

# 基于正余弦优化算法的两区域多电源互联 电力系统负荷频率控制

李英<sup>1</sup>,王金平<sup>2</sup>,刁怀佳<sup>2</sup>,张春晖<sup>3</sup>

(1. 国能国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 102211; 2. 南京工程学院 能源与动力工程学院, 江苏 南京 211167;  
3. 上海市东方海事工程技术有限公司, 上海 210000)

**摘要:**为进一步提高两区域多电源互联电力系统负荷频率闭环调节的性能,针对以包含火电、水电及燃气轮机等多个发电单元的两区域互联电力系统模型,提出采用正余弦优化算法(SCA)对各发电单元的控制器的动态优化,以实现负荷频率的有效控制。研究了以绝对误差的积分准则(ITAE)为优化目标函数,分析优化后控制器的调节特性。结果表明:在区域内施加1%扰动条件下,控制器的调节时间约为2s,频率最大超调为0.0009 pu;在区域内频率偏置系数变化50%的条件下,频率最大超调约为0.003 pu,控制器调节时间为2.6s;在区域内发电单元调整系数变化50%的情况下,频率最大超调约为0.001 pu,控制器调节时间约为2.5s。相比微分进化算法DE优化和最优控制算法,本研究正余弦优化算法SCA动态优化控制器表现出更好的调节效果。

**关键词:**正余弦优化算法;互联电力系统;负荷频率控制;多电源;控制系统性能

中图分类号:TM714 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.016

[引用本文格式]李英,王金平,刁怀佳,等.基于正余弦优化算法的两区域多电源互联电力系统负荷频率控制[J].热能动力工程,2025,40(5):141-149. LI Ying, WANG Jinping, DIAO Huaijia, et al. Load frequency control of a two-area multi-source interconnected power system based on cosine optimization algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 141-149.

## Load Frequency Control of A Two-Area Multi-Source Interconnected Power System Based on Cosine Optimization Algorithm

LI Ying<sup>1</sup>, WANG Jinping<sup>2</sup>, DIAO Huaijia<sup>2</sup>, ZHANG Chunhui<sup>3</sup>

(1. Guoneng Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 102211;  
2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 211167;  
3. Shanghai Oriental Maritime Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 210000)

**Abstract:** To further improve the performance of load frequency closed-loop regulation in a multi-source interconnected power system, a two-area interconnected power system model containing multiple generating units such as thermal power, hydropower and gas turbines was considered. A sine cosine algorithm (SCA) was proposed to dynamically optimize the controllers of each generating unit, aiming to achieve effective control of load frequency. The integral of time-weighted absolute error (ITAE) was adopted as the optimization objective function, and the regulation characteristics of the optimized controllers were analyzed. The results show that under a 1% disturbance within an area, the controller's regulation time is about 2 seconds, and the maximum frequency overshoot is 0.0009 pu. When the frequency bias coefficient varies by 50% within the area, the maximum frequency overshoot is about 0.003 pu, and the con-

收稿日期:2024-04-16; 修订日期:2024-08-16

基金项目:江苏省产学研合作项目(BY2022863)

Fund-supported Project: Jiangsu Province Industry University Research Cooperation Project (BY2022863)

作者简介:李英(1973-),男,国能国华(北京)电子研究院有限公司高级工程师。

通信作者:王金平(1977-),男,南京工程学院教授。

troller regulation time is 2.6 seconds. When the participation factor of the generating units changes by 50% within the area, the maximum frequency overshoot is about 0.001 pu, and the regulation time is about 2.5 seconds. Compared with the differential evolution (DE) algorithm and optimal control algorithm, the SCA used in this study shows better regulation performance in dynamically optimizing the controllers.

**Key words:** cosine optimization algorithm, interconnected power system, load frequency control, multi-source, control system performance

符号说明

- $\Delta P$ —电力系统负荷变化/W
- $P$ —电力系统功率/W
- $\Delta f$ —频率差/Hz
- $R$ —发电单元功率调节系数/Hz·pu<sup>-1</sup>
- $U$ —功率调节器输出
- $K$ —发电单元参与因子
- $T$ —时间常数/s
- $B$ —功率偏置系数/pu MW·Hzd<sup>-1</sup>
- $A_{CE}$ —区域控制偏差
- $s$ —拉普拉斯算子
- $t$ —时间/s
- $\lambda$ —电力系统频率增益系数/Hz/pu·MW
- $C$ —常数
- KP—调节器比例系数
- KI—调节器积分系数
- KD—调节器微分系数
- 下标: 1—区域 1
- 2—区域 2
- T—火电单元
- H—水电单元
- G—燃机单元
- sg—火电机组速度调节阀
- r—火电机组再热器
- tg—火电机组中压缸
- sg—火电机组速度调节阀
- gh—水轮机调速器主伺服系统
- rs—水轮机调速器复位
- rh—水轮机调速器瞬态下垂
- w—水轮机
- gv—燃机进气阀
- xc—燃气轮机调速器的前导
- yc—燃气轮机调速器的滞后
- cr—燃机燃烧反应
- f—燃气轮机进燃料时间
- cd—燃气轮机压气机排气
- sys—电力系统
- a—区域

- $i$ —区域序号
- max—最大值
- min—最小值
- Tie—区域联络线
- sim—仿真运行

引 言

电力系统的频率是电力系统稳定运行的重要指标<sup>[1]</sup>,特别是在多区域互联电力系统中,负荷波动或外部干扰可能导致联络线功率偏差和频率振荡<sup>[2]</sup>。因此,频率调节是智能电网发展的主要挑战之一<sup>[3]</sup>。为确保系统平稳运行,需要设计安全可靠的负荷频率控制器,以维持频率和区域功率偏差在允许范围内波动。许多学者以两区域电力系统为模型,研究控制算法对负荷频率调节的影响,如采用经典的自适应 PID 控制<sup>[4]</sup>、灰狼算法优化 PID 控制器参数<sup>[5]</sup>、鲁棒控制器<sup>[6]</sup>、滑模控制<sup>[7-8]</sup>、灰色狼优化算法<sup>[9]</sup>以及融合神经网络和其他算法的控制策略<sup>[10-11]</sup>等方法,以两区域互联电力系统为模型,在区域 1 或 2 施加负荷扰动后分析不同控制策略的控制效果。

正余弦算法 (Sine Cosine Algorithm, SCA) 是一种基于自然界中正弦和余弦函数的周期性变化特性而设计的启发式优化算法<sup>[12]</sup>。该算法由 Mirjalili 等人<sup>[13]</sup>于 2016 年提出,旨在解决优化问题。SCA 算法模仿了正弦和余弦函数的周期性变化,在算法中,解决方案的位置通过正弦和余弦函数进行调整,以模拟解决方案的移动过程<sup>[13-14]</sup>。在搜索空间中以正弦和余弦函数的形式进行随机变化,从而实现了解空间的全局和局部搜索,这种基于周期性变化的搜索方式使得算法能够在解空间中进行有效的探索,并在适应度函数上寻找到最优解<sup>[15]</sup>。

经典比例积分微分(PID)控制器是工业过程中最常用的反馈控制器,可以满足各种工业领域的控制要求<sup>[16]</sup>。针对互联电力系统,本研究利用正余弦优化算法 SCA 对 PID 控制器参数进行动态优化,建立包含火电、水电以及燃气轮机等多电源的两区域互联电力系统模型,以绝对误差的积分准则(ITAE)为优化约束函数,对两区域电力系统中的火电、水电以及燃气轮机的负荷频率 PID 控制器参数进行动态优化。

## 1 两区域多电源电力系统负荷频率模型

### 1.1 负荷频率控制原理

电力系统负荷频率控制原理如图 1 所示。

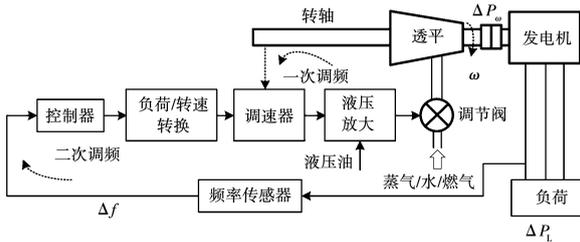


图 1 负荷频率控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of load frequency control

系统负荷需求  $\Delta P_L$  通过频率传感器产生频差  $\Delta f$ , 并将其送到控制器。频差经过负荷转速后送到调速器, 调速器将控制信号送到液压执行机构以调节阀门。转速信号直接作用在调速器进行阀门调节, 此过程称为一次调频, 通过控制器产生的指令进行阀门的调节称为二次调频。

### 1.2 负荷频率模型

电力系统具有复杂的非线性特性, 特别是在涉及多区域互联的情况下。在负荷频率控制方面, 由于正常运行时外界负荷相对于电源负荷而言变化较小, 通常可以对模型进行线性化处理。图 2 是单区域多电源电力系统负荷频率模型<sup>[16-18]</sup>。该模型由 1 个中间再热的火电机组发电单元、1 个水力发电单元和 1 个燃气轮机发电单元组成了单一区域电力系统。模型中对各发电单元的调速器、中间再热汽轮发电机组、水力发电机组和燃气轮机发电机组采用线性化模型, 进行电力系统的仿真和负荷频率控制(LFC)研究。每个发电单元都有其调节参数和参与因子, 3 个发电单元参与因子之和应该等于 1。

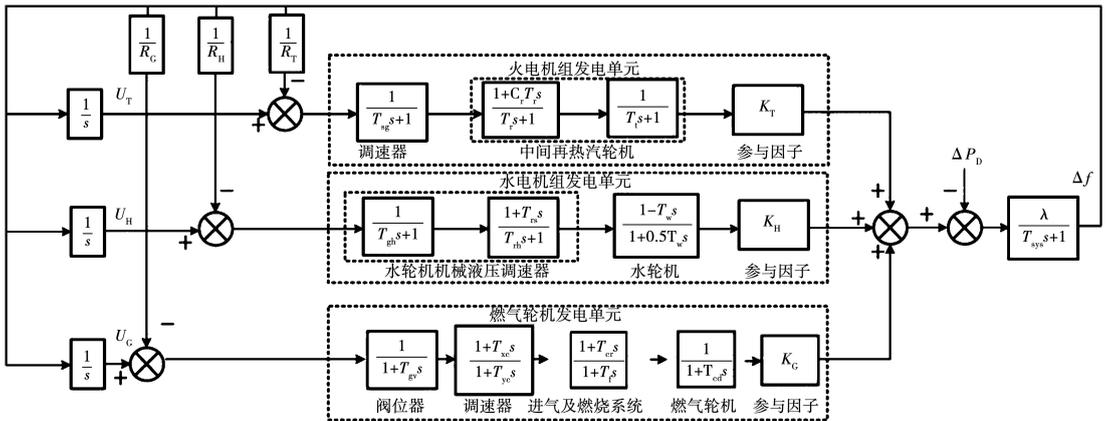


图 2 单区域多电源电力系统负荷频率模型

Fig. 2 Load frequency model for single area multi-source power systems

图 3 是两区域多电源电力系统负荷频率模型。两个区域通过区域联络线进行互联。两区域系统模型的能量方程为:

联络线功率变化为:

$$\Delta P_{ne}(s) = \frac{2\pi T_{1,2}}{s} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (1)$$

每个区域的频率变化为:

$$\Delta P_{a,i} = \Delta P_{T,i} + \Delta P_{H,i} + \Delta P_{G,i} \quad (2)$$

每个区域的发电功率变化为:

$$K_{T_i} + K_{H_i} + K_{G_i} = 1 \quad (3)$$

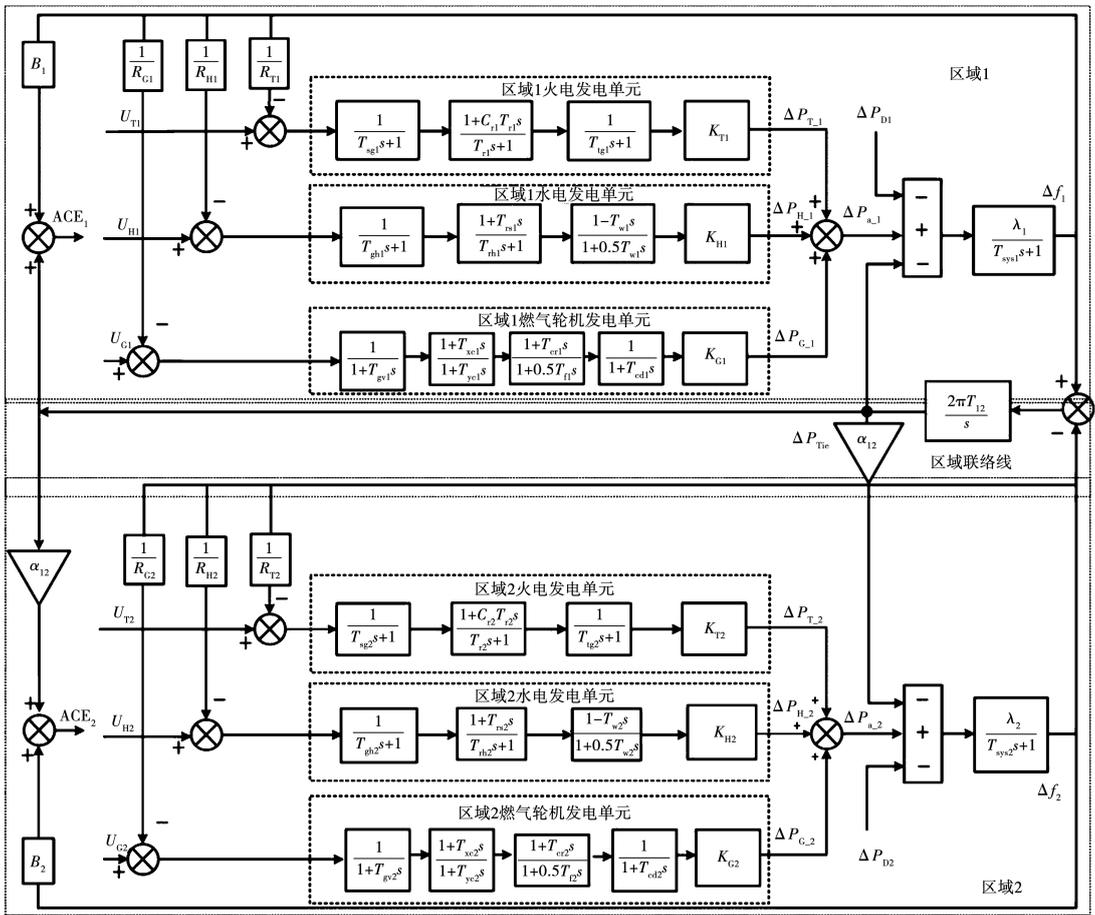


图 3 两区域多电源电力系统负荷频率模型

Fig. 3 Load frequency model for two-area multi-source power systems

### 1.3 负荷频率控制器设计

本研究对两区域的控制均采用 PID 控制器, 根据每个区域负荷扰动不同对 PID 控制器参数进行动态优化, 以达到对负荷频率较好的控制效果。控制器的优化设计中, 首先根据所需的控制要求和约束定义目标函数, 用于控制器参数优化的目标函数设计通常考虑闭环响应的性能指标。控制系统时域的指标包括峰值超调、上升时间、调节时间和稳态误差等。控制器设计中通常考虑的性能标准有: 时间乘以绝对误差的积分准则 (ITAE)、误差的平方积分准则 (ISE)、时间乘以误差的平方积分准则 (ITSE) 和绝对误差的积分准则 (IAE)。ISE 和 ITAE 准则通常因其相对于 IAE 和 ITSE 准则具有更好的性能而被广泛使用。ISE 准则对时间内误差的平方进行积分, 该准则的控制系统倾向于快速消除较大的动态误差, 但容忍较小稳态误差长时间存在, 该准则响

应速度快, 但也会产生低频振荡的副作用。ITAE 准则将误差乘以时间后进行积分, 将长时间存在的误差赋予更重的权重, 所以 ITAE 准则比 ISE 准则可以更快地达到稳定状态<sup>[16]</sup>。

两区域电力系统要求尽量减少区域之间的功率变化速率。本研究中的两区域电力系统的负荷频率模型目标函数表达式为:

$$J = \text{ITAE} = \int_0^{t_{\text{sim}}} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + \Delta P_{\text{Tie}}) t dt \quad (4)$$

目标函数的约束是控制器参数的边界, 因此负荷频率控制优化问题可以被表述为以下优化问题:

$$\begin{cases} \min(J) \\ U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

每个区域各发电单元 PID 结构的控制器输出为  $U_{T,i}$ ,  $U_{H,i}$  和  $U_{C,i}$ , 其表达式为:

$$U_{T,i} = KP_{T,i}ACE_i + KI_{T,i} \int ACE_i + KD_{T,i} \frac{dACE_i}{dt}$$

(6)

$$U_{H,i} = KP_{H,i}ACE_i + KI_{H,i} \int ACE_i + KD_{H,i} \frac{dACE_i}{dt} \quad (7)$$

(7)

$$U_{C,i} = KP_{C,i}ACE_i + KI_{C,i} \int ACE_i + KD_{C,i} \frac{dACE_i}{dt} \quad (8)$$

(8)

## 2 正余弦优化算法优化流程

### 2.1 正余弦算法 SCA 原理

SCA 是一种参数少、结构简单和易实现的群体智能优化算法,其利用正弦和余弦函数的波动性和周期性进行迭代寻优。假设种群规模为  $M$ , 每个个体的维度为  $D$ , 个体  $i$  在第  $j$  维的空间位置表示为  $X_{ij}$ , 其中  $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 。首先, 在解空间内随机生成  $M$  个个体的初始位置, 对应种群规模的大小。然后, 计算每个个体的适应度值, 并记录当前最优个体位置。最后, 在满足终止条件之前, 循环更新个体位置。每次迭代中, 个体位置的更新表达式为输出最优解<sup>[13]</sup>。图 4 为 SCA 算法寻优示意图。

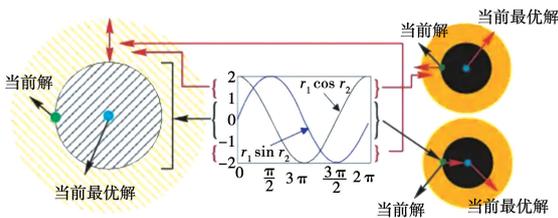


图 4 SCA 算法寻优示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of sine cosine algorithm optimization<sup>[19]</sup>

个体位置的更新表达式为<sup>[13,19]</sup>

$$X_{ij}^{n+1} = \begin{cases} X_{ij}^n + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 M_{ij}^n - X_{ij}^n|, & r_4 \geq 0.5 \\ X_{ij}^n + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 M_{ij}^n - X_{ij}^n|, & r_4 < 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $X_{ij}^n$ —个体  $i$  在第  $n$  次迭代时的位置在第  $j$  维的分量;  $M_{ij}^n$ —第  $n$  次迭代种群当前最优个体  $i$  在第  $j$  维的分量;  $r_2 \in [0, 2\pi]$ ,  $r_3 \in [0, 2]$  以及  $r_4 \in [0, 1]$ —3 个随机参数,  $r_1$ —控制参数, 其随着迭代次数的增加从  $a$  递减到 0, 可表示为:

$$r_1 = a - n \frac{a}{n_{\max}} \quad (10)$$

式中:  $a$ —常数, 一般取 2;  $n$ —当前的迭代次数;  $n_{\max}$ —最大迭代次数。

### 2.2 基于 SCA 的负荷频率控制器参数优化流程

基于正余弦算法 SCA 的负荷频率控制器参数优化流程如图 5 所示。

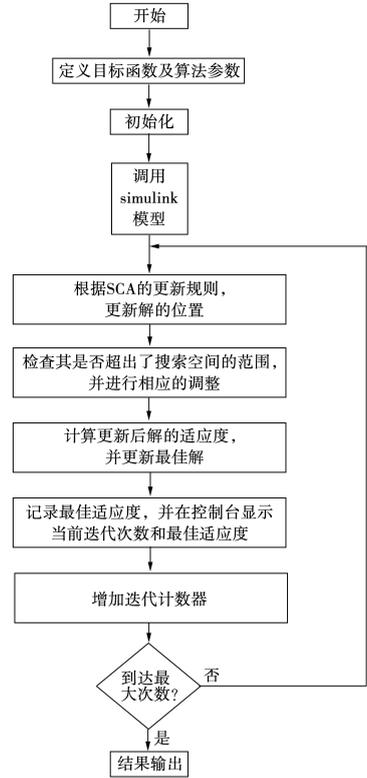


图 5 基于 SCA 的负荷频率控制器参数优化流程

Fig. 5 Load frequency controller parameter optimization process based on sine cosine algorithm

优化程序开始运行后, 首先定义目标函数及算法主要参数, 包括搜索代理数量、最大迭代次数、搜索空间的上下限、问题维度以及目标函数句柄, 函数返回最佳适应度、最佳位置和收敛曲线等; 其次进行初始化, 随机初始化一组初始解, 计算初始解的适应度, 并找到初始最佳解, 调用 MATLAB 中建立的两区域多电源电力系统负荷频率 Simulink 模型, 进入正余弦算法的主循环, 在每次迭代中, 根据 SCA 的更新规则和更新解的位置, 检查每个解是否超出了搜索空间的范围, 并进行相应的调整; 然后计算更新后解的适应度, 并更新最佳解, 记录每次迭代的最佳适应度, 同时在控制台显示当前迭代次数和最佳适应度, 每次计算完成后增加迭代计数器, 直到达到最

大迭代次数为止;最后将每次迭代的最佳适应度记录在收敛曲线中,以便后续分析。

### 3 仿真结果及分析

为了验证本研究所设计的正余弦算法(SCA)优化控制器的性能,利用 MATLAB/Simulink 算法根据图 2、图 3 建立了两区域多电源互联电力系统模型。仿真模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数<sup>[16-17]</sup>

Tab.1 System simulation parameters<sup>[16-17]</sup>

参 数	数 值
区域负荷/MW	1 740
功率偏置系数 $B/\text{pu MW}\cdot\text{Hz}^{-1}$	0.431 2
发电单元功率调节系数 $R/\text{Hz}\cdot\text{Pu}^{-1}$	2.4
电力系统频率增益系数 $\lambda/\text{Hz}\cdot\text{pu}^{-1}\text{MW}$	68.956 6
火电机组参与因子	0.543 478
水电机组参与因子	0.326 084
燃机组参与因子	0.130 438

利用 SCA 优化算法对 3 个发电单元的 PID 控制器参数进行优化,SCA 优化算法的搜索代理数量选择 20,最大迭代次数选择 50 次,搜索空间的上下限设置为 100 和 -100,问题维度选取 15。SCA 优化后的调节参数及控制器参数如表 2 所示。

表 2 SCA 优化后的调节参数及 PID 控制器参数

Tab.2 Regulation parameters and PID controller parameters optimized by SCA

参 数	火电单元	水电单元	燃气轮机单元
比例系数	9.857 6	0.033 3	10
积分系数	10	0.01	8.342 9
微分系数	5.468 2	0.063 9	0.055 3

为了研究 PID 参数采用 SCA 算法对频率控制的调节效果,本研究在每个区域的负荷侧施加扰动两区域负荷交换系数设置为 0.043 3。在  $t=0\text{ s}$  时,在区域 1 施加了 1% 的阶跃负载扰动。对于仅包含交流线路的系统,比较了本研究的正余弦算法 SCA 优化 PID 控制器、文献[15]研究的微分进化算法 DE 优化 PID 控制器以及文献[16]研究的最优控制算法的调节效果,结果如图 6 所示。

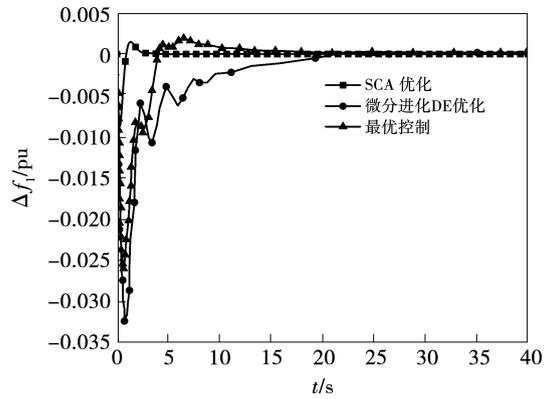


图 6 区域 1 在 1% 负荷扰动下频率调节曲线  
Fig.6 Frequency regulation curve under 1% load disturbance in area 1

从图 6 仿真结果可以看出,SCA 优化 PID 算法的调节时间最短,约为 2 s,微分进化 DE 算法 PID 的调节时间约为 22 s,最优控制算法的调节时间约为 20 s。SCA 优化算法的最大超调为 0.000 9 pu,而微分进化算法无超调。

图 7 为  $t=0\text{ s}$  时,在区域 2 施加了 1% 的阶跃负载扰动,3 种优化算法的计算结果。由图 7 可以看出,SCA 优化算法的调节时间为 6 s,微分进化 DE 算法约为 10 s,最优控制约为 20 s;SCA 优化算法的最大超调约为 0.001 pu,微分进化 DE 算法的最大超调约为 0.000 8 pu,最优控制无超调。综合 3 种优化 PID 控制算法可以看出,SCA 优化具有调节时间更短、响应更快等优点,但超调比另外两种优化算法稍大。

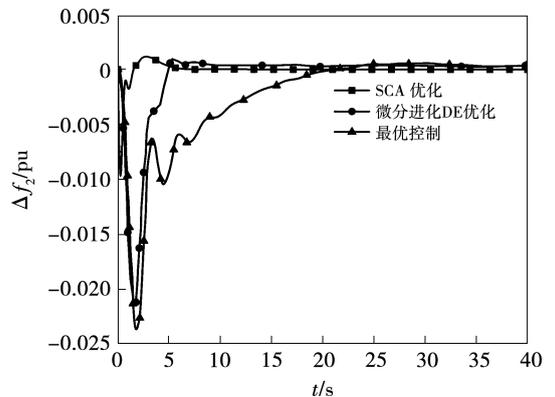


图 7 区域 2 在 1% 负荷扰动下频率调节曲线  
Fig.7 Frequency regulation curve under 1% load disturbance in area 2

为了研究控制系统在面对参数变化不确定情况下的性能表现,对建立的模型进行鲁棒性研究。通过对系统的频率偏置系数  $B$  进行变参数设置以观察系统的调节特性。将频率偏置系数分别设置为原始值  $0.4312$  (变化  $0\%$ ),  $0.539$  (增加  $25\%$ ),  $0.3232$  (减少  $25\%$ ),  $0.6448$  (增加  $50\%$ ) 和  $0.2156 \text{ pu} \cdot \text{MW}/\text{Hz}$  (减少  $50\%$ ), 频率偏置系数变化条件下区域 1、区域 2 的频率调节曲线如图 8 和图 9 所示。区域联络线功率调节曲线系统的调节效果如图 10 所示。

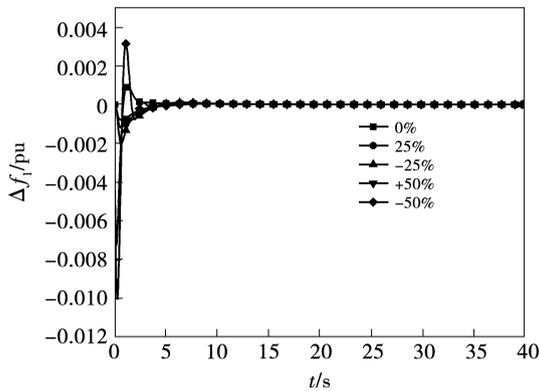


图 8 频率偏置系数变化条件下区域 1 的频率调节曲线

Fig. 8 Frequency regulation curve in area 1 under the condition of frequency bias coefficient variation

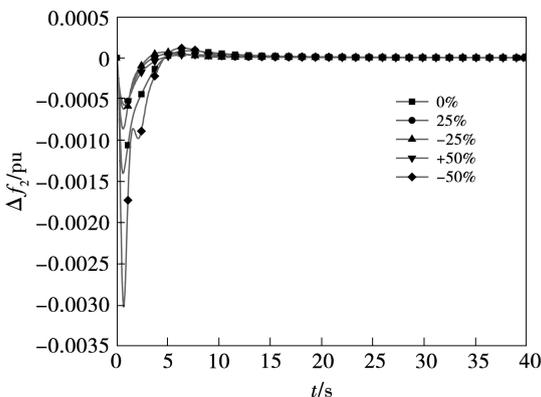


图 9 频率偏置系数变化条件下区域 2 的频率调节曲线

Fig. 9 Frequency regulation curve in area 2 under the condition of frequency bias coefficient variation

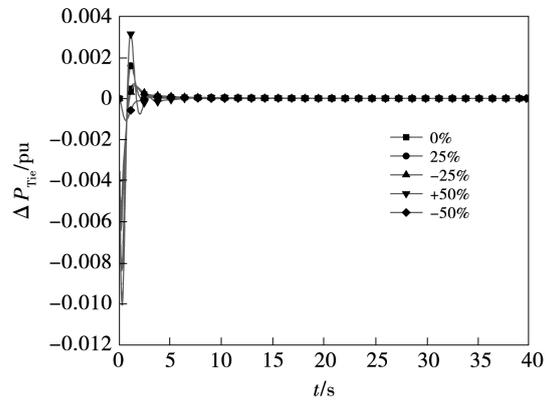


图 10 频率偏置系数变化条件下区域联络线功率调节曲线

Fig. 10 Interconnection line power regulation curve in area under the condition of frequency bias coefficient variation

对比图 8 ~ 图 10 可以看出,经过 SCA 动态优化的 PID 控制器对频率偏置系数后具有较好的鲁棒性,区域 1 的频率偏置系数变化  $50\%$ , 频率曲线最大超调约为  $0.003 \text{ pu}$ , 调节时间为  $2.6 \text{ s}$ ; 区域 2 最大超调约为  $0.0001 \text{ pu}$ , 调节时间为  $9 \text{ s}$ ; 联络线功率最大超调  $0.0031 \text{ pu}$ , 调节时间为  $5 \text{ s}$ 。

为了研究系统的调节特性对每个区域内发电单元的调整系数  $R_1$  进行变参数设置,将发电单元调整系数分别设置为原始值  $2.4$  (变化  $0\%$ ),  $7.2$  (增加  $25\%$ ),  $1.8$  (减少  $25\%$ ),  $3.6$  (增加  $50\%$ ) 和  $1.2 \text{ Hz}/\text{pu}$  (减少  $50\%$ )。发电单元调整系数变化条件下区域 1 和区域 2 的频率调节曲线如图 11 和图 12 所示。联络线功率调节曲线系统的调节效果如图 13 所示。

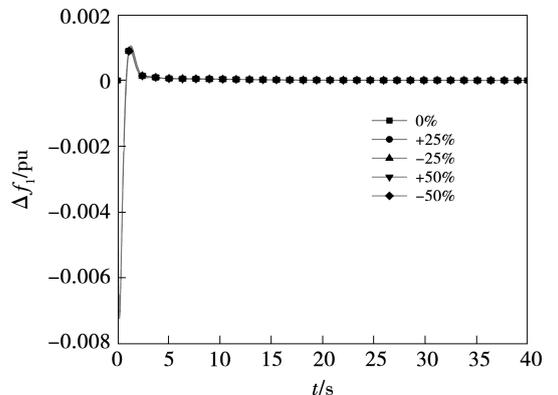


图 11 调整系数变化条件下区域 1 的频率调节曲线  
Fig. 11 Frequency regulation curve in area 1 under the condition of adjustment coefficient variation

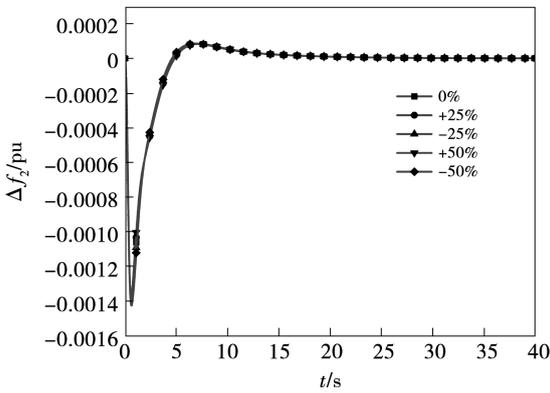


图 12 调整系数变化条件下区域 2 的频率调节曲线

Fig. 12 Frequency regulation curve in area 2 under the condition of adjustment coefficient variation

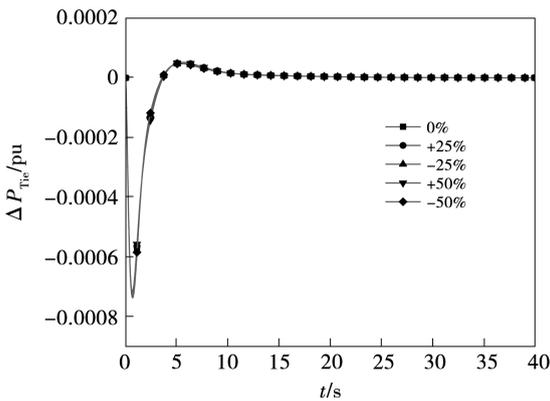


图 13 调整系数变化条件下联络线功率调节曲线

Fig. 13 Interconnection line power regulation curve under the condition of adjustment coefficient variation

由图 11 ~ 图 13 可以看出,经过 SCA 动态优化的 PID 控制器对发电单位的调整系数具有较强的鲁棒性,调整系数变参数对控制器的影响较小,最大超调约为 0.001 pu,调节时间约为 2.5 s。区域 2 频率变化较小,最大超调约为 0.000 1 pu,调节时间约为 15 s。联络线功率最大超调 0.000 06 pu,调节时间为 12 s。

## 4 结论

提出了用正余弦优化算法对两区域互联电力系统的各发电单位的控制器进行动态优化的方法以更好的对负荷频率进行控制,建立了以两区域包含火电、水电及燃机等多个发电单元的互联电力系统模型,研究了以绝对误差的积分准则(ITAE)为优化约束函数,对两区域电力系统中的火电、水电以及燃机的负荷频率 PID 控制器参数动态优化模型,经过

SCA 优化的控制器性能进行比较与分析:

(1) 与微分进化算法 DE 优化 PID 控制器相比,SCA 优化 PID 算法的调节时间为 2 s,微分进化 DE 算法 PID 的调节时间约为 22 s,优化算法的最大超调为 0.000 9 pu。

(2) 经过 SCA 动态优化的 PID 控制器对频率偏置系数后具有较好的鲁棒性,区域内的频率偏置系数变化 50%,频率曲线最大超调约为 0.003 pu,调节时间为 2.6 s,联络线功率最大超调 0.003 1 pu,调节时间为 5 s。

(3) 经过 SCA 动态优化的 PID 控制器对发电单位的调整系数具有较强的鲁棒性,发电单位调整系数变化 50%,最大超调约为 0.001 pu,调节时间约为 2.5 s。

## 参考文献:

- [1] 徐 箭,唐旭辰,徐 琪,等.考虑火电机组深度快速变负荷能力的频率控制[J].电力系统自动化,2018,42(8):51-56,82. XU Jian,TANG Xuchen,XU Qi,et al. Frequency control considering deep and fast load changing capability of thermal power units [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(8):51-56,82.
- [2] 范培潇,柯 松,杨 军,等.基于改进多智能体深度确定性策略梯度的多微网负荷频率协同控制策略[J].电网技术,2022,46(9):3504-3515. FAN Peixiao,KE Song,YANG Jun,et al. Load frequency coordinated control strategy of multi-microgrid based on improved MADDPG[J]. Power System Technology,2022,46(9):3504-3515.
- [3] 陈宗遥,卜旭辉,郭金丽.基于神经网络的数据驱动互联电力系统负荷频率控制[J].电工技术学报,2022,37(21):5451-5461. CHEN Zongyao,BU Xuhui,GUO Jinli,et al. Neural network based data-driven load frequency control for interconnected power systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(21):5451-5461.
- [4] 彭建春,黄 纯,江 辉.两区域负荷频率的智能自适应 PID 控制[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(4):55-60. PENG Jianchun,HUANG Chun,JIANG Hui. Intelligent adaptive PID control for two area load frequency [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,1999,11(4):55-60.
- [5] 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 per-

- formance assessment in interconnected power grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.
- [6] 王玉龙, 谭文. 多区域电网负荷频率控制的鲁棒设计[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 179-182, 431.  
WANG Yulong, TAN Wen. Robust load frequency control for multi-area power systems[J]. Computer Simulation, 2014, 31(2): 179-182, 431.
- [7] 孟祥萍, 薛昌飞, 张化光. 多区域互联电力系统的PI滑模负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 7-12.  
MENG Xiangping, XUE Changfei, ZHANG Huaguang. PI sliding mode load frequency control of multi-area power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 7-12.
- [8] 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 for multi-area interconnected power systems [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(5): 944-948.
- [9] GUHA D, ROY P K, BANERJEE S. Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization[J]. Swarm and Evolutionary computation, 2016, 27: 97-115.
- [10] 罗兵, 章云, 黄红梅. 小波神经网络与PID相结合的负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 25-29.  
LUO Bing, ZHANG Yun, HUANG Hongmei. Load-frequency control based on wavelet neural network and PID control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 25-29.
- [11] 吴忠强, 张伟, 李峰, 等. 基于云神经网络自适应逆系统的电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 86-91, 98.  
WU Zhongqiang, ZHANG Wei, LI Feng, et al. Load frequency control of power system based on cloud neural network adaptive inverse system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 86-91, 98.
- [12] 李威, 卢盈齐, 范成礼. 基于套索算法和改进正余弦优化支持向量回归的目标威胁估计[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2470-2478.  
LI Wei, LU Yingqi, FAN Chengli. Target threat estimation based on lasso algorithm and improved sine cosine optimized support vector regression[J]. Control and Decision, 2023, 38(9): 2470-2478.
- [13] MIRJALILI S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 120-133.
- [14] ABUALIGAH L, DIABAT A. Advances in sine cosine algorithm: A comprehensive survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(4): 2567-2608.
- [15] SINDHU R, NGADIRAN R, YACOB Y M, et al. Sine-cosine algorithm for feature selection with elitism strategy and new updating mechanism[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28: 2947-2958.
- [16] MOHANTY B, PANDA S, HOTA P K, et al. Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 77-85.
- [17] PARMAR K S, MAJHI S, KOTHARI D P. Load frequency control of a realistic power system with multi-source power generation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 426-433.
- [18] RAMAKRISHNA K S S, SHARMA P, BHATTI T. Automatic generation control of interconnected power system with diverse sources of power generation[J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(5): 51-65.
- [19] 陈亮, 汤显峰. 改进正余弦算法优化特征选择及数据分类[J]. 计算机应用, 2022, 42(6): 1852-1861.  
CHEN Liang, TANG Xianfeng. Improved sine cosine algorithm for optimizing feature selection and data classification[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(6): 1852-1861.

(姜雪梅 编辑)