

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190407

# 双馈感应电机最大功率跟踪鲁棒滑模控制设计

张维奇<sup>1</sup>, 李富盛<sup>2</sup>, 余涛<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 变速恒频风力发电技术已广泛用于实际风机中, 其中一个经典问题即最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。针对双馈感应电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)设计了一款基于扰动观测器的滑模控制(Perturbation Observer Based Sliding-Mode Control, POSMC)来实现 MPPT。所提控制器将扰动观测器和滑模控制(Sliding-Mode Control, SMC)相结合, 从而大幅提高了 DFIG 的鲁棒性。首先, 应用扰动观测器对系统扰动(发电机非线性、参数不确定和随机风速)进行在线估计。随后, 通过 SMC 对该扰动估计进行实时完全补偿, 从而实现不同工况下的控制全局一致性以及各类不确定环境下的鲁棒控制。最后, POSMC 无需精确的 DFIG 系统模型, 仅需测量转子角速度和定子无功功率, 易于实现。进行了三个算例研究, 即阶跃风速、随机风速和发电机参数不确定性。仿真结果表明, 与矢量控制(Vector Control, VC)、反馈线性控制(Feedback Linearization Control, FLC)和 SMC 相比, POSMC 在各类工况下均可捕获最大的风能并具有最强的鲁棒性。

**关键词:** 双馈感应电机; 扰动观测器; 滑模控制; 最大功率跟踪

## Optimal wind power extraction of doubly-fed induction generator via perturbation observer based sliding-mode controller

ZHANG Weiqi<sup>1</sup>, LI Fusheng<sup>2</sup>, YU Tao<sup>2</sup>

(1. Power Dispatch Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Variable-speed constant-frequency wind power generation technology has been widely used in actual wind turbines. A typical issue is the Maximum Power Point Tracking (MPPT). This paper designs a Perturbation Observer Based Sliding Mode Control (POSMC) scheme for MPPT of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). It combines the perturbation observer and Sliding-Mode Control (SMC) to significantly enhance the robustness. Firstly, the perturbation observer estimates the perturbation (generator nonlinearities, parameter uncertainties, and random wind speed) online. Then, the perturbation estimation is compensated in the real-time by SMC, such that a global control consistency and improved robustness can be achieved under different operation conditions. Finally, POSMC does not require an accurate DFIG model while only the rotor angular velocity and stator reactive power needs to be measured, thus it is easy to implement. Three case studies are undertaken, namely, step wind speed, random wind speed and uncertain generator parameters. Simulation results show that, compared with Vector Control (VC), Feedback Linearization Control (FLC) and SMC, POSMC can capture the maximum wind power under various operation conditions and can provide the strongest robustness.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Ltd. (No. GDKJXM20180576).

**Key words:** doubly-fed induction generator; perturbation observer; sliding-mode control; maximum power point tracking

## 0 引言

能源与环境是当今人类生存和发展所要解决的

紧迫问题, 因此, 可再生能源的开发和利用越来越受到重视和关注。其中, 风能具有分布广、储量大、利用方便、无污染等优点<sup>[1-2]</sup>, 近年来得到了国内外的广泛关注与应用。

变速恒频风力发电技术已成为目前风力发电的

基金项目: 中国南网电网科技项目资助(GDKJXM20180576)

主流<sup>[3]</sup>, 其中双馈感应电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)已成为大型风电场的主力机型<sup>[4]</sup>。在低于额定风速的情况下, 根据风速变化调节风机转速使其运行于最优功率点, 从而捕获最大风能, 即最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)<sup>[5-6]</sup>, 是目前风力发电的一个经典控制问题。

一般地, 传统 MPPT 策略主要是采用基于比例-积分(Proportional Integral, PI)环的矢量控制(Vector Control, VC)<sup>[7]</sup>来实现。其具有结构简单、可靠性高等优点, 从而在风电控制领域得到广泛应用。然而, PI 控制参数是基于对原非线性系统在某一点线性化后得到的, 当系统运行点发生改变时, 其控制性能也会随之降低。在某些极端条件下甚至会导致被控系统失稳的严重问题。

为解决上述线性控制策略的缺陷, 近年来涌现出了大量非线性控制器的研究。其中, 反馈线性化控制(Feedback Linearization Control, FLC)<sup>[8]</sup>已成功应用到 DFIG 控制中, 该算法可完全补偿系统的非线性从而获得不同运行点下的控制全局一致性。文献[9]设计了基于 DFIG 的二阶滑模控制(Sliding-Mode Control, SMC), 用于提高系统的故障穿越能力。文献[10]设计了一款基于连续时间模型预测控制的 DFIG 直接功率控制器。文献[11]设计了一种可提高被控系统鲁棒性的 DFIG 分数阶滑动模态控制策略。另外, 文献[12]设计了鲁棒状态反馈控制来提高双馈电机的鲁棒性。文献[13]为增强含有 DFIG 的电力系统稳定性, 设计了近似动态规划策略。文献[14]提出了基于观测器的反推控制来提高 DFIG 的 MPPT 能力。文献[15]设计了一种带有最大功率跟踪(MPPT)的微控制器, 从而提高了光伏面板的工作效率。文献[16]采用基于集合经验模态分解(EEMD)方法实现不同时间尺度的风电功率分解。文献[17]提出一种全局学习自适应细菌觅食算法与直接控制法实现 MPPT 控制, 提高了算法的求解精度和收敛速度。然而, 上述控制器结构复杂, 需测量较多系统参数与状态, 其实现较为困难。本文提出了一种基于扰动观测器的滑模控制(Perturbation Observer Based Slid-Ing-Mode Control, POSMC)来实现 DFIG 的 MPPT。首先, 将 DFIG 的非线性、发电机参数不确定性和各类不确定性聚合为一个扰动。

然后, 由滑动模态扰动观测器(Sliding-Mode Perturbation Observer, SMPO)对该扰动进行实时估计<sup>[18]</sup>。最后, 结合 SMC 对该扰动估计进行完全补偿。该方法结合了扰动观测器和 SMC 的优点, 相比之下, 其他非线性方法需要精确的系统模型或者仅能处理某些特定的不确定性。特别地, 由于采用

了扰动估计值来取代扰动上限值, POSMC 可以避免常规 SMC 过于保守的缺陷。另外, POSMC 只需测量转子角速度和定子无功功率, 因此, 其较易硬件实现。

最后, 本文进行了三个算例研究来评价所提方法的有效性, 并将其控制性能与 VC、FLC 和 SMC 进行了对比。仿真结果验证了 POSMC 的有效性和优势。

## 1 双馈感应电机建模

DFIG 的结构示意图如图 1 所示, 风轮机从风能中获取的机械功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v_{\text{wind}}^2 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮机半径;  $v_{\text{wind}}$  为风速;  $C_p(\lambda, \beta)$  为风能利用系数, 该系数为一个关于叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的函数, 其中  $\lambda$  的定义如式(2)<sup>[14]</sup>。

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_{\text{wind}}} \quad (2)$$

功率系数  $C_p(\lambda, \beta)$  可由下式描述:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

式中:  $c_1 = 0.22$ 、 $c_2 = 116$ 、 $c_3 = 0.4$ 、 $c_4 = 5$ 、 $c_5 = 12.5$ <sup>[19]</sup>。

发电机的动态方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{\omega_b}{L'_s} \left( -R_1 i_{qs} + \omega_s L'_s i'_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{qs} - \frac{1}{T_l \omega_s} e'_{ds} - v_{qs} + \frac{L_m}{L_{tr}} v_{qt} \right) \\ \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{\omega_b}{L'_s} \left( -R_1 i_{ds} - \omega_s L'_s i'_{ds} + \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{ds} + \frac{1}{T_l \omega_s} e'_{qs} - v_{ds} + \frac{L_m}{L_{tr}} v_{dt} \right) \\ \frac{de'_{qs}}{dt} = \omega_s \omega_b \left( R_1 i_{ds} - \frac{1}{T_l \omega_s} e'_{qs} + \left( 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) e'_{ds} - \frac{L_m}{L_{tr}} v_{dt} \right) \\ \frac{de'_{ds}}{dt} = \omega_s \omega_b \left( -R_2 i_{qs} - \frac{1}{T_l \omega_s} e'_{ds} - \left( 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) e'_{qs} + \frac{L_m}{L_{tr}} v_{dt} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega_b$  是机械转速;  $\omega_s$  是同步角速度;  $e'_{ds}$  和  $e'_{qs}$  分别是  $dq$  轴内部电压;  $i_{ds}$  和  $i_{qs}$  分别是  $dq$  轴定子电流;  $v_{ds}$  和  $v_{qs}$  分别是  $dq$  轴定子外部电压;  $v_{dt}$  和  $v_{qt}$  分别是  $dq$  轴转子电压。

有功功率  $P_e$  计算如下:

$$P_e = e'_{qs} i_{qs} + e'_{ds} i_{ds} \quad (6)$$

无功功率  $Q_s$  计算如下:

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} = v_{qs} i_{ds} \quad (7)$$

转轴系统采用等价惯性常数为  $H_m$  的集中惯量系统进行简单描述, 从而原始二阶转轴动态系统可简化为一阶转轴动态系统, 即

$$H_m = H_t + H_g \quad (8)$$

式中,  $H_t$  和  $H_g$  分别为风轮机和发电机的惯性常数。

机电动态方程可由式(9)求得<sup>[20]</sup>。

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H_m} (T_m - T_e - D\omega_m) \quad (9)$$

式中,  $\omega_m$  为聚合系统的旋转角速度, 与发电机的转子角速度  $\omega_r$  相等。因此, 后文均采用转子角速度  $\omega_r$  来表示该速度。  $D$  表示集中惯量系统的综合阻尼,  $T_m$  为机械转矩, 并满足  $T_m = P_m / \omega_m$ 。

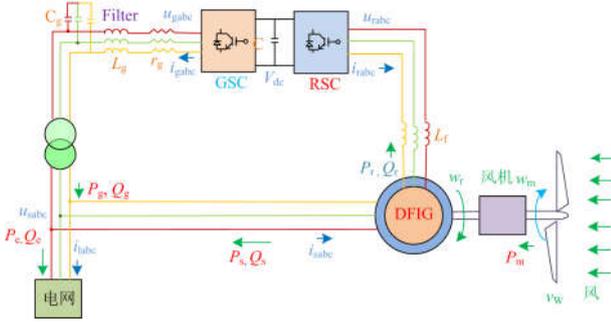


图 1 DFIG 系统示意图

Fig. 1 Configuration of DFIG systems

## 2 基于 POSMC 的 DFIG 最大功率跟踪设计

选取转子角速度和定子无功功率的控制误差  $e = [e_1 \ e_2]^T$  为控制输出, 可得

$$\begin{cases} e_1 = \omega_r - \omega_r^* \\ e_2 = Q_s - Q_s^* \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\omega_r^* = \lambda_{opt} v_{wind} / R$  和  $Q_s^*$  分别为转子角速度和无功功率的参考值。

对上式求导直至控制输入  $v_{dr}$  和  $v_{qr}$  显性出现, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 - \dot{\omega}_r^* \\ f_2 - \dot{Q}_s^* \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$f_1 = \frac{\dot{T}_m}{2H_m} - \frac{1}{2H_m} \left\{ \left( 1 - \frac{1}{\omega_s} \right) (e'_{ds} i_{ds} - e'_{qs} i_{ds}) - \frac{1}{\omega_s T_r} (e'_{qs} i_{qs} + e'_{ds} i_{ds}) + \frac{1}{\omega_s L'_s} \left[ \frac{\omega_r}{\omega_s} (e'_{ds} + e'_{qs}) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \omega_s (e'_{ds} i_{ds} - e'_{qs} i_{qs}) - R_r (e'_{qs} i_{qs} + e'_{ds} i_{ds}) - e'_{qs} v_{qs} - e'_{ds} v_{ds} \right\} \right\} \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{1}{L'_s} (\omega_s L'_s i_{qs} + R_r i_{ds} - \frac{1}{\omega_s T_r} e'_{qs} - \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{ds}) v_{qs} + \quad (13)$$

$$\frac{1}{L'_s} (-R_r i_{qs} + \omega_s L'_s i_{ds} + \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{qs} - \frac{1}{\omega_s T_r} e'_{ds} - v_{qs}) v_{ds} \quad (14)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{-2H_m L_{rr}} \left( \frac{e'_{ds}}{\omega_s L'_s} \right) & \frac{L_m}{-2H_m L_{rr}} \left( \frac{e'_{qs}}{\omega_s L'_s} + i_{ds} \right) \\ -\frac{L_m}{L'_s L_{rr}} v_{qs} & \frac{L_m}{L'_s L_{rr}} v_{ds} \end{bmatrix}$$

式中, 矩阵  $\mathbf{B}$  为控制增益矩阵, 且  $\det(\mathbf{B}) = -\frac{L_m^2 v_{qs}}{2H_m L'_s L_{rr}^2} (\frac{e'_{qs}}{\omega_s L'_s} + i_{ds}) \neq 0$ , 故该矩阵可逆且全局可线性化。

式(12)中机械转矩的一阶导数计算如式(15)。

$$\dot{T}_m = \frac{\partial T_m}{\partial \omega_r} \times \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{\partial T_m}{\partial v_{wind}} \times \frac{dv_{wind}}{dt} \quad (15)$$

其中:

$$\frac{\partial T_m}{\partial \omega_r} = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \{ c_1 e^{-c_5 \left( \frac{v_{wind}}{R\omega_r} - 0.035 \right)} \left[ \frac{c_2 c_5 v_{wind}^2}{R^2 \omega_r^4} - \frac{(2c_2 + 0.035c_2 c_5 + c_4 c_5) v_{wind}}{R\omega_r^3} + \frac{0.035c_2 + c_4}{\omega_r^2} \right] \} \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial v_{wind}} = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^2 \{ c_1 e^{-c_5 \left( \frac{v_{wind}}{R\omega_r} - 0.035 \right)} \left[ \frac{c_2 c_5 v_{wind}^2}{R^2 \omega_r^3} - \frac{(4c_2 + 0.035c_2 c_5 + c_4 c_5) v_{wind}}{R\omega_r^2} + \frac{0.105c_2 + 3c_4}{\omega_r} \right] - \frac{2c_6 R}{v_{wind}} \} \quad (17)$$

定义系统(11)的扰动  $\psi_1(\bullet)$  和  $\psi_2(\bullet)$  为

$$\begin{bmatrix} \psi_1(\cdot) \\ \psi_2(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} + (\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中定常控制增益矩阵  $\mathbf{B}_0$  选取如下:

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

系统(11)可等价于:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1(\cdot) \\ \psi_2(\cdot) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_0 \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\omega}_r^* \\ \dot{Q}_s^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

定义状态  $z_{11} = \omega_r$  以及  $z_{12} = \dot{z}_{11}$ , 采用一个三阶滑模状态-扰动观测器 (Sliding-Mode State and Perturbation Observer, SMSPO) 来估计  $\psi_1(\bullet)$ , 可得

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{11} = \hat{z}_{12} + \alpha_{11}\tilde{\omega}_r + k_{11}\text{sat}(\tilde{\omega}_r, \varepsilon_0) \\ \dot{\hat{z}}_{12} = \hat{\psi}_1(\cdot) + \alpha_{12}\tilde{\omega}_r + k_{12}\text{sat}(\tilde{\omega}_r, \varepsilon_0) + b_{11}v_{dr} \\ \dot{\hat{\psi}}_1(\cdot) = \alpha_{13}\tilde{\omega}_r + k_{13}\text{sat}(\tilde{\omega}_r, \varepsilon_0) \end{cases} \quad (21)$$

式中：观测器增益  $k_{11}$ 、 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ 、 $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{13}$  均为正常数； $\varepsilon_0$  为观测器  $\text{sat}(\cdot)$  函数的层宽度系数。

同理，定义状态  $z_{21} = Q_s$ ，设计一个二阶 SMPO 来估计  $\psi_2(\cdot)$ ，可得

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{21} = \hat{\psi}_2 + \alpha_{21}\tilde{Q}_s + k_{21}\text{sat}(\tilde{Q}_s, \varepsilon_0) + b_{22}v_{qr} \\ \dot{\hat{\psi}}_2 = \alpha_{22}\tilde{Q}_s + k_{22}\text{sat}(\tilde{Q}_s, \varepsilon_0) \end{cases} \quad (22)$$

式中，观测器增益  $k_{21}$ 、 $k_{22}$ 、 $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$  均为正常数。系统(11)的估计滑动平面选取为

$$\begin{cases} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{cases} = \begin{cases} \rho_1(\hat{z}_{11} - \omega_r^*) - \zeta_1\hat{S}_1 - \varphi_1\text{sat}(\hat{S}_1, \varepsilon_c) - \hat{\psi}_1(\cdot) \\ \dot{Q}_s^* - \zeta_2\hat{S}_2 - \varphi_2\text{sat}(\hat{S}_2, \varepsilon_c) - \hat{\psi}_2(\cdot) \end{cases} \quad (23)$$

式中，正常数  $\rho_1$  和  $\rho_2$  代表估计滑动平面增益。

系统(11)的 POSMC 可设计如下：

$$\begin{cases} v_{dr} \\ v_{qr} \end{cases} = \begin{cases} \rho_1(\hat{z}_{12} - \dot{\omega}_r^*) - \zeta_1\hat{S}_1 - \varphi_1\text{sat}(\hat{S}_1, \varepsilon_c) - \hat{\psi}_1(\cdot) \\ \dot{Q}_s^* - \zeta_2\hat{S}_2 - \varphi_2\text{sat}(\hat{S}_2, \varepsilon_c) - \hat{\psi}_2(\cdot) \end{cases} \quad (24)$$

式中，控制增益  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  确保系统(11)收敛。

图 2 给出了 DFIG 的整体 POSMC 框架示意图。由图可见，所提控制策略仅需测量转子角速度  $\omega_r$  与定子无功功率  $Q_s$  两个状态，控制输入经过一个正弦脉冲

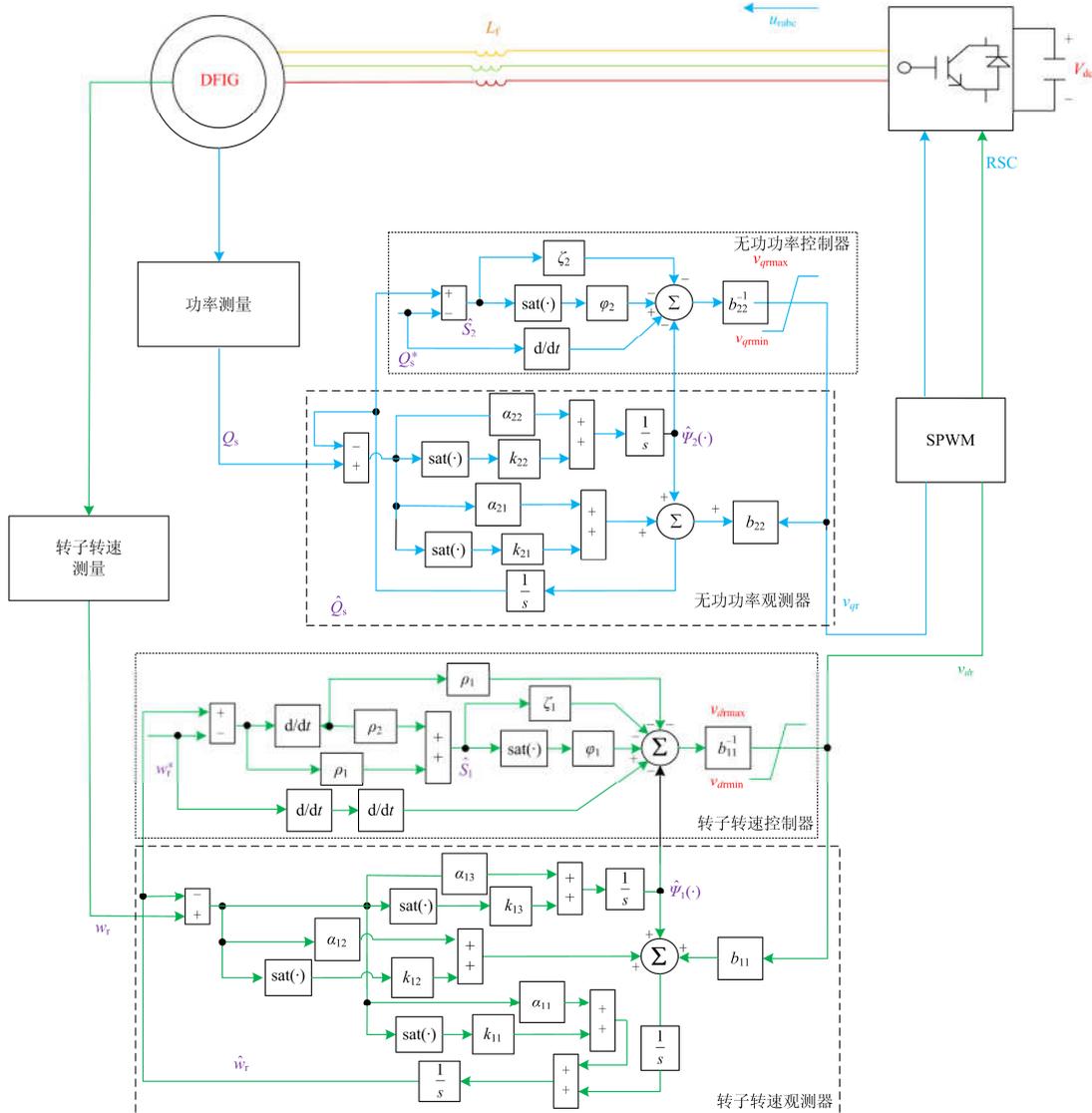


图 2 DFIG 的 POSMC 的整体框图

Fig. 2 Overall POSMC structure of DFIG

宽度调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)模块<sup>[21]</sup>后进入转子侧换流器。最后, 本文采用装设过电流保护装置来抑制转子侧发生过电流<sup>[22]</sup>。

### 3 算例研究

本节将 POSMC 应用于 DFIG 上以实现最大功率跟踪。在阶跃风速、随机风速以及发电机参数不确定三个算例下对其控制性能与 VC<sup>[6]</sup>、F、LC<sup>[7]</sup>和 SMC<sup>[8]</sup>进行对比。其中, DFIG 系统参数与控制器参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 DFIG 系统参数

Table 1 DFIG system parameters

系统参数	$\omega_b=100\pi$ rad/s	$\omega_s=1.0$ p.u.
	$\omega_{r-base}=1.29$	$v_{s-nom}=1.0$ p.u.
DFIG 参数	$P_{rated}=5$ MW	$R_s=0.005$ p.u.
	$R_r=1.1R_s$	$L_m=4.0$ p.u.
	$L_{ss}=1.01L_m$	$L_{tr}=1.005L_{ss}$
	$L'_s=L_{ss}-L_m^2/L_{tr}$	$T_r=L_{tr}/R_r$
	$R_l=R_s+R_r$	$R_2=(L_m/L_n)^2R_l$
风轮机参数	$\rho=1.225$ kg/m <sup>3</sup>	$R=58.89$ m <sup>2</sup>
	$V_{wind-nom}=12$ m/s	$\lambda_{opt}=6.325$
	$H_m=4.4$ s	$D=0$ p.u.

表 2 POSMC 参数

Table 2 POSMC parameters

转子角速度	$b_{11}=-2\ 500$	$\rho_1=750$	$\rho_2=1$	$\zeta_1=50$
控制器	$\varphi_1=40$			
转子角速度	$\alpha_{11}=30$	$\alpha_{12}=300$	$\alpha_{13}=1\ 000$	$k_{11}=20$
观测器	$k_{12}=600$	$k_{13}=6\ 000$	$e_0=0.2$	
定子无功功率	$b_{22}=6\ 000$	$\zeta_2=10$	$\varphi_2=10$	$e_c=0.2$
控制器				
定子无功功率	$\alpha_{21}=40$	$\alpha_{22}=400$	$k_{21}=15$	$k_{22}=600$
观测器				

#### 3.1 阶跃风速

测试风速  $v_{wind}=8\sim 12$  m/s 的四个连续阶跃变化。图 3 显示了阶跃风速下的系统响应图。结果表明, 在有功功率中, VC、FLC、SMC 和 POSMC 在第三次阶跃变化下的收敛时间分别是  $t=3.2$  s、 $t=3.0$  s、 $t=3.8$  s 和  $t=2.8$  s。同时, 在转子角速度误差的第四次阶跃变化下, VC 的收敛时间是  $t=4.3$  s, FLC 收敛时间是  $t=3.2$  s, SMC 收敛时间是  $t=3.6$  s, POSMC 的收敛时间是  $t=2.2$  s, 在所有控制器中, POSMC 收敛时间最小。特别地, 与其他算法相比, POSMC 能够以最小的振荡获取最大风能。

#### 3.2 随机风速

图 4 显示了风速从 8~12 m/s 随机变化的曲线图, 随机风速下不同控制器的系统响应如图 5 所示。由图可知, 相比较而言, POSMC 能够实现转子角速度误差和定子无功功率的最小振荡。另外, 其风

能利用系数最接近最佳值, 因此可以在随机风速变化下最优地提取风能。

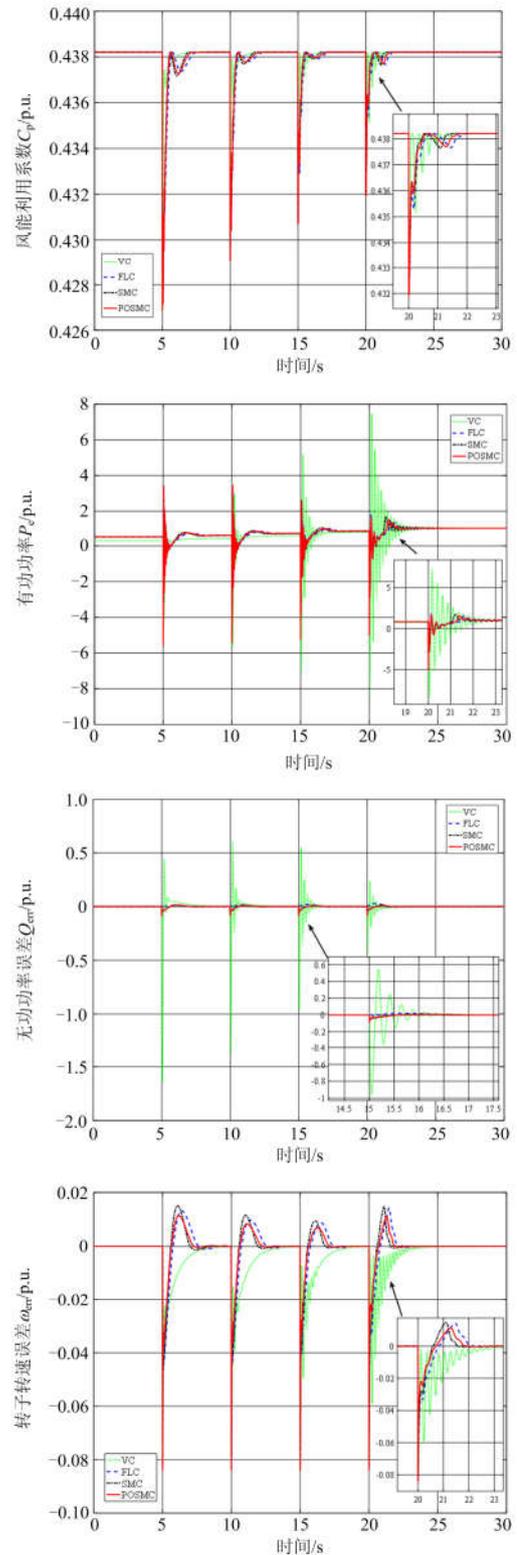


图 3 阶跃风速下的系统响应示意图

Fig. 3 System responses obtained under step changes of wind speed

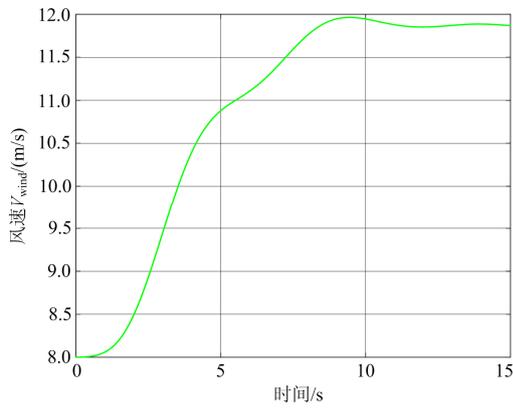


图 4 随机风速变化曲线

Fig. 4 Random wind speed curve

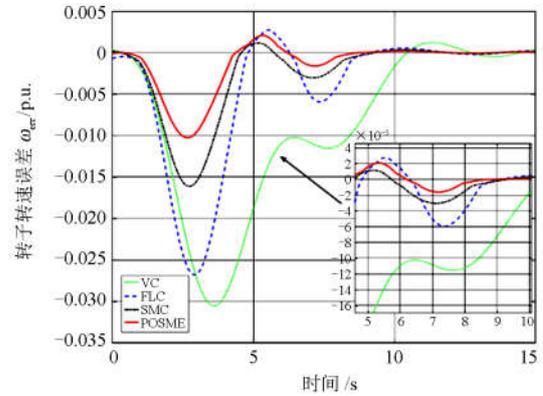
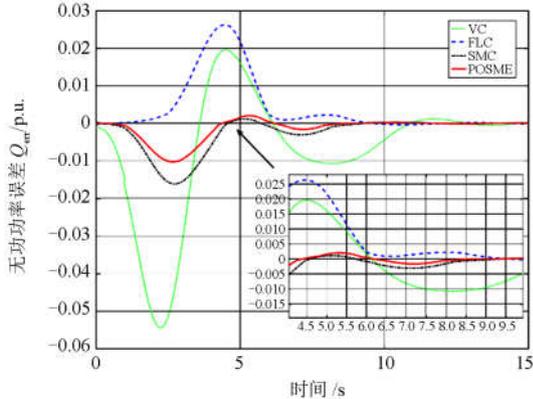
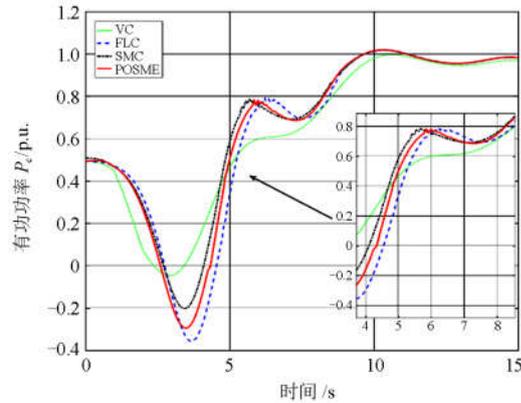
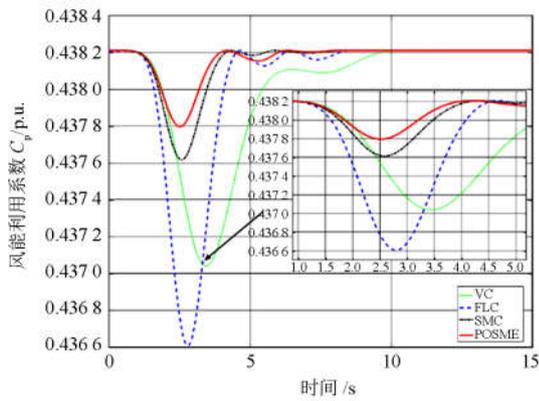


图 5 随机风速下的系统响应示意图

Fig. 5 System responses obtained under a stochastic wind speed



### 3.3 发电机参数不确定

为研究各控制器在发电机参数不确定时系统的鲁棒性,对定子电阻  $R_s$  和互感  $L_m$  在额定值  $\pm 20\%$  的变化范围内的测量误差进行仿真。图 6 显示了有功功率  $|P_e|$  峰值对比。

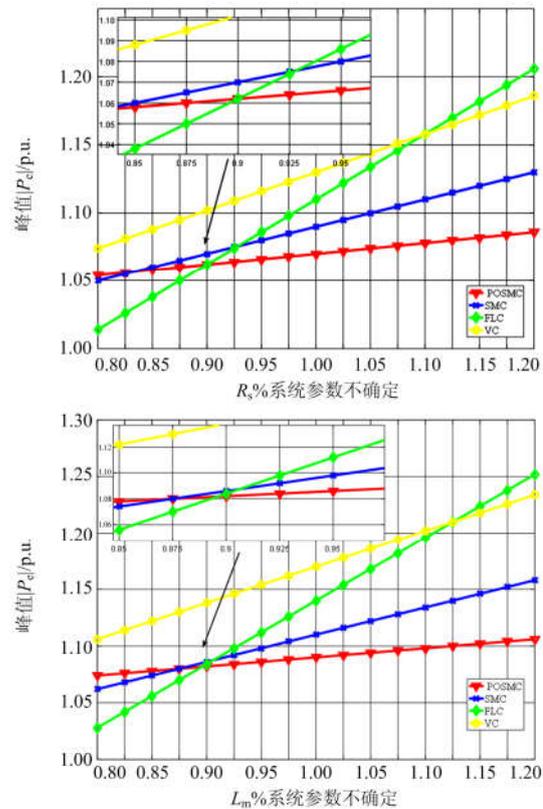


图 6 发电机定子电阻  $R_s$  和互感  $L_m$  在额定值  $\pm 20\%$  范围内变化时,系统电网电压跌落 0.25 p.u. 下不同策略有功功率  $|P_e|$  峰值对比图

Fig. 6 Peak value of active power  $|P_e|$  obtained under 0.25 p.u. voltage drop at power grid with 20% variation of the stator resistance  $R_s$  and mutual inductance  $L_m$  of different approaches, respectively

由图 6 可知, 定子电阻  $R_s$  发生  $\pm 20\%$  的变化后, POSMC、FLC、SMC 和 VC 的有功功率  $|P_e|$  峰值分别是 2.3%、19.7%、8% 和 11.2%。对于电感  $L_m$  发生  $\pm 20\%$  的变化后, POSMC、FLC、SMC 和 VC 的有功功率  $|P_e|$  峰值分别是 1.4%、22.5%、9.6% 和 12.8%。显然, POSMC 在参数不确定下有最小的有功功率峰值, 具有最高的鲁棒性。

### 3.4 综合控制性能对比

表 3 罗列了两种算例下各控制器的绝对误差积分(Integral Absolute Error, IAE)指标, 其定义为  $IAE_x = \int_0^T |x - x^*| dt$ , 其中  $x^*$  为变量  $x$  的参考值。同时, 选择仿真时间为  $T=15$  s。根据上述定义, 可用其值的大小来定量评价 POSMC 的控制性能。

从表 3 中可发现, POSMC 在两类风速下均具有最小的 IAE 指标, 因此其控制性能为四者中最优。特别地, 在随机风速下, POSMC 的  $IAE_Q$  和  $IAE_{wr}$  分别是 SMC 的 33.51%、58.45%, FLC 的分别为 18.39%、37.46%, 以及 VC 的分别为 14.61%、20.65%。

表 3 不同控制器不同工况下 IAE 指数

Table 3 IAE indices (in p.u.) of different controllers obtained in different scenarios

工况	IAE	VC	FLC	SMC	POSMC
阶跃	$IAE_Q$	0.021 8	0.014 3	0.010 4	0.007 21
风速	$IAE_{wr}$	0.004 29	0.003 15	0.002 87	0.001 24
随机	$IAE_Q$	0.004 77	0.003 79	0.002 08	0.000 697
风速	$IAE_{wr}$	0.002 36	0.001 85	0.000 996	0.000 471

最后, 研究两种算例下各控制器所需的总控制成本, 即  $\int_0^T (|u_1| + |u_2|) dt$ 。MPPT 下各控制总控制成本对比图如图 7 所示。从图 7 中可以发现, 在阶跃风速下, POSMC 的控制成本分别是 VC、FLC 和 SMC 的 94.5%、98.8% 和 92.6%。在随机风速下, POSMC 的控制成本分别是 VC、FLC 和 SMC 的 97.3%、98.7% 和 94.9%。因此, POSMC 在所有控制器中具有最低的控制成本。

## 4 硬件在环实验

本部分基于 dSpace 进行硬件在环实验(Hardware-In-the-Loop, HIL)以验证 POSMC 的应用可行性。其中, 控制器置于 dSpace 的 DS1104 平台, 其采样频率  $f_c=1$  kHz; 双馈电机系统则置于 dSpace 的 DS1006 平台, 其采样频率  $f_s=50$  kHz, 旨在使 HIL 实验可以最大程度地模拟实际发电机。HIL 实验平台如图 8 所示。



图 7 MPPT 下各控制总控制成本对比图

Fig. 7 Overall control costs of each control obtained under MPPT

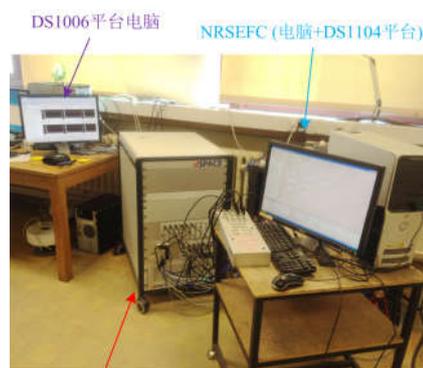
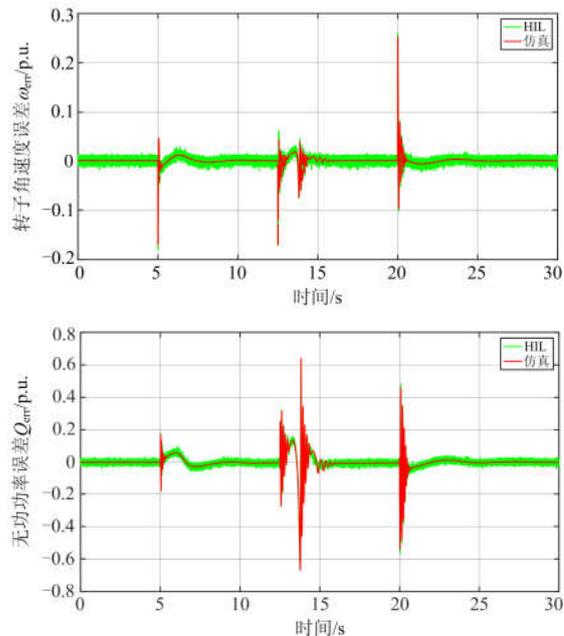


图 8 HIL 实验平台

Fig. 8 Experimental platform of the HIL test

首先测试 POSMC 在阶跃风速下的控制性能, 系统响应如图 9 所示。由图 9 可知, POSMC 可较好地跟踪参考风速, HIL 实验结果与仿真结果的演化过程一致。



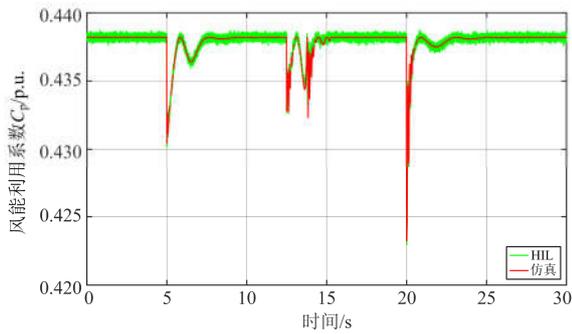


图 9 阶跃风速下的 HIL 结果

Fig. 9 HIL results obtained under step change of wind speed

随后测试 POSMC 在随机风速下的控制性能，系统响应如图 10 所示。由图 10 可知， POSMC 可在随机风速下有效地捕获最大风能，且 HIL 实验结果与仿真结果的 MPPT 性能相同。

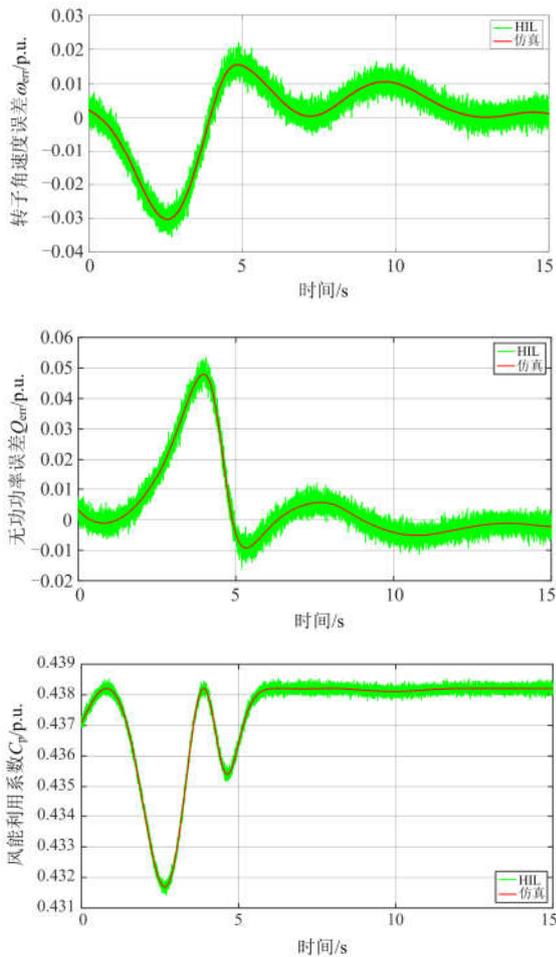


图 10 随机风速下的 HIL 结果

Fig. 10 HIL results obtained under random wind speed

最后测试 POSMC 在机端电压跌落下的控制性能，系统响应如图 11 所示。由图 11 可知 POSMC

可在电压跌落下快速地抑制功率振荡并恢复受扰系统，且 HIL 实验结果与仿真结果具有相同的收敛速度。

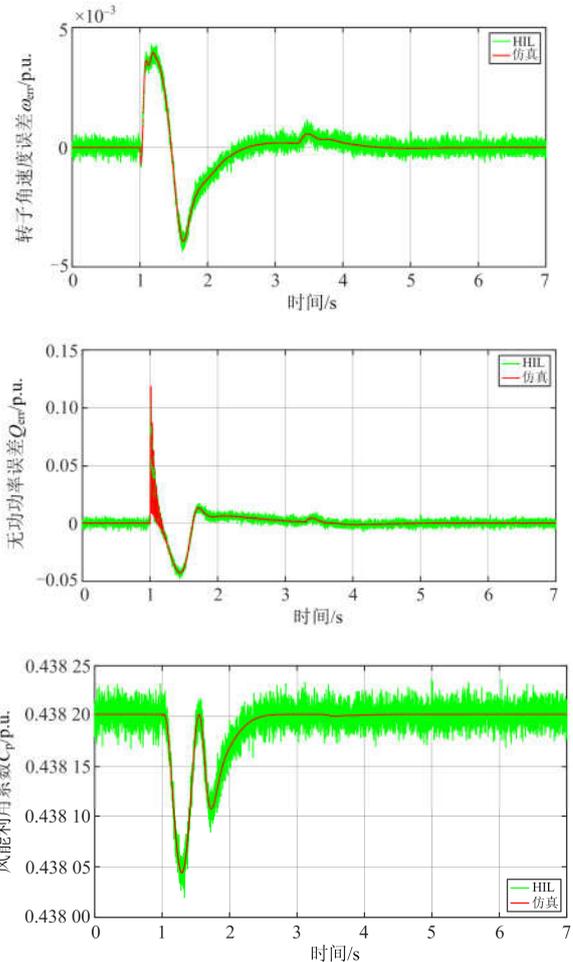


图 11 机端电压跌落下的 HIL 结果

Fig. 11 HIL results obtained under the voltage drop

上述 HIL 实验结果与仿真结果的差异主要是由信号测量误差、控制器低采样频率以及控制信号传输时延引起。至此，HIL 实验结果有效验证了 POSMC 的应用可行性。

## 5 结论

本文设计了一款 POSMC 用于实现 DFIG 的 MPPT。主要结论可归纳如下：

- (1) 首先定义一个系统扰动，包括系统非线性、发电机参数不确定性和随机风速，随后通过扰动观测器对其快速估计并通过滑模控制器对其完全补偿，从而在不同运行条件下实现最大功率跟踪；
- (2) POSMC 仅需测量转子角速度和定子无功功率，与其他非线性控制器相比， POSMC 在实际中

更易实现;

(3) 仿真结果表明, 在阶跃风速下, POSMC 的控制成本分别是 VC、FLC 和 SMC 的 94.5%、98.8% 和 92.6%。在随机风速下, POSMC 的转子角速度误差分别是 VC、FLC 和 SMC 的 20.65%、37.46% 和 58.45%。因此, POSMC 可最大程度地获取风能并具有最低的控制成本。

### 参考文献

- [1] 高金辉, 唐静. 一种新型光伏系统最大功率跟踪算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 21-24.  
GAO Jinhui, TANG Jing. A novel MPPT method for PV systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 21-24.
- [2] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 并网型交流励磁变速恒频风力发电系统控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 109-114.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Investigation of control for AC-excited VSCF wind power generation system connected to grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 109-114.
- [3] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.  
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [4] 张文娟, 马浩淼, 高蕊. 引入比例谐振调节器的双馈电机转子电流无速度传感器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 108-112.  
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, GAO Rui. Rotor current speed sensorless control of doubly-fed induction generator based on proportional resonant regulator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 108-112.
- [5] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 86-92.  
MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 86-92.
- [6] 胡家兵, 贺益康, 刘其辉. 基于最佳功率给定的最大风能追踪控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 32-38.  
HU Jiabing, HE Yikang, LIU Qihui. Optimized active power reference based maximum wind energy tracking control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 32-38.
- [7] LI S, HASKEW T A, WILLIAMS K A, et al. Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 1-11.
- [8] YANG B, JIANG L, WANG L, et al. Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 74: 429-436.
- [9] BENBOUZID M, BELTRAN B, AMIRAT Y, et al. Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride-through capability enhancement[J]. ISA Transactions, 2014, 53(3): 827-833.
- [10] ERROUISSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M, et al. Offset-free direct power control of DFIG under continuous-time model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 2265-2277.
- [11] EBRAHIMKHANI S. Robust fractional order sliding mode control of doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind turbines[J]. ISA Transactions, 2016, 63: 343-354.
- [12] YANG B, HU Y L, HUANG H Y, et al. Perturbation estimation based robust state feedback control for grid connected DFIG wind energy conversion system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(33): 20994-21005.
- [13] GUO W T, LIU F, SI J, et al. Approximate dynamic programming based supplementary reactive power control for DFIG wind farm to enhance power system stability[J]. Neurocomputing, 2015, 170: 417-427.
- [14] BADRE B, MOHAMMED K, AHMED L, et al. Observer backstepping control of DFIG-generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation[J]. Renewable Energy, 2015, 81: 903-917.
- [15] 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.
- [16] 付菊霞, 陈洁, 滕扬新, 等. 基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略[J]. 电工技

- 术学报, 2019, 28(9): 137-144.
- FU Juxia, CHEN Jie, TENG Yangxin, et al. Energy management coordination control strategy for wind power hybrid energy storage system based on EEMD[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 28(9): 137-144.
- [17] 商立群, 朱伟伟. 基于全局学习自适应细菌觅食算法的光伏系统全局最大功率点跟踪方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2606-2614.
- SHANG Liqun, ZHU Weiwei. Photovoltaic system global maximum power point tracking method based on the global learning adaptive bacteria foraging algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2606-2614.
- [18] 李正明, 单晓晨, 徐鹏坤. 基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 38-43.
- LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun. Super-twisting sliding mode controller used in photovoltaic system MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 38-43.
- [19] FEI M, PAL B C. Modal analysis of grid connected doubly-fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 728-736.
- [20] QIAO W. Dynamic modeling and control of doubly fed induction generators driven by wind turbines[C] // Proceedings of 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, USA: 1-8.
- [21] 李洪亮, 姜建国, 乔树通. 三电平 SVPWM 与 SPWM 本质联系及对输出电压谐波的分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 130-137.
- LI Hongliang, JIANG Jianguo, QIAO Shutong. Essential relation between three-level SVPWM and SPWM and analysis on output voltage harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 130-137.
- [22] YANG B, JIANG L, YU T, et al. Passive control design for multi-terminal VSC-HVDC systems via energy shaping[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 98: 496-508.

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-05-28

作者简介:

张维奇(1977—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电网实时调度, 智能调度中心等; E-mail: 1336004278@qq.com

李富盛(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: lifusheng0208@foxmail.com

余涛(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论与仿真等。E-mail: taoyu1@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)