

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190124

光伏逆变器无源分数阶滑动模态控制器设计

张鑫¹, 赖伟坚¹, 林泽宏¹, 陈威洪¹, 李敬光¹, 瞿凯平², 余涛²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 苏州华天国科电力科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 设计了光伏逆变器无源分数阶滑动模态控制器(Passive Fractional-Order Sliding-Mode Controller, PFSMC)来实现不同运行条件下的最大功率跟踪。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。随后, 引入分数阶滑动模态控制(Fractional-Order Sliding-Mode Control, FSMC)作为附加控制输入对储能函数进行能量重塑以提高光伏逆变器的动态响应性能, 同时分数阶滑动模态的引入可大幅提高闭环系统的鲁棒性。为验证所提控制器的有效性, 进行了两种算例研究, 即光照强度变化和电网电压跌落。仿真结果表明, PFSMC 与常规 PID 控制、无源控制(Passivity-Based Control, PBC)和 FSMC 相比, 其能在各类工况下实现最快的动态响应以及最低的超调量。最后, 基于 dSpace 的硬件在环实验(Hardware-in-the-Loop, HIL)验证了所提算法的硬件实现可行性。

关键词: 光伏逆变器; 最大功率跟踪; 无源分数阶滑动模态控制; 硬件在环实验

Passive fractional-order sliding-mode controller design for PV inverters

ZHANG Xin¹, LAI Weijian¹, LIN Zehong¹, CHEN Weihong¹, LI Jingguang¹, QU Kaiping², YU Tao²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523000, China;
2. Suzhou Huatian Guoke Power Technology Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: This paper designs a Passive Fractional-Order Sliding-Mode Controller (PFSMC) for PV inverter to achieve the Maximum Power Point Tracking (MPPT) under various operation conditions. At first, 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 a globally consistent control performance. Then, the Fractional-order Sliding-Mode Control (FSMC) is employed as the additional input to reshape the energy of the storage function, such that an improved dynamical response of the PV inverter could be realized. Meanwhile, the closed-loop system robustness can be significantly enhanced by the use of FSMC framework. Two case studies are undertaken, e.g. solar irradiation variation and power grid voltage drop, to verify the effectiveness of the proposed approach. Simulation results show that PFSMC can achieve the fastest dynamical responses and the lowest overshoot in comparison to that of conventional PID control, Passivity-Based Control (PBC), and FSMC under different operation conditions. Lastly, a dSpace based Hardware-In-the-Loop (HIL) test is carried out to validate the implementation feasibility of PFSMC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777078) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. 031900KK52170132).

Key words: PV inverter; maximum power point tracking; passive fractional-order sliding-mode control; hardware-in-the-loop test

0 引言

作为当前应用较为广泛的一种新能源发电技术,

光伏发电系统近年来受到了世界各国的广泛关注^[1-3]。鉴于其发电效率较低这个特点, 在实际运行中需在不同气候条件下尽可能多地获取电能, 即最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[4]。常见的 MPPT 算法有增量电导法^[5-6]与扰动观测法^[7-8], 近年来各类启发式优化算法^[9-10]亦得到了大量应

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777078); 广东电网有限责任公司科技项目资助(031900KK52170132)

用,以解决阴影条件下全局最大功率点的搜索问题。

当上述各类 MPPT 算法获取最大功率点后,一个关键问题便是如何设计高效的光伏逆变器控制系统,从而将光伏系统所发出的直流电快速地转化为交流电。常规的控制器的主要基于比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制框架^[11],其具有运行可靠性高、结构简单等突出优点^[12]。然而, PID 控制框架的控制参数主要是通过对某一运行点进行线性化后获得,当系统运行点改变时,其控制性能会有一定程度的降低,某些情况下甚至出现失稳的问题。因此, PID 控制难以实现全局一致的控制性能。

为解决上述线性控制框架的缺陷,各类非线性控制器近年来得到了大量研究。在文献[13]中,基于反馈线性化控制将光伏逆变器的非线性进行了完全补偿,从而获得了全局一致的控制性能。然而,该控制器需要精确的光伏逆变器系统数学模型,因此缺乏鲁棒性。为提高系统鲁棒性,文献[14]设计了滑动模态控制器来有效处理光伏逆变器参数不确定与外部扰动的问题。文献[15]提出了一款光伏逆变器反推控制策略来实现 MPPT,其渐进稳定性基于 Lyapunov 判据得以严格证明。在文献[16]中,模型预测控制成功地实现了光伏逆变器的鲁棒 MPPT。

上述各类先进的非线性控制器通常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^[17]。基于此观点,无源控制(Passivity-Based Control, PBC)^[18-19]近年来在各类工程问题中得到广泛应用。在文献[20]中, PBC 已被成功应用于光伏逆变器的控制系统中,结果表明 PBC 可大幅提高光伏逆变器的运行性能。然而, PBC 仍然需要精确的光伏逆变器模型,如何提高其鲁棒性变得尤为重要。

基于上述讨论,本文旨在将 PBC 可显著提高系统动态响应特性的优点与分数阶滑动模态控制(Fractional-Order Sliding-Mode Control, FSMC)^[21]可大幅提高系统鲁棒性的优点相结合,提出了一款新型的无源分数阶滑动模态控制器(Passive Fractional-Order Sliding-Mode Controller, PFSMC)。该控制器首先基于光伏逆变器构建一个包含直流侧电压与 q 轴电流的储能函数,对其中各项的物理特性进行深入分析后保留系统阻尼有益项,从而提高光伏逆变器的动态性能;随后引入 FSMC 作为额外输入,从而提高系统的鲁棒性能。特别地,由于引入了分数阶滑动模态平面,FSMC 相较于传统的整数阶型滑动模态控制而言具有更佳的控制性能。

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台对 PFSMC 在光照强度变化与电网电压跌落两个算例下进行研究,并与常规 PID 控制、PBC 以及 FSMC 进行了对比。最后,基于 dSpace 的硬件在环实验(Hardware-in-the-Loop, HIL)^[22]验证了 PFSMC 的硬件实现可行性。

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^[1]。串联和并联的光伏电池数量分别用 N_s 和 N_p 表示,那么,输出电流和电压之间的关系可描述为^[9]

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

式中: I_{ph} 为光伏电池产生的光生电流; I_s 为光伏电池的反向饱和电流,电子电荷 $q = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{Cb}$; A 为二极管的理想因子,玻尔兹曼常数 $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{J/K}$; T_c 为温度; V_{dc} 为光伏输出电压; I_{pv} 为光伏输出电流; R_s 为串联电阻。

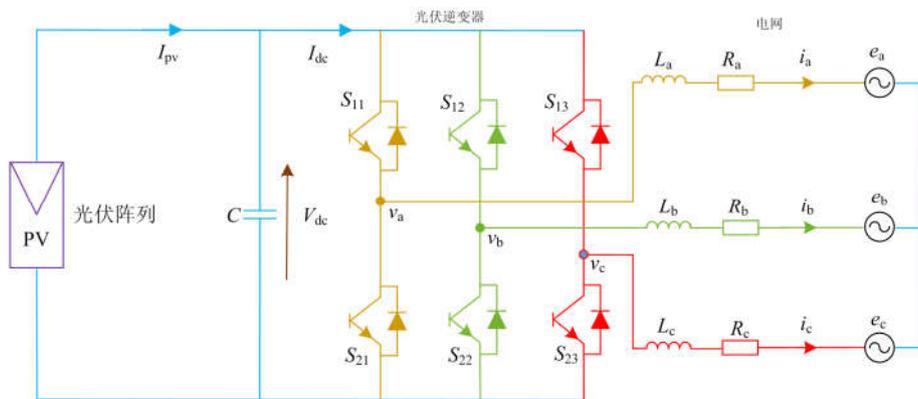


图 1 光伏发电系统结构示意图

Fig. 1 Configuration of grid-connected PV systems

光伏电池发出的光生电流 I_{ph} 计算为

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

式中: I_{sc} 为短路电流; k_i 为光伏电池短路电流温度系数; T_{ref} 为光伏电池的参考温度; s 为光照强度。

光伏电池饱和电流 I_s 计算为

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

式中: I_{RS} 为在额定光照强度和温度下的光伏电池反向饱和电流; E_g 为光伏电池半导体中带隙能^[12]。

光伏逆变器在 dq 坐标下的方程为^[13]

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

式中: 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; ω 为交流电网频率。

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

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

式中, I_{dc} 为流入光伏逆变器的输入电流。

直流侧的动态特性为

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

式中, C 为直流侧电容。

2 光伏逆变器无源分数阶滑动模态控制

定义系统输出 $\mathbf{y} = (y_1, y_2)^T = (i_q, V_{dc})^T$ 和输入 $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T = (v_d, v_q)^T$, 定义跟踪误差 $\mathbf{e} = (e_1, e_2)^T = (i_q - i_q^*, V_{dc} - V_{dc}^*)^T$, 对跟踪误差 \mathbf{e} 求导直到控制输入 \mathbf{u} 显式出现, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} + \mathbf{B}(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_q^* \\ \dot{V}_{dc}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$f_1(x) = -\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \quad (8)$$

$$f_2(x) = \frac{I_{pv}}{C} - \frac{e_d \left(-\frac{R}{L} i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L} \right) + e_q \left(-\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \right)}{CV_{dc}} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{C^2 V_{dc}^2} I_{pv} + \frac{(e_d i_d + e_q i_q)^2}{C^2 V_{dc}^3} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{e_d}{LCV_{dc}} & -\frac{e_q}{LCV_{dc}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

$$\det[\mathbf{B}(x)] = \frac{e_d}{L^2 CV_{dc}} \neq 0 \quad (11)$$

式中, 由于电压分量 e_d 总是不等于零, 因此上述线性化总能满足。

构建系统(7)的储能函数, 如式(12)。

$$H(i_q, V_{dc}, I_{dc}) = \underbrace{\frac{1}{2}(i_q - i_q^*)^2}_{\text{交流串联电阻发热}} + \underbrace{\frac{1}{2}(V_{dc} - V_{dc}^*)^2}_{\text{直流并联电阻发热}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{I_{dc}}{C} - \dot{V}_{dc}^* \right)^2}_{\text{直流串联电阻发热}} \quad (12)$$

式中, 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。

在此, 储能函数第一项 $\frac{1}{2}(i_q - i_q^*)^2$ 代表功率因数的

调节, 储能函数后两项 $\frac{1}{2}(V_{dc} - V_{dc}^*)^2$ 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。根据式(6)直流侧动态特性, 直流侧电压 V_{dc} 和直流侧电流 I_{dc} 的变化可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

$$\begin{aligned} \dot{H}(i_q, V_{dc}, I_{dc}) = & \left(-\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} + \frac{1}{L} u_2 - \dot{i}_q^* \right) (i_q - i_q^*) + \\ & \left(V_{dc} - V_{dc}^* + \frac{I_{pv}}{C} - \frac{e_d}{LCV_{dc}} u_1 - \frac{e_q}{LCV_{dc}} u_2 + \dot{V}_{dc}^* - \right. \\ & \left. e_d \left(-\frac{R}{L} i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L} \right) + e_q \left(-\frac{R}{L} i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L} \right) \right) \\ & \frac{(i_q - i_q^*)}{CV_{dc}} + \frac{e_d i_d + e_q i_q}{C^2 V_{dc}^2} I_{pv} + \frac{(e_d i_d + e_q i_q)^2}{C^2 V_{dc}^3} \left(\frac{I_{dc}}{C} - \dot{V}_{dc}^* \right) \end{aligned} \quad (13)$$

针对式(7)系统, 设计 PFSSMC 为

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{LCV_{dc}}{e_d} \left[\ddot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc} + V_{dc}^* + \frac{e_q}{LCV_{dc}} u_2 - \frac{\dot{I}_{pv}}{C} + \right. \\ \left. \frac{e_d(-\frac{R}{L}i_d - \omega i_q - \frac{e_d}{L}) + e_q(-\frac{R}{L}i_q + \omega i_d - \frac{e_q}{L})}{CV_{dc}} + \right. \\ \left. \frac{e_d i_d + e_q i_q}{CV_{dc}^2} \dot{V}_{dc}^* + v_1 \right] \\ u_2 = Li_q^* - \omega Li_d + Ri_q^* + e_q + v_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中, v_1 和 v_2 为附加控制输入。将式(14)PFSSMC 以及式(6)直流侧动态代入式(13)储能函数一阶导数, 可得

$$\dot{H}(i_q, V_{dc}, I_{dc}) = \underbrace{-\frac{1}{CR_{dc}}(\dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc}^*)^2 - \frac{R}{L}(i_q - i_q^*)^2}_{\text{有利项保留}} + \underbrace{(\dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc}^*)v_1 + \frac{i_q - i_q^*}{L}v_2}_{\text{额外输入}} \quad (15)$$

式中, $R_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{e_d i_d + e_q i_q}$ 可视为一个与直流侧电容并

联的虚拟电阻。

对于式(7)跟踪误差, 设计分数阶比例-微分 PD^α 滑动模态平面为

$$\begin{bmatrix} S_{FO1} \\ S_{FO2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{\alpha_1}(i_q - i_q^*) + \lambda_{c1}(i_q - i_q^*) \\ D^{\alpha_2}(V_{dc} - V_{dc}^*) + \lambda_{c2}(V_{dc} - V_{dc}^*) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: α_1 和 α_2 为分数阶微分阶数; 正常数 λ_{c1} 和 λ_{c2} 分别表示 PD^α 滑动平面增益。

选取额外输入为

$$\begin{cases} v_1 = \underbrace{-\kappa_1(i_q - i_q^*)}_{\text{额外阻尼}} - \underbrace{\zeta_1 S_{FO1} - \phi_1 \text{sat}(S_{FO1}, \epsilon_{c1})}_{\text{鲁棒性增强}} \\ v_2 = \underbrace{-\kappa_2(V_{dc} - V_{dc}^*)}_{\text{额外阻尼}} - \underbrace{\zeta_2 S_{FO2} - \phi_2 \text{sat}(S_{FO2}, \epsilon_{c2})}_{\text{鲁棒性增强}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, 正常数 ζ_1, ζ_2, ϕ_1 以及 ϕ_2 代表分数阶比例-微分 PD^α 滑动模态平面增益, 其值的选取使得式(7)跟踪误差得以收敛。采用饱和函数 $\text{sat}(\cdot)^{[23]}$ 来代替滑动模态控制中常用的符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$, 从而减少其不连续性所带来的抖振现象, 其中参数 ϵ_{c1} 和 ϵ_{c2} 代表控制器层宽系数。另外, 正常数 κ_1 与 κ_2 可为闭环系统注入额外阻尼, 从而提升被控系统的动态响应特性。

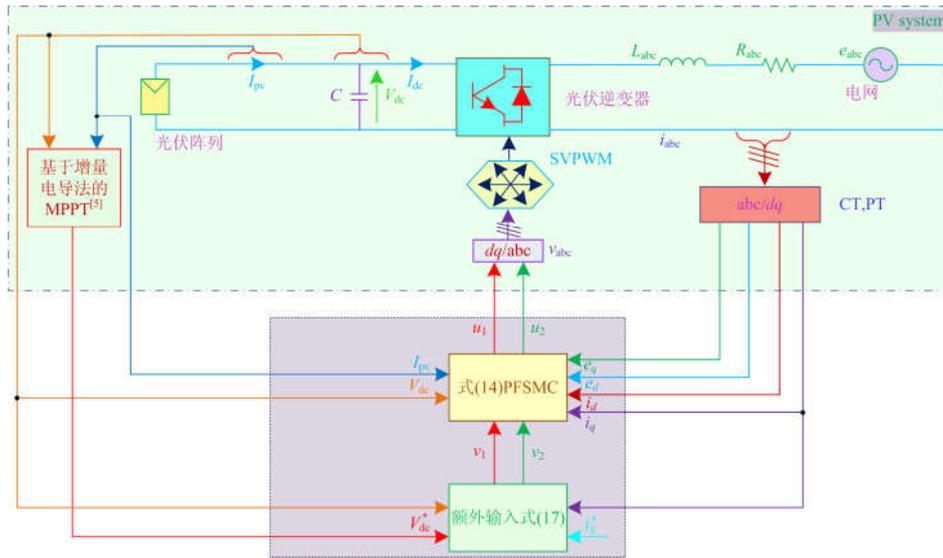


图 2 光伏系统 PFSSMC 整体结构图

Fig. 2 Overall PFSSMC structure of PV system

至此, 对于光伏逆变器系统, 无源分数阶滑动模态控制器 PFSSMC 的整体控制框图如图 2 所示。在此, MPPT 算法采用文献[5]中的增量电导法。

3 仿真算例研究

本章旨在研究使用 PFSSMC 的光伏逆变器在光

照强度变化与电网电压跌落两个算例下的控制性能, 其控制性能分别与 PID 控制^[12]、PBC^[20]和 FSMC^[21]进行对比。另外, 表 1 给出了光伏发电系统的参数^[13]。选取光照强度 1 kW/m^2 和温度 25°C 作为额定值, q 轴电流 $i_q=0$ 。在额定运行条件下, 光伏输出功率 $P=1867 \text{ W}$, 直流侧电压 $V_{dc} =$

539.5 V, 光伏输出电流 $I_{pv} = 3.46$ A。同时, 表 2 给出了 PFSMC 参数。

表 1 光伏发电系统参数

Table 1 PV system parameters

名称	参数	名称	参数
峰值功率	60 W	二极管理想因子 A	1.5
峰值功率下电压	17.1 V	串联电阻	0.21 Ω
峰值功率下电流	3.5 A	电网电压有效值	120 V
短路电流 I_{sc}	3.8 A	频率 f	50 Hz
开路电压 V_{oc}	21.1 V	等效电感 L	2 mH
I_{sc} 的温度系数 k_1	3 mA/ $^{\circ}$ C	等效电阻 R	0.1 Ω
额定工作温度 T_{ref}	49 $^{\circ}$ C	直流侧电容 C	2 200 μ F

表 2 PFSMC 参数

Table 2 PFSMC parameters

q 轴电流		直流侧电压	
参数	数值	参数	数值
κ_1	15	κ_2	25
α_1	1.25	α_2	1.75
ζ_1	20	ζ_2	30
λ_{c1}	25	λ_{c2}	40
φ_1	35	φ_2	40
ε_{c1}	0.15	ε_{c2}	0.15

3.1 光照强度变化(Solar irradiation variation)

为了研究光照强度变化对光伏发电系统输出的影响, 在 $t=0.2$ s 时光照强度从 1 kW/m^2 下降到 0.5 kW/m^2 , 在 $t=0.7$ s 时, 光照强度增加到 0.8 kW/m^2 , 在 $t=1.2$ s 时恢复到 1 kW/m^2 。在光照强度变化期间, 温度保持在其额定值(25°C)。同时, 在 $t=0.2$ s 时 q 轴电流 i_q 增加到 50 A, 在 $t=1.2$ s 时减小到 -30 A。光伏系统响应如图 3 所示, 可见 PID 控制会产生显著的直流电压振荡与超调量, 这主要是由于光伏逆变器非线性部分的存在所导致的; 相比之下, PBC 和 FSMC 对光伏逆变器的非线性进行了全局补偿, 因此其响应特性无超调量产生。最后, PFSMC 则兼具 PBC 与 FSMC 的优点, 其具有最快的收敛速度。

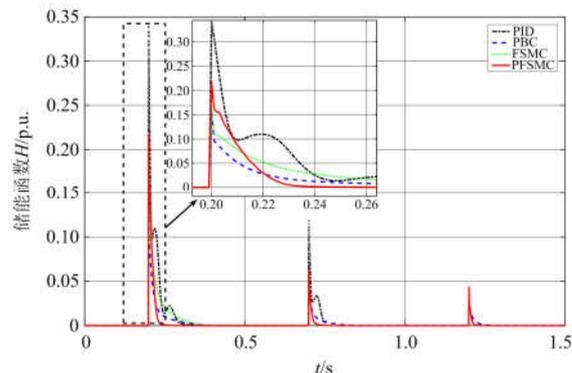
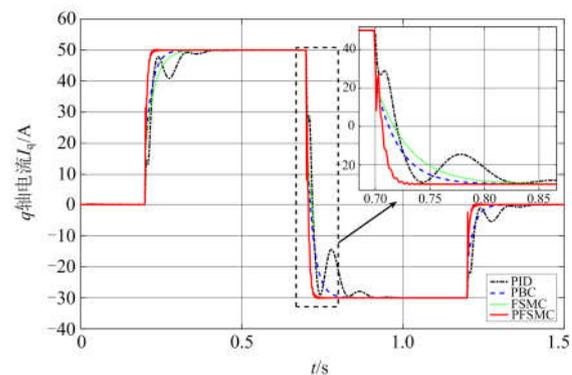
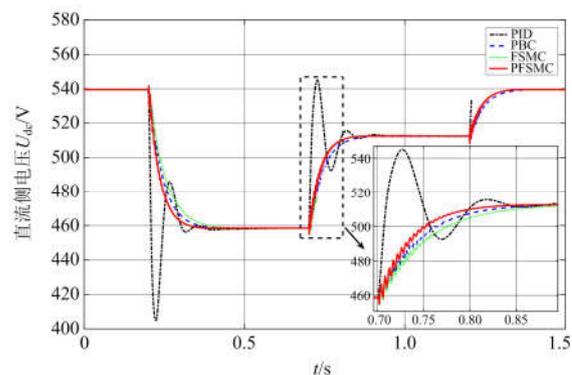
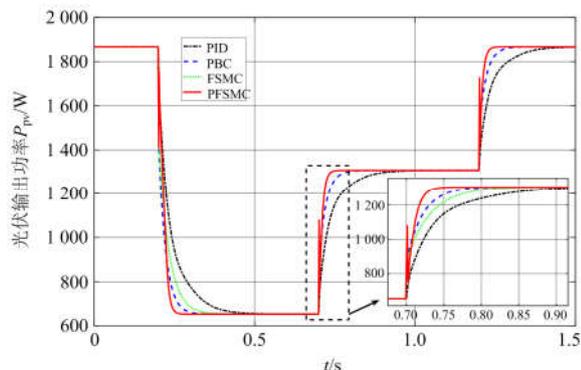


图 3 光照强度变化下光伏发电系统响应

Fig. 3 PV system responses obtained under solar irradiation variation

3.2 电网电压跌落(Power grid voltage drop)

为测试 PFSMC 在电网发生故障后的恢复系统能力, 在 $t=0.2 \sim 0.35$ s 期间电网电压跌落至 0.4 p.u.。光伏发电系统的响应如图 4 所示。可以发现, PFSMC 具有最快速率恢复故障所引发的有功功率、直流侧电压和 q 轴电流振荡的能力。同时, 在其控制下故障导致的振荡幅度亦为最小, 其可有效抑制电网故障对并网光伏发电系统的不良影响。另外, 储能函数收敛的越快表示收敛速度越快; 储能函数的峰值越低则表示跟踪误差幅值越小; 从储能函数的变化上可看出 PFSMC 具有最佳的控制性能。

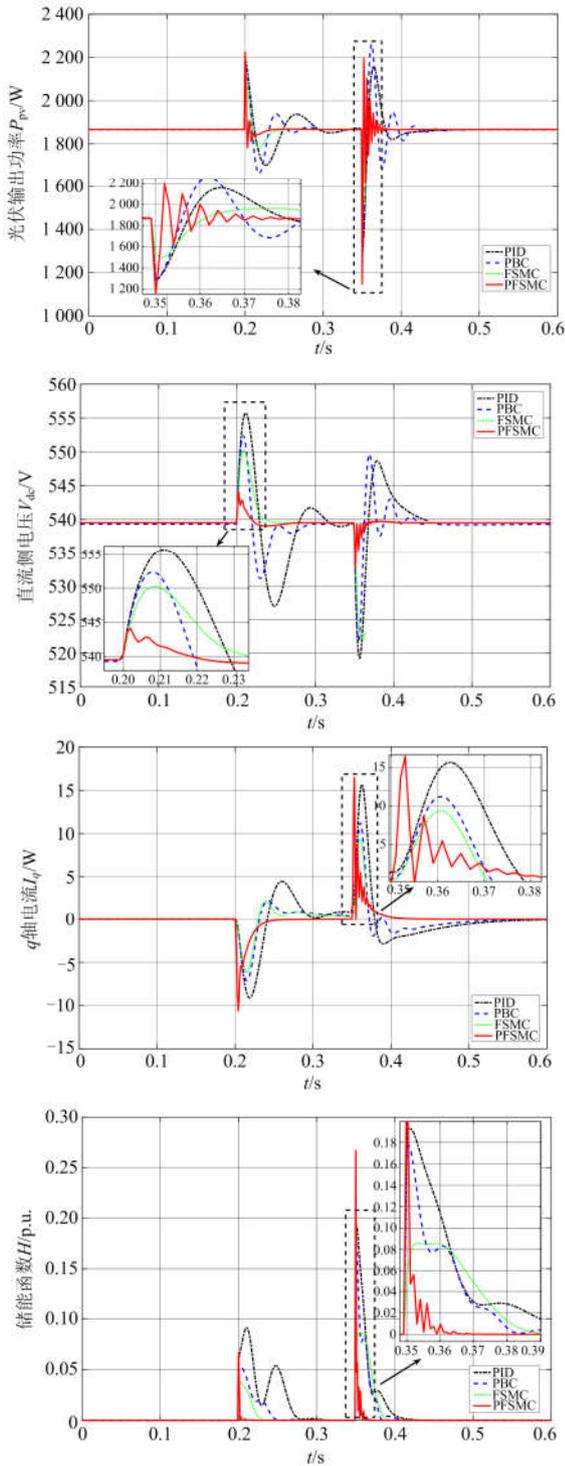


图4 电网电压跌落变化下光伏发电系统响应
Fig. 4 PV system responses obtained under power grid voltage drop

3.3 鲁棒性测试

为测试PFSCM对系统参数不确定性的鲁棒性,对电网等效电阻 R 和电网等效电感 L 在其额定值附

近 $\pm 20\%$ 范围内变化进行研究。选取电网电压跌落持续 100 ms 下有功功率 $|P|$ 的峰值进行对比。由图 5 可知, PID 控制、PBC、FSMC 和 PFSCM 的有功功率 $|P|$ 的峰值分别是 10.38%, 17.54%, 5.11% 和 4.87%。因此, PFSCM 具有对系统参数不确定性的最高鲁棒性。

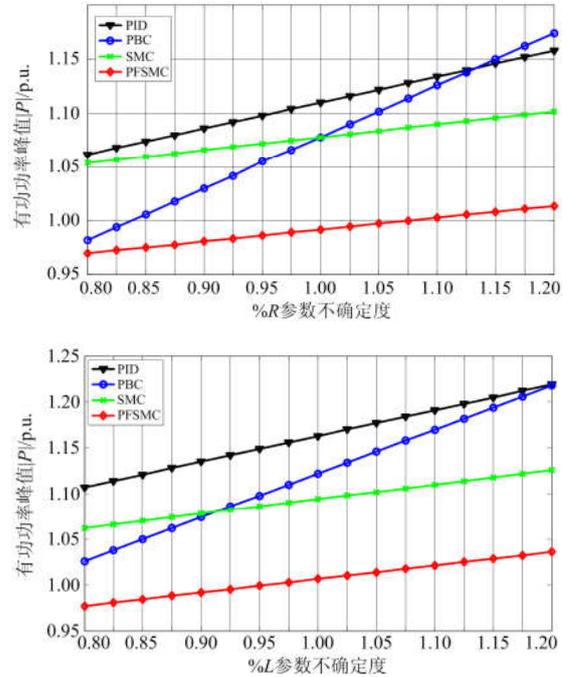


图5 电网等效电阻 R 和电感 L 在额定 $\pm 20\%$ 范围内变化时,电网电压跌落持续 100 ms 下有功功率 $|P|$ 峰值对比图
Fig. 5 Peak value of active power $|P|$ obtained at power grid voltage drop with $\pm 20\%$ variation of the equivalent resistance R and inductance L of different controllers

3.4 定量分析

表 3 罗列了两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^* 为 q 轴电流参考值; $IAE_{V_{dc}} = \int_0^T |V_{dc} - V_{dc}^*| dt$, V_{dc}^* 为直流侧电压参考值。由表 3 可得, PFSCM 在两种算例下均具有最低的 IAE 指标。特别地, 其在电压跌落下的 $IAE_{V_{dc}}$ 分别是 PID 控制的 82.56%, PBC 的 90.54% 和 FSMC 的 90.11%。

最后, 图 6 比较了两种算例下 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 6 可知, PFSCM 在两种算例下均仅需最低的总控制成本。这主要是由于保留了对系统有利的项以及采用 FSMC 的控制框架。特别地, 在电网电压跌落下,

其总控制成本分别仅为 PID 控制的 89.49%, PBC 的 96.12%和 FSMC 的 94.61%。

表 3 三种算例下 4 个控制器的 IAE 指标

Table 3 IAE indices of four controllers obtained in two cases

工况	IAE 指标	PID	PBC	SMC	PFSMC
光照强度	IAE_{I_q}	0.185 2	0.163 6	0.167 1	0.138 5
变化	$IAE_{V_{dc}}$	0.449 8	0.437 8	0.440 3	0.386 7
电网电压	IAE_{I_q}	0.223 3	0.205 5	0.209 2	0.161 3
跌落	$IAE_{V_{dc}}$	0.560 4	0.529 2	0.532 5	0.473 7

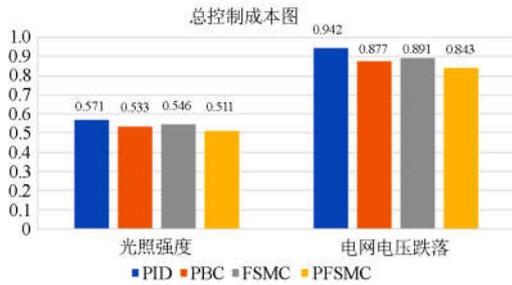


图 6 两种算例下 4 个控制器的总控制成本

Fig. 6 Overall control costs required by four controllers obtained under two cases

4 硬件在环实验

本章基于 dSpace 进行 HIL 实验, 其结构和实验平台分别由图 7 和图 8 所示。在此, 无源分数阶滑模动态控制器 PFSMC 放置于 DS1104 平台上, 其采样频率 $f_c=1$ kHz, 光伏发电系统则放置于 DS1006 平台, 其采样频率 $f_s=50$ kHz。DS1006 平台通过对光伏发电系统的实时仿真得到 q 轴电流 i_q 和直流端电压 V_{dc} , 随即传输到 DS1104 平台上的 PFSMC, 以实现控制输入的实时运算。

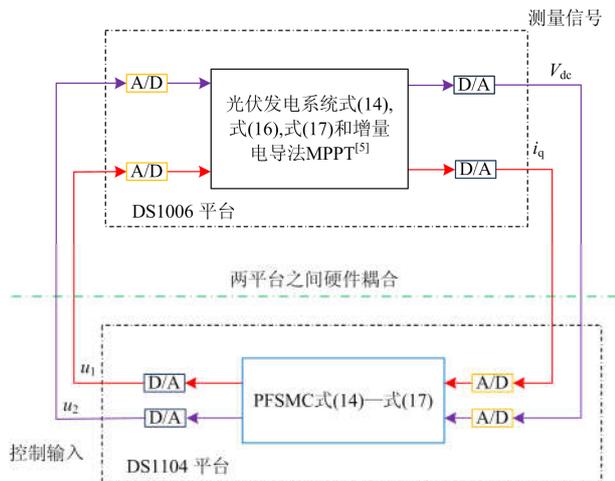


图 7 HIL 实验结构示意图

Fig. 7 Schematic configuration of HIL experiment

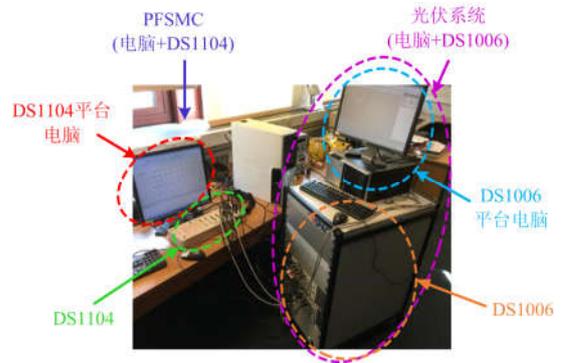


图 8 HIL 实验硬件平台

Fig. 8 Hardware platform of HIL experiment

4.1 光照强度变化

如图 9 所示, 在光照强度变化下, HIL 实验结果和仿真结果非常接近。

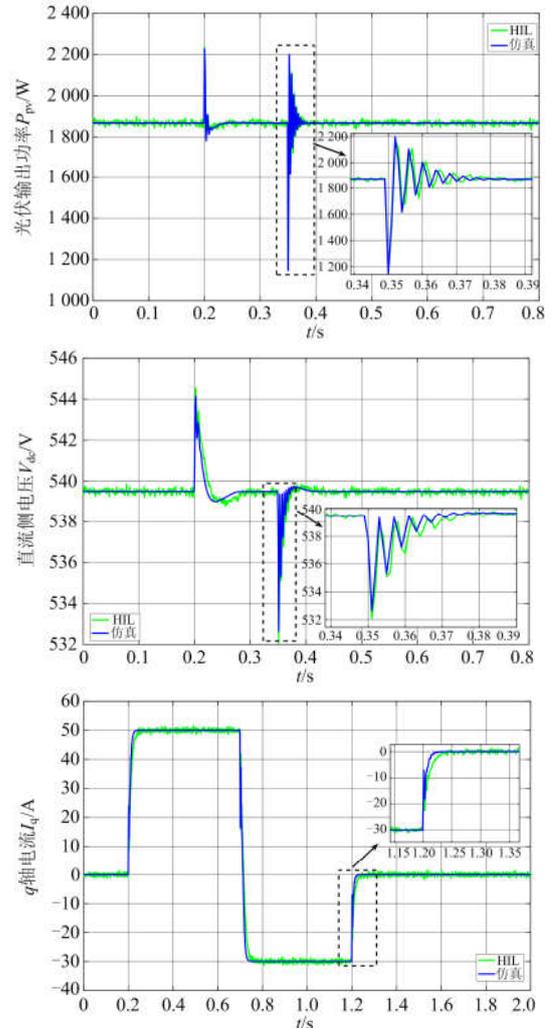


图 9 光照强度变化下仿真和 HIL 实验结果对比图

Fig. 9 Simulation and HIL experiment results obtained under solar irradiation variation

4.2 电网电压跌落

电网电压跌落时的系统响应图如图 10 所示。由图 10 可见 HIL 实验结果和仿真结果十分相似。

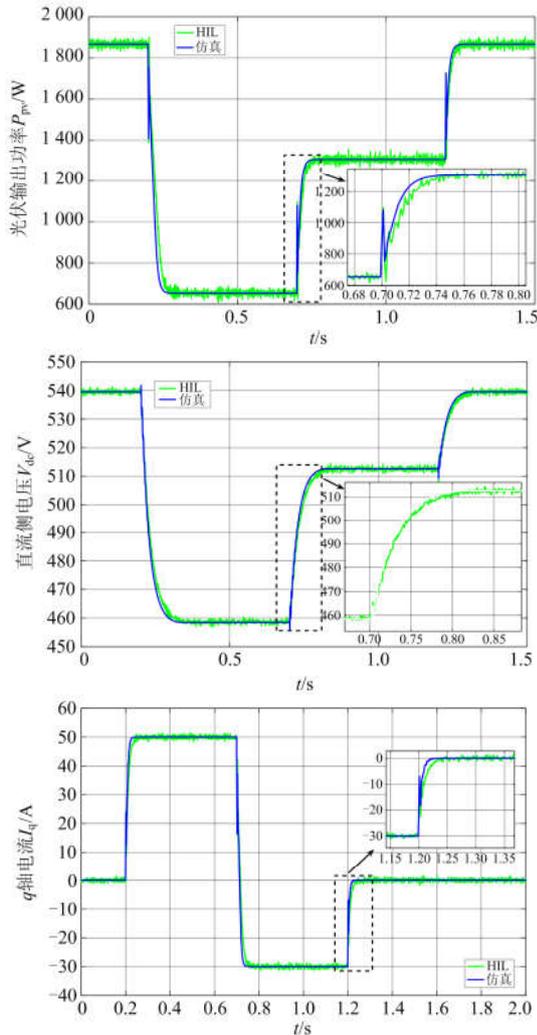


图 10 电网电压跌落下仿真和 HIL 实验结果图

Fig. 10 Simulation and HIL experiment results obtained under power grid voltage drop

仿真结果与 HIL 实验结果之间的差异主要是由以下 3 个原因导致：(1) HIL 实验中存在外部环境干扰，而仿真为理想状态，从而导致 HIL 实验结果的持续振荡；(2) 与仿真中使用的连续控制相比，HIL 实验中的离散控制可能引入额外的控制误差；(3) 实时控制器存在时延。

5 结论

本文设计了一款 PFSMC 策略来实现光伏逆变器的 MPPT，其主要结论与创新点可总结如下：

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了深入的分析，

同时保留了系统阻尼有利项从而提高光伏逆变器的动态响应性能。

2) 引入 FSMC 作为额外输入从而大幅提高在光伏逆变器建模不确定性下的鲁棒性。同时，采用分数阶比例-微分 PD^α 滑动模式平面以进一步提高闭环系统的动态响应特性。

3) 仿真结果表明，相较于 PID 控制、PBC 以及 FSMC，PFSMC 在光照强度变化以及电网电压跌落下均具有最快的误差收敛速度，最小的跟踪误差以及最低的控制成本。

4) 基于 dSpace 的 HIL 实验验证了 PFSMC 的硬件实现可行性。

为进一步增强所提控制策略的环境适应性，未来的研究方向可引入扩展状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 对系统的各类不确定性聚为一个扰动后进行实时在线观测，随后控制器将对其进行完全补偿，即开发自适应无源分数阶滑模控制。

参考文献

[1] 吴峰, 李玮. 含高渗透率分布式光伏发电系统的配电网动态等值分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 65-70.

WU Feng, LI Wei. Dynamic equivalence analysis of distribution network integrated with high-penetration distributed photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 65-70.

[2] 黄伟, 高怡芳, 张勇军, 等. 计及不确定性的分布式光伏接入配电网极限容量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 9-16.

HUANG Wei, GAO Yifang, ZHANG Yongjun, et al. Evaluation of ultimate capacity for distributed photovoltaic access distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 9-16.

[3] 谢国辉, 李娜娜, 汪晓露, 等. 全球大型光伏电站基地开发潜力分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 1-5.

XIE Guohui, LI Nana, WANG Xiaolu, et al. Study on development potential of global large scale PV power base[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 1-5.

[4] 王云平, 李颖, 阮新波. 基于局部阴影下光伏阵列电流特性的最大功率点跟踪算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 201-210.

WANG Yunping, LI Ying, RUAN Xinbo. Maximum power point tracking algorithm for photovoltaic array under partial shading based on current property[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 201-210.

[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] 赵羽, AUGUSTIN M. 太阳能电池最大功率跟踪控制的研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2010, 23(4): 595-598.
ZHAO Yu, AUGUSTIN M. Maximum power point tracking control for photovoltaic panels[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2010, 23(4): 595-598.
- [7] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [8] 钟庆, 石泉, 王钢, 等. 基于扰动式 MPPT 控制的光伏并网系统间谐波分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6533-6542.
ZHONG Qing, SHI Quan, WANG Gang, et al. Interharmonic analysis model of photovoltaic grid-connected system based on perturbed MPPT control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6533-6542.
- [9] REZK H, FATHY A, ABDELAZIZ A Y. A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 377-386.
- [10] 盛四清, 陈玉良, 张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 23-29.
SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Research on maximum power point tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 23-29.
- [11] CAMACHO E F, RUBIO A F R, BERENGUEL M, et al. A survey on control schemes for distributed solar collector fields part I: modeling and basic control approaches[J]. Solar Energy, 2007(81): 1240-1251.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ORTEGA R, SCHAFT A, MAREELS I, et al. Putting energy back in control[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(2): 18-33.
- [18] ORTEGA R, SCHAFT 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.
- [19] 郑成才, 王久和, 慕小斌, 等. 基于 PCHD 模型的 APF 自适应模糊无源控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 8-15.
ZHENG Chengcai, WANG Jiuhe, MU Xiaobin, et al. Self-adaption fuzzy-passivity based hybrid control strategy of active power filter based on port controlled Hamiltonian with dissipation model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 8-15.
- [20] BAO X, WANG J, XIANG H, et al. The maximum power point tracking technology of passivity-based photovoltaic grid-connected system[C] // IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference-ECCE Asia, June 2-5, 2012, Harbin, China: 1372-1376.
- [21] ZHANG B, PI Y, LUO Y. Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor[J]. ISA Transactions, 2012, 51: 649-656.
- [22] 丁恒春, 杨晓波, 钱吉红, 等. 基于 dSPACE 的光伏并网系统实时仿真[J]. 智慧电力, 2015, 43(12): 21-26.
DING Hengchun, YANG Xiaobo, QIAN Jihong, et al. Real-time simulation of photovoltaic grid-connected system based on dSPACE[J]. Smart Power, 2015, 43(12): 21-26.
- [23] 杨晓峰, 李泽杰, 郑琼林. 基于虚拟阻抗滑模控制的 MMC 环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6893-6904.
YANG Xiaofeng, LI Zejie, ZHENG Qionglin. A novel MMC circulating current suppressing strategy based on virtual impedance sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6893-6904.

收稿日期: 2019-01-26; 修回日期: 2019-04-16

作者简介:

张鑫(1986—), 男, 工程师, 主要从事电网调度运行及管理工作; E-mail: gk_650@163.com

赖伟坚(1988—), 男, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行; E-mail: weijian.l@qq.com

林泽宏(1989—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电网调度运行。E-mail: linzehong20@126.com

(编辑 周金梅)