

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209242

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

郭强¹, 薛志伟², 芦晓辉², 杨琦¹

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001;

2. 国网山西省电力公司调度控制中心, 山西 太原 030001)

[摘要] 针对现代电力系统中呈现出的互联和多源的特点, 首先提出了一种启发式智能优化算法辅助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方法, 该方法以每个区域的区域控制偏差为目标函数; 然后利用鲸鱼智能优化算法鲁棒性强、求解精度高及收敛快速等优点, 对各区域的 PID 负荷频率控制器参数进行协同优化, 使得系统在各种随机扰动下, 都能够维持频率稳定和长期安全运行; 最后建立含风光水火储的三区域互联电力系统模型, 对比不同优化整定方法下的互联电力系统频率和联络线功率偏差, 测试系统在不同扰动时各区域的稳定性及所提方法的有效性。实验结果表明, 所采取的多区域互联负荷频率控制器协同优化整定方法有效地改善了系统的稳定性, 具有良好的鲁棒性和实用性。

[关键词] 负荷频率控制; 鲸鱼优化算法; 多源互联电力系统; 控制器参数优化

[引用本文格式] 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.

Optimal control of load frequency of multi-region interconnected power system based on mutual benefit of wind, solar, water, thermal and storage power

GUO Qiang¹, XUE Zhiwei², LU Xiaohui², YANG Qi¹

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Company Dispatching Center, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of interconnection and multi-source in modern power systems, a heuristic intelligent optimization algorithm is proposed to assist multi-area interconnected power systems with wind, solar, water, thermal storage to optimize load frequency control. This method takes the area control error of each region as the objective function, and uses the advantages of whale intelligent optimization algorithm, such as strong robustness, high solution accuracy and fast convergence speed to jointly optimize the parameters of the PID load frequency controller in each region, so that the system can maintain frequency stability and long-term safe operation under various random disturbances. Finally, a three-area interconnected power system model with wind, solar, water and thermal storage is established to compare the frequency and tie line power deviation of the interconnected power system in different optimization tuning methods, and test the stability of the system in different regions under different disturbances and the effectiveness of the proposed method. The experimental results show that the coordinated optimization tuning method of the multi-area interconnected load frequency controller adopted in this paper effectively improves the stability of the system, and has good robustness and practicality.

Key words: load frequency control; whale optimization algorithm; multi-source interconnected power system; controller parameter optimization

收稿日期: 2022-09-24 网络首发日期: 2023-02-25

基金项目: 国网山西省电力公司电力科学研究院科技项目(52053020002S)

Supported by: Science and Technology Project of Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company (52053020002S)

第一作者简介: 郭强(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为自动控制, 346526139@qq.com。

随着我国电力行业的发展，如今电力系统已成为一个结构复杂、由多个区域组成的庞大系统。为维持系统的频率稳定，负荷频率控制（LFC）通过控制区域内机组的有功出力来确保系统频率稳定在基准值（50 Hz）。但随着风、光等可再生能源大量接入电网^[1-2]，传统的负荷频率控制方法面对随机性和波动性较强的可再生能源很难保证控制效果^[3]。因此针对含有风、光等可再生能源的电力系统设计出合适的负荷频率控制策略一直是电力系统科技工作者的重要课题之一。

近年来，先进控制与负荷频率控制相结合的研究取得了诸多成果。李玲芳等^[4]提出一种基于交替方向乘法法的分布式最优负荷频率控制器设计方法，该方法具有良好的控制性能，同时具备较高的计算效率。文献[5-7]基于风电参与下的电力系统，根据不同的控制策略利用滑模控制器进行负荷频率控制。杨昱等^[8]利用模型预测控制算法实现负荷频率控制，并建立三区域电力系统模型，通过对比 PI 控制器和模型预测控制器（MPC）的控制效果，证明了该方法的优越性。关燕鹏等^[9]在传统的 LFC 模型基础上增加基于储能的虚拟惯量控制环节并设计了稀疏结构控制器，随后在四区域互联电力系统中验证了该方法的实用性。郑阳等^[10]提出了一种多变量约束隐式广义预测负荷频率控制方法，通过该方法所设计的控制器具有良好的控制效果和鲁棒性，且能有效改善系统的状态约束能力。

新的控制策略层出不穷，但 PID 控制器仍是实际电力系统中最常用和最实用的控制器。其结构简单、易于试验，在实际电力系统中的应用非常广泛。负荷频率控制中 PID 控制器的优化主要集中于控制器参数的优化，选择合适的控制器参数能够有效提高控制器性能和系统稳定性，大量学者对此进行了深入研究。比较经典的调参方式有临界比例带法、衰减曲线法、Z-N 整定方法^[11-12]等。随着智能优化算法的发展，遗传算法、粒子群算法^[13]、灰狼算法等智能算法逐渐应用于 PID 控制器中，相较于传统方法，通过智能算法得到的控制器的适应性更高、控制效果更好，因此被广泛应用于 PID 控制器的参数整定中。田园园等^[14]将粒子群改进自适应细菌觅食优化算法应用于 LFC 控制器设计，相较于传统的粒子群算法，该方法精确度更高、寻优速度更快。邵泰衡等^[15]设计了一种基于改进飞蛾优化算法的水火互联电网负荷频率控制方案，该方案通过改进

飞蛾优化算法对分数阶 PID 控制器参数进行智能寻优，能够有效提高系统稳定性，满足实际运行需要。文献[16]采用灰狼优化算法，但在设计多区域电力系统时，只考虑了包含光伏电站在内的三区域互联电力系统。针对文献[16]中互联电力系统的局限性，侯国莲等^[17]建立了一个风、光参与下的四区域互联电力系统模型，并基于灰狼优化算法展开多源电力互联系统负荷频率控制研究。上述文献中虽然考虑了新能源参与的情况，但在实际的电力行业中，储能技术也被广泛应用于智能电网、风能和光伏储能电站等^[18-19]。

近年来，含风光水火储多种电源类型的大型清洁能源基地不断建设，多电源多区域互联电力系统负荷频率控制协同需求日益迫切。同时，相较于传统智能优化算法，鲸鱼优化算法操作简单，全局搜索能力强，采用此方法整定负荷频率控制器参数具有较好的应用潜力。基于以上分析，本文提出了基于鲸鱼优化算法的含风光水火储的多区域协同优化负荷频率控制方法。通过建立含风光水火储的多区域互联电力系统，在系统内加入不同扰动对所提方法的控制性能进行对比验证。

1 互联电力系统负荷频率控制模型

现代电力系统是由多个区域组成的庞大系统，每个区域中含有多个机组，各个区域之间通过联络线相连。在建立互联电力系统负荷频率控制模型时，一般选择忽略无功和电压的影响，且将同一区域内的发电机组等效为一台机组^[20]。火电区域和水电区域的结构如图 1、图 2 所示。

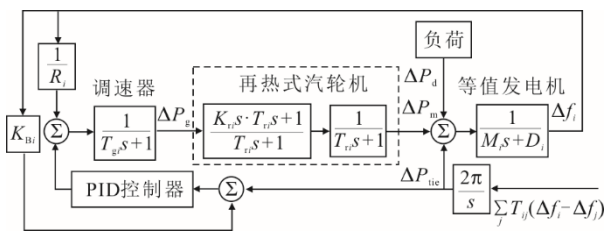


图 1 火电参与区域负荷频率控制模型
Fig.1 The area load frequency control model for thermal power

图 1 中： K_{Bi} 为控制区域 i 频率偏差系数； R_i 为控制区域 i 的发电机组调差系数； Δf_i 为控制区域 i 频率偏差； ΔP_g 为汽轮机阀门变化量； ΔP_m 为机组出力变化量； ΔP_{tie} 为联络线功率偏差。系统频率波动特性满足式(1)。

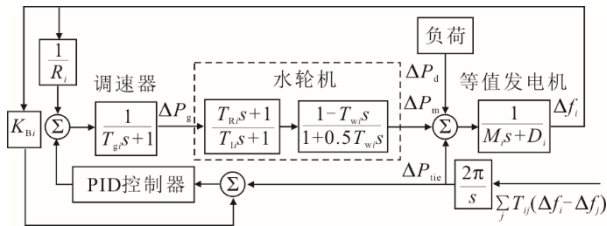


图2 水电参与区域负荷频率控制模型

Fig.2 The area load frequency control model for hydropower

$$\Delta f = \frac{1}{Ms + D} (\Delta P_a - \Delta P_d) \quad (1)$$

式中： M 为系统的惯性系数； D 为电系统的负载阻尼系数； ΔP_a 为系统内所有电源出力之和； ΔP_d 为系统内的波动负载之和。

联络线采用传递函数：

$$G_t(s) = \frac{2\pi T_{ij}}{s} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (2)$$

式中： T_{ij} 为*i*、*j*两区域之间的联络线同步系数。

再热式汽轮机和水轮机的线性表达式为：

$$G_r(s) = \frac{K_r \cdot T_r s + 1}{T_r s + 1} \cdot \frac{1}{T_t s + 1} \quad (3)$$

$$G_w(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (4)$$

式中： T_t 为汽轮机时间常数； T_r 为再热时间常数； K_r 为再热系数； T_w 为水轮机惯性时间常数。

汽轮机调速器的线性表达式为：

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \quad (5)$$

式中： T_g 为调速器时间常数。

传统的水电机组调速器因水轮的强滞后性多采用式(6)所示调速器^[15]。

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \cdot \frac{T_R s + 1}{T_1 s + 1} \quad (6)$$

式中： T_R 、 T_1 分别为水轮机调节阀时间常数。

风电场和光伏电站的机组单元数量多、协调控制与稳定运行困难，需从场站级提出解决方案^[21-23]。变速风电机组通过增加频率环节对桨距角控制，使其具有一次频率调节能力。风电机组的一次调频模型等效为一阶滞后传递函数。其中，风电机组变桨距控制动态响应模型为：

$$G_{bj}(s) = -\frac{K_{bj}}{T_{bj} s + 1} \quad (7)$$

式中： K_{bj} 为风电参与调频的一次调频系数； T_{bj} 为变桨距响应时间常数。

光伏电站有功削减参与系统频率调节，将光伏电站等效为一阶惯性环节，其动态响应模型如下：

$$G_{pv}(s) = -\frac{K_{pv}}{T_{pv} s + 1} \quad (8)$$

式中： K_{pv} 为光伏电站参与调频的一次调频系数； T_{pv} 为光伏电站输出有功功率变化量。

在实际工程应用中，电化学储能是占比最大的储能系统，而锂离子电池是当前较为成熟、应用较为广泛的电化学储能技术，其是将电池储能电源等效成时间常数的一阶惯性环节，具体的传递函数如下：

$$G_{bess}(s) = -\frac{K_{bess}}{T_{bess} s + 1} \quad (9)$$

式中： T_{bess} 为电池储能环节时间常数； K_{bess} 为电池储能增益系数。

为避免很小的频率波动造成储能系统不必要的频繁充放电动作损耗储能系统寿命，锂电池储能系统设置一次调频死区。当 $-0.033 \text{ Hz} < \Delta f < 0.033 \text{ Hz}$ 时，锂电池储能不参与一次调频，当 $\Delta f < -0.033 \text{ Hz}$ 或 $\Delta f > 0.033 \text{ Hz}$ 时，锂电池储能系统启动一次调频功能。此外，为减少储能发生过充过放的次数，引入自适应出力控制模块控制储能的实际出力。锂电池储能自适应出力控制模块根据锂电池的荷电状态(SOC)和一次调频功率参考值等综合判断确定锂电池储能一次调频实际出力。

2 鲸鱼优化算法的原理及应用

2.1 鲸鱼优化算法的原理

鲸鱼优化算法(WOA)主要包括包围猎物、发泡网攻击、搜索猎物3个阶段^[24-25]。

2.1.1 包围猎物

根据当前适应度最优的鲸鱼个体位置进行位置更新，具体流程如下：

$$D = |CY_b(t) - Y(t)| \quad (10)$$

$$Y(t+1) = Y_b(t) - AD \quad (11)$$

式中： t 为当前迭代次数； $Y_b(t)$ 为目标函数最优的鲸鱼位置； $Y(t)$ 为第*t*次迭代中鲸鱼的位置向量； A 为收敛因子； C 为摇摆因子。 A 和 C 的表达式为：

$$A = 2ar_1 - a \quad (12)$$

$$C = 2r_2 \quad (13)$$

$$a = 2 - \frac{2t}{T_{\max}} \quad (14)$$

式中： r_1 和 r_2 为(0,1)中的随机数； T_{\max} 为最大迭代次数。

2.1.2 发泡网攻击

发泡网攻击是座头鲸特有的狩猎行为，在数学

模型上的表达为:

$$Y(t+1) = Y_b(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l) \quad (15)$$

式中: $D_p = |Y_p(t) - Y(t)|$ 为该位置处的鲸鱼和最优的鲸鱼个体之间的距离; b 为对数螺旋形状常数; l 为随机数, 取值范围为 $(-1, 1)$ 。

鲸鱼在以螺旋形状游向猎物的同时会收缩包围网, 一般选择各以 50% 的概率选择收缩包围网和以螺旋形状游向猎物, 数学上的表达为:

$$Y(t+1) = \begin{cases} Y_b(t) - AD, & P < 0.5 \\ Y_b(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l), & P \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

2.1.3 搜索猎物

算法设定当收敛因子 A 的绝对值小于 1 时, 鲸鱼向猎物发起攻击; 当 A 的绝对值大于等于 1 时, 鲸鱼游向种群中随机一条鲸鱼的位置。具体数学模型如下:

$$D = |CY_r(t) - Y(t)| \quad (17)$$

$$Y(t+1) = Y_r(t) - AD \quad (18)$$

式中: $Y_r(t)$ 为某个随机的鲸鱼位置向量。当 $P < 0.5$ 时, 此时鲸鱼采用包围捕食方式, 根据 A 的绝对值对鲸鱼位置进行更新。

$$Y(t+1) = \begin{cases} Y_b(t) - A \cdot |C \cdot Y_b(t) - Y(t)|, & |A| < 1 \\ Y_r(t) - A \cdot |C \cdot Y_r(t) - Y(t)|, & |A| \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

综上所述, 鲸鱼算法中对每个鲸鱼位置的更新方法由 P 和 A 的绝对值决定。当 $P < 0.5$ 时, 此时鲸鱼采用包围捕食方式, 根据 A 的绝对值对鲸鱼位置进行更新; 当 $P \geq 0.5$ 时, 此时鲸鱼采用螺旋式位置更新。

2.2 鲸鱼优化算法在多区域负荷频率控制中的应用

对于互联电力系统中的负荷频率控制问题, 传统 PID 控制便可实现无差调节, 但为了系统在各种随机扰动下能快速恢复频率稳定和长期安全运行, 需要对控制器进行参数整定。

δ_{ACE_i} 表示互联系统中第 i 个控制区域中输出控制区域误差的值, 具体表达式为:

$$\delta_{ACE_i} = \Delta P_{tieij} + \beta_i \Delta f_i \quad (20)$$

式中: ΔP_{tieij} 为区域 i 与区域 j 之间的联络线功率偏差; β_i 为频率偏差常数。在多区域互联电力系统中, 通常以 δ_{ACE} 的值来判断控制效果的好坏。根据 δ_{ACE} 设计评估函数, 选取 IAE 作为性能指标, 确定的适应度函数为:

$$\min J_{IAE} = \int_0^T (|\Delta f_i| + |\Delta P_{tieij}|) dt \quad (21)$$

基于以上分析, 参数优化问题可以看作在一定参数范围内寻找使目标函数达到最小值的控制器参数值。为达到理想的控制效果, 本文提出一种运用鲸鱼优化算法辅助负荷频率控制的方法, 利用鲸鱼优化算法全局搜索能力强、求解精度高及收敛快速等优点, 实现对负荷频率控制中 PID 控制器参数的整定。设 PID 参数整定问题中的比例系数 K_P 、积分时间系数 K_I 和微分时间系数 K_D 决策变量为鲸鱼的位置分量。目标函数为式(21), 参数优化流程如图 3 所示。

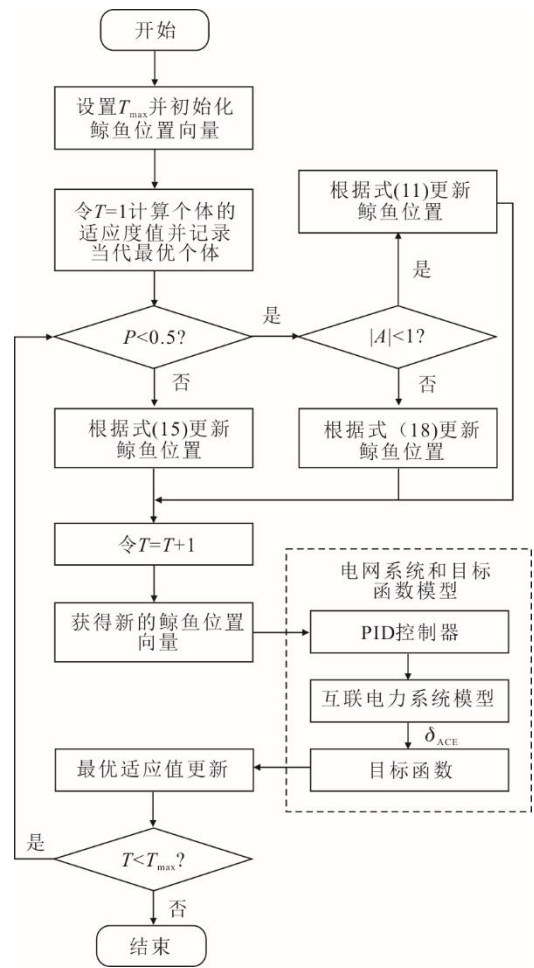


图3 鲸鱼算法PID优化调参过程
Fig.3 The whale algorithm for optimization of PID parameters

3 仿真实验

3.1 仿真模型搭建

为验证本文设计控制器的性能, 利用 MATLAB/Simulink 构建包含风电和光电的三区域互联电力系统模型进行仿真验证。仿真系统中包括 3 个区域电网模型。其中: 区域 1 为风电机组、火

电机组和储能装置;区域2为光伏电站和火电机组;区域3为水电机组和火电机组。具体结构如图4、图5所示。

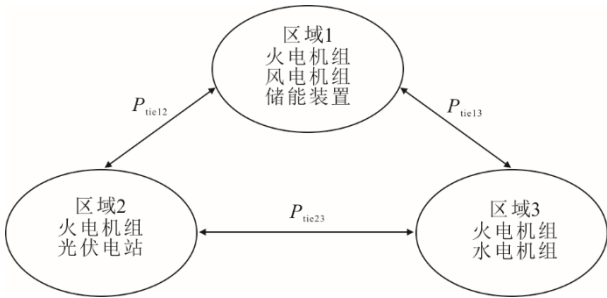


图4 三区域互联电力系统结构示意图

Fig.4 Structural diagram of the three-area interconnected power system

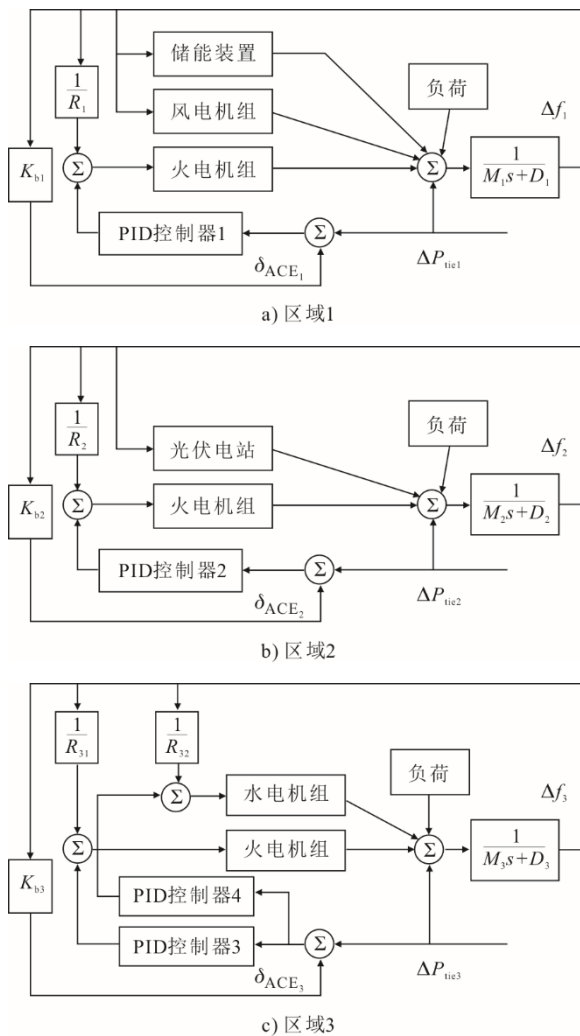


图5 三区域负荷频率控制模型

Fig.5 The three-area load frequency control model

设置互联电力系统的参数为： $M_i=0.1667$ p.u., $D_i=0.0083$ p.u., $T_i=0.3$ s, $T_r=10$ s, $K_r=0.5$ s, $T_w=1$ s, $T_{gi}=0.08$ s, $T_R=0.6$ s, $T_I=10$ s, $T_{ij}=0.0707$ s,

$R_1=R_2=R_{31}=2.4$ Hz/(p.u.), $R_{32}=3$ Hz/(p.u.), $K_{bj}=20$ Hz/(p.u.), $T_{bj}=3$ s, $K_{pv}=30$ Hz/(p.u.), $T_{pv}=3$ s, $K_{bess}=33.4$ Hz/(p.u.), $T_{bess}=0.03$ s。

3.2 仿真研究

设在区域1中 $t=1$ s 施加 0.01 p.u.的负荷扰动,分别采用鲸鱼优化算法、粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)对控制器的参数进行优化,仿真结果如图6、图7所示。

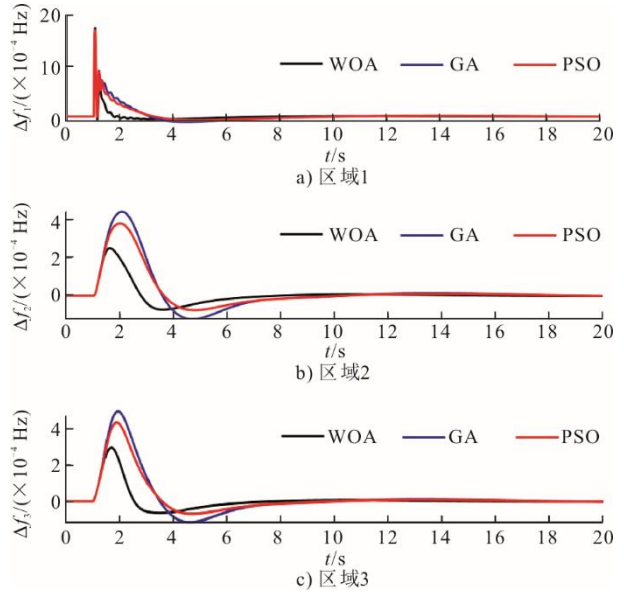


图6 区域1加入扰动后各区域频率偏差响应曲线

Fig.6 The frequency deviation response curve of each region after adding disturbance in area 1

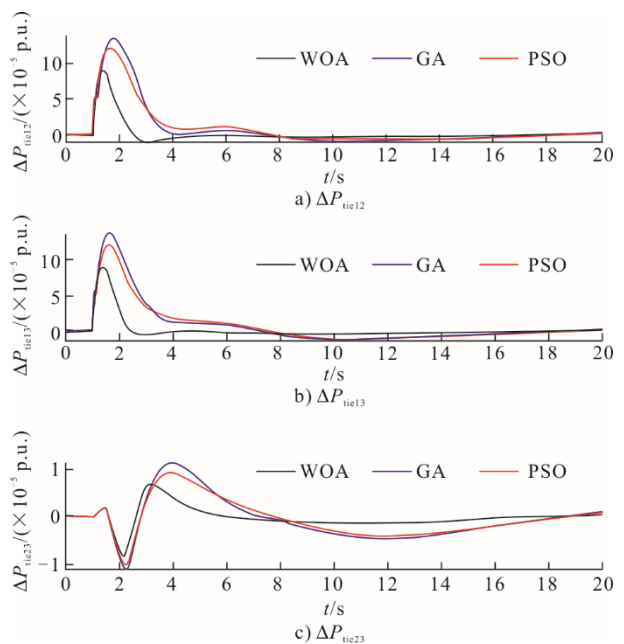


图7 区域1加入扰动后各区域之间的联络线功率偏差响应曲线

Fig.7 The tie line power deviation response curve between regions after adding disturbance in area 1

表1 使用鲸鱼优化算法优化后的PID控制器参数
Tab.1 The PID controller parameters after WOA optimization

控制器参数	控制器1	控制器2	控制器3	控制器4
K_P	1.895 5	0.756 8	1.995 5	0
K_I	1.964 4	0.557 7	1.032 7	0.566 5
K_D	1.812 4	1.876 9	1.067 0	0

由图6、图7可以看出：当区域1发生负荷扰动时，区域1中的频率偏差变化明显大于其他区域的频率偏差变化；此外，比较3种方法得到的频率偏差波动曲线和联络线功率偏差响应曲线可以得到：相较于粒子群算法和遗传算法，基于鲸鱼优化算法所设计的控制器，超调量更小、能够更快达到稳定，因此该方法所设计的控制器的控制效果要更加优越。使用鲸鱼优化算法优化后的PID控制器参数见表1。

在实际电厂运行中，负荷扰动不会是单一的阶跃扰动。为模拟实际情况，从0s开始，在区域1中加入200s的随机阶跃负荷扰动，得到3个区域的频率偏差和联络线功率偏差如图9、图10所示。

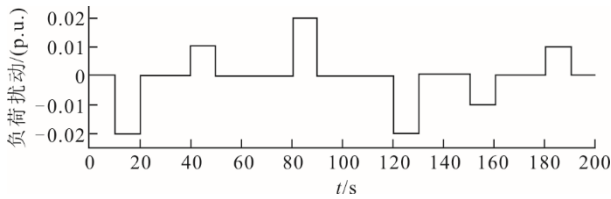


图8 随机阶跃负荷扰动
Fig.8 Random step load disturbance

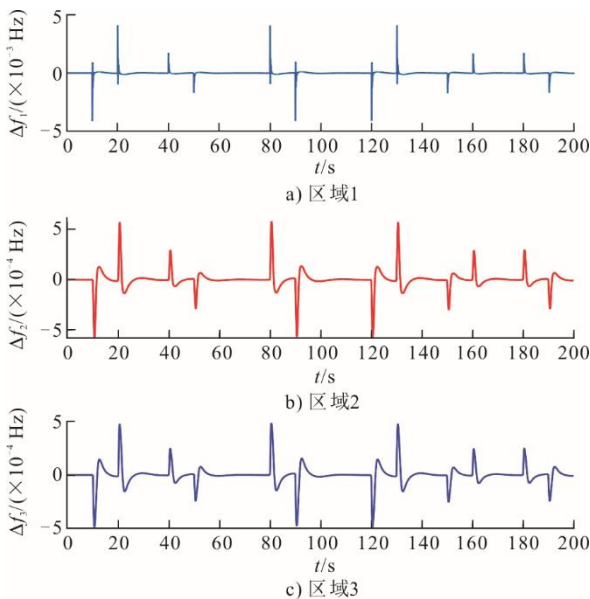


图9 加入随机扰动后各区域频率偏差响应曲线
Fig.9 Response curves of regional frequency deviation among three areas after adding random disturbance

由图9和图10的仿真结果可以看出，在加入随机扰动后，本文所设计的控制器仍能够在较短时间内使系统达到稳定状态，大大增加了多区域互联电力系统的稳定性。

鲁棒性是指系统内部在受到扰动的情况下，仍然可以维持某些性能的特性。为验证本文所设计的控制器的鲁棒性，将系统参数 T_p 改为标准参数的-20%和+20%，检测结果如图11所示。

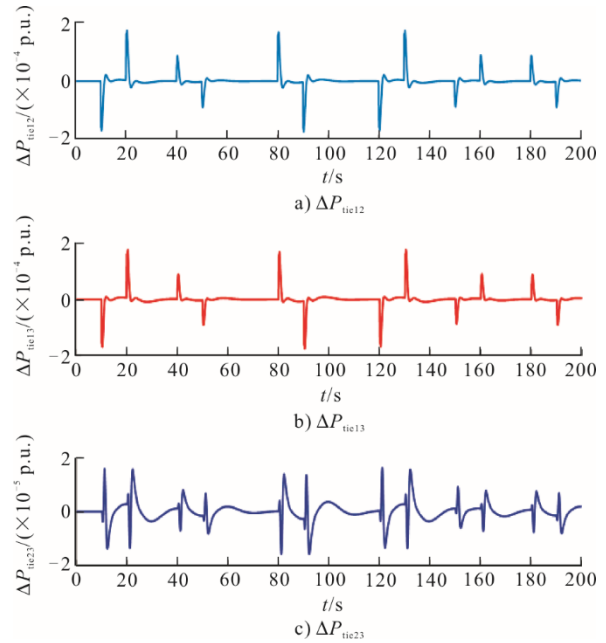


图10 加入随机扰动后各区域之间的联络线功率偏差响应曲线

Fig.10 Response curves of tie line power deviation among three areas after adding random disturbance

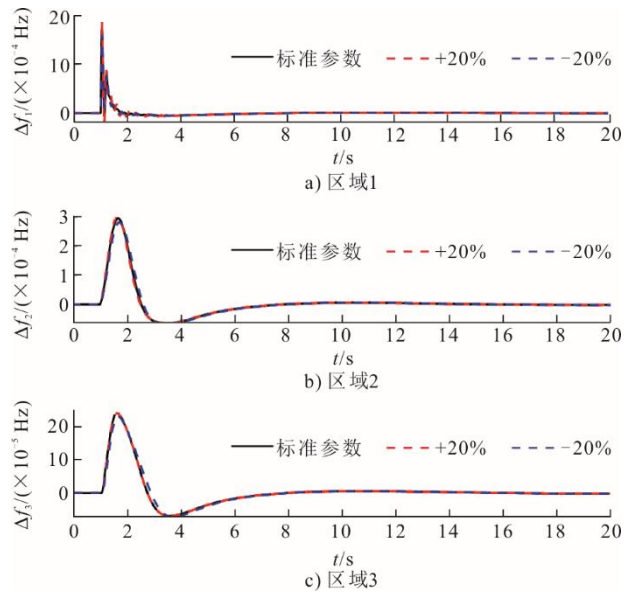


图11 当 T_p 分别为标准参数、-20%和+20%时各区域的频率偏差
Fig.11 The frequency deviation fluctuation of three areas with variation of T_p

由图 11 可得, 当 T_p 变化 20% 时, 系统频率偏差波动曲线与发生扰动前变化不大。因此, 在系统参数发生变化的情况下, 本文所提出的控制器仍然能够保存良好的控制效果, 证明系统具有良好的鲁棒性。

4 结 论

本文提出了一种运用鲸鱼优化算法辅助含风光水火储的多区域互联电力系统负荷频率控制方法。为验证该方法的有效性, 首先建立了含有风、光、水、火、储的三区域多源互联电力系统; 然后在区域 1 中加入负荷扰动, 通过比较与遗传算法和粒子群优化算法的仿真结果, 验证了该控制器的控制性能要优于其他 2 种方法; 随后模拟实际电厂情况加入随机扰动, 仿真结果表明该控制器能快速消除扰动带来的影响; 最后将各个区域内的电力系统时间常数修改为标准参数的-20%和+20%, 对设计的控制器进行鲁棒性分析, 仿真结果表明在系统内部发生扰动时, 频率偏差波动曲线与发生扰动前变化不大, 证明该控制器具有较强鲁棒性。

[参 考 文 献]

- [1] ERSHUN D, ZHANG N, BRI M H, et al. Operation of a high renewable penetrated power system with CSP plants: a look-ahead stochastic unit commitment model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 140-151.
- [2] 严干贵, 张善峰, 贾祺, 等. 光伏发电主动参与电网频率调节的机理分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 191-199.
YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, JIA Qi, et al. Mechanism analysis of PV generation actively participating in power grid frequency regulation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(8): 191-199.
- [3] 樊国东, 刘世林, 裴俊, 等. 光火储混合发电系统的负荷频率协调优化控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 134-143.
FAN Guodong, LIU Shilin, PEI Jun, et al. Load frequency coordinated optimization control of hybrid power generation system consisting of PV[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(12): 134-143.
- [4] 李玲芳, 陈义宣, 许岩, 等. 基于交替方向乘子法的分布式负荷频率控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 125-132.
LI Lingfang, CHEN Yixuan, XU Yan, et al. Distributed optimal load frequency control strategy based on alternating direction method of multiplier[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 125-132.
- [5] 米阳, 郝学智, 刘红业, 等. 基于滑模控制的含风储多域电力系统负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 437-444.
MI Yang, HAO Xuezhi, LIU Hongye, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 437-444.
- [6] 韩云昊, 马超, 朱银珠, 等. 考虑风能渗透的电力系统的负荷频率控制研究[J]. 控制工程, 2018, 25(11): 2046-2051.
HAN Yunhao, MA Chao, ZHU Yinzhu, et al. Load frequency control for power systems with wind energy[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(11): 2046-2051.
- [7] 李峰, 余为杰, 张周胜. 含风电的多域互联电力系统负荷频率控制方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 195-199.
LI Feng, YU Weijie, ZHANG Zhousheng. Load frequency control for multi-area power system with wind power generation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 195-199.
- [8] 杨罡, 刘明光, 屈志坚. 基于 MPC 算法的电力系统负荷频率控制[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(2): 105-110.
YANG Gang, LIU Mingguang, QU Zhijian. Load frequency control of power systems based on MPC algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(2): 105-110.
- [9] 关燕鹏, 李晓宁, 贾新春. 含可再生能源的多区域电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 64-71.
GUAN Yanpeng, LI Xiaoning, JIA Xinchun. Load frequency control of multi-area power system with renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 64-71.
- [10] 郑阳, 陈启卷, 刘宛莹, 等. 基于多变量约束 GPC 的负荷频率控制[J]. 控制工程, 2022, 29(12): 2204-2212.
ZHENG Yang, CHEN Qijuan, LIU Wanying, et al. Multivariable constrained generalized predictive control-based load frequency control scheme[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(12): 2204-2212.
- [11] PANDEY S K, MOHANTY S R, KISHOR N. A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25(5): 318-334.
- [12] CHATTERJEE A N, MUNSHI S. An adaptive bacterial foraging algorithm for fuzzy entropy based image segmentation[J]. Expert Systems with Application, 2011, 38(12): 15489-15498.
- [13] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1-7.
ZHOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load frequency control of power systems with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1-7.
- [14] 田园园, 金国强, 彭道刚. 基于 PSO-ABFO 的负荷频率控制系统控制器设计与优化[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 120-127.
TIAN Yuanyuan, JIN Guoqiang, PENG Daogang, et al. Design and optimization of load frequency control system controller based on PSO-ABFO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 120-127.
- [15] 邵泰衡, 麻常辉, 马欢, 等. 基于改进飞蛾优化算法的水火互联电网负荷频率控制[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 197-201.
SHAO Taiheng, MA Changhui, MA Huan, et al. Load frequency control of hydro and thermal interconnected power grid based on improved moth-flame optimization algorithm[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 197-201.

- [16] SHARMA A, AIKIA L C. Automatic generation control of a multi-area ST-thermal power system using grey wolf optimizer algorithm based classical controllers[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015(73): 853-862.
- [17] 侯国莲, 郭雅迪, 弓林娟. 基于灰狼优化算法的多源互联电力系统负荷频率控制[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(5): 52-58.
HOU Guolian, GUO Yadi, GONG Linjuan. Load frequency control of multi-source power system based on grey wolf optimization[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2019, 40(5): 52-58.
- [18] 马瑞, 李浩, 吴震宇. 考虑置信水平的混合储能平抑风电波动[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(1): 35-40.
MA Rui, LI Hao, WU Zhenyu. Wind power fluctuations suppression with hybrid energy storage considering the confidence level[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(1): 35-40.
- [19] GUO T, LIU Y, XIANG Y, et al. A novel two-stage model predictive control for wind power smoothing based on HESS[C]//8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). IET, 2019: 1-8.
- [20] PRABHA K. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 389-410.
PRABHA K. *Power system stability and control*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 389-410.
- [21] 万天虎, 汪飞, 张江滨, 等. 风电场一次调频控制方法及试验研究[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(4): 60-65.
WAN Tianhu, WANG Fei, ZHANG Jiangbin, et al. Study on wind farm primary frequency regulation control method and test[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(4): 60-65.
- [22] 吴鹏飞, 刘博, 杨鹏程, 等. 考虑天气和运行状态的光伏一次调频控制及评估[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(3): 275-282.
WU Pengfei, LIU Bo, YANG Pengcheng, et al. PV primary frequency regulation and evaluation considering weather characteristics and operating conditions[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(3): 275-282.
- [23] 严才, 姚伟, 崔岩, 等. 计及虚拟惯量与下垂控制的风火耦合系统小扰动稳定分析[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(8): 19-28.
YAN Cai, YAO Wei, CUI Yan, et al. Small disturbance stability analysis of wind-thermal coupling system considering virtual inertia and droop control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(8): 19-28.
- [24] 崔智忠, 曾国辉, 黄勃, 等. 基于鲸鱼优化算法的双向LLC谐振变换器控制参数优化[J]. *制造业自动化*, 2021, 43(9): 83-86.
CUI Zhizhong, ZENG Guohui, HUANG Bo, et al. Parameter optimization of bidirectional LLC resonant converter control based on whale optimization algorithm[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(9): 83-86.
- [25] 田林钢, 杨丹. 基于鲸鱼优化算法的区域水资源优化配置研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(7): 31-34.
TIAN Lingang, YANG Dan. Optimal allocation of regional water resources based on whale optimization algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(7): 31-34.

(责任编辑 邓玲惠)