

光伏功率扰动下的水电机组海鸥优化模糊 PID 控制研究 *

曹 飞¹, 钱 晶^{1,2}, 邹屹东¹, 曾 云^{1,2}, 贾高杰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: 光伏发电机组输出功率的随机性和波动性影响着供电系统的安全稳定运行。为了提高水光供电系统的频率稳定能力, 根据水轮机调速系统的数学模型, 结合海鸥算法的寻优能力和模糊控制的推理能力, 提出基于海鸥优化模糊 PID(SOAFPID)控制的水电机组控制策略, 使其能够快速调节光伏和负荷波动引起的系统频率偏差。通过搭建 Simulink 仿真模型, 分析其在不同扰动工况下的频率稳定能力。仿真结果表明: 与传统 PID 控制方法相比, 采用 SOAFPID 控制的水电机组在光伏和负荷功率扰动下具有更小的超调量和更快的稳定速度, 在水光供电系统中表现出了优越的动态调节性能。

关键词: 水电机组; 模糊 PID 控制; 海鸥算法; 光伏功率; 频率调节

中图分类号: TV734:TP18 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)07-0070-07

doi: 10.12177/emca.2022.035

Research on Seagull Optimal Fuzzy PID Control of Hydropower Unit Under Photovoltaic Power Disturbance *

CAO Fei¹, QIAN Jing^{1,2}, ZOU Yidong¹, ZENG Yun^{1,2}, JIA Gaojie¹, 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: The randomness and volatility of the output power of photovoltaic generator sets affect the safe and stable operation of the power supply system. In order to improve the frequency stability of the hydropower-photovoltaic power supply system, the mathematical model of the hydraulic turbine speed control system is analyzed, then the optimization ability of the seagull algorithm and the reasoning ability of the fuzzy control are combined, and a seagull-optimized fuzzy PID control (SOAFPID) based method is proposed. The hydroelectric unit control strategy enables the system to quickly adjust the frequency deviation caused by photovoltaic and load fluctuations. The Simulink simulation model is built, the frequency stability capability of the system under different disturbance conditions is analyzed. The simulation results show that the hydroelectric unit controlled by SOAFPID has a minor overshoot and faster stabilization speed under photovoltaic and load power disturbance compared with the traditional PID control method. The dynamic regulation in the hydropower-photovoltaic power supply system performs well.

Key words: hydroelectric unit; fuzzy PID control; seagull algorithm; photovoltaic power; frequency regulation

收稿日期: 2022-03-29; 收到修改稿日期: 2022-05-19

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51869007, 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, 硕士, 教授, 研究方向为发电机组的稳定控制及其对电网的影响。

0 引言

由于光伏发电的输出功率容易受到光照和温度的影响,其输出具有随机性和波动性的特点,在并网方式下会对电网的稳定运行产生影响^[1]。为确保系统能够吸收最大的光伏发电量。需要使用其他电源来补偿其输出,使光伏发电和其他电源的发电量总和等于区域负荷所需的电力供应,从而实现系统的电力供需平衡^[2]。中国水电资源丰富,水电装机容量居世界第一,对水能的利用有非常成熟的技术基础。水电作为光伏发电的补充电源,因具有灵活的调节特性可以用来抑制光伏输出的波动,使水光总出力保持恒定^[3]。

目前水电机组一般采用 PID 控制规律。但是在一些工况多变的情况下,固定的 PID 控制方法可能无法保证水力发电系统的稳定性要求,因此需要对传统的 PID 控制策略加以改进。徐昕等^[4]将实数型遗传算法用于对水轮机 PID 控制参数进行优化,避免了传统遗传算法在参数整定时容易陷入局部极小值的缺点。李星等^[5]利用灰狼算法对采用 PID 控制的水电机组进行控制参数寻优,提高了水电机组跟踪补偿风电出力的能力。卢恒光等^[6]利用模糊神经网络算法优化水轮机调节 PID 参数,有效提高了调节的精度。除了运用智能算法优化之外,也有一些学者采用智能控制与 PID 相结合的方法^[7-8]。万瑞文等^[9]将模糊 PID 控制运用于水轮机调节系统中,利用模糊控制的专家推理能力,在线调整 PID 控制系数,使系统具有良好的跟踪性能和较强的鲁棒性^[10]。

海鸥优化算法(SOA)是 Dhiman 和 Kumar 在 2019 年提出的一种受生物行为启发的新智能优化算法^[11]。该算法通过模拟海鸥种群的迁移和攻击行为来优化目标函数,具有良好的全局搜索和局部搜索能力。与常用的群体优化算法如粒子群优化算法和蚁群算法等相比,SOA 算法实现简单,参数调整简单,收敛速度快,优化精度高。因此,常用于求解一些计算量较大的多目标优化问题^[12-13],在一些实际的工程应用上也证明了其适用性^[14]。与依靠单一的优化方式相比,本文同时引入海鸥智能算法和模糊控制对水电机组的 PID 控制参数进行优化,通过搭建 MATLAB 仿真模

型,验证其在光伏功率扰动下的调节性能。

1 水光独立供电系统结构

水光独立供电系统由水光互补出力给系统中的负荷供电,通过维持系统功率供需平衡,使得整个系统频率稳定。本文采用水轮发电机组作为主要功率输出和调频设备,把水力发电和光伏发电作为系统的主要动力源。水光独立供电系统结构如图 1 所示。

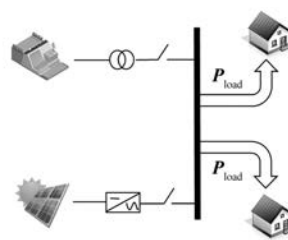


图 1 水光独立供电系统简图

2 研究对象的数学模型

2.1 水轮发电机组数学模型

水轮发电机组是集引水过程、机械过程和发电过程于一体的复杂系统。水轮发电系统可分为 3 部分:调速器、原动机和发电机。调速器由控制器和电液随动系统 2 部分组成,原动机由水轮机和有压引水系统组成^[15]。其结构图如图 2 所示。

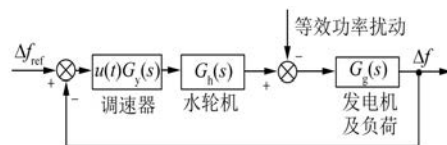


图 2 水轮机调节结构图

水轮机调速器通过反馈系统频率偏差控制导叶开度以改变转速,图 2 中 $u(t)$ 为 PID 输出控制信号。其线性电液随动系统传递函数为

$$G_y(s) = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (1)$$

式中: T_y 为水轮机接力器时间常数。

式(1)是一个以 s 为变量的代数方程,可以用来表示系统的动态特性。

当考察水轮机环节的能量转移函数时,本文采用水轮机 IEEE 非线性的模型,忽略水力摩擦及阻尼损耗,得到理想的水轮机传递函数描述为

$$G_h(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 \cdot T_w s} \quad (2)$$

式中: T_w 为水流惯性时间常数。

本文在考虑水轮发电机时,忽略了同步发电机绕组的动态特性和转子功角特性,只考虑了转子的运动方程。相应的一阶发电机模型和负载传递函数如下:

$$G_g(s) = \frac{1}{Ms + D} \quad (3)$$

式中: M 为水轮发电机机械惯性时间常数; D 为水轮发电机自调节系数。

2.2 光伏发电机组数学模型

光伏电池的发电原理是基于半导体的光伏效应将太阳能转换为电能^[16]。光伏电池中的 PN 结在光照下会产生电流,产生的电流通过理想二极管和内阻。光伏电池的模型如图 3 所示,主要包括一个串联电阻和一个并联的内部电阻、并联二极管和光生电流源。

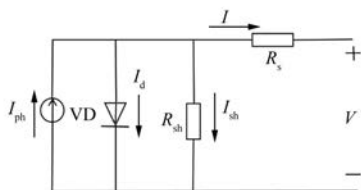


图3 光伏电池等效模型

图3中, I_{ph} 为光生电流源的输出电流, I_d 为流经二极管的电流值, R_{sh} 为光伏电池并联电阻, I_{sh} 为流经并联内电阻的电流, R_s 为光伏电池串联内阻, I 、 V 分别为光伏电池的输出电流和输出电压。

计算流过二极管电流的 I_d 表达式为

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{ou}}{NKT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

式中: I_0 为二极管的反向饱和电流; N 为 PN 结的理想因子; q 为电子电荷; K 、 T 分别为波耳兹曼常数和光伏电池实际工作温度; V_{ou} 为光伏电池的开路电压。

光伏电池的外特性为输出电流 I 和电压 V 之间的关系,由其等效模型可以得出:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (5)$$

$$V_{ou} = V + IR_s \quad (6)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{ou}}{R_{sh}} \quad (7)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} [I_{scr} + K_I(T - 298)] \quad (8)$$

式中: G 为太阳辐射系数; I_{scr} 为参考条件下光伏电池的短路电流; K_I 为断路电流温度效应系数。

I 与 V 是光伏电池的主要电气特性,光伏电池的 I - V 输出曲线会受到环境光照和温度的影响。在每组 I - V 函数曲线中,当 $I=0$ 时表示光伏电池所连接的外电路开路,此时 V 为光伏电池的开路电压,用 V_{ou} 表示;当 $V=0$ 时,表示光伏电池被短路,此时的 I 为光伏电池的短路电流,用 I_{scr} 表示^[17]。每条 I - V 曲线中均存在唯一的功率最大值点,称为光伏电池的最大输出功率点 (MPP)。

2.3 水光独立供电系统数学模型

水光供电系统动态模型如图4所示,包括水轮机组、同步发电机、光伏机组、负荷和控制器等。在本文中,光伏发电机组采用最大功率点跟踪 (MPPT) 控制。

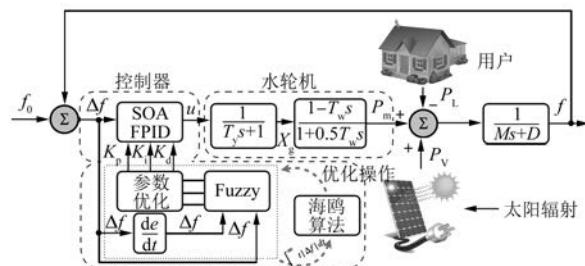


图4 水光独立供电系统频率调节模型

图4中, Δf 为系统频率偏差, u 为控制器的输出信号, X_g 为导叶调节角度, P_m 为水轮机输出功率, P_v 为光伏发电输出功率, P_L 为系统的负荷。将 P_v 与 P_L 的偏差,作为水电机组调频模式下的功率扰动输入项。SOA-FPID 控制器控制水电机组的出力进行功率补偿使系统频率偏差尽可能趋向于0,从而维持供电系统的频率稳定。

3 海鹰算法优化模糊 PID 控制器设计

3.1 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器就是模糊推理在传统 PID 控制中的应用,主要由3部分组成:模糊处理、模糊推理和去模糊化。工作时,将输出结果与参考值进行比较得出被控对象的输出偏差 e 和偏差变

化率 ec 可作为模糊推理的输入变量,通过模糊规则设置输出 PID 的 3 个控制参数,完成模糊 PID 控制^[18]。通常模糊 PID 控制规则大部分依靠专家经验法或采用试凑法来进行制定,一定程度上容易受到主观影响。在大波动暂态过程中存在控制误差较大的情况,难以达到控制要求下的最佳效果,在一些特殊情况下还会发生较大的误差。在选取模糊推理隶属度函数的过程中也会出现类似的情况。

3.2 海鸥优化算法

海鸥优化算法是一种基于海鸥迁移和攻击行为的群体智能随机搜索算法。海鸥算法在进行优化操作时,将每只海鸥视为 d 维搜索空间中的一个搜索个体。海鸥通过迁徙和攻击不断更新其位置。在海鸥优化算法中,每只海鸥个体包含以下元素:每只海鸥自身的位置、搜索到的海鸥群体全局最优位置 P_{bs} 和海鸥位置对应的适应度值^[19]。迁移行为和攻击过程如下所述。

3.2.1 迁徙行为

迁徙指的是海鸥位置移动变换的过程,体现为算法中的全局搜索阶段。对这一阶段建立数学模型时,需满足以下 3 个条件:

(1) 避免碰撞。为了避免海鸥之间在迁徙时发生碰撞,通过变量 A 来调整海鸥的位置:

$$C_s(t) = A \cdot P_s(t) \quad (9)$$

式中: $C_s(t)$ 为不与其他海鸥发生碰撞的新位置; A 为海鸥在给定搜索空间中的运动行为; $P_s(t)$ 为海鸥当前的位置; t 为当前迭代次数。

A 的值是通过 f_c 线性调节的, f_c 可以控制变量 A 的频率, f_c 值从 2 线性降低到 0。 A 的计算公式如下:

$$A = f_c - t \cdot (f_c / D_{\max}) \quad (10)$$

式中: $D_{\max}$ 为最大迭代次数 100。

(2) 向最佳位置移动。在避免与其他海鸥重叠后,海鸥会朝着最佳位置的方向移动。最佳海鸥所在的方向 $M_s(t)$ 为

$$M_s(t) = B \cdot [P_{bs}(t) - P_s(t)] \quad (11)$$

式中: $P_{bs}(t)$ 为最佳海鸥所在的位置; B 为负责平衡算法全局和局部搜索的随机数, $B = 2 \cdot A^2 \cdot rand$, $rand$ 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

(3) 靠近最佳位置。 $D_s(t)$ 表达式为

$$D_s(t) = |C_s(t) + M_s(t)| \quad (12)$$

3.2.2 攻击行为

海鸥在迁徙过程中进行捕猎时会不断改变攻击角度和速度,利用翅膀和体重来保持高度。当海鸥攻击猎物时,会在空中盘旋移动^[20]。攻击行为反映了海鸥的局部搜索过程,在此过程中,海鸥在 x, y, z 平面的运动行为描述如下:

$$P_s(t) = D_s(t)xyz + P_{bs}(t) \quad (13)$$

式中: $x = r \cdot \cos(\theta)$, $y = r \cdot \sin(\theta)$, $z = r \cdot \theta$, r 为螺旋半径, $r = ue^{\theta v}$, θ 为 $[0, 2\pi]$ 范围内的随机角度值, u 和 v 为螺旋形状的相关常数,在本例中均取值为 1; $P_{bs}(t)$ 为最佳海鸥位置,海鸥攻击的位置就是最终的位置。

3.2.3 海鸥算法寻优适应度函数

为了缩短调整时间,本文采用工程实用性强、选择性好的 ITAE 指数作为海鸥算法的适应度评价函数:

$$fitness = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (14)$$

式中: t 为仿真时间; $e(t)$ 为频率误差。

3.3 海鸥算法优化模糊 PID 控制器

为克服传统模糊 PID 方法的缺点,本文将海鸥算法引入模糊 PID 控制当中,通过优化模糊控制器输出 PID 调整参数的比例系数来整定最终输出的 PID 控制值。本文中的 PID 控制器采用位置式 PID。其原理如图 5 所示。

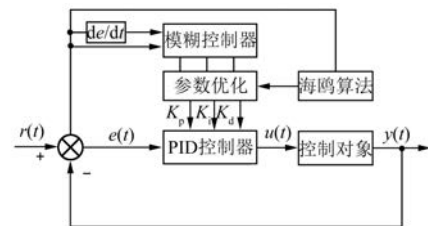


图 5 海鸥算法优化模糊 PID 原理图

图 5 中的 $r(t)$ 为给定的参考值, $y(t)$ 为实际的输出值。本文采用的是 2×3 的模糊推理系统,控制器有 2 个输入量和 3 个输出量。输入量为系统频率偏差值 e 和偏差变化率 ec , 输出量为 PID 参数的调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$, 输入量和输出量的论域范围皆为 $[-3, 3]$ 。模糊子集分为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大) 7 个评判等级。输入量 e, ec , 输出量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的隶属度函数采用常用的三角函数, 控制规则库根据 PID 控制特点制定。为了与传统的 PID 控制进行

对比,设定传统 PID 的 3 个控制参数为 K_{pc} 、 K_{ic} 、 K_{dc} , 海鸥模糊整定在其基础上优化。根据本控制系统应用环境,对于 PID 控制中的 3 个控制参数取值范围限定为 $K_p=[0,10], K_i=[0,5], K_d=[0,5]$ 。模糊整定后引入海鸥算法对 PID 参数进行二次整定,海鸥算法的种群规模设为 50,迭代次数为 100, d 值为 3,海鸥的搜索空间上下限设置为 $[-10,10]$,仿真时长 t 为 100 s 执行流程图如图 6 所示。

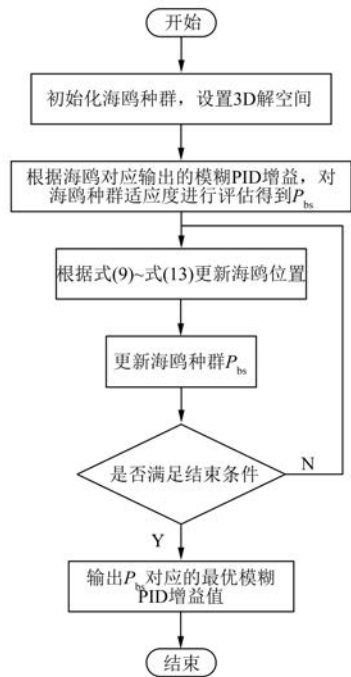


图6 海鸥算法寻优流程图

经海鸥算法运算可以得到 K_p 、 K_i 、 K_d 的调整量增益参数: Ck_p 、 Ck_i 、 Ck_d 。得出最后 PID 控制器输出量 $u(t)$ 的表达式:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

其中,修正后的 3 个控制参数为 $K_p = K_{pc} + Ck_p \cdot \Delta K_p$; $K_i = K_{ic} + Ck_i \cdot \Delta K_i$; $K_d = K_{dc} + Ck_d \cdot \Delta K_d$ 。

PID 控制器将伴随着系统的扰动和输入频率偏差的变化,完成参数值的调整,从而实现 PID 参数值的在线自动调整过程,有效改善了系统的调节特性。

4 算例仿真研究

本文采用 MATLAB/Simulink 平台搭建基于 SOAFPID 控制的水光独立供电系统频率控制模型。分别对 4 种不同工况进行控制对比分析,通

过主程序调用海鸥算法和 Simulink 模型运行。仿真结果均采用标么值形式。仿真参数设定如表 1 所示。

表 1 仿真参数对照表

参数名称	T_y	T_w	M	D
赋值	0.25	1.2	8.5	1

4.1 开机工况下的负荷频率响应仿真

对水轮机开机工况的频率响应输出进行仿真分析。纵坐标为水轮机单独供电时的系统频率标么值。由图 7 可以看出,采用 SOAFPID 控制的水电机组的系统频率响应速度快于 PID,在 10 s 内就能使系统频率稳定,最大超调量只有 3%。而采用常规 PID 控制的最大超调量达到 12%,且需要 30 s 才能使频率追踪到系统稳定状态。

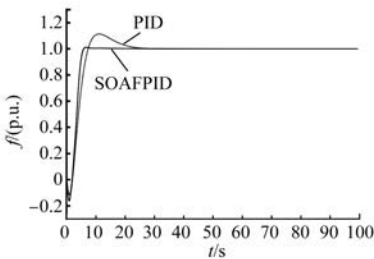


图7 水轮机组开机工况频率响应

4.2 负荷扰动工况下的仿真

为了保证光伏的最大出力,系统的负荷扰动由水电机组进行调节。图 8 为 10% 负荷功率波动工况下系统频率偏差响应曲线。当突然出现负荷增加时,系统的频率会下降。当频率偏差为 0 时,代表系统达到供电稳定状态。由图 8 可看出,在相同的负荷扰动条件下,基于 SOAFPID 控制的水电机组具有更好的干扰抑制响应特性,系统的频率偏差最大超调量为 0.025 p.u.,且在此后不到 10 s 的时间内就能使系统频率快速上升达到稳定值,而传统 PID 控制的超调量达到了 0.038 p.u.,

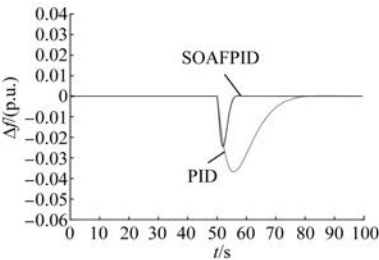


图8 在 10% 功率扰动下的稳定响应

比 SOAFPID 控制高了约 13%, 且调节时间达到了 30 s。可见采用 SOAFPID 控制的水电机组系统抗干扰能力明显优于传统 PID 控制。

4.3 负荷和光伏同时扰动工况仿真

为了验证 SOAFPID 控制下的水电机组在光伏和负荷同时出现变化时的调节效果, 本文设计了图 9 所示的多阶跃变化作为光伏和负荷的扰动输入项, 取扰动频繁的阶段进行仿真对比分析。由仿真结果可得: 在出现频繁功率扰动的工况下, 采用 SOAFPID 控制的水电机组能较好地抑制系统频率波动, 其产生的超调量比传统 PID 控制平均要低了 1/3, 且响应速度很快, 基本能在 10 s 内使系统的频率偏差恢复到 0 的状态。而采用传统 PID 控制的系统响应速度慢, 在短期频繁干扰下很难使系统频率恢复到稳定状态。

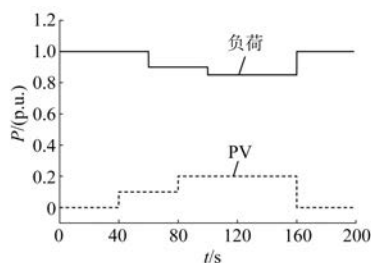


图 9 光伏出力和负荷的功率变化

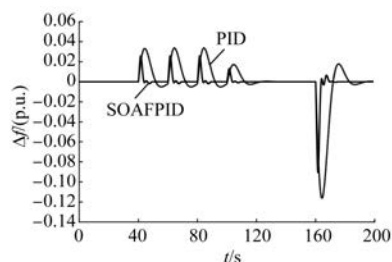


图 10 光伏和负荷同时波动下频率偏差响应

4.4 实际光伏功率波动工况仿真

维持水光独立系统供电平稳最大的障碍在于光伏出力的频繁变化。本文选取江苏某光伏电站的典型日出力曲线作为实际光伏发电功率, 取值间隔为 5 min, 采集数据点 300 个, 利用水电出力进行光伏补偿。

由图 11 可知, 光伏出力有着明显的昼夜差别, 出力变化最频繁的为日间时段, 故本文主要研究在日间的出力补偿特性。由图 12 可以看出, 在光伏出力波动频繁的情况下, SOAFPID 调节比传

统 PID 调节具有更加快速的响应能力, 能够使系统的频率偏差基本控制在 ± 0.02 p.u. 范围内, 最大超调量为 0.029 p.u.。而传统 PID 控制的最大超调量达到了 0.053 p.u., 且波动频繁, 稳定时间较长。说明引入 SOAFPID 控制后水电机组能够更好地对光伏机组进行功率补偿, 整个系统供电更加平稳。与传统 PID 调节相比, SOAFPID 水电机组对整个供电系统的频率调节能力得到明显提升。

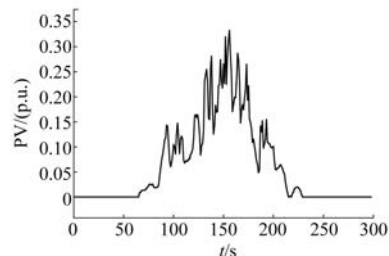


图 11 典型日光伏出力曲线

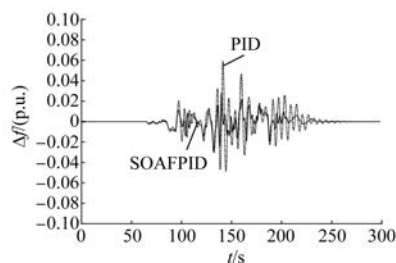


图 12 实际光伏发电功率波动工况频率偏差响应曲线

5 结 语

本文通过采用海鸥算法对模糊 PID 控制器的控制参数进行寻优迭代, 设计出 SOAFPID 控制器。并将其运用到水光独立供电系统的水电机组控制当中。经过仿真研究后得出, 与传统 PID 控制相比, 在水电机组调节系统调频模式中引入 SOAFPID 控制器, 水电机组具有更好地功率输出性能和鲁棒性。可以有效、快速地补偿光伏发电的功率波动, 使得水光电协同运行系统的频率保持平稳, 有利于发挥光伏发电等新能源发电的作用, 对于充分利用新能源具有重要意义。

【参考文献】

- [1] 杨锡运, 任杰, 李相俊, 等. 结合序列分布概率的储能系统典型功率曲线提取方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 8.

- [2] 郭雅卿,钱晶,邹屹东,等.引入风电功率波动的水电机组迭代学习控制[J].水电能源科学,2021,39(9):177.
- [3] 许寅,王佳璇,吴翔宇,等.水光互补发电系统超低频振荡抑制控制策略研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(12):1248.
- [4] 徐昕,耿清华.基于实数型遗传算法的水轮机调节系统设计优化[J].人民长江,2015,46(17):83.
- [5] 李星,杨秀媛,王丽婕.灰狼算法在风电水电协同运行中的应用[J].发电技术,2018,39(1):43.
- [6] 卢恒光,温步瀛,李天扬.基于模糊神经网络的水轮机调速器PID控制[J].电网与清洁能源,2021,37(5):128.
- [7] FARROKHABADI M, CAÑIZARES C A, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 13.
- [8] 文力,陈志辉,郭润龙,等.变论域模糊PID控制在交流发电系统中的应用[J].电机与控制应用,2020,47(2):34.
- [9] 万瑞文,周倩倩.基于自适应模糊PID控制的水轮机调节系统[J].人民长江,2016,47(4):79.
- [10] 郝河淦.水轮机调速器控制方法的研究及调速器的设计[D].成都:西南石油大学,2019.
- [11] DHIMAN G, KUMAR V. Seagull optimization algorithm: theory and its applications for large-scale industrial engineering problems [J]. Knowledge - Based Systems,2019, 165: 169.
- [12] 张冰洁,何庆,戴松利,等.多方向螺旋搜索的混沌海鸥优化算法[J/OL].小型微型计算机系统,2021.doi:21.1106.TP.20211213.1750.028.
- [13] LI L, ZHENG S, TSENG M, et al. Performance assessment of combined cooling, heating and power system operation strategy based on multi-objective seagull optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114443.
- [14] CAO Y, LI Y, ZHANG G, et al. Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm [J]. Energy Reports, 2019, 5: 1616.
- [15] 毛颖卓.水-风-光微电网调频与功率平衡控制技术[D].广州:广东工业大学,2020.
- [16] 陈菲,刘亚琳,张莹文.基于模糊最优梯度法的光伏MPPT控制策略研究[J].电子质量,2021(1):90.
- [17] 徐键.水风光互补发电控制策略与并网控制研究[D].南昌:南昌工程学院,2019.
- [18] 曹向虎,张春雨,段文远,等.基于遗传算法优化的收获机割台高度模糊PID控制研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2021,39(3):49.
- [19] 秦维娜,张达敏,尹德鑫,等.一种基于非线性惯性权重的海鸥优化算法[J].小型微型计算机系统,2022,43(1):10.
- [20] 王玉银.群智能优化算法在图像分割中的应用[J].现代计算机,2020(30):39.

(上接第62页)

感应电机高效能设计技术及解决工程应用问题具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 李世杰,孙吉华.空载损耗对牵引电机温升的影响分析研究[J].铁道机车与动车,2017(11):38.
- [2] 王卫平.定子开口槽感应电机空载损耗分析[J].电机技术,2009(1):43.
- [3] 杜肖飞,侯砚泽,孙楚,等.航空变频电源下笼型感应电机矩形转子槽结构优化分析[J].航空学报,2015(2):614.
- [4] 吴电宁,杨仲源.基于有限元法的电机空载励磁电流影响因素分析[J].电机技术,2015(5):19.
- [5] 龚育林.谐波分量对异步电机性能的影响及抑制方法[J].电机与控制应用,2020,47(7):17.
- [6] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [7] 李祥成,王迎春,黄新宇,等.转子槽口深度和槽配合对异步电机转子损耗的影响[J].电机与控制应用,2018,45(11):78.
- [8] 李聪波,黄明利,李伟,等.基于电磁-结构耦合的异步电机外特性优化[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(6):74.