

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶PID控制

杨博, 束洪春, 朱德娜, 邱大林, 余涛

引用本文:

杨博, 束洪春, 朱德娜, 等. 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶PID控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 593–603.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0943>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 无线多跳网络联合拥塞控制和功率分配的快速二阶算法

Fast second-order algorithm for jointly congestion control and power allocation in wireless multi-hop networks

*控制与决策*. 2020, 35(1): 99–106 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0564>

### 考虑执行器性能约束的刚体航天器鲁棒姿态跟踪控制

Robust attitude tracking control of rigid spacecraft considering control input constraints

*控制与决策*. 2019, 34(4): 735–742 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1384>

### 一类不确定非线性系统的自适应支持向量回归建模与动态面控制

Adaptive support vector regression modeling and dynamic surface control of a class of uncertain nonlinear systems

*控制与决策*. 2019, 34(1): 63–71 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0965>

### 基于无源性的全方位移动机器人自抗扰控制

Passivity-based active disturbance rejection control of an omni-directional mobile robot

*控制与决策*. 2018, 33(6): 1081–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0114>

### 基于分布式PID控制的任意阶线性多智能体系统的一致性

Consensus of multi-agent systems with general linear dynamics based on distributed PID control

*控制与决策*. 2017, 32(5): 899–905 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0231>

### 非线性耦合动态互联系统分布式协作负载均衡控制

Distributed cooperative load-sharing control for coupled inter-connected dynamical systems with nonlinear dynamics

*控制与决策*. 2017, 32(10): 1894–1899 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1223>

### 协调探索和开发能力的改进灰狼优化算法

Improved grey wolf optimization algorithm coordinating the ability of exploration and exploitation

*控制与决策*. 2017, 32(10): 1749–1757 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1545>

### 含状态和输入时滞的离散时间系统的近似最优跟踪控制

Optimal output tracking control for discrete-time systems with delayed state and input

*控制与决策*. 2017, 32(1): 157–162 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0060>

# 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶PID控制

杨博<sup>1</sup>, 束洪春<sup>1</sup>, 朱德娜<sup>1</sup>, 邱大林<sup>1</sup>, 余涛<sup>2†</sup>

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500; 2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

**摘要:** 针对并网光伏逆变器(PV)设计最优无源分数阶PID(PFoPID)控制,其可在不同天气条件下,通过扰动观测(P&O)技术实现最大功率追踪(MPPT)。首先,基于跟踪误差构建储能函数,保留系统阻尼有益项以提高跟踪速率,并完全补偿其他的系统非线性以实现全局一致的控制性能。然后,引入分数阶PID(FoPID)控制作为附加控制输入,对储能函数进行能量重塑,并通过群灰狼优化算法(GGWO)获取最优控制参数。对3种算例进行研究,即光照强度变化、温度变化和电网电压跌落,仿真结果表明,与常规PID控制、FoPID控制和无源控制(PBC)相比,PFoPID控制在各类工况下能够实现最大功率追踪并具有较好的动态特性。最后,基于dSpace的硬件在环(HIL)实验验证了所提出方法的硬件可行性。

**关键词:** 光伏逆变器; 最大功率追踪; 最优无源分数阶PID控制; 群灰狼优化算法; 硬件在环实验

中图分类号: TM7

文献标志码: A

## Grouped grey wolf optimizer based optimal passive fractional-order PID control of photovoltaic inverters

YANG Bo<sup>1</sup>, SHU Hong-chun<sup>1</sup>, ZHU De-na<sup>1</sup>, QIU Da-lin<sup>1</sup>, YU Tao<sup>2†</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper aims to design an optimal passive fractional-order proportional-integral-derivative (PFoPID) controller for grid connected photovoltaic inverters (PV), which can achieve maximum power point tracking (MPPT) under different atmospheric conditions via the perturb and observe (P&O) technique. Firstly, a storage function is constructed based on the tracking errors, in which the beneficial terms are retained to increase the tracking rate. Meanwhile, other system nonlinearities are fully compensated to realize globally consistent control performance. Then, the fractional-order PID (FoPID) control framework is introduced as the additional input to reshape the storage function, and optimal control parameters are tuned by using the grouped grey wolf optimizer (GGWO). Three case studies are carried out, e.g., solar irradiation variation, temperature variation, and power grid voltage drop. Simulation results verify that the PFoPID control outperforms the conventional PID control, FoPID control, and passive-based control (PBC) under different operation conditions. Finally, a hardware-in-loop (HIL) test based on dSpace is undertaken to validate the implementation feasibility of the proposed approach.

**Keywords:** photovoltaic inverter; maximum power point tracking; optimal passive fractional-order proportional-integral-derivative; grouped grey wolf optimizer; HIL test

## 0 引言

太阳能作为一种新兴的绿色能源,以其储量丰富、无污染、分布广泛等优点,近年来得到迅猛发展<sup>[1]</sup>。其能有效缓解化石能源危机、环境污染、偏远地区供电等问题,具有重大的现实意义<sup>[2]</sup>。

由于光伏发电系统发电效率较低,在其实际运行中一个最重要的问题是在给定的光照强度和温度下尽可能多地获取电能,通常称之为最大功率追踪

(maximum power point tracking, MPPT)<sup>[3]</sup>。现阶段常用的MPPT算法有扰动观测法<sup>[4]</sup>和增量电导法<sup>[5]</sup>,此类方法结构简单、可靠性高,在实际应用中得到了广泛的应用。

近年来,国内外学者对光伏逆变器的控制系统进行了大量研究,以期提高光伏逆变器的性能<sup>[6]</sup>。目前,最常用的控制器为比例-积分-微分(PID)控制器,其具有运行可靠性高、结构简单等突出优点<sup>[7]</sup>。然而,

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61963020, 51667010, 51777078)。

责任编辑: 张维海。

†通讯作者。E-mail: taoyu1@scut.edu.cn。

PID控制的参数通过对原非线性系统在某一运行点处线性化后获得,当系统运行点改变时,其控制性能将会降低,故其难以实现全局一致的控制性能。同时,PID控制的最优参数往往基于经验得到,难以实现最优的控制效果<sup>[8]</sup>。

非线性控制理论为解决上述PID控制的缺陷提供了一套有效的解决思路。文献[9]采用反馈线性化控制(FLC)对光伏逆变器的非线性进行完全补偿,从而获得全局一致的控制性能。但是,FLC需要精确的光伏发电系统模型,因此,其对参数不确定性或外部干扰缺乏鲁棒性。文献[10]设计了一款不同光照强度和温度下的光伏逆变器反推控制来实现MPPT,其渐近稳定性基于Lyapunov判据得以严格证明。文献[11]提出了光伏逆变器二阶滑模控制(SMC)策略以提高系统鲁棒性,该控制器克服了经典一阶SMC的抖振现象,并提高了光伏发电系统建模不确定条件下的控制精度。此外,针对光伏逆变器系统参数不确定、系统频率波动和外部时变扰动,文献[12]应用反推有限时间快速滑模控制来有效处理上述各类不确定性。另外,文献[13]设计了模型预测控制来实现光伏逆变器鲁棒MPPT。文献[14]则采用扰动观测器对光伏逆变器电流进行实时估计,该方法不需要光伏发电系统的精确模型,具有较强的鲁棒性能。

一般地,上述非线性控制器的设计主要基于纯粹的控制理论而并未充分考虑被控系统的物理特性。事实上,对于工程问题而言,被控系统的内在物理特性对其动态性能具有显著的影响,因此,对其进行分析可提高被控系统的控制性能<sup>[15]</sup>。为实现这一目标,无源控制(passivity-based control, PBC)<sup>[15-16]</sup>近年来在各类工程问题中得到广泛应用,该理论将被控系统和控制器分别视为两个相互作用的能量转换装置。首先对被控系统构建一个储能函数并对其进行求导,分析各项的物理意义;然后,将控制器视为另一个对被控系统进行能量重塑的装置,从而动态调节被控系统的阻尼。文献[17]提出了一种无源光伏逆变器电流控制器,从而实现光伏发电系统在外环境条件变化时的快速响应。文献[18]基于系统参数辨识器,为光伏/电池混合动力电源开发了自适应无源控制器,可以快速有效地估计光伏阵列电压与负载电阻的未知参数。文献[19]通过PBC对光伏逆变器注入额外阻尼,从而大幅提高了其MPPT的性能。另外,文献[20]基于粒子群优化,提出了最优分数阶PI控制以实现光伏逆变器的MPPT控制,同时文献[21]采用阴-阳八卦最优算法设计了一款基于扰动观测器的最

优分数阶PID控制器以提高光伏逆变器的动态性能。

为有效实现光伏逆变器的控制,本文提出一款最优分数阶无源PID(passive fractional-order PID, PFoPID)控制。该算法将无源控制理论与分数阶PID(fractional-order PID, FoPID)控制<sup>[20]</sup>相结合,主要有以下3个设计阶段:

1) 有益项保留。基于光伏逆变器构建与直流侧电压、直流侧电流以及 $q$ 轴电流相关的储能函数。对其中每一项的物理特性进行深入分析后保留系统阻尼有益项,从而提高系统的动态性能。

2) 能量重塑。引入FoPID控制作为附加控制输入来重塑储能函数,其分数阶微分与分数阶积分机制可进一步增强控制性能。

3) 参数优化。采用新型启发式算法,即群灰狼优化算法(grouped grey wolf optimizer, GGWO)<sup>[22]</sup>来搜索最优PFoPID控制参数。该算法通过改进灰狼群分组机制来实现更好的局部探索与全局搜索之间的平衡,从而获得更佳的寻优质量。

本文在3种算例下对PFoPID控制进行研究,即光照强度变化、温度变化和电网电压跌落,将其控制性能与其他控制算法进行对比分析。最后,通过dSpace的硬件在环(hardware-in-loop, HIL)实验表明PFoPID控制器的硬件可行性。

## 1 光伏逆变器建模

光伏发电系统的结构示意图如图1所示,其中包括光伏阵列、直流侧电容器、光伏逆变器和三相电网<sup>[8]</sup>。串联和并联的光伏电池数量分别用 $N_s$ 和 $N_p$ 表示,于是,输出电流与电压之间的关系<sup>[9]</sup>可描述为

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left( \exp \left[ \frac{q}{AkT_c} \left( \frac{V_{dc}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \right) \right] - 1 \right). \quad (1)$$

其中: $I_{ph}$ 是光伏电池产生的光生电流, $I_s$ 是光伏电池的反向饱和电流,电子电荷 $q = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ , $A$ 是二极管的理想因子,玻尔兹曼常数 $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , $T_c$ 为温度, $V_{dc}$ 是光伏输出

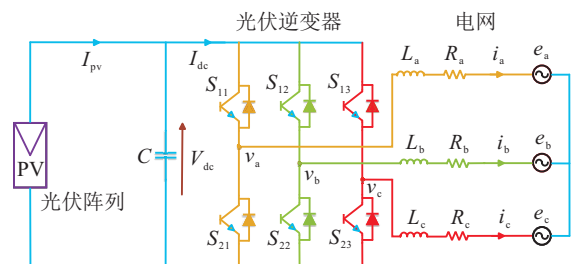


图1 并网发电系统结构示意图

电压,  $I_{pv}$  是光伏输出电流,  $R_s$  是串联电阻. 光伏电池产生的光生电流  $I_{ph}$  计算如下:

$$I_{ph} = (I_{sc} + k_i(T_c - T_{ref})) \frac{s}{1000}. \quad (2)$$

其中:  $I_{sc}$  是短路电流,  $k_i$  是光伏电池短路电流温度系数,  $T_{ref}$  是光伏电池的参考温度,  $s$  是光照强度.

随温度变化的光伏电池饱和电流  $I_s$  计算如下:

$$I_s = I_{RS} \left[ \frac{T_c}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right]. \quad (3)$$

其中:  $I_{RS}$  是在额定光照强度和温度下的光伏电池反向饱和电流,  $E_g$  是光伏电池半导体中带隙能<sup>[9]</sup>.

光伏逆变器在  $dq$  坐标下的方程<sup>[22-23]</sup> 如下所示:

$$\begin{cases} v_d = e_d + Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + Li_q, \\ v_q = e_q + Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $e_d$ 、 $e_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ 、 $v_d$  和  $v_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴的电网电压、电网电流及逆变器输出电压,  $R$  和  $L$  代表电网等效电阻和等效电感,  $\omega$  为交流电网频率.

忽略光伏逆变器的开关损耗, 直流输入侧与交流输出侧之间的功率平衡关系可描述为

$$e_d i_d + e_q i_q = V_{dc} I_{dc}, \quad (5)$$

其中  $I_{dc}$  是流入光伏逆变器的输入电流.

根据基尔霍夫电流定律, 直流侧的动态特性如下所示:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_{dc} = I_{pv} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{V_{dc}}, \quad (6)$$

其中  $C$  为直流侧电容.

本文仅考虑均匀光照条件, 因此, 光伏模块的功率-电压曲线仅有一个峰值<sup>[8,24]</sup>. 采用扰动观测法能在快速时变的天气条件下有效地跟踪最大功率点. 对于非均匀光照条件, 亦称为阴影条件, 光伏模块的功率-电压曲线将出现多个峰值, 常规扰动观测法或增量电导法难以获取全局最优功率点. 在此种情况下, 可以采用各类启发式算法有效解决该问题, 如遗传算法<sup>[24]</sup>、粒子群算法<sup>[25]</sup>、布谷鸟搜索算法<sup>[26]</sup>等.

## 2 最优无源分数阶PID控制设计

在不同天气条件下, 基于扰动观测法得到直流侧参考电压值  $V_{dc}^*$ . 同时, 根据用户需求的功率因数确定  $q$  轴参考电流值  $i_q^*$ .

定义系统状态  $x = (x_1, x_2, x_3)^T = (i_d, i_q, V_{dc})^T$ , 输出  $y = (y_1, y_2)^T = (i_q, V_{dc})^T$  和输入  $u = (u_1, u_2)^T = (v_d, v_q)^T$ , 光伏逆变器(4)和(6)的状态方程可写为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 - \omega x_2 - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{e_q}{L} \\ \frac{I_{pv}}{C} - \frac{e_d x_1 + e_q x_2}{Cx_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u. \quad (7)$$

定义跟踪误差  $e = [e_1, e_2]^T = [i_q - i_q^*, V_{dc} - V_{dc}^*]^T$ , 对跟踪误差  $e$  求导直到控制输入  $u$  显式出现, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} + B(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_q^* \\ \dot{V}_{dc}^* \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$f_1(x) = -\frac{R}{L}i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L}, \quad (9)$$

$$f_2(x) =$$

$$\frac{\dot{I}_{pv}}{C} - \frac{e_d \left( -\frac{R}{L}i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L} \right) + e_q \left( -\frac{R}{L}i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \right)}{CV_{dc}}$$

$$\frac{(e_d i_d + e_q i_q) I_{pv}}{C^2 V_{dc}^2} + \frac{(e_d i_d + e_q i_q)^2}{C^2 V_{dc}^3}, \quad (10)$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{e_d}{LCV_{dc}} & -\frac{e_q}{LCV_{dc}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

为确保上述输入-输出线性化可行, 控制增益矩阵  $B(x)$  在整个运行范围内必须是可逆的, 即

$$\det[B(x)] = \frac{e_d}{L^2 CV_{dc}} \neq 0. \quad (12)$$

由于式(12)中分量  $e_d$  总是不等于零, 上述线性化总能得到满足.

构建系统(8)的储能函数为

$$H(i_q, V_{dc}, I_{dc}) = \underbrace{\frac{1}{2}(i_q - e_q^*)^2}_{\text{交流串联电阻发热}} + \underbrace{\frac{1}{2}(V_{dc} - V_{dc}^*)^2}_{\text{直流并联电阻发热}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left( \frac{I_{dc}}{c} - \dot{V}_{dc}^* \right)^2}_{\text{直流串联电阻发热}}, \quad (13)$$

其中储能函数  $H(i_q, V_{dc}, I_{dc})$  的物理意义为交流串联电阻发热、直流并联电阻发热和直流串联电阻发热之和. 具体而言, 储能函数的第1项  $\frac{1}{2}(i_q - i_q^*)^2$  代表功率因数的调节, 储能函数的后两项  $\frac{1}{2}(V_{dc} - V_{dc}^*)^2$  和  $\frac{1}{2} \left( \frac{I_{dc}}{C} - \dot{V}_{dc}^* \right)^2$  代表光伏逆变器将太阳能转化为电能的过程. 根据直流侧动态(6)、直流侧电压  $V_{dc}$  和直流侧电流  $I_{dc}$  的变化, 可以直接反映出光伏输出功率  $P_{pv}$  的变化.

对储能函数  $H(i_q, V_{dc}, I_{dc})$  求导, 可得

$$\dot{H}(i_q, V_{dc}, I_{dc}) =$$

$$\begin{aligned}
& (i_q - i_q^*) \left( -\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} + \frac{1}{L} u_2 - \ddot{i}_q^* \right) + \\
& \left( \frac{I_{dc}}{C} - \dot{V}_{dc}^* \right) \left[ V_{dc} - V_{dc}^* + \frac{\dot{I}_{pv}}{C} - \right. \\
& \left. \frac{e_d \left( -\frac{R}{L} i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L} \right) + e_q \left( -\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \right)}{CV_{dc}} - \right. \\
& \left. \frac{(e_d i_d + e_q i_q) I_{pv}}{C^2 V_{dc}^2} + \frac{(e_d i_d + e_q i_q)^2}{C^2 V_{dc}^3} - \right. \\
& \left. \frac{e_d}{LCV_{dc}} u_1 - \frac{e_q}{LCV_{dc}} u_2 + \ddot{V}_{dc}^* \right]. \quad (14)
\end{aligned}$$

针对系统(8),设计PFoPID控制如下:

$$\begin{cases}
u_1 = \\
-\frac{LCV_{dc}}{e_d} \left[ \ddot{V}_{dc}^* - V_{dc} + V_{dc}^* + \frac{e_q}{LCV_{dc}} u_2 - \frac{\dot{I}_{pv}}{C} + \right. \\
\left. \frac{e_d \left( -\frac{R}{L} i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L} \right) + e_q \left( -\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \right)}{CV_{dc}} + \right. \\
\left. \frac{(e_d i_d + e_q i_q) \dot{V}_{dc}^* - v_1}{CV_{dc}^2} \right], \\
u_2 = Li_q^* - \omega Li_d + Ri_q^* + e_q - v_2.
\end{cases} \quad (15)$$

其中:  $v_1$  和  $v_2$  为附加控制输入,设计如下:

$$\begin{cases}
v_1 = K_{P1} (V_{dc} - V_{dc}^*) + \frac{K_{I1}}{s\lambda_1} (V_{dc} - V_{dc}^*) + \\
K_{D1} s^{\mu_1} (V_{dc} - V_{dc}^*), \\
v_2 = K_{P2} (i_q - i_q^*) + \frac{K_{I2}}{s\lambda_2} (i_q - i_q^*) + \\
K_{D2} s^{\mu_2} (i_q - i_q^*).
\end{cases} \quad (16)$$

其中:  $K_{P1}$ 、 $K_{P2}$ 、 $K_{I1}$ 、 $K_{I2}$ 、 $K_{D1}$  和  $K_{D2}$  为PID控制增益,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为微分阶次,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为积分阶次.

将PFoPID控制(15)和(16)代入储能函数一阶导(14)中,同时计及直流侧动态(6),可得

$$\begin{aligned}
\dot{H}(i_q, V_{dc}, I_{dc}) = & \underbrace{-\frac{1}{CR_{dc}} (\dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc}^*)^2 - \frac{R}{L} (i_q - i_q^*)}_{\text{系统阻尼有益项}} - \\
& \underbrace{(\dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc}^*) v_1 - \frac{i_q - i_q^*}{L} v_2}_{\text{能量重塑}}, \quad (17)
\end{aligned}$$

其中  $R_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{e_d i_d + e_q i_q}$  表示与直流侧电容并联的虚拟电阻. 至此,系统(17)的前两个对系统阻尼有益的项被保留,从而提高  $q$  轴电流  $i_q$  和直流侧电压  $V_{dc}$  的跟踪速率. 同时,系统(17)的后两项与FoPID控制相结合,通过调整FoPID控制参数,可显著提高储能函

数的衰减速率,从而进一步改进闭环系统的动态性能.

### 3 基于群灰狼优化的控制参数调节

GGWO为常规灰狼优化算法(GWO)<sup>[26]</sup>的改进算法,其通过引入分组机制实现灰狼群之间更广泛和更深入的合作捕猎,从而显著地提高全局最优搜索性能. GGWO的细节可参见文献[22].

GGWO的猎物包围策略如下:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)|, \quad (18)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D, \quad (19)$$

$$A = 2\alpha \cdot r_1 - \alpha, \quad (20)$$

$$C = 2 \cdot r_2. \quad (21)$$

其中:  $t$  表示当前迭代次数;  $X_p$  和  $X$  分别是猎物和灰狼的位置矢量;  $A$  和  $C$  是系数矢量;  $\alpha$  是包围系数矢量,在每次迭代过程中,其值从2线性递减至0;而  $r_1$  和  $r_2$  分别表示在  $[0, 1]$  中的随机矢量.

狩猎策略描述如下:

$$\begin{cases}
D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X|, \\
D_{\beta_1} = |C_2 \cdot X_{\beta_1} - X|, \\
D_{\beta_2} = |C_2 \cdot X_{\beta_2} - X|, \\
D_{\delta_1} = |C_3 \cdot X_{\delta_1} - X|, \\
D_{\delta_2} = |C_3 \cdot X_{\delta_2} - X|, \\
D_{\delta_3} = |C_3 \cdot X_{\delta_3} - X|;
\end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases}
X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha, \\
X_{21} = X_{\beta_1} - A_2 \cdot D_{\beta_1}, \\
X_{22} = X_{\beta_2} - A_2 \cdot D_{\beta_2}, \\
X_{31} = X_{\delta_1} - A_3 \cdot D_{\delta_1}, \\
X_{32} = X_{\delta_2} - A_3 \cdot D_{\delta_2}, \\
X_{33} = X_{\delta_3} - A_3 \cdot D_{\delta_3};
\end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases}
X(t+1) = \\
k_\alpha X_1 + k_\beta \left( \frac{X_{21} + X_{22}}{2} \right) + k_\delta \left( \frac{X_{31} X_{32} + X_{33}}{3} \right), \\
k_\alpha + k_\beta + k_\delta = 1, k_\alpha \geq 0, k_\beta \geq 0, k_\delta \geq 0.
\end{cases} \quad (24)$$

其中:  $X_\alpha$ 、 $X_\beta$  和  $X_\delta$  分别是  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼和  $\delta_1$  狼的位置,  $k_\alpha$ 、 $k_\beta$  和  $k_\delta$  分别是  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼和  $\delta_1$  狼的引导系数.

随机侦查策略为

$$X(t+1) = X(t) + r_{\delta_2}, \quad (25)$$

其中  $r_{\delta_2}$  是一个范围任意的随机侦察矢量,仅受可控

变量的上下界限制。

GGWO的优化流程如图2所示。其中： $\varepsilon$ 为收敛判据，本文选取 $\varepsilon = 10^{-4}$ ， $F_k$ 和 $F_{k-1}$ 分别表示在第 $k$ 次迭代和第 $(k-1)$ 次迭代时的适应度函数值。

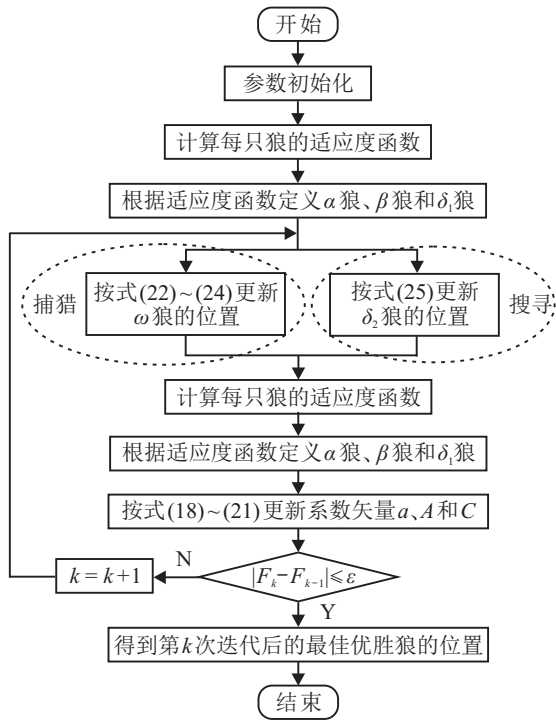


图2 GGWO流程

本文将PFoPID应用于光伏逆变器，在光照强度变化、温度变化以及电网电压跌落3种算例下，通过GGWO调节最优控制器参数(16)以实现MPPT。优化目标为最小化直流侧电压 $V_{dc}$ 的跟踪误差、 $q$ 轴电流 $i_q$ 的跟踪误差以及控制成本。上述优化模型描述如下：

$$\min F = \sum_{3 \text{ 种算例}} \int_0^T (|V_{dc} - V_{dc}^*| + |i_q - i_q^*| + \omega_1 |u_1| + \omega_2 |u_2|) dt.$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} K_{P_i}^{\min} \leq K_{P_i} \leq K_{P_i}^{\max}, \\ K_{I_i}^{\min} \leq K_{I_i} \leq K_{I_i}^{\max}, \\ K_{D_i}^{\min} \leq K_{D_i} \leq K_{D_i}^{\max}, \\ \lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max}, \\ \mu_i^{\min} \leq \mu_i \leq \mu_i^{\max}, \\ u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max}, \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (26)$$

其中：权重系数 $\omega_1 = \omega_2 = 0.2$ ，仿真时间 $T = 3 \text{ s}$ 。

PID控制参数 $K_{P_i}$ 、 $K_{I_i}$ 和 $K_{D_i}$ 的取值范围分别为 $[0, 300]$ 、 $[0, 200]$ 和 $[0, 50]$ ；积分阶次 $\mu_i$ 和微分阶次 $\lambda_i$ 分别在 $[0, 2]$ 之间；控制输入则限于 $[-0.6, 0.6]$ 之间；引导系数 $k_\alpha = 0.3$ ， $k_\beta = 0.4$ ， $k_\delta = 0.3$ ；合作狩猎组的种群大小 $n_h = 12$ ；随机侦察组的种群大小 $n_s = 6$  [22]。

PFoPID控制、PID控制 [7]、FoPID控制 [21] 和PBC [17] 的控制参数均经过GGWO优化后进行对比。其中GGWO运行30次，每个控制器都采用最佳结果（适应度函数最小的控制参数）下的控制器最优参数，如表1所示，算法优化统计结果如表2所示。由表2可见，PBC仅需优化两个参数，故其收敛时间最短。此外，由于分数阶机制的引入，FoPID控制比PID控制能获得更低的适应度函数。最后，PFoPID控制拥有最低的适应度函数，因此，它在上述控制器中具有最佳的控制性能。

表1 30次GGWO优化后的各控制器最优控制参数

算法	$q$ 轴电流	直流侧电压
PID	$K_{P_1} = 197, K_{I_1} = 126, K_{D_1} = 55$	$K_{P_2} = 173, K_{I_2} = 116, K_{D_2} = 73$
FoPID	$K_{P_1} = 185, K_{I_1} = 147, K_{D_1} = 25$ $\mu_1 = 1.63, \lambda_1 = 1.25$	$K_{P_2} = 148, K_{I_2} = 182, K_{D_2} = 51$ $\mu_2 = 1.44, \lambda_2 = 1.93$
PBC	$\lambda_1 = 35$	$\lambda_2 = 57$
PFoPID	$K_{P_1} = 120, K_{I_1} = 85, K_{D_1} = 10$ $\mu_1 = 1.75, \lambda_1 = 1.5$	$K_{P_2} = 165, K_{I_2} = 120, K_{D_2} = 15$ $\mu_2 = 1.5, \lambda_2 = 1.25$

表2 30次GGWO优化后的各控制器优化统计结果

算法	适应度函数 / p.u.			收敛时间 / h			迭代次数		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
PID	2.18	1.64	1.89	0.51	0.42	0.47	176	153	162
FoPID	1.87	1.48	1.55	0.45	0.33	0.38	145	113	136
PBC	1.34	1.07	1.22	0.14	0.11	0.13	52	24	33
PFoPID	1.17	0.92	1.03	0.64	0.51	0.57	164	141	153



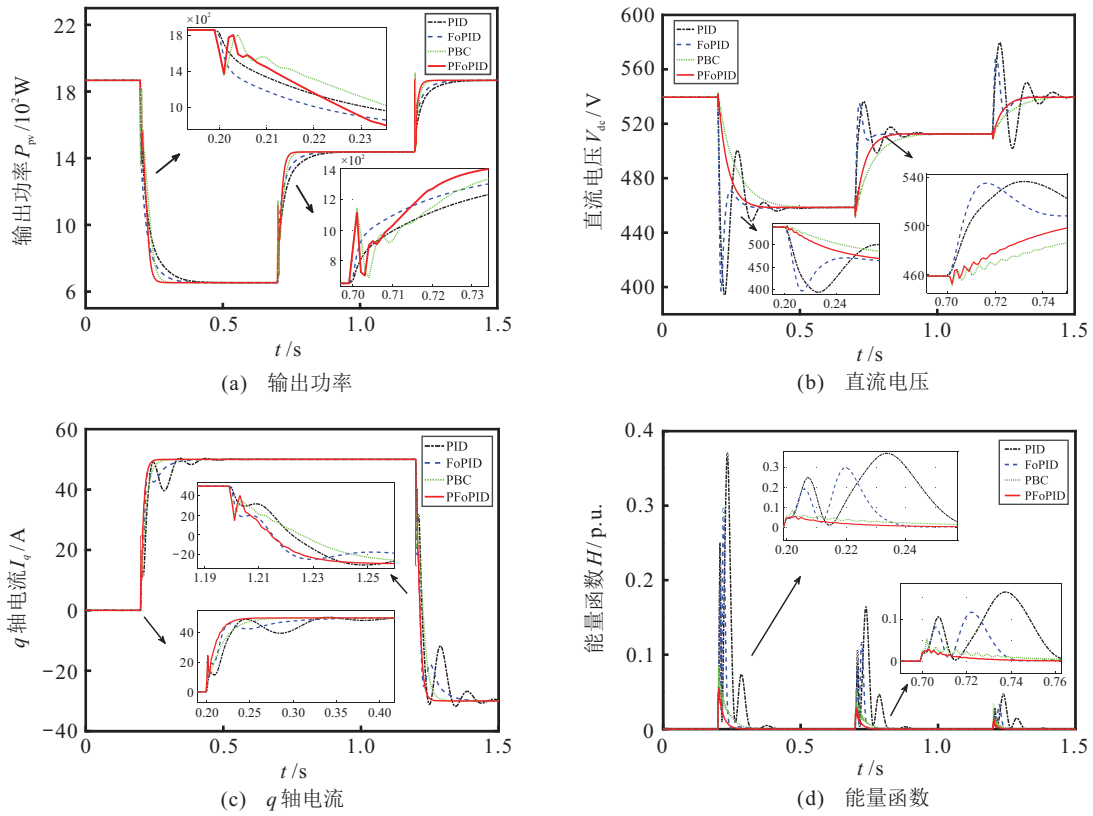


图4 光照强度变化下光伏发电系统响应

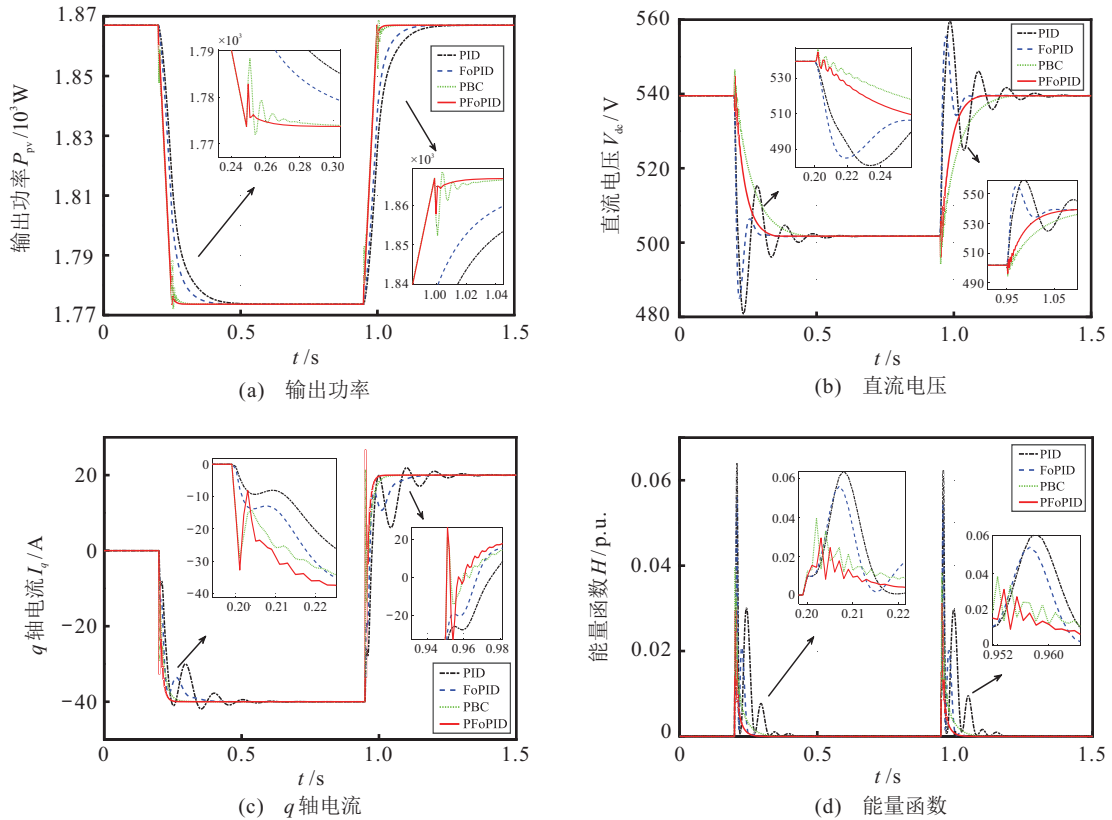


图5 温度变化下光伏发电系统响应

### 4.3 电网电压跌落

为了测试PFOPID控制在电网发生故障后的恢复系统能力,在 $t = 0.2s \sim 0.35s$ 期间电网电压跌落至 $0.4p.u.$ .光伏发电系统的响应如图6所示.可以发

现,PFOPID控制能以最快的速率和最低的振荡幅度恢复由故障引起的有功功率、直流侧电压和 $q$ 轴电流的波动.因此,其可有效抑制电网故障对并网光伏发电系统的不良影响.此外,储能函数的变化表明,由

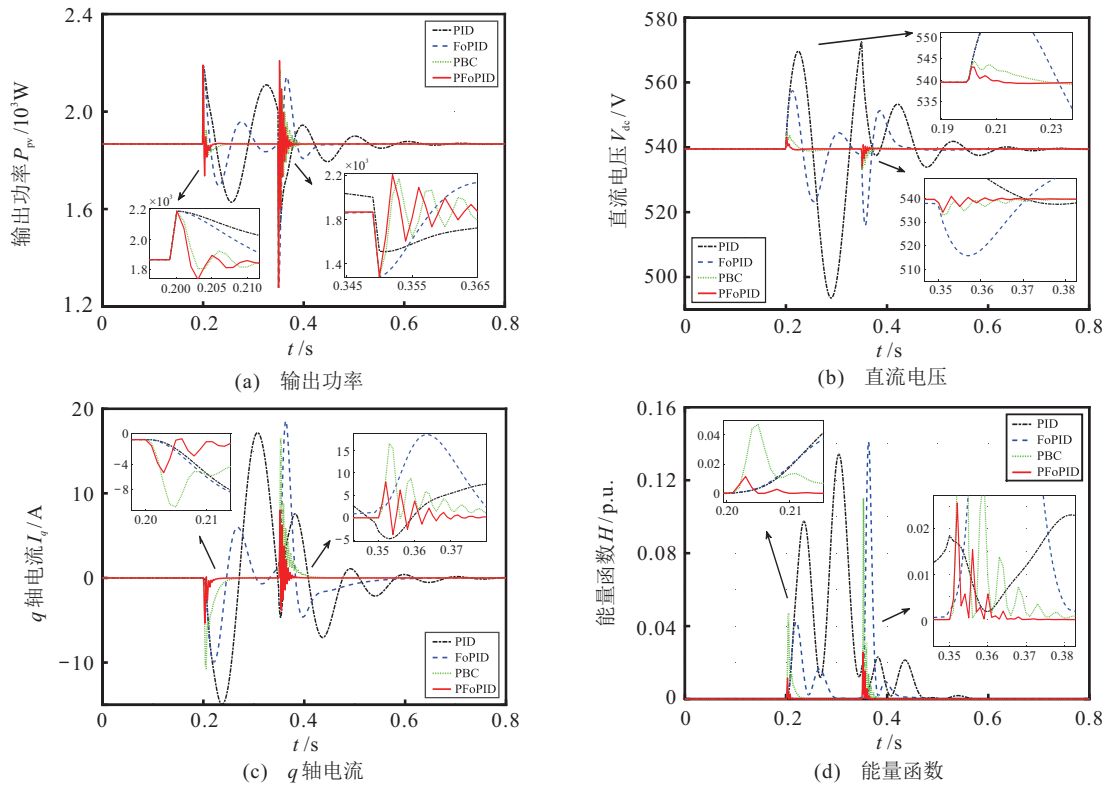


图6 电网电压跌落变化下光伏发电系统响应

于系统阻尼有益项的保留和剩余非线性项的完全补偿,PBC和PFoPID控制可以实现最小的能量振荡,从而大幅提高光伏发电系统的稳定性.

4.4 定量分析

表4给出了3种算例下各控制器的绝对误差积分指标(integral of absolute error, IAE). 其中:  $IAE_{I_q} = \int_0^T |i_q - i_q^*| dt$ ,  $i_q^*$  是  $q$  轴电流参考值;  $IAE_{V_{dc}} = \int_0^T |V_{dc} - V_{dc}^*| dt$ ,  $V_{dc}^*$  是直流侧电压参考值. 由表4可得,PFoPID控制拥有最低的IAE指标,这主要得益于其系统阻尼有益项保留和能量重塑机制. 特别地,PFoPID控制在温度变化下的  $IAE_{I_q}$  分别是PID控制的74.74%,FoPID控制的77.43%和PBC的82.31%. 同时,PFoPID控制在电压跌落下的  $IAE_{V_{dc}}$  分别是PID控制的83.37%,FoPID控制的86.59%和PBC的91.46%.

表4 3种算例下4个控制器的IAE指标

工况	IAE指标	PID	FoPID	PBC	PFoPID
光照强度变化	$IAE_{I_q}$	0.1837	0.1732	0.1611	0.1407
	$IAE_{V_{dc}}$	0.4484	0.4412	0.4357	0.3901
温度变化	$IAE_{I_q}$	0.2217	0.2140	0.2013	0.1657
	$IAE_{V_{dc}}$	0.5587	0.5431	0.5262	0.4778
电网电压跌落	$IAE_{I_q}$	0.3413	0.3207	0.2938	0.2476
	$IAE_{V_{dc}}$	0.7529	0.7249	0.6863	0.6277

此外,在3种算例下对储能函数积分  $\int_0^T H(i_q, V_{dc}, I_{dc}) dt$  进行比较,如图7所示,其值反映了系统整体跟踪误差. 可以发现,PID控制的值最大,因此,它在4个控制器中具有最高的跟踪误差. 相比之下,PFoPID控制拥有最低的跟踪误差,因此可以达到最佳的控制性能.

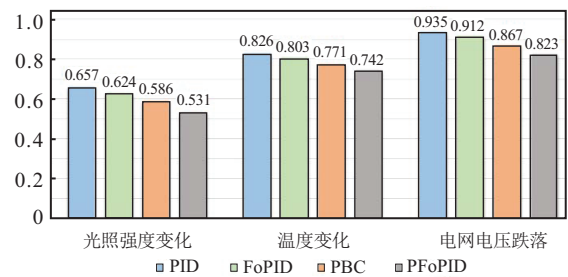


图7 不同算例下4种控制器的总体能量

最后,图8比较了3种算例下4个控制器所需的总控制成本,即  $u = \int_0^T (|u_1| + |u_2|) dt$ . 由图8可

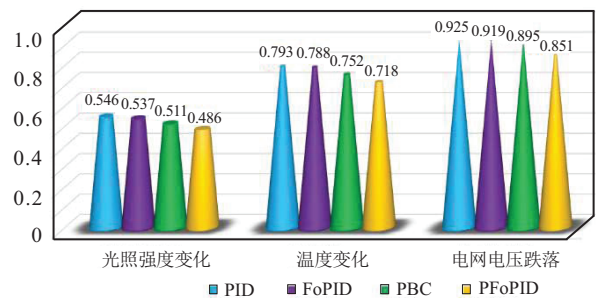


图8 3种算例下4个控制器的总控制成本

知,PFoPID控制在所有算例下均具有最低的总控制成本. 特别地,在电网电压跌落下,其总控制成本分别为PID控制的92%,FoPID控制的92.6%和PBC的95.08%.

### 5 硬件在环实验

本节基于dSpace进行HIL实验以测试所提出控制器的硬件可行性,其结构示意和硬件平台分别如图9和图10所示. 特别地,基于PFoPID的 $q$ 轴电流和直流侧电压控制器(15)和(16)置于DS1104平台,其采样频率 $f_c = 1\text{ kHz}$ ;同时,光伏发电系统置于DS1006平台,采样频率 $f_s = 50\text{ kHz}$ ,旨在最大程度地模拟真实的光伏发电系统. 通过DS1006中光伏发电系统的实时模拟可得到 $q$ 轴电流 $i_q$ 和直流侧电压 $V_{dc}$ 的测量值,并通过进入DS1104平台中的PFoPID控制器实时传输控制器输出信号.

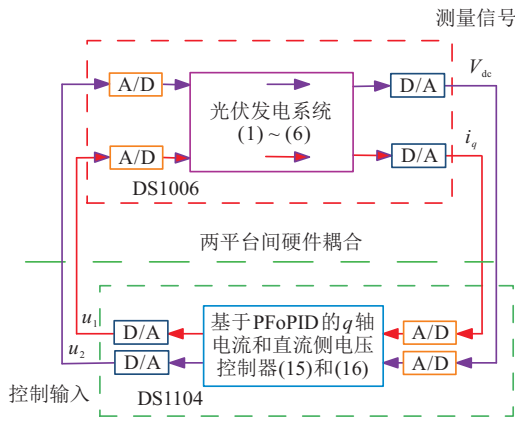


图9 HIL实验结构示意图

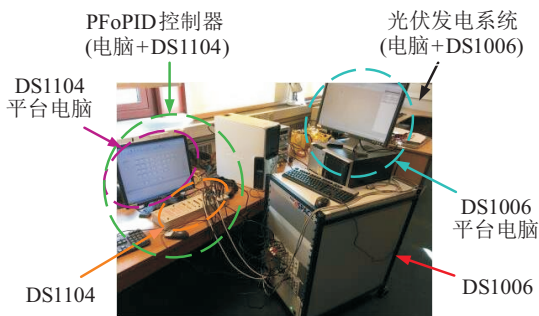


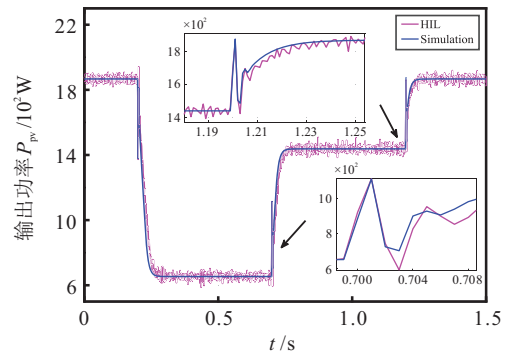
图10 HIL实验硬件平台

HIL实验的主要目的可归纳为以下两个方面:

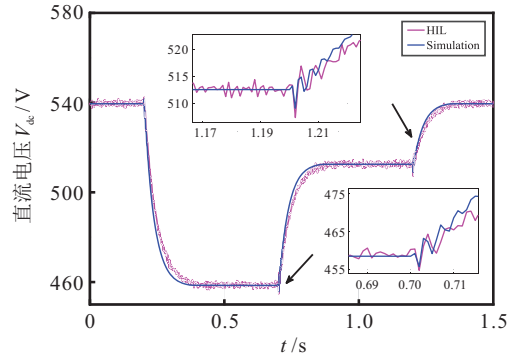
- 1) 验证PFoPID控制器在光伏发电系统中的硬件可行性;
- 2) 评估PFoPID控制器的控制精度和实际运算能力.

#### 5.1 光照强度变化

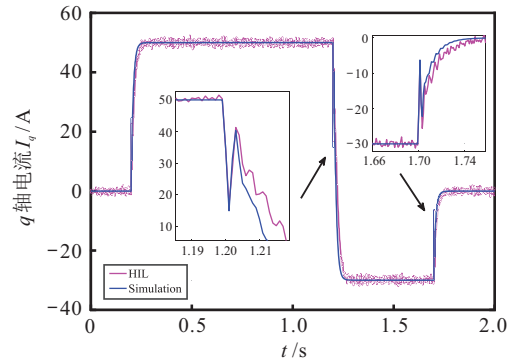
图11比较了仿真和HIL实验所获得的光伏发电系统响应,可以发现,HIL实验结果非常接近于仿真结果.



(a) 输出功率



(b) 直流电压



(c)  $q$ 轴电流

图11 光照强度变化下仿真和HIL实验结果

#### 5.2 温度变化

温度变化下光伏发电系统响应如图12所示,可以看出,HIL实验能够实现与仿真几乎相同的控制性能. 在此,图11与图12中当 $t = 1.7\text{ s}$ 时人为地将 $q$ 轴电流进行一个调整,从而进一步验证了直流侧电压与 $q$ 轴电流可以完全解耦控制.

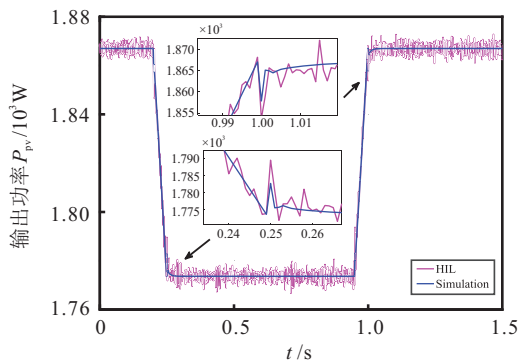
#### 5.3 电网电压跌落

在相同的电网电压跌落时的光伏发电系统响应如图13所示,可以观察到,HIL实验结果与仿真结果非常相似.

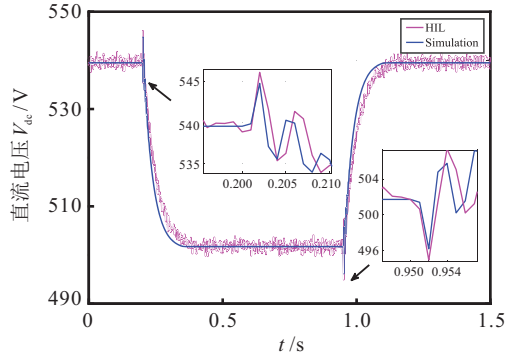
### 6 结论

本文设计了基于群灰狼优化算法的最优分数阶PID控制器,实现了并网光伏逆变器的最大功率追踪. 其主要结论可归纳为以下3个方面:

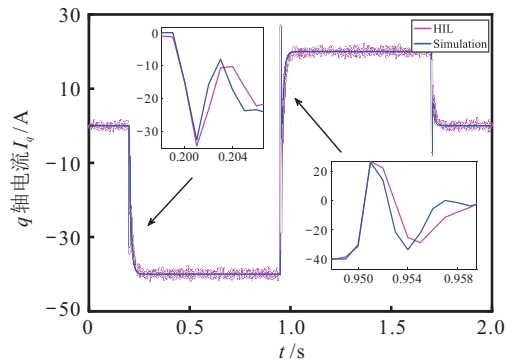
- 1) 基于无源控制理论,构建了光伏逆变器的储能函数,对系统各项的物理特性进行深入的分析,保留



(a) 输出功率



(b) 直流电压



(c) q轴电流

图12 温度变化下仿真和HIL实验结果

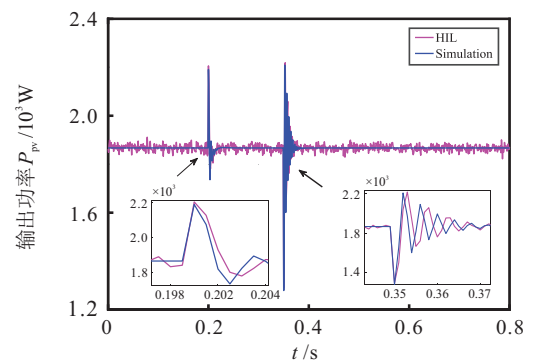
系统阻尼项从而提高了系统的动态性能;

2) 引入分数阶PID控制机制作为额外输入,对储能函数进行能量重塑,其中,采用群灰狼优化算法获取其最优控制参数,从而进一步提升了所提出控制器的控制性能;

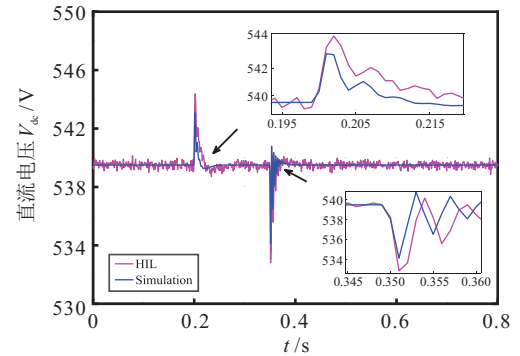
3) 3种算例下的仿真结果表明,最优分数阶PID控制器可以在各种天气条件下达到满意的控制性能,而且只需最低的总控制成本,同时基于dSpace的HIL实验验证了其硬件可行性。

#### 参考文献(References)

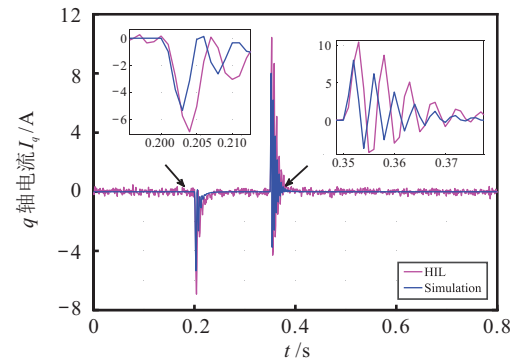
- [1] 孙秋野, 杨凌霄, 张化光. 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 938-949.  
(Sun Q Y, Yang L X, Zhang H G. Smart energy — Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 938-949.)



(a) 输出功率



(b) 直流电压



(c) q轴电流

图13 电网电压跌落下仿真和HIL实验结果

- [2] 王鲁浩, 李歧强, 王桂荣, 等. 多可再生能源冷热电联供微网系统环境经济优化调度[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 913-918.  
(Wang L H, Li Q Q, Wang G R, et al. Optimal environmental economic scheduling of combined cooling heating and power microgrid system with multi-renewable energy[J]. Control and Decision, 2016, 31(5): 913-918.)
- [3] 任海鹏, 郭鑫, 杨彧, 等. 光伏阵列最大功率追踪变论域模糊控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 13-19.  
(Ren H P, Guo X, Yang Y, et al. Maximum power point tracking of photovoltaic array using variable universe fuzzy controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 13-19.)
- [4] Alik R, Awang J. Modified perturb and observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation[J]. Solar Energy, 2017, 148: 128-139.
- [5] Loukriz A, Haddadi M, Messalti S. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size incremental conductance MPPT algorithm for PV systems[J]. ISA Transactions, 2016, 62(1): 30-38.

- [6] 王久和, 慕小斌, 张百乐, 等. 光伏并网逆变器最大功率传输控制研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 49-56.  
(Wang J H, Mu X B, Zhang B L, et al. Research on maximum power transfer control of photovoltaic grid connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 49-56.)
- [7] Kadri R, Gaubert J P, Champenois G. An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 66-75.
- [8] Zhang X S, Li S N, He T Y, et al. Memetic reinforcement learning based maximum power point tracking design for PV systems under partial shading condition[J]. Energy, 2019, 174: 1079-1090.
- [9] Lalili D, Mellit A, Lourci N, et al. Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter[J]. Renewable Energy, 2011, 36: 3282-3291.
- [10] Naghmasha, Armghan H, Ahmad I, et al. Backstepping based non-linear control for maximum power point tracking in photovoltaic system[J]. Solar Energy, 2018, 159: 134-141.
- [11] Kchaou A, Naamane A, Koubaa Y, et al. Second order sliding mode-based MPPT control for photovoltaic applications[J]. Solar Energy, 2017, 155: 758-769.
- [12] Dhar S, Dash P K. A new backstepping finite time sliding mode control of grid connected PV system using multivariable dynamic VSC model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82: 314-330.
- [13] Shadmand M B, Balog R S, Abu-Rub H. Model predictive control of PV sources in a smart DC distribution system: Maximum power point tracking and droop control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2014, 29(4): 913-921.
- [14] Mohomad H, Saleh S A M, Chang L. Disturbance estimator-based predictive current controller for single-phase interconnected PV systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2017, 53(5): 4201-4209.
- [15] Ortega R, Schaft A, Mareels I, et al. Putting energy back in control[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(2): 18-33.
- [16] Ortega R, Schaf A, Castanos F, et al. Control by interconnection and standard passivity-based control of port-Hamiltonian systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(11): 2527-2542.
- [17] Bao X, Wang J, Xiang H, et al. The maximum power point tracking technology of passivity-based photovoltaic grid-connected system[C]. The 7th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference-ECCE Asia. Harbin: IEEE, 2012: 1372-1376.
- [18] Tofighi A, Kalantar M. Power management of PV/battery hybrid power source via passivity-based control[J]. Renewable Energy, 2011, 36(9): 2440-2450.
- [19] Wang J, Mu X, Li Q K. Study of passivity based decoupling control of T-NPC PV grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7542-7551.
- [20] Ramadan H S. Optimal fractional order PI control applicability for enhanced dynamic behavior of on-grid solar PV systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(7): 4017-4031.
- [21] Yang B, Yu T, Shu H C, et al. Perturbation observer based fractional-order PID control of photovoltaics inverters for solar energy harvesting via Yin-Yang-Pair optimization[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 170-187.
- [22] Yang B, Zhang X S, Yu T, et al. Grouped grey wolf optimizer for maximum power point tracking of doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133: 427-443.
- [23] Yang B, Yu T, Shu H C, et al. Passivity-based fractional-order sliding-mode control design and implementation of grid-connected photovoltaic inverters[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10: 043701.
- [24] Daraban S, Petreus D, Morel C. A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading[J]. Energy, 2014, 74(5): 374-388.
- [25] Sen T, Pragallapati N, Agarwal V, et al. Global maximum power point tracking of PV arrays under partial shading conditions using a modified particle velocity-based PSO technique[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(5): 555-564.
- [26] Mirjalili S, Mirjalili S M, Andrew L. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [27] Bharatiraja C, Jeevananthan S, Latha R. FPGA based practical implementation of NPC-MLI with SVPWM for an autonomous operation PV system with capacitor balancing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 489-509.

## 作者简介

杨博(1988—), 男, 副教授, 博士, 从事非线性自适应控制、高压直流输电系统和风力发电优化及控制等研究, E-mail: yangbo\_ac@outlook.com;

束洪春(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事故障定位与行波测距等研究, E-mail: kmshc@sina.com.cn;

朱德娜(1993—), 女, 硕士生, 从事风力发电系统控制的研究, E-mail: 1767075436@qq.com;

邱大林(1989—), 男, 硕士生, 从事风力发电系统优化运行的研究; E-mail: 864950746@qq.com;

余涛(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 从事人工智能电力系统控制与优化等研究, E-mail: taoyu1@scut.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)