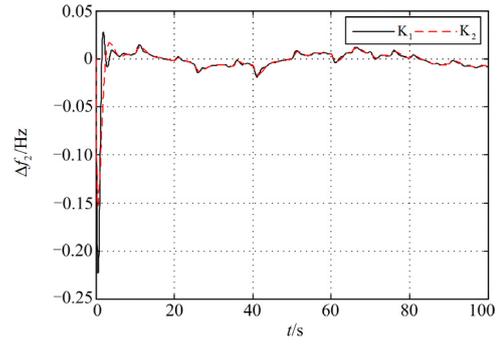
3.3.2 风电功率偏差叠加大的阶跃负荷扰动实验

下面就控制器 K_1 、 K_2 对系统加大的阶跃负荷扰动和风电功率偏差扰动叠加的扰动进行实验。假设在 $t \geq 0$ s 时, 两个区域中的阶跃负荷扰动情况如下: $\Delta P_{d1} = 0.1$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.1$ p.u., 并叠加风电功率的随机偏差扰动输入, 其功率偏差输入如图 6 所示。在控制器 K_1 、 K_2 的作用下, 系统的频率偏差响应曲线如图 10 所示。

从图 10 可知, 当 $t \geq 0$ s 时, 系统受到风电功率偏差加大的负荷扰动后, Δf_1 在控制器 K_1 作用下, 下降的最大幅值将达到 0.2129 Hz; Δf_2 在控制器 K_1 作用下, 下降的最大幅值也将达到 0.2228 Hz。所以, 该系统在装载控制器 K_1 时, Δf_1 与 Δf_2 都将超过系统允许的 ± 0.2 Hz, 将失去对频率的控制作用。然而, 系统在控制器 K_2 的作用下, Δf_1 与 Δf_2 下降的最大幅值分别为 0.1409 Hz、0.1545 Hz, 都在系统允许的 ± 0.2 Hz 以内, 并且, 将在较小的偏差内稳定。因此, 采用改进的 J_2 性能指标为目标函数, 基于 MVO 算法优化所得 PID 控制器参数的效果更优。可知, 采用改进目标函数后的 LFC 方案, 在提升风电渗透率方面将发挥较好的控制效果。



(a) 区域1的频率偏差



(b) 区域2的频率偏差

图 10 30%IR 时叠加大扰动下不同控制器的频率偏差响应曲线对比

Fig. 10 Comparison of frequency deviation responses curve with different controllers under superimposed large disturbance with 30%IR

3.4 控制器非脆弱性对比分析

控制器的非脆弱性表征了控制器稳定性能相对控制器参数变化的灵敏度。控制系统在运行过程中, 控制器设备中的元器件受外界环境温度或其自身物理特性的影响, 将导致控制器参数偏离设定值, 从而影响控制器的性能。因此, 在工业应用领域, 要求设计的控制器具有非脆弱性, 即当控制器的参数发生一定程度的变化后, 控制器不会失效, 仍能保证整个闭环系统稳定。

在 $t \geq 0$ s 时, 两个区域中的阶跃负荷扰动与风电功率阶跃负荷扰动情况如下: $\Delta P_{d1} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{d2} = 0.01$ p.u., $\Delta P_{w-1} = -0.02$ p.u., $\Delta P_{w-2} = -0.02$ p.u.。得到的控制器 K_1 、 K_2 的参数为标称参数。当控制器参数中的 K_p 、 K_i 、 K_d 按一定的比例增大或减小时, 即

$$\Delta K\% = [\Delta K_p\%, \Delta K_i\%, \Delta K_d\%] = [(|K'_p - K_p|)/K_p, (|K'_i - K_i|)/K_i, (|K'_d - K_d|)/K_d] \quad (18)$$

式中: K'_p 、 K'_i 和 K'_d 分别表示比例系数、积分系数和微分系数变化后的值; $\Delta K_p\%$ 、 $\Delta K_i\%$ 和 $\Delta K_d\%$ 分别表示比例系数、积分系数和微分系数变化的百分比。

文献[26]定义并提出了非脆弱性指标(non-fragility index, NFI), 记为 F 。但是, 由于参数变化后导致的性能指标值可能减小或增大, 因此, 非脆弱性指标应修改为

$$F = [F_p, F_i, F_d] = [(|J_p - J_0|)/J_0, (|J_i - J_0|)/J_0, (|J_d - J_0|)/J_0] \quad (19)$$

式中: J_0 为标称控制参数下优化得到的最优性能指标值; J_p 、 J_i 和 J_d 分别对应控制器参数摄动 $\Delta K_p\%$ 、 $\Delta K_i\%$ 和 $\Delta K_d\%$ 下的性能指标; F_p 、 F_i 和

F_D 分别对应控制器参数摄动 $\Delta K_p\%$ 、 $\Delta K_i\%$ 和 $\Delta K_D\%$ 下的非脆弱性指标。 F_p 、 F_1 和 F_D 的指标值越小, 表示控制器抵御自身参数变化的能力越强。

下面分析控制器 K_1 、 K_2 中参数 K_p 、 K_i 和 K_D 发生变化后控制器的非脆弱性。假定两个区域内的 PID 控制器参数相对优化值分别从 -40% 到 40% 依次增加 20%, 系统区域 1 与区域 2 内的阶跃负荷扰动与风电功率阶跃负荷扰动情况如下:

$\Delta P_{d1} = 0.01 \text{ p.u.}$, $\Delta P_{d2} = 0.01 \text{ p.u.}$, $\Delta P_{w-1} = -0.02 \text{ p.u.}$, $\Delta P_{w-2} = -0.02 \text{ p.u.}$ 。计算控制器 K_1 中各参数变化条件下的 F , 结果如附录 A 表 A3 所示, 相应地, Δf_1 和 Δf_2 的调节时间和最大偏差也列入附录 A 表 A3 中。计算控制器 K_2 中各参数变化条件下的 F , 结果如附录 A 表 A4 所示, 相应地, Δf_1 和 Δf_2 的调节时间和最大偏差也列入附录 A 表 A4 中。

从表 A3 和表 A4 可以看出, 控制器 K_1 内参数变化时, 所得的非脆弱性指标较小, 而且区域 1 和区域 2 内频率偏差的调节时间、最大偏差变化也不大, 这说明了 J_1 性能指标变化不大, 验证了采用 MVO 算法寻优所得的控制器在控制器参数变化 $\pm 40\%$ 的范围内, 仍具有较优异的性能指标。但是, 相比控制器 K_1 , 控制器 K_2 内参数变化后, 其所得的非脆弱性指标相对更小。这也进一步验证了采用改进的目标函数寻优所得的 PID 控制器参数的稳健性能更好。

控制器内 K_i 参数变化时的 F , 相对 K_p 、 K_D 变化时要大。特别是控制器内 K_i 参数变化到 -40% 时, NFI 指标增大的最多。下面选取 F 变化最严重时 (-40%) 的控制器参数进行仿真验证。在上述同等的负荷与风电功率阶跃扰动下, 控制器 K_1 、 K_2 中的 K_i (分别记为 K_{i1} 、 K_{i2}) 同时降低 40% 时, 区域 1 的频率偏差仿真曲线如图 11 所示 (区域 2 的频率偏差曲线类似)。

由图 11 可知, 控制器 K_1 和 K_2 中的积分参数下降 40%, 当 $t \geq 0 \text{ s}$ 时, 系统受到外部阶跃扰动后, Δf_1 在控制器 K_1 作用下, 频率最大偏差为 -0.022 Hz, 恢复到稳定的调节时间为 9.58 s; 在控制器 K_2 作用

附录 A

下, 频率最大偏差为 -0.018 55 Hz, 比控制器 K_1 作用下的偏差降低了 0.003 45 Hz; 恢复到稳定的调节时间为 6.98 s, 比控制器 K_1 作用下的调节时间缩短了 2.6 s。进一步验证了采用 MVO 算法结合 ITAE 优化所得的 PID 控制器也具有较好的非脆弱性指标。但采用 MVO 算法结合改进的 ITAE 指标优化所得的 PID 控制的非脆弱性指标会更优。

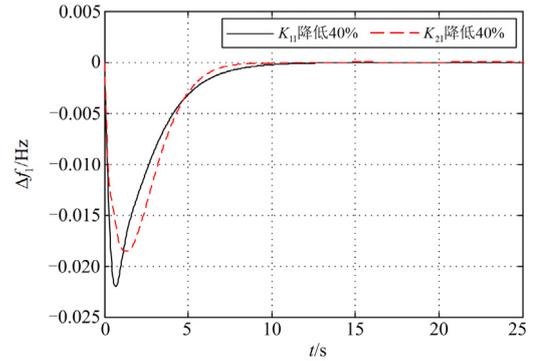


图 11 控制器参数 K_i 变化时 Δf_1 的响应曲线

Fig. 11 Responses curve of Δf_1 when controller parameter K_i changes

4 结语

针对风电输出功率的不确定性及其接入电网导致系统惯性系数等参数的变化对电力系统 LFC 的不利影响, 提出了一种基于 MVO 算法与改进目标函数的 PID 控制参数优化设计方法。建立了含风电的多区域电力系统 LFC 闭环模型。分析了 MVO 算法的原理及其有效性, 分别选取时域输出响应的最小化 J_1 值与改进的 J_2 值作为优化目标函数, 并采用 MVO 算法寻优获得了 LFC 系统的最优 PID 控制器参数。通过对含风电的两区域 4 机组互联电力系统的仿真发现, 选取改进目标函数所得的 PID 控制器参数, 比直接选取 J_1 值所得的控制器参数, 对阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、风电功率偏差扰动以及系统的参数变化具有相对较好的鲁棒性能, 可进一步提升风电的渗透率。尤其是在控制器非脆弱性方面表现出更优的性能。

表 A1 两区域电力 LFC 系统的参数

Table A1 Parameters of two-area power LFC systems

参数	$k-i$: 区域 i 第 k 家发电公司				参数	控制区域	
	1-1	2-1	1-2	2-2		1	2
T_i	0.32	0.30	0.30	0.32	M	0.1667	0.2084
T_g	0.06	0.08	0.06	0.07	D	0.0084	0.0084
R	2.4	2.5	2.5	2.7	β	0.4250	0.3996
α	0.5	0.5	0.5	0.5	T_{i2}	0.2450	

表 A2 30%IR 时两区域电力 LFC 系统参数
Table A2 Parameters of two-area power LFC system with 30%IR

参数	$k-i$: 区域 i 第 k 家发电公司				参数	控制区域	
	1-1	2-1	1-2	2-2		1	2
T_i	0.32	0.30	0.30	0.32	M	0.1166	0.1458
T_g	0.06	0.08	0.06	0.07	D	0.0084	0.0084
R	3.4285	3.5714	3.5714	3.8571	β	0.2884	0.2676
α	0.5	0.5	0.5	0.5	T_{12}	0.2450	

表 A3 J_1 性能指标下控制器参数变化非脆弱性指标
Table A3 Non-vulnerability index for controller parameter change under the J_1 performance indicators

参数	ΔK	F	调节时间/s		最大偏差/Hz	
			Δf_1	Δf_2	Δf_1	Δf_2
基准值	0	0	7.38	6.20	-0.021 11	-0.2325
K_p	+40	0.0336	6.73	5.69	-0.0211	-0.0232
	+20	0.0328	6.93	5.79	-0.0211	-0.0232
	-20	0.0328	5.63	4.97	-0.021 13	-0.0239
	-40	0.0311	6.99	5.73	-0.021 15	-0.0233
K_i	+40	0.364	4.38	3.99	-0.020 45	-0.0223
	+20	0.286	4.78	4.02	-0.020 77	-0.023 37
	-20	0.478	6.82	5.73	-0.021 53	-0.024 47
	-40	1.378	10.08	7.10	-0.022	-0.024 51
K_D	+40	0.0337	7.45	6.82	-0.0192	-0.022
	+20	0.0328	6.62	3.96	-0.0201	-0.022 62
	-20	0.0311	5.85	4.41	-0.022 24	-0.0239
	-40	0.0303	6.99	5.86	-0.023 48	-0.0246

表 A4 J_2 性能指标下控制器参数变化非脆弱性指标
Table A4 Non-vulnerability index for controller parameter change under the J_2 performance indicators

参数	ΔK	F	调节时间/s		最大偏差/Hz	
			Δf_1	Δf_2	Δf_1	Δf_2
基准值	0	0	5.02	4.51	-0.016 46	-0.016 68
K_p	+40	0.000 024	4.61	4.40	-0.0164	-0.0166
	+20	0.000 024	4.64	4.45	-0.0164	-0.0166
	-20	0	4.21	4.09	-0.016 43	-0.016 69
	-40	0	4.75	4.50	-0.016 48	-0.0167
K_i	+40	0.000 57	3.10	2.89	-0.015 07	-0.0156
	+20	0.000 50	3.49	3.20	-0.015 71	-0.015 96
	-20	0.000 31	5.17	5.14	-0.017 33	-0.017 75
	-40	0.0051	7.41	7.10	-0.018 55	-0.019 15
K_D	+40	0.0014	6.59	6.23	-0.015 39	-0.0159
	+20	0.000 31	4.39	5.53	-0.015 75	-0.0163
	-20	0.000 144	4.98	4.02	-0.017 12	-0.017 76
	-40	0.000 24	6.99	5.86	-0.017 82	-0.019 66

参考文献

- [1] 国务院新闻办.《新时代的中国绿色发展》白皮书[Z]. 2023.
- [2] 国家发展改革委员会. “十四五” 可再生能源发展规划[Z]. 2022.
- [3] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [4] 李谟发, 张志文, 练红海, 等. 含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 77-88. LI Mofa, ZHANG Zhiwen, LIAN Honghai, et al. Sampling load frequency control of power systems with doubly-fed wind power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 77-88.
- [5] NGUYEN N, MITRA J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 22(37): 354-363.
- [6] 高启瑄, 吕世轩, 郑丽君, 等. 高渗透率条件下考虑功率协调性的可再生能源调频方式[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 122-131. GAO Qixuan, LÜ Shixuan, ZHENG Lijun, et al. Frequency regulation mode of renewable energy considering power coordination under the condition of high penetration[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 122-131.
- [7] YAN Ruifeng, SAHA T K, BAI Feifei, et al. The anatomy of the 2016 South Australia blackout: a catastrophic event in a high renewable network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5374-5388.
- [8] LIU Xiangjie, ZHANG Yi, LEE K Y. Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5140-5150.
- [9] CUI Yanliang, FEI Minrui, SHEN Yubin. Observer based robust integral sliding mode load frequency control for wind power systems[J]. Control Engineering Practice, 2017, 65(17): 1-10.
- [10] 李勇, 刘芳, 曹一家, 等. 电力系统频率鲁棒控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [11] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 101-109. FU Yang, SONG Yunzhong. Distributed model predictive load frequency control of a multi-area power system considering controllable load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 101-109.
- [12] KUNYA A B, ARGIN M, JIBRIL Y, et al. Improved model predictive load frequency control of interconnected power system with synchronized automatic generation control loops[J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2020, 47(9): 1-13.
- [13] TANG Yanmei, BAI Yan, HUANG Congzhi, et al. Linear active disturbance rejection based load frequency control concerning high penetration of wind energy[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 95: 259-271.
- [14] 李朋真, 刘艳红, 吴振龙. 高比例可再生能源的多区域电力系统负荷频率自抗扰控制[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 33-41. LI Pengzhen, LIU Yanhong, WU Zhenlong. Active disturbance rejection control on load frequency of multi-area power systems with high-proportion renewable energy[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10): 33-41.
- [15] 米阳, 伦雪莹, 孟凡斌, 等. 基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源电力系统频率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 13-20. MI Yang, LUN Xueying, MENG Fanbin, et al. Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and EV auxiliary regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 13-20.
- [16] MOHAMED M, MOSTAFA I M, MARIAM A S, et al. An adaptive load frequency control for power systems with renewable energy sources[J]. Energies, 2022, 15: 573.
- [17] MING Guoxin, GENG Jian, LIU Jiantao, et al. Load frequency robust control considering intermittent characteristics of demand-side resource[J]. Energies, 2022, 15: 4370.
- [18] 周一辰, 覃露, 李永刚. 基于多求和不等式输出反馈 Lyapunov 判据的时变时滞电力系统二次调频控制[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3247-3258. ZHOU Yichen, QIN Lu, LI Yonggang. Secondary frequency modulation control of power with time-varying delay based on Lyapunov criterion of multi-summation inequality output feedback[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3247-3258.
- [19] 李志军, 王硕, 张家安, 等. 基于变论域模糊逻辑的互联电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 151-160. LI Zhijun, WANG Shuo, ZHANG Jiaan, et al. Variable universe fuzzy logic-based load frequency control in an interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 151-160.

- [20] 项雷军, 陈昊, 郭新华, 等. 基于模糊分数阶 PID 的含电动汽车的多能源微电网二次频率控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 74-80.
XIANG Leijun, CHEN Hao, GUO Xinhua, et al. Secondary frequency control of multi-energy microgrid with electric vehicles based on fuzzy fractional-order PID[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 74-80.
- [21] 郭强, 薛志伟, 芦晓辉, 等. 含风光水火储的多区域互联电力系统协同优化负荷频率控制[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 136-143.
GUO Qiang, XUE Zhiwei, LU Xiaohui, et al. Optimal control of load frequency of multi-region interconnected power system based on mutual benefit of wind, solar, water, thermal and storage power[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 136-143.
- [22] PILLAI A G, SAMUEL E R, UNNIKRIISHNAN 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.
- [23] 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.
- [24] GUPTA N K, KAR M K, SINGH A K A. Design of a 2-DOF-PID controller using an improved sine-cosine algorithm for load frequency control of three-area system with nonlinearities[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 490-507.
- [25] KONG Fannie, LI Jinfang, YANG Daliang. Multi-area load frequency control of hydro-thermal-wind power based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Elektronika ir Elektrotechnika, 2020, 26(6): 1392-1215.
- [26] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联电网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.
ZUO Jian, XIE Pingping, LI Yinhong, et al. Intelligent optimization algorithm based load frequency controller design and its control performance assessment in interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.
- [27] MIRJIALILI S, MIRJIALILI S M, HATAMLOU A. Multi-verse optimizer: a nature inspired algorithm for global optimization[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(2): 495-513.
- [28] 杨文珍, 何庆. 动态串行机制多元宇宙优化算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3623-3628, 3633.
YANG Wenzhen, HE Qing. Dynamic multi-serial mechanism MVO optimization algorithm[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(12): 3623-3628, 3633.
- [29] 刘世宇, 王孜航, 杨德友. 多元宇宙算法及其在电力系统环境经济调度的应用[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(4): 19-26.
LIU Shiyu, WANG Zihang, YANG Deyou. Optimal scheduling of energy saving and emission reduction in power system based on multi-verse optimizer algorithm[J]. Journal of Northeast Electric power university, 2018, 38(4): 19-26.
- [30] LIN Jian, ZHU Lei, WANG Zhoujing. A hybrid multi-verse optimization for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127(1): 1089-1100.
- [31] 龙干, 黄媚, 方力谦, 等. 基于改进多元宇宙算法优化 ELM 的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 99-106.
LONG Gan, HUANG Mei, FANG Liqian, et al. Short-term power load forecasting based on an improved multi-verse optimizer algorithm optimized extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 99-106.

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2023-10-23

作者简介:

李漠发(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为分布式电源接入电网的故障特性分析、保护以及频率稳定性等; E-mail: limofa@126.com

张志文(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流电能变换系统理论与新技术、新型电气装备自动化与控制技术、电力系统谐波抑制、现代电力电子技术及应用等; E-mail: hdzzw@126.com

胡斯佳(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为智能配/用电系统与装备、先进轨道交通电力系统和高性能电磁装备。E-mail: huda_hsj@163.com

(编辑 周金梅)