DOI:10.12177/emca.2026.223 文章编号:1673-6540(2026)10-1028-11 中图分类号:TM 315 文献标志码:A

垂直轴风电系统超螺旋滑模直接转矩控制及直流侧协同控制策略研究

于 皓[1], 杨建飞[1,2*], 邱 鑫[1,2], 范晨兴[1], 陈熙文[1], 朱育娴[1]
(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院,江苏 南京 210023;
2. 江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210023)

A Study on Super-Twisting Sliding Mode Direct Torque Control and DC-Side Cooperative Control Strategies for Vertical-Axis Wind Turbine Systems

Yu Hao[1], Yang Jianfei[1,2*], Qiu Xin[1,2], Fan Chenxing[1], Chen Xiwen[1], Zhu Yuxian[1]
(1. School of Electric and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing 210023, China)

Abstract: **[Objective]** To address the issues of large generator-side torque ripple and significant DC-bus voltage fluctuation in small off-grid vertical-axis wind turbine systems under variable wind speeds and load disturbances, a cooperative control strategy based on super-twisting algorithm direct torque control, space vector pulse width modulation (STA-SVPWM-DTC), and DC/DC voltage regulation is proposed, which simultaneously suppresses torque ripple and stabilizes the DC-bus voltage. **[Methods]** A hierarchical decoupling control approach was adopted, dividing the system into two main modules: generator-side rectification and DC-link voltage stabilization. For the generator-side control, a composite sliding manifold was constructed using stator flux error and electromagnetic torque error. A super-twisting sliding mode control (STSMC) was utilized to output a continuous and smooth control signal, which drove the generator-side PWM rectifier via SVPWM, thereby eliminating the high-frequency torque ripple caused by the hysteresis-based discrete switching in conventional DTC. On the DC-link side, a dual-loop DC/DC voltage regulation architecture was built with a voltage outer loop cascaded with an inductor current inner loop. An independent voltage regulation loop was used to block the transmission of load-side power fluctuations to the generator side, attenuating the reverse coupling interference between the two control channels. **[Results]** To verify the performance of the proposed strategy, multiple sets of simulation conditions and physical load experiments were set up for comparative testing. Under the step wind speed condition where the wind speed decreased from 12 m/s to 7 m/s, simulation results showed that, compared with the conventional DTC, the proposed STA-SVPWM-DTC and DC/DC coordinated control method reduced the peak-to-peak electromagnetic torque from 1.35 N·m to 0.4~0.5 N·m, a decrease of 60~70%. Under step wind speed, combined wind speed, and 10 Ω load experimetal conditions, the DC bus voltage was stabilized near 12 V, and the voltage and current ripples were significantly reduced. **[Conclusion]** The proposed STA-SVPWM-DTC and DC/DC coordinated control strategy improves the torque smoothness and DC output stability of small off-grid vertical-axis wind power systems, and provides a feasible control scheme for the stable operation of off-grid wind power supply systems.

Key words: vertical-axis wind turbine system; super-twisting sliding mode control; space vector pulse width modulation; direct torque control

摘 要:**【目的】**针对小型离网垂直轴风电系统在变风速和负载扰动下存在的机侧转矩脉动大、直流母线电压波动明显等问题,提出一种基于超螺旋滑模算法-直接转矩控制-空间矢量脉宽调制(STA-SVPWM-DTC)与 DC/DC 稳压的协同控制策略,同时实现时间转矩脉动的抑制与母线电压稳定调控。**【方法】**采用分层解耦控制思路,将

基金项目:江苏省研究生实践创新计划项目(26CXJH3167)
Jiangsu Province Postgraduate Practice and Innovation Program Project (26CXJH3167)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

系统划分为机侧整流与直流侧稳压两大模块。机侧控制以定子磁链误差与电磁转矩误差构建复合滑模面，利用超螺旋滑模控制（STSMC）输出连续平滑的控制信号，经 SVPWM 驱动机侧 PWM 整流器，从而消除传统 DTC 因滞环离散切换引起的高频转矩纹波。直流侧则构建电压外环串联电感电流内环的双闭环 DC/DC 稳压架构，通过独立稳压回路阻隔负载侧功率波动向机侧传递，削弱两侧控制通道间的反向耦合干扰。【结果】为验证所提策略的性能，设置多组仿真工况与实物负载试验进行对比测试。风速由 12 m/s 降至 7 m/s 的阶跃工况下，仿真结果表明，相较传统 DTC，所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制方法可将电磁转矩峰峰值由 1.35 N·m 降低至0.4～0.5 N·m，降幅达 60～70%；在阶跃风速、组合风速及 10 Ω 带载试验条件下，直流母线电压均可稳定在 12 V 附近，且电压与电流纹波明显减小。【结论】所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制策略能够改善小型离网垂直轴风电系统的转矩平滑性和直流输出稳定性，为离网风电供能系统的稳定运行提供了一种可行控制方案。

关键词：垂直轴风电系统；超螺旋滑模控制；空间矢量脉宽调制；直接转矩控制

0 引言

随着“十五五”规划的印发，国家将进一步强化可再生能源发展导向，推动风电等清洁能源规模化发展并与电力系统深度适配[1]。在“双碳”目标和新型电力系统建设背景下，风电已成为能源低碳转型的重要支撑，其规模化发展对风电机组提出更高要求[2-3]。直驱永磁同步风力发电系统在提升系统可靠性和降低运行成本方面具有明显优势[4]，然而受风向变动及阻力矩扰动影响，转矩脉动抑制成为关键瓶颈。传统直接转矩控制（Direct Torque Control，DTC）虽动态响应快，但滞环控制器引发的固有抖振限制了输出电能品质。同时，随着风电应用向分布式供能、微网及离网场景延伸，机组在风速波动、负载变化及孤岛运行等复杂工况下保持稳定运行的需求日益凸显[5-9]。

已有研究围绕机侧转矩控制和无传感观测展开研究：一方面提出改进型 DTC 方法[10-14]，以提高磁链估算精度、抑制转矩脉动；另一方面探索基于转速估算的无风速传感最大功率控制策略[15-16]。例如 Yahdou 等[17]提出自适应反步滑模矢量控制以增强扰动抑制与运行稳定性；Nguyen 等[18]在小型异步发电系统中实现无传感矢量控制，提高了传感器削减条件下的状态估计与稳定控制能力；在直驱永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM）系统中，Zhang 等[19]提出无传感 DTC 策略以改善动态性能与控制精度。尽管上述研究在转矩脉动抑制与状态观测方面取得一定进展，但传统滑模控制仍易引入高频抖振，且传统 DTC 的离散开关特性会导致开关频率不固定、变频噪声增加及电流纹波偏大等问题。

李耀华等[20]利用超螺旋滑模控制（Super-Twisting Sliding Mode Control，STSMC）对 PMSM 磁场定向展开研究。高梓伦等[21]利用超螺旋滑模观测器解决双三相 PMSM 模型预测控制系统鲁棒性低、对电机参数依赖性高的问题。赵晨等[22]在传统直接瞬时转矩控制的基础上引入了反向传播神经网络控制策略，抑制了电机在运行时的转矩脉动，同时引入滑模控制对转速环节进行改进提高。李敏等[23]提出一种基于改进型滑模变结构的 PMSM 无位置传感器矢量控制方法，以削弱抖振，从而改善系统的动、静态性能。刘小俊等[24]提出了一种带全阶观测器的 PMSM 电流滑模控制器，解决传统比例积分控制在转速和负载变化下的超调及 dq 轴电流脉动问题。文献[20-24]仅以削弱抖振、无位置传感器运行为目标，未兼顾磁链、转矩协同优化，并且针对离网风电等应用场景，难以适配风电随机风速与离网直流侧稳压需求。

垂直轴风机结构简单、无需偏航、低风速启动性好，但气动转矩周期性波动，变风速下易引发电磁转矩脉动与直流母线电压波动。现有研究多从机侧优化 DTC、抑制抖振或设计观测器等单一维度改进，较少关注离网系统中发电侧与负载侧的耦合影响。为此，本文提出机侧—直流侧协同控制框架：机侧采用超螺旋算法-空间矢量脉宽调制（Super-Twisting Algorithm-Space Vector Pulse Width Modulation，STA-SVPWM）-DTC，结合超螺旋滑模与 SVPWM 调制以降低转矩脉动和电流纹波；直流侧采用 DC/DC 稳压控制，提升变风速及负载扰动下的母线电压稳定性。两者协同提升了系统动态性能与供电稳定性，仿真与试验验证了该策略的有效性。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1　基于 STSMC-DTC 及 DC/DC 协同作用控制理论

1.1　STSMC 理论

为克服传统一阶滑模控制引起的高频抖振,本文采用二阶 STA。该算法通过积分项累积滑模面符号,使控制律具有连续特性。结合磁链电压方程,构建基于 STA 的定子磁链与电磁转矩控制器。建立 STSMC 系统模型,如式(1)所示:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x,t) + u\end{cases} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{x} = [x_1, x_2]^{\mathrm{T}}$ 为系统状态;$f(\boldsymbol{x},t)$ 为满足 $|f(\boldsymbol{x},t)| \leqslant L$ 的未知有界扰动,L 为系统未知扰动的上界;u 为控制输入。

$$s = cx_1 + x_2(c > 0) \tag{2}$$

$$u = -k_1 |s|^{1/2} sign(s) - k_2 \int sign(s)\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

式中:k_1、k_2 为正增益,需满足 $k_1 > 2\sqrt{L}$、$k_2 > L$,确保滑模面 s 及其导数 $\dot{s}$ 收敛至 0;$sign(s)$ 为符号函数,$s>0$ 时取 1,$s<0$ 时取 -1;$\int sign(s)\mathrm{d}\tau$ 为积分项,使控制律呈连续特性。

$$\frac{d^2\psi_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathrm{d}u_d}{\mathrm{d}t} - R_{\mathrm{s}}\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

将式(4)代入磁链电压方程,即可建立与定子电压的对应关系;引入 STA 连续控制结构,进而得到磁链控制器的表达式:

$$u_d^* = K_{\mathrm{p}} |S_\psi|^{\mathrm{T}} sign(S_\psi) + u_d \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_d}{\mathrm{d}t} = K_{\mathrm{i}} sign(S_\psi) \tag{6}$$

式中:K_{p}、K_{i} 为待设计的比例增益、积分增益参数;S_ψ 为磁链滑模面;u_d 为 d 轴定子电压积分项;u_d^* 为 u_d 参考值。

电磁转矩的滑模面函数为

$$S_{\mathrm{T}} = T_{\mathrm{e}}^* - T_{\mathrm{e}} \tag{7}$$

式中:T_{e} 为电机实际电磁转矩;T_{e}^* 为转矩参考值。

同理,可得转矩控制器的表达式为

$$u_q^* = K_{\mathrm{p}} |S_{\mathrm{T}}|^r sign(S_{\mathrm{T}}) + u_q \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_q}{\mathrm{d}t} = K_{\mathrm{i}} sign(S_{\mathrm{T}}) \tag{9}$$

式中:r 为误差幂次系数;u_q 为 q 轴定子电压积分项;u_q^* 为 u_q 参考值。

由式(5)~(8)可得磁链二阶、转矩二阶 STSMC 的控制框图分别如图 1、2 所示。图 1 中,sqrt(u)为平方根运算。

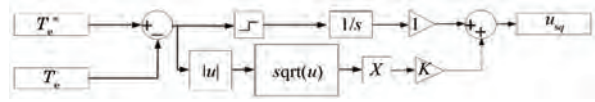


图 1　磁链 STSMC 控制框图

Fig. 1　Flux linkage STSMC control block diagram

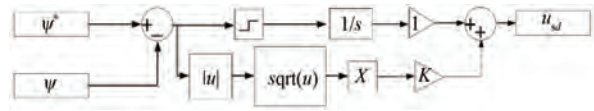


图 2　转矩 STSMC 控制框图

Fig. 2　Torque STSMC control block diagram

1.2　STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制系统

为进一步抑制传统 DTC 因电压矢量离散切换和开关频率不固定引发的电流纹波与转矩脉动,本文在 STSMC 基础上引入 SVPWM,以提高机侧电压矢量调制的连续性。同时,为增强离网运行下的直流侧稳压能力,构建 STA-SVPWM-DTC 与 DC/DC 稳压相结合的协同控制策略。其中,STA-SVPWM 通过改善机侧电磁转矩动态性能来降低发电机输出功率波动;DC/DC 变换器则通过母线电压闭环调节来抑制负载扰动引起的电压波动。两者分别作用于发电侧和负载侧,通过直流母线实现能量缓冲与信息耦合,从而形成机侧转矩优化与直流侧稳压协同控制机制。

DC/DC 变换器属于典型非线性系统,其状态空间模型可表示为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} = \dfrac{V_{\mathrm{in}}}{L}\mu - (1-\mu)\dfrac{V_0}{L} \\ \dfrac{\mathrm{d}V_0}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{V_0}{R_0 C} + (1-\mu)\dfrac{i_{\mathrm{L}}}{C}\end{cases} \tag{10}$$

式中:V_{in} 为输入电压;L 为电感值;i_L 为电感电流;C 为电容值;V_0 为输出电压;R_0 为负载电阻;μ 为占空比。

基于 STA 设计电流内环控制器:

$$\begin{cases}u = -\eta_1 |s|^{\frac{1}{2}} sign(s) + u_1 \\ u_1 = -\eta_2 sign(s)\end{cases} \tag{11}$$

式中:η_1、η_2 分别为超螺旋算法的非线性控制增益、积分控制增益。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1.3 协同控制机理分析

在离网垂直轴风电系统中，风速波动会引起风力机输出机械功率变化，进而导致发电机电磁转矩与输出功率波动；同时，负载侧功率需求的变动也会经直流母线传导至系统其余部分。因此，仅依赖机侧控制或负载侧稳压均难以同时保证发电质量与供电稳定性。为此，本文构建了一种由机侧 STA-SVPWM-DTC 与直流侧 DC/DC 稳压控制组成的双侧协同控制结构，如图 3 所示。图中，ψ_s 为定子磁链；ψ_s^* 为 ψ_s 给定值；U_{dc} 为直流母线电压；U_o 为负载电压。

图 3 中，风速波动引起的机械功率变化经永磁同步发电机（Permanent Magnet Synchronous Generator，PMSG）和整流器传递至直流母线，表现为母线电压波动；同时，负载侧功率需求的改变也通过直流母线反向影响发电侧的运行状态，因此直流母线构成了机侧与负载侧能量耦合的关键节点。

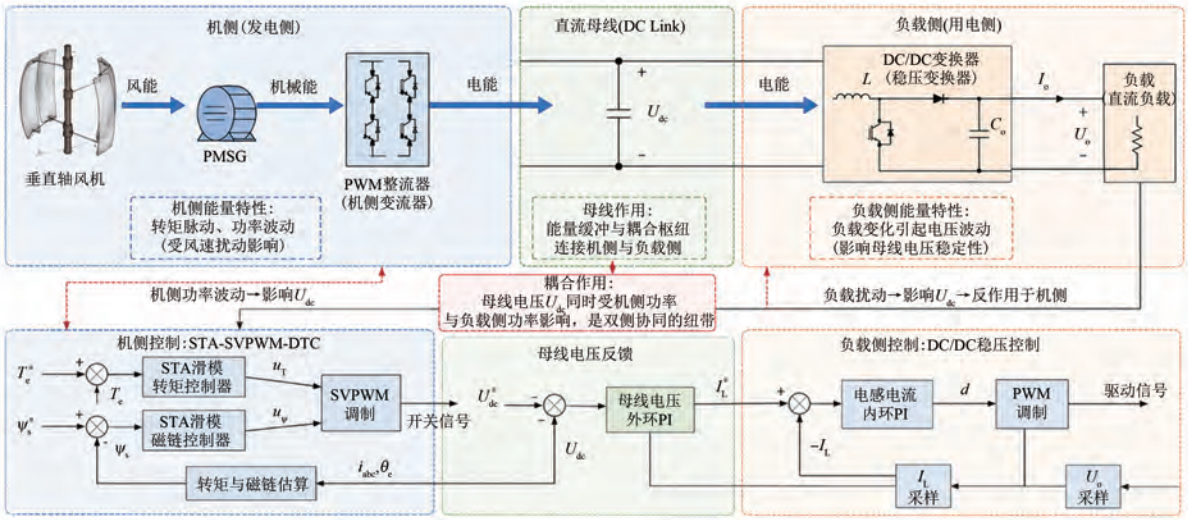


图 3 协同控制机理图

Fig. 3 Diagram of the cooperative control mechanism

机侧采用 STA-SVPWM-DTC，通过抑制电磁转矩脉动和电流纹波，提高发电机输出功率平滑性；直流侧采用 DC/DC 双闭环稳压控制，通过调节占空比维持母线电压稳定。两者以母线电压为耦合变量，实现机侧功率品质优化与负载侧电压稳定控制的协同运行，从而提高离网垂直轴风电系统在变风速工况下的动态性能与供电稳定性。

2 基于 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 联合控制仿真分析

三种控制策略的控制框图如图 4 所示。

本次仿真采用风电控制领域常用的极端扰动测试方法，初始风速设置为 12 m/s，0.8 s 时阶跃变化为 7 m/s。在此工况下，重点分析发电机的转速、电磁转矩、直流侧输出电压及电流指标。系统所用发电机模型参数如表 1 所示，其运行参数如表 2 所示。

首先，对 DTC、STA-SVPWM 和 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制三种控制策略进行对比，转速响应结果如图 5 所示，电磁转矩仿真结果如图 6 所示。

由图 5 可知，当阶跃发生后，传统 DTC 转速跌落明显且恢复时间较长。采用 STA-SVPWM-DTC 后，转速跌落幅度减小，调节时间缩短至 0.1 s 以内。进一步引入 DC/DC 协同控制后，系统调节时间最短为 0.02 s，阶跃后稳态转速纹波最低。这表明所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制策略能有效提升系统动态响应速度与抗扰性能。

由图 6 可知，在 $t=0.8$ s 风速阶跃切换前后，传统 DTC 存在较大的转矩波动和稳态纹波。采用 STA-SVPWM-DTC 后，跟踪误差和纹波幅值均有所减小。进一步加入 DC/DC 协同控制后，电磁转矩在阶跃前后分别稳定在 −10 N·m 和 −5 N·m

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

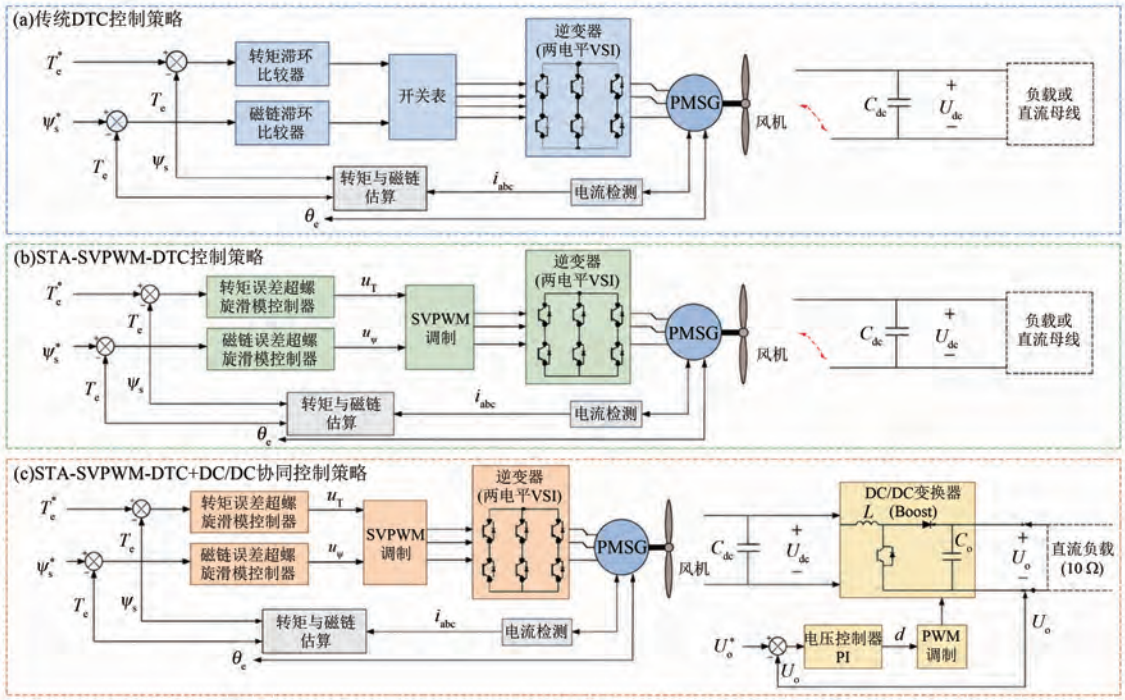


图4　三种控制策略下的控制框图

Fig. 4　Control block diagrams of three control strategies

表 1　发电机模型参数

Tab. 1　Generator model parameters

参数名称	参数值
极对数	4
定子相电阻/Ω	0.7
定子电感 $L_d=L_q$/mH	4.0
转动惯量/(kg·m^2)	0.000 8
永磁磁链/Wb	0.175
额定功率/W	750
转速/(r·min^{-1})	700

表 2　仿真模型运行参数

Tab. 2　Simulation model operating parameters

参数名称	参数值
运行时间/s	1.6
阶跃前风速/(m·s^{-1})	12
阶跃时间/s	0.8
阶跃后风速/(m·s^{-1})	7
直流侧负载/Ω	2
直流侧输出电压/V	12

附近,稳态波动进一步降低,表明所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制策略能够提升

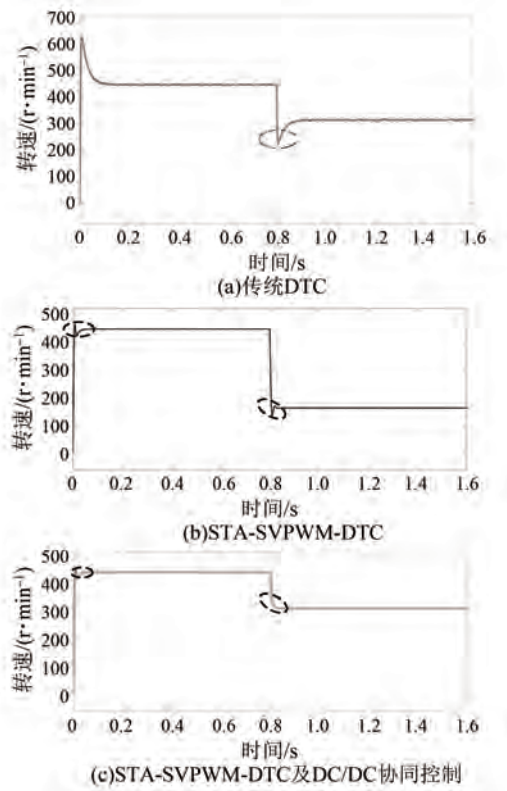


图 5　不同控制策略下的发电机转速响应曲线

Fig. 5　Generator speed response curves under different control strategies

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

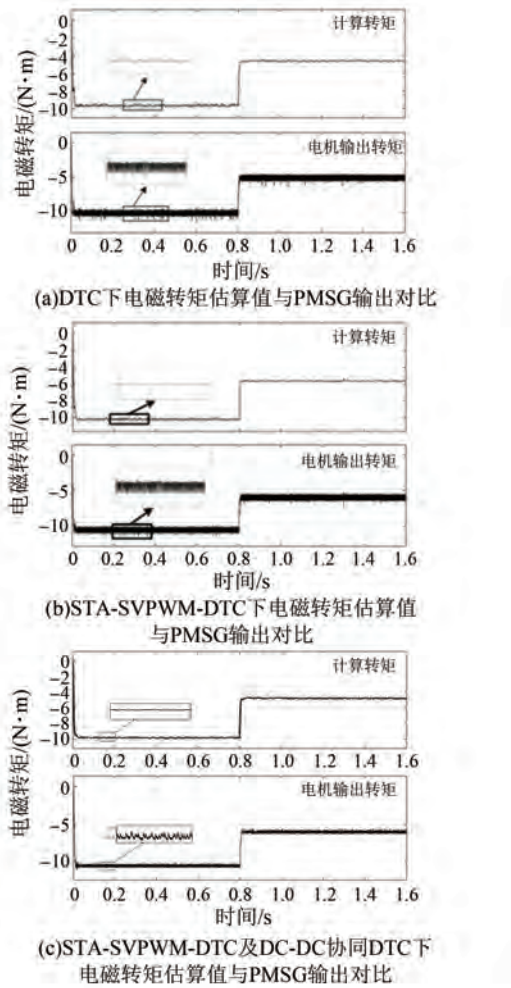


图 6　不同控制策略下的电磁转矩仿真结果对比

Fig. 6　Comparison of electromagnetic torque simulation results under different control strategies

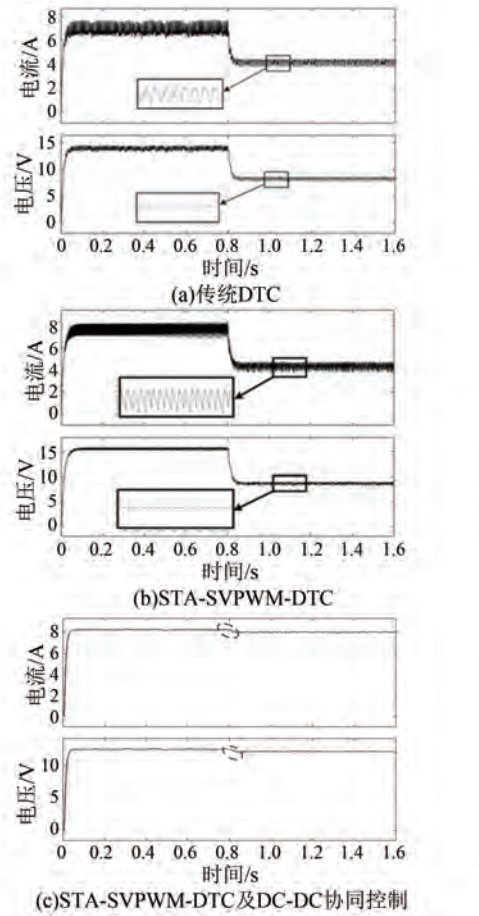


图 7　不同控制策略下的发电机电压、电流对比

Fig. 7　Comparison of generator voltage and current under different control strategies

变风速条件下的转矩跟踪性能和抗扰能力。

三种控制策略下的发电机电压、电流对比波形如图 7 所示。由图 7(a)、(b)可知，采用 STA-SVPWM-DTC 策略后，直流侧电压和电流纹波较传统 DTC 明显减小，输出波形更加平滑。进一步加入 DC/DC 协同控制后，直流母线电压在风速切换前后均稳定在 12 V 附近，电压、电流波动进一步减小，表明所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制策略能够有效提高直流侧输出稳定性。

针对不同控制策略下的电磁转矩纹波对比如图 8 所示。由图 8 可知，传统 DTC 下电磁转矩尖峰明显，峰峰值为 1.35 N·m；采用 STA-SVPWM-DTC 后，转矩峰峰值降低至 1.0 N·m，较传统 DTC 减小明显。进一步加入 DC/DC 协同控制后，转矩主要稳定在−10.3～−10.7 N·m 附近，局部波动范围降至 0.4～0.5 N·m。仿真结果表明，STA-SVPWM-DTC 能够改善机侧转矩调节品质，DC/DC 协同控制进一步提高了转矩输出平滑性。

对不同控制策略下的仿真结果进行量化分析，结果如表 3 所示。其中，纹波改善率如式(12)所示：

$$\eta = \frac{R_{\mathrm{DTC}} - R_{\mathrm{c}}}{R_{\mathrm{DTC}}} \times 100\% \tag{12}$$

式中：η 为纹波改善率；R_{DTC}、R_{c} 分别为 DTC、对比控制策略的纹波峰峰值。

由表 3 可知，传统 DTC 下系统转速调节时间为 0.1 s，电磁转矩峰峰值为 1.35 N·m，转矩脉动较明显。采用 STA-SVPWM-DTC 后，调节时间缩短至 0.05 s，转矩峰峰值降至 1.0 N·m，纹波降低 25～30%。进一步加入 DC/DC 协同控制后，调节时间缩短至 0.02 s，转矩峰峰值降至 0.25 N·m，纹波降低 60～70%，且母线输出稳定

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

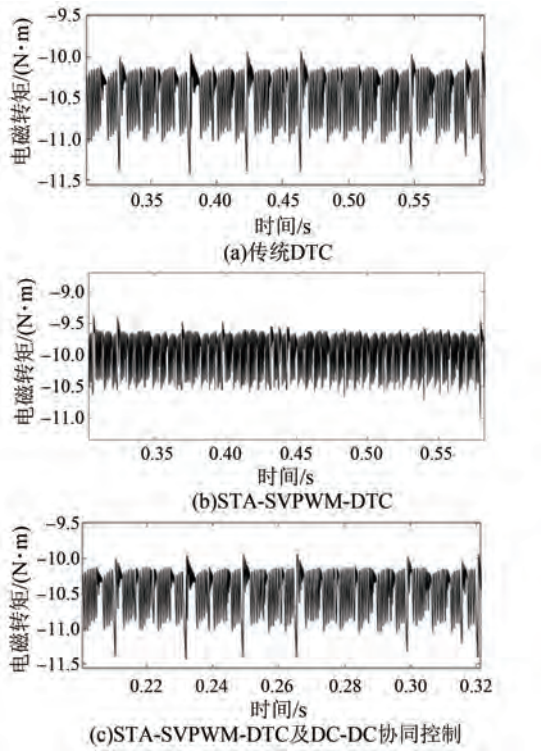


图 8　三种控制策略下电磁转矩纹波对比

Fig. 8　Comparison of electromagnetic torque ripple under three control strategies

在 12 V/8 A。结果表明,所提协同控制策略能够有效改善转矩平滑性、动态响应速度和直流侧输出稳定性。

表 3　不同控制策略的仿真结果对比

Tab. 3　Comparison of simulation results under different control strategies

控制策略	转速调节时间/s	电磁转矩峰峰值/(N·m)	母线电压响应/V	母线电流响应/A	纹波改善率/%
传统 DTC	0.1	1.35	7	3.9	–
STA-SVPWM-DTC	0.05	1.0	8	4.2	25~30
STA-SVPWM-DTC+DC/DC 协同控制	0.02	0.45	12	6	60~70

3　试验结果

图 9 所示的风力发电硬件平台是一套集风源模拟、发电、电力变换、闭环控制与监测于一体的试验验证系统,其核心用途是对仿真阶段提出的 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 协同控制策略进行实物验证。试验中 DC/DC 变换器输出端连接直流母线,母线输出接 10 Ω 纯电阻负载。试验期间负载阻值保持恒定(恒阻带载试验),不进行动态切换。

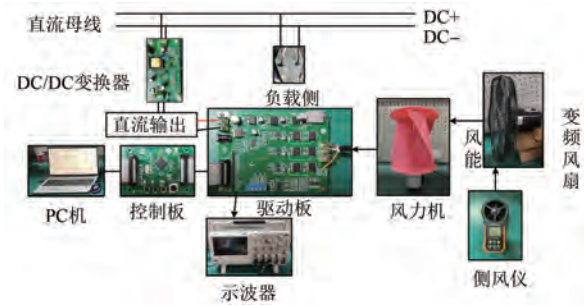


图 9　风机控制系统试验平台

Fig. 9　Wind turbine control system experimental platform

试验工况分为两种:一种是从静止切换至 7 m/s 的阶跃风速工况,另一种是风速在 7~10 m/s 范围内波动的组合风速工况。三种控制策略直流侧电压输出对比如图 10 所示。

由图 10(a)、(b)可知,传统 DTC 下电压波动较大。采用 STA-SVPWM-DTC 后,电压波动范围收窄,阶跃风速下可平滑过渡至 12~13 V,组合风速下维持在 10~12 V 区间。加入直流 DC/DC 协同控制后,直流侧电压在两类工况下均稳定在 12 V 附近,表明所提 STA-SVPWM-DTC 及 DC/DC 控制策略能够显著提升变风速条件下的直流侧稳压能力。

为进一步评价控制策略在实际发电工况下的输出能力,本文开展了带载试验。在保证系统足热或过载的条件下,试验采用 10 Ω 电阻作为直流侧负载,在恒定 7 m/s 的风速条件下接入直流侧母线,观测直流侧电压与电流响应,结果如图 11 所示。

带载试验结果如表 4 所示。为定量评估不同控制策略下的输出品质,电压与电流的纹波系数分别按式(13)和式(14)计算:

$$K_u = \frac{\Delta U_{pp}}{U_{ave}} \times 100\% \tag{13}$$

$$K_i = \frac{\Delta I_{pp}}{I_{ave}} \times 100\% \tag{14}$$

式中:K_u、K_i 分别为直流母线电压、电流的纹波系数;ΔU_{pp}、ΔI_{pp} 分别为稳态运行在一个周期内电压、电流的峰峰值;U_{ave}、I_{ave} 分别为对应的平均值。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

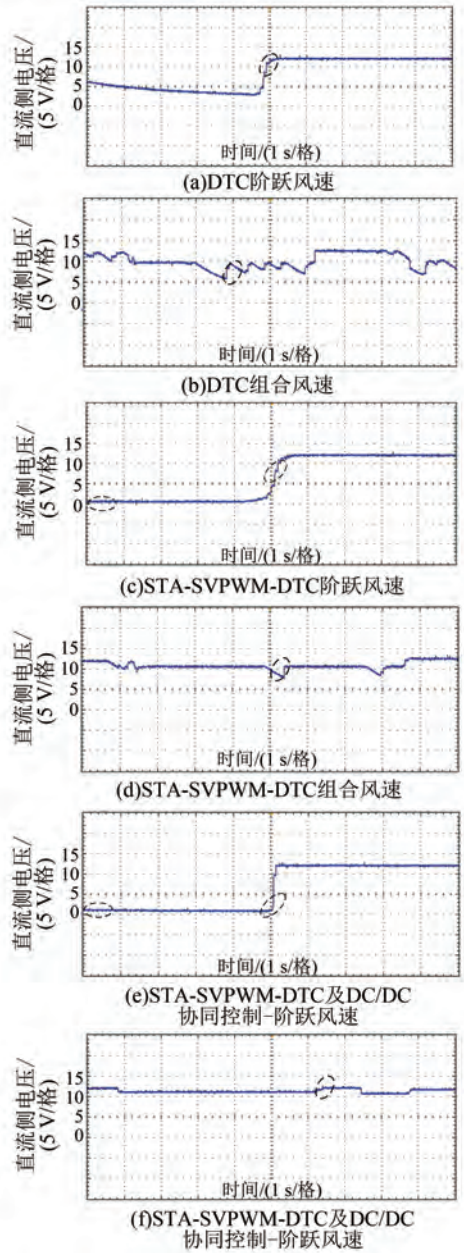


图 10　不同控制策略下阶跃风速与组合风速直流侧电压响应对比

Fig. 10　Comparison of DC-side voltage responses under step wind speed and combined wind speed with different control strategies

由表 4 可知，在 10 Ω 负载条件下，传统 DTC 控制时直流母线电压平均值为 11.6 V，电压纹波峰峰值为 0.60 V，电压纹波系数为 5.17%；其对应负载电流平均值约为 2.16 A，电流纹波峰峰值为 0.22 A，电流纹波系数为 10.19%。采用 STA-SVPWM-DTC 后，直流侧电压纹波降低至 0.38 V，电流纹波降低至 0.13 A，较传统 DTC 分别降低 36.7% 和 40.9%，表明 STSMC 与 SVPWM 能够改善机侧扰动抑制能力，并减小直流侧输出波动。进一步加入 DC/DC 协同稳压环节后，直流侧电压稳定在 12 V 附近，电压纹波峰峰值为 0.15 V，电流纹波峰峰值为 0.05 A，较传统 DTC 分别降低约 75.0% 和 77.3%。结果表明，所提 STA-SVPWM-DTC 与 DC/DC 协同控制策略能够显著抑制直流侧电压、电流纹波，提高带载输出稳定性。

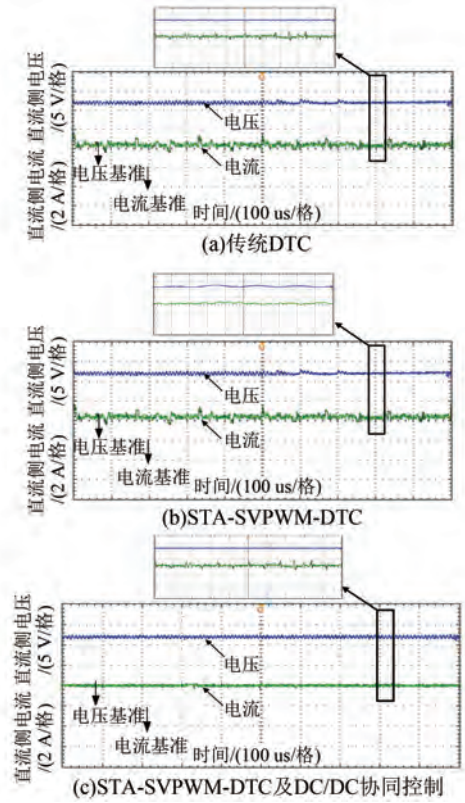


图 11　带载条件下直流母线电压与电流响应结果

Fig. 11　DC bus voltage and current responses results under load conditions

表 4　带载试验下不同控制策略的试验结果

Tab. 4　Experimental results under different control strategies with load experiment

控制策略	带载母线电压响应/V	带载母线电流响应/A	电压纹波系数/%	电流纹波系数/%
传统 DTC	11.6	2.16	5.17	10.19
STA-SVPWM-DTC	11	2.1	2.7~4.1	6.22
STA-SVPWM-DTC+DC/DC 协同控制	12	2.2	0.8~1.7	2.27

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

4　结语

本文针对小型离网垂直轴风电系统中传统DTC存在转矩脉动大、直流侧输出波动明显等问题,提出了一种STA-SVPWM-DTC与DC/DC稳压相结合的协同控制策略。仿真结果表明,所提策略可将电磁转矩峰峰值由传统DTC的1.35 N·m降低至0.45 N·m,其纹波降低了60~70%,且转速调节时间明显缩短。试验结果进一步表明,在阶跃风速、组合风速及10 Ω带载条件下,加入DC/DC协同控制后,直流侧电压能够稳定在12 V附近,且输出电压和电流波动均得到有效抑制。上述结果验证了所提STA-SVPWM-DTC及DC/DC协同控制策略在降低转矩脉动、提高直流侧稳压能力和改善离网供电稳定性方面的有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

于皓进行了方案设计、理论推导与论文撰写,范晨兴、陈熙文、朱育娴进行了试验研究,杨建飞、邱鑫负责了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, theoretical derivation, and manuscript writing were performed by Yu Hao. The experimental studies were conducted by Fan Chenxing, Chen Xiwen, and Zhu Yuxian. Manuscript review and revision were carried out by Yang Jianfei and Qiu Xin. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] 王明月, 陈大恩, 庞昌伟. 中国新能源产业高质量发展水平测度与时空演变特征[J]. 统计与决策, 2025, 41(5): 132-136.

[2] 黄正军, 刘泉, 郝育新. 永磁同步直驱风力发电机结构改进研究[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(8): 1301-1307.
Huang Z J, Liu Q, Hao Y X. Research on structure improvement of permanent magnet synchronous direct-drive wind turbine generator [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(8): 1301-1307.

[3] 吴震宇, 赵大兴, 袁康, 等. 永磁直驱风力发电机的定子支撑轻量化设计[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(6): 174-177.
Wu Z Y, Zhao D X, Yuan K, et al. The lightweight design of stator supporting for direct-drive permanent-magnet wind generators [J]. Mechanical Design & Research, 2016, 32(6): 174-177.

[4] 高程杰, 全惠敏, 毕大强. 永磁直驱风力发电系统在线实时控制仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 135-140.
Gao C J, Quan H M, Bi D Q. Hardware-in-the-loop real-time simulation for PMSG wind power generation systems [J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 135-140.

[5] 康尔良, 张琪. 新型交流励磁直驱风力发电机的空载特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 619-623.
Kang E L, Zhang Q. No-load characteristics of new AC excitation direct-drive wind generator [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 619-623.

[6] 邓文浪, 申翠平, 李利娟, 等. 高频链TSMC-PET直驱风力发电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 38-44.
Deng W L, Shen C P, Li L J, et al. Direct drive wind power generation system with high-frequency link TSMC-PET [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 38-44.

[7] 徐艳春, 杨昊, 程杉. 基于超稀疏矩阵变换器的直驱风力发电系统控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 59-66.
Xu Y C, Yang H, Cheng S. Research of control strategy for direct-driven wind-power generation system based on ultra-sparse matrix converter [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 59-66.

[8] 沈阳武, 葛云霞, 崔挺, 等. 基于阻抗比判据的永磁直驱风力发电系统并网稳定分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 45-53.
Shen Y W, Ge Y X, Cui T, et al. A stability analysis

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

method for the gird-connected permanent magnet synchronous generator based on impedance ratio criterions [J]. Power System Protection and Control，2017，45(18)：45-53.

[9] 黄伟煌，王芸，赵浩然. 一种新型的永磁直驱风力发电机组控制策略在微网中的应用[J]. 太阳能学报，2015，36(1)：61-69.
Huang W H，Wang Y，Zhao H R. A novel control strategy of PMSG based wind turbines for micro-grid application [J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2015，36(1)：61-69.

[10] 刘国海，孙汶超，周华伟，等. 五相永磁同步电机改进型无差拍直接转矩和磁链控制[J]. 电工技术学报，2023，38(24)：6658-6667.
Liu G H，Sun W C，Zhou H W，et al. An improved deadbeat direct torque and flux control strategy of five-phase permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(24)：6658-6667.

[11] 唐浦华，宋昌林，黎亚元. 一种改进型的感应电机直接转矩控制[J]. 系统工程与电子技术，2004，26(4)：479-481.
Tang P H，Song C L，Li Y Y. Modified direct torque control of induction machines [J]. Systems Engineering and Electronics，2004，26(4)：479-481.

[12] 刘国海，高猛虎，周华伟，等. 五相永磁同步电机磁链改进型容错直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(2)：359-365.
Liu G H，Gao M H，Zhou H W，et al. Flux-modification-based fault-tolerant DTC for five-phase PMSM [J]. Proceedings of the CSEE，2019，39(2)：359-365.

[13] 梁传栋，许刘超，潘志恒，等. 一种改进型滑模变结构控制永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用，2022，49(3)：1-6+17.
Liang C D，Xu L C，Pan Z H，et al. An improved sliding mode variable structure control direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(3)：1-6+17.

[14] 陈令荣，李强，储建华. 基于改进型有限控制集模型预测的永磁电机直接转矩控制[J]. 微特电机，2017，45(6)：69-75.
Chen L R，Li Q，Chu J H. Direct torque control of permanent magnet motor based on improved finite control set model predictive control [J]. Small & Special Electrical Machines，2017，45(6)：69-75.

[15] 孙硕. 基于无速度传感器的变风速风力发电机的二阶滑模控制策略研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
Sun S. Research on second order sliding mode control strategy based on speed sensorless control of variable speed wind turbine [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2018.

[16] 姜学想. 永磁直驱风力发电变流系统的直接转矩控制研究[D]. 株洲：湖南工业大学，2015.
Jiang X X. Research on the direct-drive permanent magnet wind rower converter system of direct torque control [D]. Zhuzhou：Hu'nan University of Science and Technology，2015.

[17] Yahdou A，Djilali B A，Boudjema Z，et al. Improved vector control of a counter-rotating wind turbine system using adaptive backstepping sliding mode [J]. Journal Européen des Systèmes Automatisés，2020，53(5)：645-651.

[18] Nguyen A T，Lee D-C. Sensorless vector control of SCIG-based small wind turbine systems using cascaded second-order generalized integrators [J]. Journal of Power Electronics，2020，20：764-773.

[19] Zhang Z，Zhao Y，Qiao W，et al. A space-vector-modulated sensorless direct-torque control for direct-drive PMSG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2014，50(4)：2331-2341.

[20] 李耀华，王自臣，何雨勰，等. 基于超螺旋滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制研究[J]. 电机与控制应用，2025，52(5)：527-539.
Li Y H，Wang Z C，He Y X，et al. Field-oriented control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode control [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(5)：527-539.

[21] 高梓伦，孙全增，孔钰，等. 基于超螺旋滑模观测器的双三相永磁同步电机鲁棒性模型预测控制算法[J]. 电机与控制应用，2025，52(5)：562-571.
Gao Z L，Sun Q Z，Kong Y，et al. Robust model predictive control algorithms for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on super-twisting sliding mode observers [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(5)：562-571.

[22] 赵晨，邓福军. 基于滑模神经网络直接瞬时转矩

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

控制的优化[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 102-109.

Zhao C, Deng F J. Optimization of direct instantaneous torque control based on sliding mode neural network [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 102-109.

[23] 李敏, 李林林, 周俊鹏. 基于改进型滑模变结构的永磁同步电机的无位置传感器矢量控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 22-33.

Li M, Li L L, Zhou J P. Sensorless vector control of PMSM based on improved sliding mode with variable structure [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 22-33.

[24] 刘小俊. 带全阶观测器的永磁同步电机电流滑模控制器研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(6): 690-699.

Liu X J. Research on current sliding mode controller with full-order observer for PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(6): 690-699.

收稿日期:2026-05-13
收到修改稿日期:2026-07-14

作者简介:

于　皓(2002—),男,硕士研究生,研究方向为垂直轴风机发电系统控制策略优化, 1009315537@qq.com;

*通信作者:杨建飞(1982—),男,博士,教授,研究方向为永磁同步电机控制, 1426461555@qq.com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.