

丁芝侠, 方勤园, 刘健, 等. 双馈变速抽水蓄能机组的反步滑模控制[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 107-121. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.008

DING Zhixia, FANG Qinyuan, LIU Jian, et al. Backstepping sliding mode control of doubly-fed variable-speed pumped storage units [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 107-121. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.008

双馈变速抽水蓄能机组的反步滑模控制

丁芝侠, 方勤园, 刘健, 李赛

(武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 【目的】双馈变速抽水蓄能机组在提升新能源消纳能力和增强电网稳定性方面具有重要应用价值。然而, 其复杂的机电耦合特性仍然带来显著的技术挑战。为有效平抑风光发电功率波动, 需要构建融合机电动态分析、功率解耦机制与快速响应控制的变速抽水蓄能系统。【方法】滑模控制作为一种适用于时变非线性系统的有效控制方法, 在变速抽水蓄能系统中展现出良好的控制性能, 但其固有的抖振问题仍然影响系统的调节精度。为此, 本研究提出了一种基于反步法的滑模控制策略, 通过调节双馈电机网侧和机侧变流器的功率传输, 有效抑制系统抖振并实现功率解耦控制。相较于传统滑模控制, 该方法在典型稳态工况、快速功率变化、参数变化以及风电-抽水蓄能混合系统四种场景下进行了仿真验证。【结果】结果表明, 在快速功率变化、参数变化和风电-抽水蓄能混合系统三种场景下, 反步滑模控制能够稳定跟踪功率变化, 而传统滑模控制分别在 51.1547 s、38.4384 s 和 10 s 后失去功率跟踪能力。【结论】与传统滑模控制相比, 反步滑模控制具有更快的功率响应速度、更强的鲁棒性和更好的稳定性。

关键词: 变速抽水蓄能; 双馈电机; 反步滑模控制; 影响因素; 电网稳定性; 新能源消纳能力; 风电

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV743

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0107-15



听语音
聊科研
与作者互动

Backstepping sliding mode control of doubly-fed variable-speed pumped storage units

DING Zhixia, FANG Qinyuan, LIU Jian, LI Sai

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract [Objective] Doubly-fed variable-speed pumped storage units have significant value in enhancing the consumption capacity of renewable energy and improving grid stability. However, their complex electromechanical coupling characteristics still pose notable technical challenges. To effectively mitigate power fluctuations from wind and solar power generation, it is necessary to develop a variable-speed pumped storage system that integrates electromechanical dynamic analysis, power decoupling mechanisms, and fast-response control. [Methods] Sliding mode control, as an effective control method for time-varying

收稿日期: 2025-04-11; 修回日期: 2025-05-07; 录用日期: 2025-05-22; 网络出版日期: 2025-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(62176189); 湖北省科技计划项目重点研发专项(2024BAB032)

作者简介: 丁芝侠(1989—), 女, 教授, 博士, 主要从事分数阶神经网络动力学分析及应用、深度学习与类脑智能研究。E-mail: zxding89@163.com

通信作者: 李赛(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事辨识、控制与优化理论研究。E-mail: sli@wit.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

nonlinear systems , exhibits good control performance in variable-speed pumped storage systems , but its inherent chattering issue still affects system regulation accuracy. To address the issue , a backstepping sliding mode control strategy was proposed , which effectively suppressed system chattering and achieved power decoupling control by regulating power transmission between the grid-side and rotor-side converters of the doubly-fed induction generator. Compared with conventional sliding mode control , the proposed approach was validated through simulations under four scenarios: typical steady-state condition , rapid power variation , parameter variation , and wind power-pumped storage hybrid system. [Results]The result showed that under the three scenarios of rapid power variation , parameter variation , and wind power-pumped storage hybrid systems , backstepping sliding mode control could stably track power variations , while traditional sliding mode control lost power tracking capability after 51.154 7 s , 38.438 4 s , and 10 s , respectively. [Conclusion] Compared with traditional sliding mode control , backstepping sliding mode control demonstrates faster power response speed , stronger robustness , and better stability.

Keywords: variable-speed pumped storage; doubly-fed induction generator; backstepping sliding mode control; influencing factors; grid stability; consumption capacity of renewable energy; wind power generation

0 引言

随着全球能源结构转型的深入推进, 能源供给体系已从单一化石能源主导逐步演化为多能互补格局, 涵盖可再生能源、核能、生物质能及多种环境友好型能源形态^[1]。根据国际能源署(IEA)的预测数据(见图1), 在2024—2030年间, 全球可再生能源发电能力预计将增长超过5.52亿kW。这一增量相当于此前六年新增装机容量的2.6倍, 并且预计约95%的新增可再生能源发电能力将来源于太阳能光伏和风力发电^[2]。然而, 风力发电与太阳能光伏发电存在显著的可变性特征, 其受气象条件制约导致的间歇性与波动性, 对新型电力系统稳定性构成严峻挑战。在此背景下, 抽水蓄能技术凭借其卓越的调峰调频能力与储能经济性优势^[3-5], 成为保障电网稳定运行的核心解决方案。根据《抽水蓄能中长期发展规划》战略部署, 我国计划在2025年抽水蓄能投产总规模达到6200万kW以上, 到2030年达到1.2亿kW左右^[6], 标志着我国抽水蓄能事业进入高速发展期。

抽水蓄能机组根据机组类型分为同步机组和变速机组, 目前我国大部分抽水蓄能机组采用恒速同步机组, 但只能以恒定速度运行, 对电网稳定性调节功能较差, 难以满足新型电力系统的要求^[8]。为提升机组动态响应特性和电网适应能力, 变速抽水蓄能

技术已成为行业重点发展方向^[9-11]。现阶段, 变速抽水蓄能机组分为双馈电机机组和全功率机组^[12], 其中双馈电机具有变速恒频、独立有功无功调节、深度进相、稳定运行等能力^[13-15], 故本文研究基于双馈电机的可变速抽水蓄能机组。

双馈变速抽水蓄能机组由水泵-水轮机及其调节系统和双馈电机及其控制系统组成。与传统抽水蓄能机组不同, 常规机组的功率和转速均由水泵-水轮机调节系统中的调速器控制, 而在双馈变速抽水蓄能机组中, 控制策略主要分为功率优先控制和转速优先控制两大类^[16]。相较于转速优先控制, 功率优先控制能够灵活快速地响应电网的有功与无功

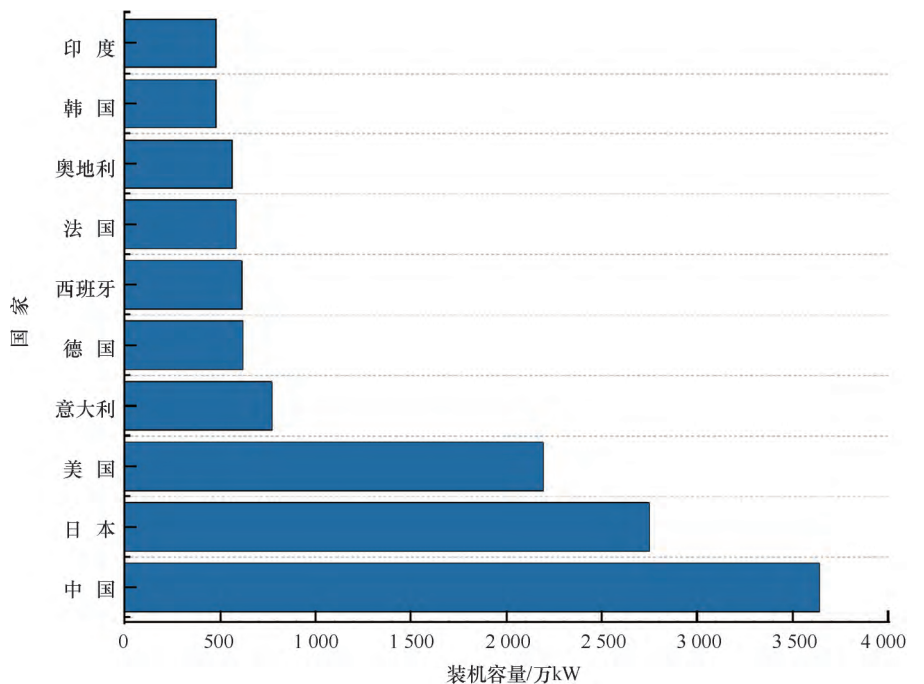


图1 2021年全球抽水蓄能装机量前十国家^[7]

Fig. 1 Top 10 countries by pumped storage installed capacity worldwide in 2021^[7]

功率指令,提升系统动态性能与调节能力^[17-18],因而成为现代抽水蓄能系统中的研究热点。针对双馈变速抽水蓄能机组的功率优先控制策略, HUANG 等^[19-20]构建了一个涵盖液压、机械与电气耦合的变速抽水蓄能机组模型,并分析了其在快速功率控制策略下的功率调节特性; GAO 等^[21]提出了自适应转速回拉控制策略,旨在防止因转速超限而损坏转子侧变流器;而井浩然等^[22]则建立了发电与抽水两种工况下的暂态模型,该模型能够在稳态运行时实现有功与无功的解耦控制,并跟踪最佳导叶开度与最优转速。

然而,上述研究均基于传统 PI 矢量控制框架,该方法在鲁棒性方面存在不足,难以有效应对机组中的扰动和不确定性。滑模控制因其良好的鲁棒性,被认为是时变非线性系统(如双馈感应发电机)的理想控制策略。近年来,许多研究者将滑模控制应用于双馈变速抽水蓄能机组。例如, MERABET 等^[23]设计了一种先进的滑模控制器,以增强机组运行的稳定性; FU 等^[12]则采用了非奇异快速终端滑模控制方法,使机组在面临甩负荷与参数变化等扰动时仍能保持稳定运行;为进一步提升系统容错能力, KUMARI 等^[24]研究了一种二阶自适应滑模控制策略,并设计了相应的冗余电路,确保机组在速度传感器发生遗漏、增益异常及饱和等故障条件下,依然能够维持稳定运行。这些滑模控制方法提升了双馈变速抽水蓄能机组的系统稳定性,但其控制范围仅限于双馈电机的转子侧,且未能有效抑制滑模控制固有的抖振问题。

为进一步改善滑模控制的抖振问题,反步滑模控制通过融合反步控制与滑模控制的优点,有效抑制了传统滑模控制中的抖振现象,显著提升了系统的鲁棒性与稳定性,近年来在无人驾驶系统^[25]、无人帆船系统^[26]、液压系统^[27]和光电跟踪转台^[28]等多个领域广泛应用。本文将反步滑模控制引入双馈变速抽水蓄能机组,充分利用其在抑制抖振方面的优势,进一步提升系统的稳定性和动态性能。通过优化控制策略,该方法不仅在功率跟踪过程中提高了控制精度,还增强了系统在应对外部扰动和参数不确定性方面的鲁棒性。

本文的主要内容如下:第一,建立双馈变速抽水蓄能机组的数学模型,包括电气、水力和机械三大模块;第二,构建风电—变速抽水蓄能混合系统的模型;第三,针对双馈电机的功率控制进行分析,并推导反步滑模控制的数学模型;第四,通过 MATLAB/Simulink 仿真验证反步滑模控制在功率跟踪及抖振抑

制方面的有效性。

1 风电—变速抽水蓄能混合系统

1.1 双馈变速抽水蓄能机组

双馈变速抽水蓄能机组是一个涉及水力、机械和电气的高度耦合的强非线性系统^[29-30]。本文基于双馈电机的动态数学模型,以及转子侧和定子侧变流器的控制策略,并综合考虑电气因素,搭建了双馈电机控制系统模型。本文采用模块化建模思想,考虑水力和机械两大因素,将水泵水轮机、调速器系统进行耦联,搭建水泵水轮机调速系统模型。

1.1.1 电气部分

电气部分包含双馈电机模型和两侧控制模型,其中双馈电机是一个复杂的非线性系统,因此本文在两相旋转 dq 坐标系下建立双馈电机动态模型,主要包括了电压方程、磁链方程、电磁转矩方程与运动方程^[31]。

1.1.1.1 电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为定、转子的 dq 轴电压分量; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定、转子的 dq 轴电流分量; φ_{sd} 、 φ_{sq} 、 φ_{rd} 、 φ_{rq} 分别为定、转子的 dq 轴磁链分量。

1.1.1.2 磁链方程

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \varphi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_m 为转子绕组等效互感; L_s 为等效的定子绕组自感; L_r 为等效的转子绕组自感。

1.1.1.3 转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sd} i_{sq}) \quad (3)$$

式中, T_e 为电磁转矩; n_p 为双馈电机极对数。

1.1.1.4 运动方程

$$T_m - T_e - D\omega_m = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中, T_m 为机械转矩; D 为摩擦系数; J 为转动惯

量。经过推导整理, 可以得到双馈电机定子端输出有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 的计算表达式为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sq} - u_{sq}i_{sd}) \end{cases} \quad (5)$$

1.1.2 水力、机械部分

水力、机械部分分为调速器控制系统、水泵水轮机系统两个模块, 其结构如图 2 所示。

1.1.2.1 水泵水轮机

水泵水轮机各运行变量间的动态关系非常复杂, 通常采用稳态工况下的力矩特性和流量特性表示水泵水轮机动态特性。其数学模型为

$$\begin{cases} m_t = e_y y + e_x x + e_h h \\ q = e_{qy} y + e_{qx} x + e_{qh} h \end{cases} \quad (6)$$

式中, m_t 为力矩偏差相对值; q 为流量偏差相对值; y 为导叶开度偏差相对值; x 为转速偏差相对值; h 为水头偏差相对值; e_y 为力矩对导叶开度的传递系数; e_{qy} 为流量对导叶开度的传递系数; e_x 为力矩对转速的传递系数; e_{qx} 为流量对转速的传递系数; e_h 为力矩对水头的传递系数; e_{qh} 为流量对水头的传递系数。

1.1.2.2 PID 调节器

PID 调节器的控制结构主要分为串联 PID 和并联

PID。串联 PID 控制的比例、积分和微分环节相互影响, 不易调整, 故并联 PID 调节器广泛应用在双馈变速抽水蓄能机组。其传递函数为

$$\sigma_{PID}(s) = \left(K_p + \frac{K_d s}{T_d s + 1} + \frac{K_i}{s} \right) (x_c - x) + b_p (y_c - \sigma_{PID}) \quad (7)$$

式中, T_d 为微分时间常数; b_p 为永态差值系数; σ_{PID} 为电气控制输出。

1.1.2.3 执行机构

PID 控制器输出电信号 σ_{PID} 通过执行机构转换成机械信号 Y , 来调节机组的活动导叶, 实现对机组的精准控制。其传递函数为

$$Y(s) = \left(\frac{k_0}{T_{yB}s + 1} \times \frac{1}{T_y s} \right) (y - \sigma_{PID}) \quad (8)$$

式中, T_{yB} 、 T_y 为主接力器响应时间常数和辅助接力器响应时间常数; k_0 为放大系数; y 为执行机构输出。

1.1.2.4 引水系统

采用近似弹性水机模型^[32]。其传递函数为

$$G_h(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = -h_w \frac{T_r s}{1 + \frac{1}{2} f T_r s + \frac{1}{8} T_r^2 s^2} \quad (9)$$

式中, h_w 为管道特性参数; T_r 为水击相长。

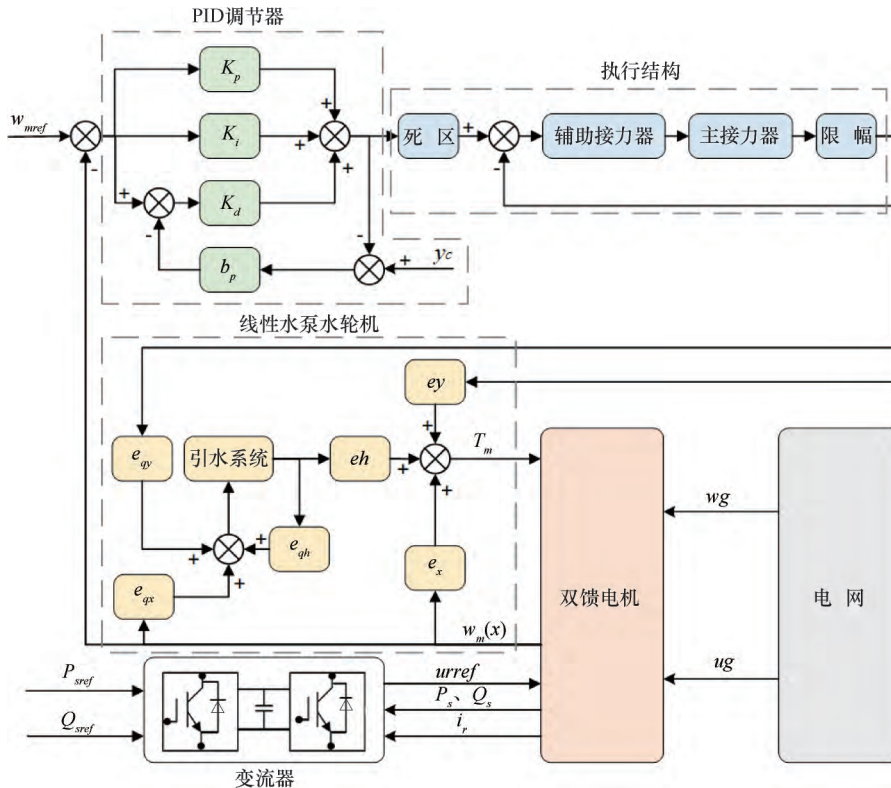


图 2 双馈变速抽水蓄能电站简化的整体控制框图

Fig. 2 Simplified overall control block diagram of doubly-fed variable-speed pumped storage plant

整个水力-机械系统各模块之间存在紧密的动态耦连关系。具体而言,引水系统通过弹性水击模型描述水头变化对流量波动的响应,进而影响水泵水轮机的力矩与流量输出;水泵水轮机将水力势能转换为机械转矩驱动机组运行,其转速变化通过PID调节器生成控制信号;该信号经执行机构转换为导叶开度的物理动作,调节水轮机输入能量,同时水头与流量的动态反馈通过公式(6)耦合至力矩计算。由图2和上述过程可知,转速、水头、导叶开度及流量等物理量形成闭环反馈控制,最终通过水力-机械-电气的多场耦合实现机组功率与转速的精准调控,为反步滑模控制的稳定性设计提供物理基础,确保双馈变速抽水蓄能机组的高效稳定运行。

1.2 风电—变速抽水蓄能混合系统分析

1.2.1 系统介绍

如图3所示,风电—抽水蓄能混合系统整合了风力发电与双馈变速抽水蓄能机组。该系统在提升新能源消纳能力的基础上,进一步增强了电网的调节性能^[33]。风电具有间歇性和随机性,可能导致电网频率波动,而抽水蓄能系统则能够在风能充足时存储电能,在风能不足时释放电能,从而平滑功率输出,降低弃风限电风险。双馈变速抽水蓄能机组具备毫秒级响应能力,能够快速调节功率,提供二次调频和无功支撑,进一步提升电网稳定性。同时,该系统采用双馈电机,通过风能与水能协同发电,实现更高效的能量转换。双馈电机具备变速运行能力,使风机和水轮机能够适应不同的风速和水头变化,并利用部分功率

变流器降低系统损耗,提升整体经济性。

从技术和经济角度来看,该系统均具备较高的可行性。在技术层面,双馈电机使风机与抽水蓄能机组具备灵活的功率调节能力,并支持低电压穿越,提升电网适应性。优化的并网控制策略能够协调风电与抽水蓄能的联合运行,并结合滑模控制和反步滑模控制等先进控制方法,提高系统的动态响应速度和稳定性。在经济层面,相较于电池储能,抽水蓄能系统具备更长的使用寿命和更低的运行成本,适用于大规模风电基地,并能有效减少远距离输电损耗。此外,该系统可享受新能源政策支持,并通过提供电网调频等辅助服务获取额外收益,从而提升经济竞争力。

在适应性方面,风电—抽水蓄能混合系统可兼容交流电网与柔性直流输电等多种输电结构,为高比例新能源电力系统的稳定运行提供技术保障。

1.2.2 风系统部分

1.2.2.1 空气动力学

$$\begin{cases} P_t = \frac{1}{2} C_{p-\max}(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \\ \lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \end{cases} \quad (10)$$

式中, C_p 为功率系数; λ 为相对速度; β 为桨距角;

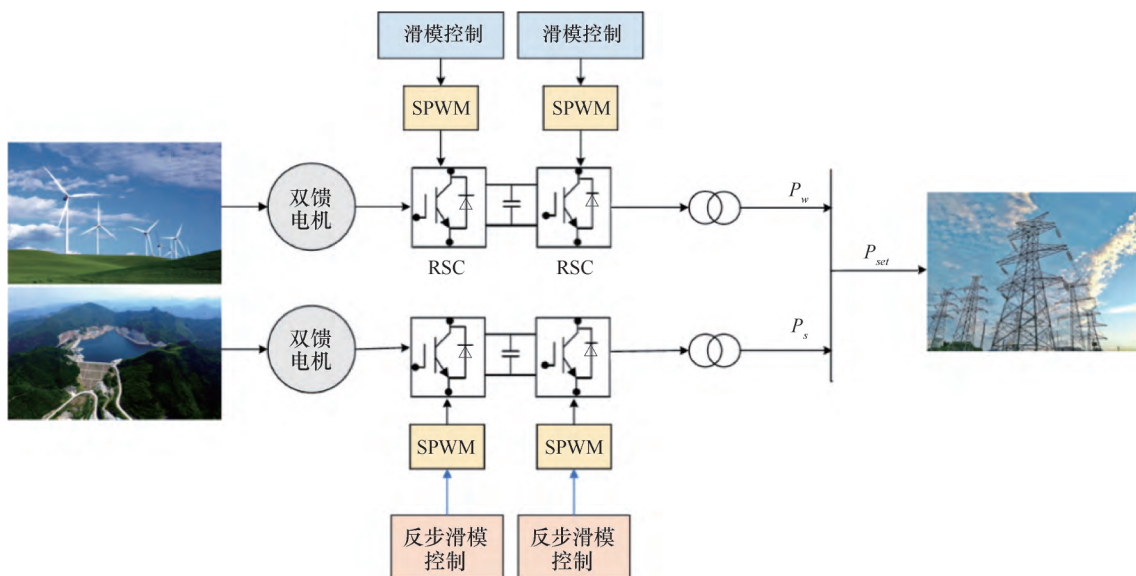


图3 风电—变速抽水蓄能混合系统的控制结构

Fig. 3 Control structure of wind power-variable speed pumped storage hybrid system

ρ 为空气密度; R 为风轮半径; v 为风速; Ω_i 为风轮角速度; $C_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 为常数。

1.2.2.2 气动转矩

$$\begin{cases} T_{em} = \frac{T_i}{G} \\ \Omega_r = \frac{\Omega_r}{G} \end{cases} \quad (11)$$

式中, T_{em} 为发电机转矩; T_i 为气动转矩; G 为齿轮比; Ω_r 为发电机转速。

1.2.2.3 传动链

$$J_w \frac{d\Omega_r}{dt} = T_i - T_{em} - D_i \Omega_r \quad (12)$$

式中, J_w 为风轮惯量; D_i 为风轮外部阻尼。

2 反步滑模控制

为了解决传统滑模控制的抖振问题, 本文提出了反步滑模控制。该控制原理是用反步控制器代替滑模调节器的切换控制来解决抖振问题, 使系统的稳定性和鲁棒性得以保证, 表达式为

$$u = u_{eq} + u_n \quad (13)$$

式中, u_{eq} 为等效函数; u_n 为切换函数。

基于双馈变速抽水蓄能机组运行原理, 本文设计滑模面 S_i 为

$$S_i(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} \times e_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (14)$$

式中, δ 为控制带宽的正增益; $e_i(x)$ 为待调节变量上的差值; r 为相对程度。

根据滑模控制理论^[34], 系统在滑模状态下运行时, 其滑模面及滑模面导数必须满足条件为

$$\begin{cases} \dot{S}_i(x) = 0 \\ S_i(x) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

表 1 符号及物理意义

Table 1 List of symbols

符 号	物理意义	符 号	物理意义
P_s	有功功率	P_g	定子侧有功功率
Q_s	无功功率	Q_g	定子侧无功功率
$i_{rd}、i_{rq}$	转子电流	$i_{gd}、i_{gq}$	电网电流
e_1	有功功率误差	e_5	定子侧有功功率误差
e_2	无功功率误差	e_6	定子侧无功功率误差
$e_3、e_4$	转子电流误差	$e_7、e_8$	电网电流误差
P_{sref}	有功功率设定值	P_{gref}	定子侧有功功率设定值
Q_{sref}	无功功率设定值	Q_{gref}	定子侧无功功率设定值
$i_{rdref}、i_{rqref}$	系统稳定转子电流的虚拟值	$i_{gdref}、i_{gqref}$	系统稳定电网电流的虚拟值
$u_{rdeq}、u_{rqeq}$	转子侧电压等效函数	$u_{gdeq}、u_{gqeq}$	定子侧电压等效函数
$u_{rdn}、u_{rqn}$	转子侧电压切换函数	$u_{gdn}、u_{gqn}$	定子侧电压切换函数
$k_1、k_2、k_3、k_4$	转子侧反步控制增益系数	$k_5、k_6、k_7、k_8$	定子侧反步控制增益系数

滑模控制中切换函数的选择需权衡抖振抑制与控制精度。本文采用符号函数, 因其具备快速收敛与低计算复杂度的优势。尽管符号函数可能引入高频抖振, 但通过反步法的分层控制机制(虚拟参考电流的动态补偿)与 Lyapunov 稳定性约束, 可显著降低抖振幅值。相较于饱和函数与边界层方法, 符号函数更适用于本文的高阶非线性系统, 能够在保证鲁棒性的同时避免稳态误差累积。切换函数公式为

$$u_n = K \times \text{sign}(S_i(x)) \quad (16)$$

式中, K 为控制增益。

由于反步滑模控制同时控制转子侧和定子侧, 推导过程中涉及变量较多, 建立符号表如表 1 所列。

2.1 转子侧反步控制

为了实现双馈变速抽水蓄能机组定子端有功功率、无功功率与转子电流的精准控制, 本文在转子侧采用反步滑模控制策略。首先, 定义有功功率、无功功率、转子电流的误差为

$$\begin{cases} e_1 = P_{sref} - P_s \\ e_2 = Q_{sref} - Q_s \\ e_3 = I_{rqref} - I_{rq} \\ e_4 = I_{rdref} - I_{rd} \end{cases} \quad (17)$$

为实现有功、无功功率与电流稳定跟踪, 设计虚拟控制量为

$$\begin{cases} I_{rqref} = \frac{2L_r L_s \sigma}{3R_r u_s L_m} (\dot{P}_{sref} + k_1 e_1) + \frac{1}{R_r} \left(u_{rq} - L_r \sigma \omega_r I_{rd} - \frac{u_s L_m \omega_r}{L_s \omega_s} \right) \\ I_{rdref} = \frac{2L_r L_s \sigma}{3R_r u_s L_m} (\dot{Q}_{sref} + k_2 e_2) + \frac{1}{R_r} (u_{rd} + L_r \sigma \omega_r I_{rq}) \end{cases} \quad (18)$$

式中, k_1 、 k_2 为正增益。由式(1)至式(5)可推导出有功功率、无功功率、转子电流的导数, 其计算公式为

$$\begin{cases} \dot{P}_s = -\frac{3u_s L_m}{2L_s} \dot{I}_{rq} \\ \dot{Q}_s = \frac{3u_s^2}{2\omega_s L_s} - \frac{3u_s L_m}{2L_s} \dot{I}_{rd} \\ \dot{I}_{rd} = \frac{u_{rd}}{L_r \sigma} - \frac{R_r}{L_r \sigma} I_{rd} + \omega_r I_{rq} \\ \dot{I}_{rq} = \frac{u_{rq}}{L_r \sigma} - \frac{R_r}{L_r \sigma} I_{rq} - \omega_r I_{rd} - \omega_r \frac{L_m u_s}{L_r L_s \sigma \omega_s} \end{cases} \quad (19)$$

由式(15)、式(19)可以得到转子侧等效函数为

$$\begin{cases} u_{rdq} = -\frac{2L_r L_s \sigma}{3L_m u_s} \dot{Q}_{sref} + R_r I_{rd} - L_r \sigma \omega_r I_{rq} \\ u_{rqeq} = -\frac{2L_r L_s \sigma}{3L_m u_s} \dot{P}_{sref} + R_r I_{rq} + L_r \sigma \omega_r I_{rd} + \frac{L_m u_s \omega_r}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (20)$$

根据反步控制思想和双馈电机原理, 为实现误差的快速收敛, 设计转子侧切换函数为

$$\begin{cases} u_{rdn} = L_r \sigma (k_4 e_4 + \dot{I}_{rdref}) + R_r I_{rd} - L_r \sigma \omega_r I_{rq} \\ u_{rqn} = L_r \sigma (k_3 e_3 + \dot{I}_{rqref}) + R_r I_{rq} + L_r \sigma \omega_r I_{rd} + \frac{L_m u_s \omega_r}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (21)$$

式中, k_3 、 k_4 为正增益。综合考虑等效控制与切换控制, 构建 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2} e_4^2 \geq 0$ 。由式(18)至式(21)可得到误差导数, 其计算公式为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \frac{3u_s L_m}{2L_r L_s \sigma} u_{rqn} \\ \dot{e}_2 = \frac{3u_s L_m}{2L_r L_s \sigma} u_{rdn} \\ \dot{e}_3 = -k_3 e_3 + \frac{1}{L_r \sigma} (u_{rqn} - u_{rq}) \\ \dot{e}_4 = -k_4 e_4 + \frac{1}{L_r \sigma} (u_{rdn} - u_{rd}) \end{cases} \quad (22)$$

由式(16)、式(22)可知, 当 $K < 0$ 、 $u_n = u$ 时, Lyapunov 函数导数 $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 + e_4 \dot{e}_4 \leq 0$ 。根据 Lyapunov 稳定性可知, 转子侧控制系统稳定。

2.2 定子侧反步控制

在定子侧控制中, 控制目标是实现定子侧有功功

率、无功功率与转子电流的精准控制, 本文在定子侧采用反步滑模控制策略。首先, 定义定子侧电网有功功率、无功功率、电流的误差为

$$\begin{cases} e_5 = P_{gref} - P_g \\ e_6 = Q_{gref} - Q_g \\ e_7 = I_{rgref} - I_{gq} \\ e_8 = I_{rgref} - I_{gd} \end{cases} \quad (23)$$

i_{gdref} 、 i_{gqref} 为确保电网功率输出符合指令要求, 基于电气特性推导出定子侧虚拟参考电流, 具体公式为

$$\begin{cases} I_{gqref} = -\frac{2L_g}{3R_g u_s} (\dot{P}_{gref} + k_5 e_5) - \frac{1}{R_g} (u_{gq} + L_g \omega_g I_{gd} - u_s) \\ I_{gdref} = -\frac{2L_g}{3R_g u_s} (\dot{Q}_{gref} + k_6 e_6) - \frac{1}{R_g} (u_{gd} - L_g \omega_g I_{gq}) \end{cases} \quad (24)$$

式中, k_5 、 k_6 为正增益; i_{gdref} 、 i_{gqref} 通过实时功率指令与电压状态计算得出, 引导实际电流跟随预期轨迹。

由式(1)至式(5)可推导出定子侧有功功率、无功功率、电流的导数, 其计算公式为

$$\begin{cases} \dot{P}_g = \frac{3}{2} u_s \dot{I}_{gq} \\ \dot{Q}_g = \frac{3}{2} u_s \dot{I}_{gd} \\ \dot{I}_{gq} = -\frac{u_{gq}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g} I_{gq} - \omega_g I_{gd} + \frac{u_s}{L_g} \\ \dot{I}_{gd} = -\frac{u_{gd}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g} I_{gd} + \omega_g I_{gq} \end{cases} \quad (25)$$

由式(15)、式(25)可以得到定子侧等效函数为

$$\begin{cases} u_{gdeq} = -\frac{2L_g}{3u_s} \dot{Q}_{gref} - R_g I_{gd} + \omega_g I_{gq} \\ u_{gqeq} = -\frac{2L_g}{3u_s} \dot{P}_{gref} - R_g I_{gq} - L_g \omega_g I_{gd} + u_s \end{cases} \quad (26)$$

根据反步控制思想和双馈电机原理, 设计定子侧切换函数为

$$\begin{cases} u_{gdn} = -L_g (k_8 e_8 + \dot{I}_{gdref}) - R_g I_{gd} + L_g \omega_g I_{gq} \\ u_{gqn} = -L_g (k_7 e_7 + \dot{I}_{gqref}) - R_g I_{gq} - L_g \omega_g I_{gd} + u_s \end{cases} \quad (27)$$

式中, k_7 、 k_8 为正增益。由定子侧控制系统, 设计 Lyapunov 函数 $V_2 = \frac{1}{2} e_5^2 + \frac{1}{2} e_6^2 + \frac{1}{2} e_7^2 + \frac{1}{2} e_8^2 \geq 0$ 。由式(23)至式(27)可得到误差导数, 其计算公式为

$$\begin{cases} \dot{e}_5 = \frac{3u_s}{2L_g}u_{gqn} \\ \dot{e}_6 = \frac{3u_s}{2L_g}u_{gdn} \\ \dot{e}_7 = -k_7e_7 + \frac{1}{L_g}(u_{gqn} - u_{rq}) \\ \dot{e}_8 = -k_8e_8 + \frac{1}{L_g}(u_{gdn} - u_{rd}) \end{cases} \quad (28)$$

由式(16)、式(28)可知, 当 $K < 0$ 、 $u_n = u$ 时, Lyapunov 函数导数 $\dot{V}_2 = e_5\dot{e}_5 + e_6\dot{e}_6 + e_7\dot{e}_7 + e_8\dot{e}_8 \leq 0$, 根据 Lyapunov 稳定性可知, 定子侧系统稳定。

3 仿真分析

为了验证所提出的反步滑模控制方法的性能, 在 MATLAB/Simulink 环境下对双馈变速抽水蓄能机组和风电-抽水蓄能混合系统进行了反步滑模控制方法和传统滑模控制方法的仿真对比研究。

3.1 双馈变速抽水蓄能机组仿真

在双馈变速抽水蓄能机组中, 双馈电机通过 RSC 和 GSC 接入电网, 两者均受反步滑模控制和传统滑模控制控制。为了评估所提出的控制策略, 进行了稳

定性和鲁棒性测试, 证明了反步滑模控制在确保双馈变速抽水蓄能装置的稳定性和鲁棒性方面的有效性。

3.1.1 稳定环境的性能评估

稳态测试对于比较传统滑模控制方法与所提出的反步滑模控制方法的性能至关重要, 主要考察有功功率与无功功率的跟踪精度及抖振水平。图 4 和图 5 可以看出反步滑模控制和传统的滑模控制的无功功率、有功功率跟踪轨迹。无功功率参考值为 0, 有功功率参考值每 20 s 阶跃变化一次分别为: 0、2.5 kW、12 kW。图 4(a) 和图 4(b) 分别为传统的滑模控制和反步滑模控制的无功功率跟踪轨迹, 响应时间分别为 0.151 5 s、0.080 5 s, 标准误差分别为 370.65 W、354.67 W, 均方根误差为 489.01 W、514.14 W; 图 5(a) 和图 5(b) 为有功功率跟踪轨迹, 响应时间分别为 0.060 2 s、0.037 5 s, 标准误差分别为 585.48 W、438.67 W, 均方根误差为 789.54 W、605.55 W, 反步滑模控制有功功率无功功率响应时间更短。从这四个图像可以看出所提出的反步滑模控制在有功功率跟踪和无功功率跟踪方面都表现出比传统滑模控制更优越的性能, 因为反步滑模控制能够更精确地跟踪参考值, 并且抖动更小。传统的滑模控制轨迹中的抖振现象在频率和幅度上都要高得多。

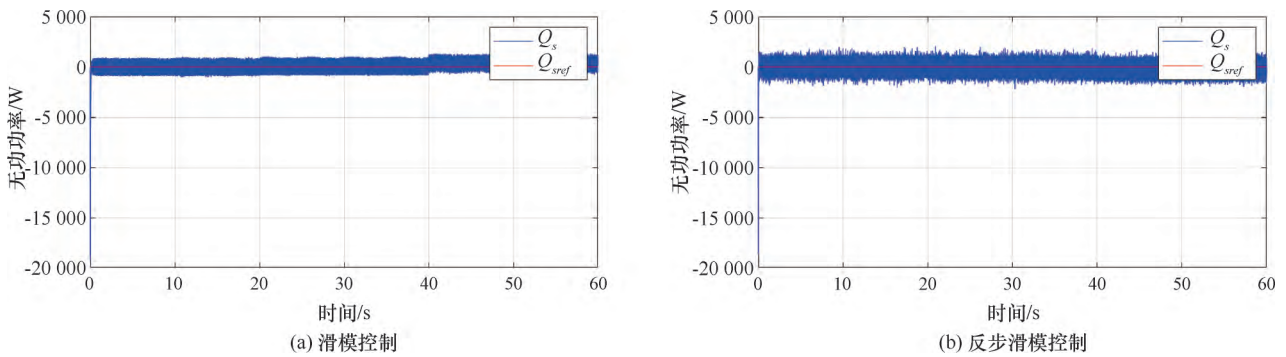


图 4 双馈变速抽水蓄能机组无功功率对比

Fig. 4 Comparison of reactive power in doubly-fed variable-speed pumped storage units

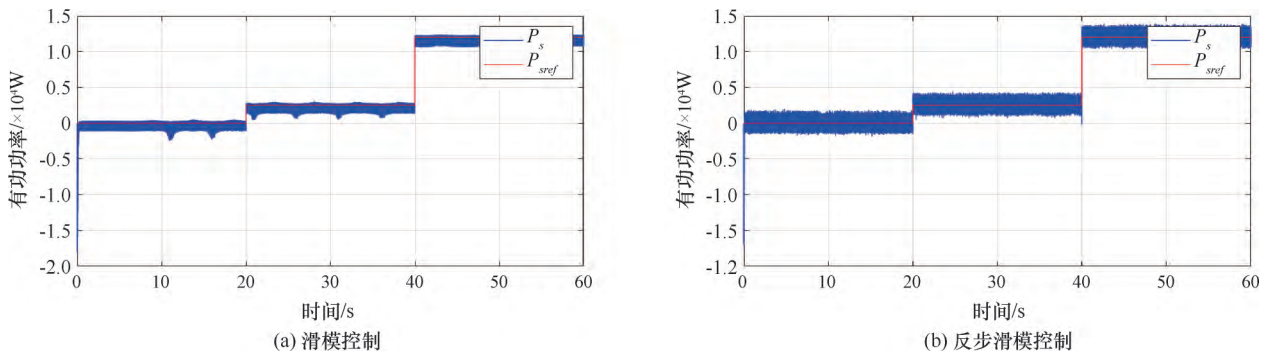


图 5 双馈变速抽水蓄能机组有功功率对比

Fig. 5 Comparison of active power in doubly-fed variable-speed pumped storage units

图 6 和图 7 可以看出反步滑模控制和传统的滑模控制的定子三相电流运行状况和直流母线电压的跟踪轨迹。定子三相电流理想情况下幅值相等、相位互差 120 度的正弦波, 直流稳态母线参考值为 510 V。图 6(a) 和图 6(b) 传统的滑模控制和反步滑模控制为定子三相电流运行状况。图 7(a) 和图 7(b) 分别为传统的滑模控制和反步滑模控制的直流母线电压跟踪轨迹, 跟踪误差分别为 0.649 5% 和 0.309 6%, 反步滑模控制的直流母线电压跟踪误差更低。从这四个图像可以看出所提出的反步滑模控制在直流母线电压跟踪和三相电流方面都表现出比传统滑模控制更优越的性能, 因为反步滑模控制定子侧三相电流运行更趋近于理想情况, 直流母线跟踪误差比传统滑模控制小 0.339 9%。因此, 在稳态环境下, 基于反步滑模控制的功率控制优于传统滑模控制的控制效果。

由于反步滑模控制的计算复杂度显著高于传统滑模控制, 本文利用 Profiler 工具对两种控制策略的仿真执行时间进行了对比, 仿真结果表明反步滑模控制计算量增加, 但反步滑模控制的单步执行时间(转子侧 0.023 ms、定子侧 0.061 ms) 远低于典型采样周期(1 ms), 且现代控制器的运算能力可轻松满足实时性要求。因此, 反步滑模控制在提升控制性能的同时,

具备工程可行性。

3.1.2 变功率下的性能评估

在实际双馈变速抽水蓄能机组运行中, 新能源的随机性导致对双馈变速抽水蓄能机组运行输出功率要求会随机改变。面对功率期望值变化, 双馈变速抽水蓄能机组运行功率能否及时响应跟踪是其控制方法的关键任务之一。图 8 和图 9 展示了传统的滑模控制和反步滑模控制下 DFVSPSU 对变功率的跟踪性能, 无功功率期望值为 0, 有功功率期望值 32 000 组随机数据循环 60 s(1 s 10 000 组数据)。图 8(a) 和图 8(b) 分别为传统的滑模控制和反步滑模控制的无功功率跟踪轨迹, 响应时间分别为 0.061 3 s、0.038 1 s, 标准误差分别为 1 312.17 W、355.78 W, 均方根误差为 1 483.68 W、517.33 W, 在 50 s 之后传统滑模控制崩溃无法跟踪无功功率的期望值。图 9(a) 和图 9(b) 传统的滑模控制和反步滑模控制为有功功率跟踪轨迹, 响应时间分别为 0.174 3 s、0.090 2 s, 标准误差分别为 1 500.42 W、625.46 W, 均方根误差为 1 744.84 W、756.38 W, 在 17 个周期内传统滑模控制崩溃无法跟踪有功功率的期望值。从这四个图像可以看出所提出的反步滑模控制在有功功率和无功功率跟踪方面都表现出比传统滑模控制更优越的性能, 因

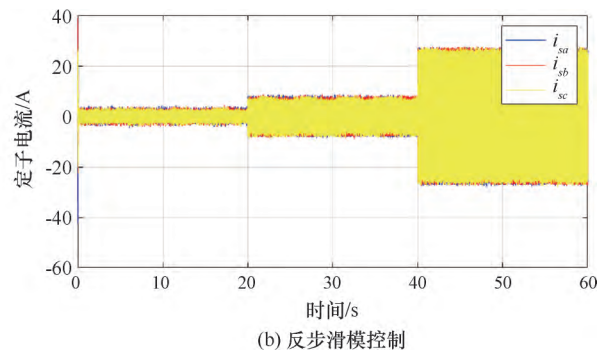
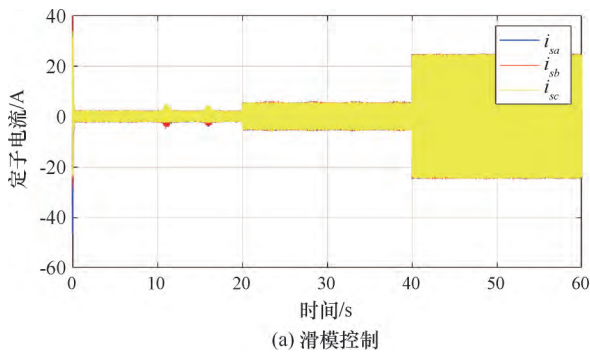


图 6 双馈变速抽水蓄能机组三相电流对比

Fig. 6 Comparison of three-phase current in doubly-fed variable-speed pumped storage units

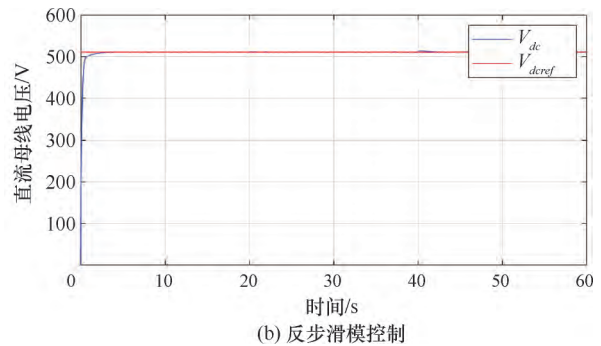
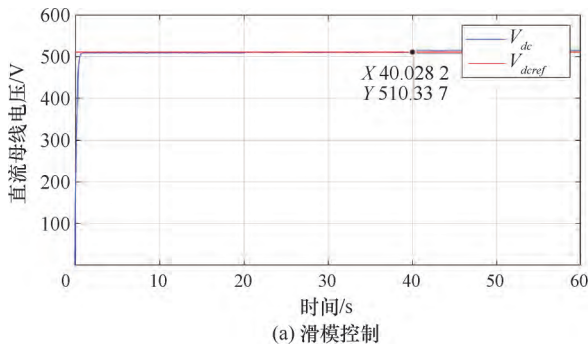


图 7 双馈变速抽水蓄能机组直流稳态电压对比

Fig. 7 Comparison of DC steady-state voltage of doubly-fed variable-speed pumped storage units

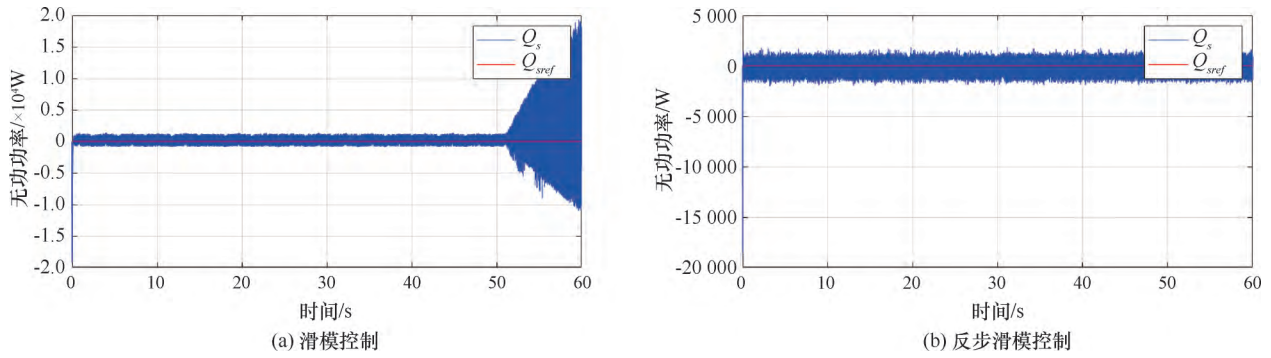


图8 变功率下双馈变速抽水蓄能机组的无功功率对比

Fig. 8 Comparison of reactive power under variable power conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

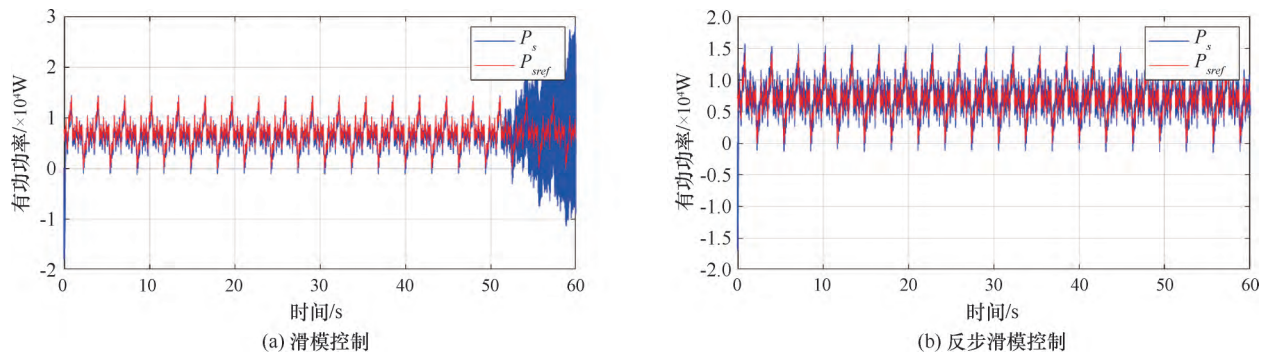


图9 变功率下双馈变速抽水蓄能机组的有功功率对比

Fig. 9 Comparison of active power under variable power conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

为反步滑模控制能稳定跟踪有功功率和无功功率。

图10和图11可以看出反步滑模控制和传统的滑模控制的直流母线电压的跟踪轨迹和定子三相电流运行状况。图10(a)和图10(b)传统的滑模控制和反步滑模控制为定子三相电流运行状况;图11(a)和图11(b)分别为传统的滑模控制和反步滑模控制的直流母线电压跟踪轨迹。滑模控制在51.1547 s之后无法继续跟踪直流母线电压期望值,直观表明机组逐步崩溃。与之对比,采用反步滑模

控制后,机组三相电流即使在故障扰动后仍保持较好的稳定性,仅在短暂过渡期内出现小幅波动;直流母线电压在反步滑模控制作用下,跟踪误差为0.3531%,整体响应速度更快,稳态稳定性更好。从这4个图像可以看出所提出的反步滑模控制在直流母线电压跟踪和三相电流方面都表现出比传统滑模更优越的性能,因为反步滑模控制的直流母线电压能稳定跟踪,三相电流能稳定运行。

传统滑模控制在51.1547 s后失稳,主要因其高

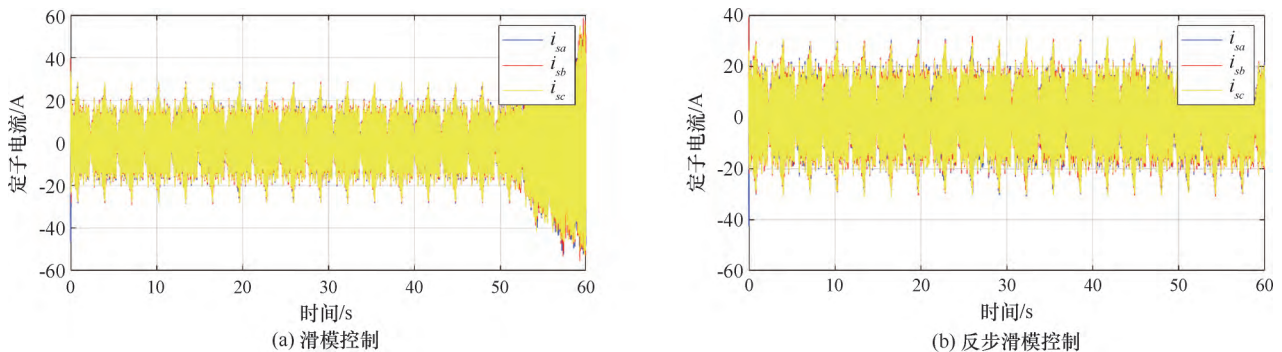


图10 变功率下双馈变速抽水蓄能机组的三相电流对比

Fig. 10 Comparison of three-phase current under variable power conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

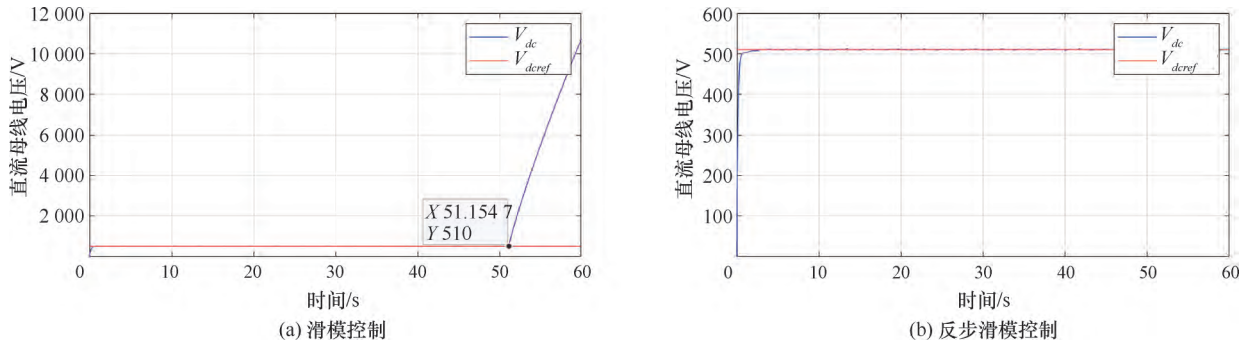


图 11 变功率下双馈变速抽水蓄能机组的直流稳态电压对比

Fig. 11 Comparison of DC steady-state voltage under variable power conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

频抖振放大了功率随机波动引起的参数敏感性，导致电流畸变与能量累积 [见图 10(a) 与图 11(a)]。反步滑模控制通过分层解耦、虚拟补偿及 Lyapunov 稳定性约束，将抖振抑制在局部子系统，并动态调节控制增益，从而在相同扰动下维持直流母线电压误差低于 0.35% [见图 11(b)]，定子电流平稳运行 [见图 10(b)]。

3.1.3 参数变化下的性能评估

为了显示所提出的方法在最坏情况仿真场景下的

性能，在仿真中模拟了参数扰动。 L_m 、 L_s 、 L_r 、 R_s 和 R_r 的参数增加标称值的 50%。从图 12~图 15 可知采用传统滑模控制时，在 38.4383 s 后直流母线电压和定子电流受影响较大，有功和无功功率跟踪曲线存在两级高频抖动，机组逐步崩溃；采用反步滑模控制时，依旧能稳定跟踪有功功率、无功功率、直流母线电压，定子三相电流按照理想情况运行。与传统滑模控制方法相比，反步滑模控制具有跟踪性能好、稳定性好的优点。

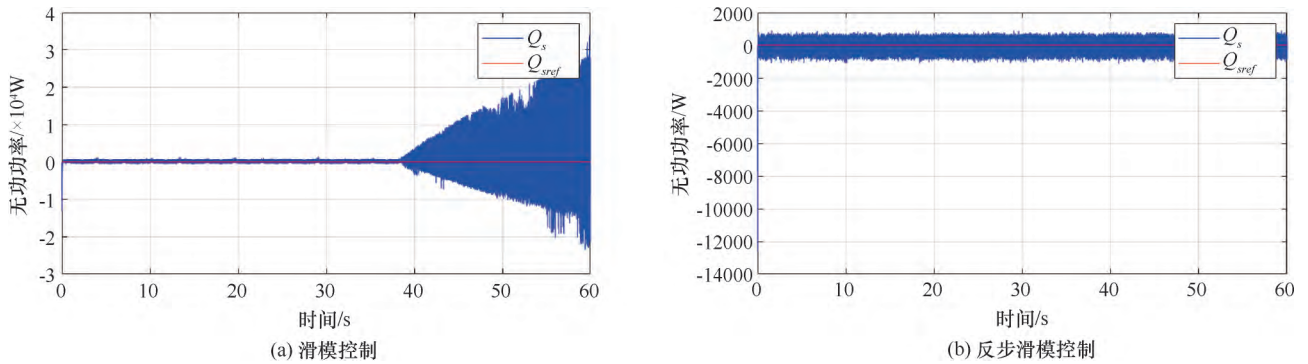


图 12 参数变化下双馈变速抽水蓄能机组的无功功率对比

Fig. 12 Comparison of reactive power under parameter variation conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

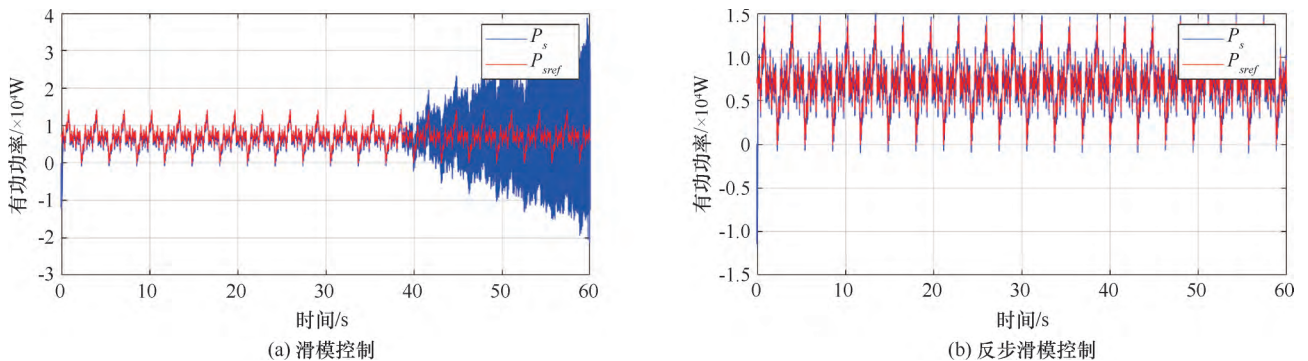


图 13 参数变化下双馈变速抽水蓄能机组的有功功率对比

Fig. 13 Comparison of active power under parameter variation conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

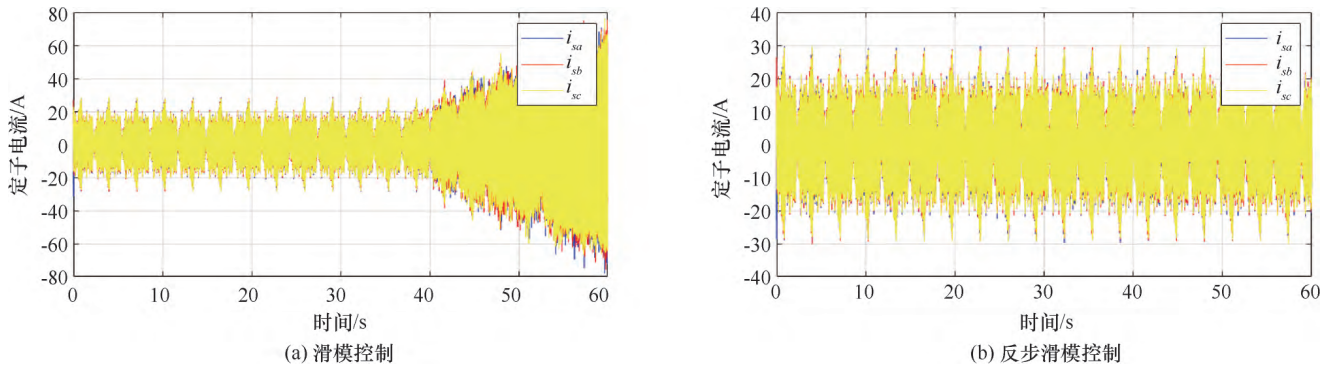


图 14 参数变化下双馈变速抽水蓄能机组的三相电流对比

Fig. 14 Comparison of three-phase current under parameter variation conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

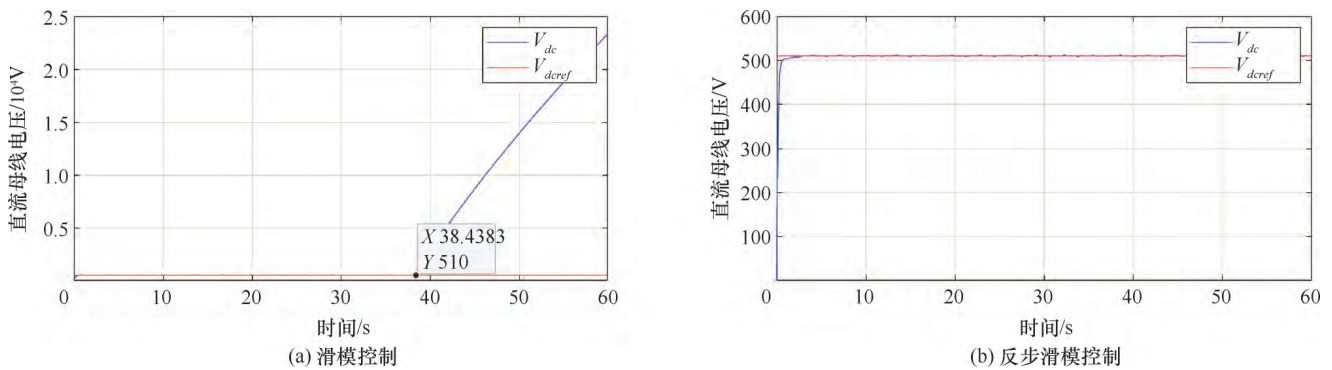


图 15 参数变化下双馈变速抽水蓄能机组的直流稳态电压对比

Fig. 15 Comparison of DC steady-state voltage under parameter variation conditions in doubly-fed variable-speed pumped storage units

3.2 风电—变速抽水蓄能混合系统仿真

在风电—变速抽水蓄能混合系统中, 风电系统的双馈电机的 RSC 和 GSC 均为传统滑模控制, 双馈变速抽水蓄能的双馈电机通过 RSC 和 GSC 接入电网受反步滑模控制和传统滑模控制。在实际场景中, 风速具有其固有的随机特性。在仿真中加入了 60 000 组随机风速数据(6 s 为一周期), 期望发电量为 20 kW。图 16(a) 展示了风电系统产能, 根据其与其期望发电量之间差值确定双馈变速抽水蓄能需发电量。图 16(b) 和图 16(c) 分别为在传统滑模、反步滑模控制下双馈变速抽水蓄能对功率的跟踪性能。从这三个图像可以看出所提出的反步滑模控制在功率跟踪方面都表现出比传统滑模控制更优越的性能, 因为反步滑模控制能稳定跟踪风电产能变化。

4 结论

本文提出了一种基于反步滑模控制的双馈变速抽水蓄能机组 RSC 与 GSC 联合控制策略, 并在 MATLAB/Simulink 平台上对其性能进行了全面仿真验证。研究表明, 与传统滑模控制相比, 反步滑

模控制在稳态运行、变功率调节及参数扰动等复杂工况下均展现出优越的控制性能。

在稳态运行测试中, 反步滑模控制显著提高了有功功率与无功功率的跟踪精度, 有功功率响应速度提升约 37.7%, 无功功率响应速度提升约 46.9%, 并有效抑制了系统抖振。此外, 采用反步滑模控制时, 直流母线电压的稳态误差降低了约 52.3%, 三相电流运行更加平稳, 进一步验证了该控制策略在长期稳定运行中的可靠性。在变功率测试中, 反步滑模控制能够精准响应功率的随机变化, 有功功率响应时间缩短约 48.3%, 无功功率响应时间缩短约 37.8%, 而传统滑模控制在大幅功率波动下在 51.1547 s 后发生控制失效, 无法持续跟踪目标功率值。这一结果表明, 反步滑模控制具备更强的动态适应能力, 适用于新能源发电波动性较大的应用场景。在参数扰动测试中, 反步滑模控制仍能保持稳定的有功功率、无功功率及直流母线电压跟踪能力, 而传统滑模控制在 38.4383 s 后出现直流母线电压和定子电流波动, 有功功率、无功功率曲线产生两级高频抖动, 系统逐步崩溃, 进一步验证了反步滑模控制在参数不确定性

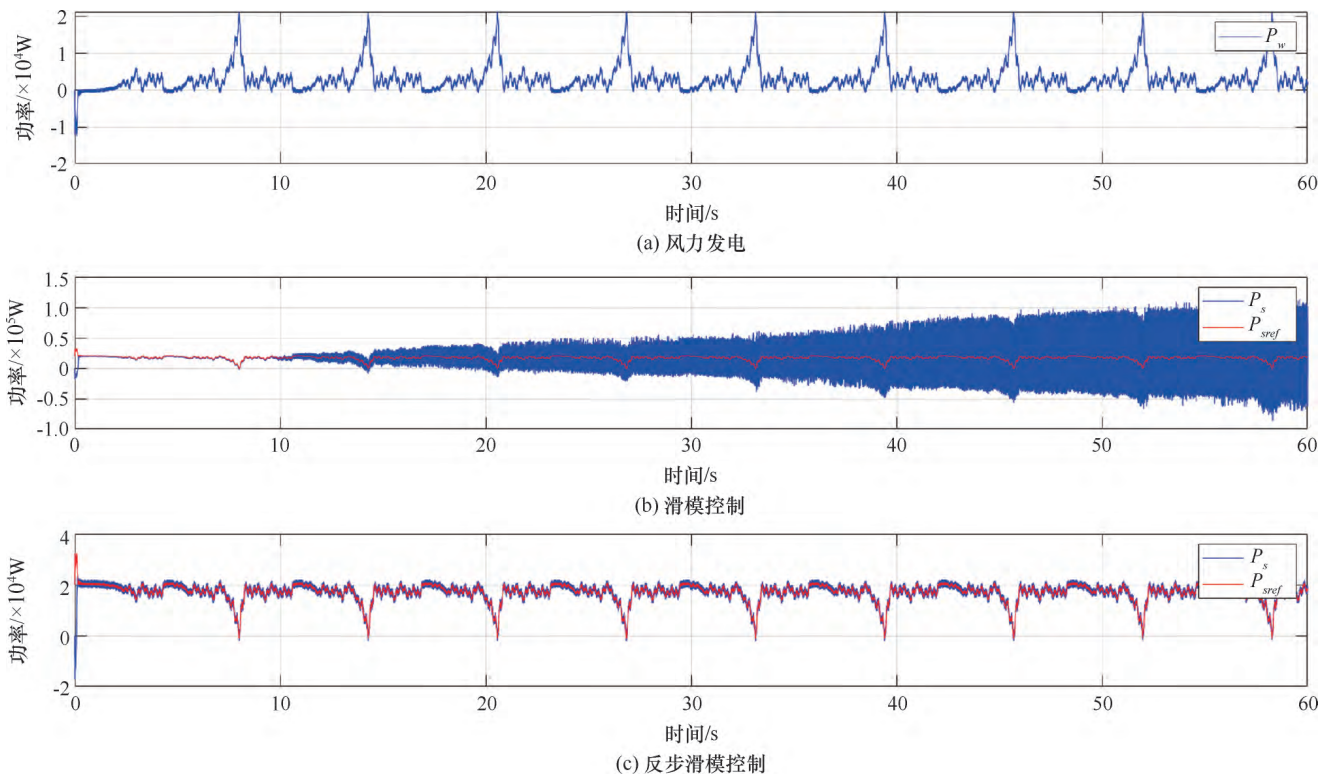


图 16 风电—变速抽水蓄能混合系统各部分功率对比

Fig. 16 Power comparison of each part in wind power-variable speed pumped storage hybrid system

条件下的强鲁棒性。在风电—双馈变速抽水蓄能混合系统仿真中,反步滑模控制通过双馈变速抽水蓄能机组的灵活调节,有效补偿了风电功率波动,提升了系统整体的功率跟踪能力和并网稳定性。

综上所述,反步滑模控制在功率跟踪精度、抗扰能力及系统鲁棒性方面均显著优于传统滑模控制,能够有效增强双馈变速抽水蓄能系统的运行稳定性,并提高新能源的消纳能力。因此,该方法在工程应用中具有广阔的应用前景,特别适用于高渗透率新能源电力系统的优化调控。未来研究可进一步结合智能优化算法或自适应控制方法,以提升反步滑模控制的实时调整能力,并拓展其在多源互补能源系统中的应用潜力。

参考文献(References):

- [1] 于俊崇,梁禹. 实现“双碳”目标的意义与挑战[J]. 核科学与工程,2024,44(4): 723-729.
YU J C, LIANG Y. The significance and challenges of achieving “dual carbon” goals[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 44(4): 723-729.
- [2] IEA. Renewable energy progress tracker [EB/OL]. (2024-12-06) [2025-05-25]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>.
- [3] LU B, BLAKERS A, STOCKS M, et al. Low-cost, low-emission 100% renewable electricity in Southeast Asia supported by pumped hydro storage[J]. Energy, 2021, 236: 121387.
- [4] JAVED M S, MA T, JURASZ J, et al. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives[J]. Renewable Energy, 2020, 148: 176-192.
- [5] LI X D, YANG W J, ZHAO Z G, et al. Advantage of priority regulation of pumped storage for carbon-emission-oriented co-scheduling of hybrid energy system[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106400.
- [6] 韩冬,赵增海,严秉忠,等. 2021年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电,2022,48(5): 1-4.
HAN D, ZHAO Z H, YAN B Z, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(5): 1-4.
- [7] 赵增海. 抽水蓄能电站发展形势与展望[EB/OL]. (2021-09-17) [2025-05-25]. <http://www.creei.cn/web/content.html?id=3634>.
ZHAO Z H. Development and prospect of pumped storage hydropower [EB/OL]. (2021-09-17) [2025-05-25]. <http://www.creei.cn/web/content.html?id=3634>.
- [8] 朱子怡,姜尧林,刘舒然,等. 小水电机组的最优导叶开度变速运行控制策略研究[J]. 水力发电学报,2025,44(4): 118-129.
ZHU Z Y, LOU Y L, LIU S R, et al. Variable-speed operation

- control strategy for small hydropower generators based on optimal guide vane openings [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2025, 44(4): 118-129.
- [9] 韩继超, 戚海铭, 李沅橙, 等. 大型变速抽水蓄能电机在电动机工况不同转速下磁密与损耗研究 [J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(2): 47-54.
- HAN J C, QI H M, LI Y C, et al. Study of flux density and losses at different speeds of variable speed pumped storage generator-motor under motor operating condition [J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(2): 47-54.
- [10] 袁静, 杭晨阳, 方杰, 等. 抽水蓄能电站技术供水系统智能调节方法研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(10): 148-155.
- YUAN J, HANG C Y, FANG J, et al. Research of intelligent adjustment method for technical water supply system of pumped storage power station [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(10): 148-155.
- [11] 郑晶星, 陈健华, 黄文锋, 等. 抽水蓄能电站水道竖井建设关键技术优化 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(S2): 329-339.
- ZHENG J J, CHEN J H, HUANG W F, et al. Optimization of key technologies of penstock shaft construction for a pumped storage power station [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(S2): 329-339.
- [12] FU J N, YU X Y, GAO C Y, et al. Nonsingular fast terminal control for the DFIG-based variable-speed hydro-unit [J]. *Energy*, 2022, 244: 122672.
- [13] KOUGIAS I, AGGIDIS G, AVELLAN F, et al. Analysis of emerging technologies in the hydropower sector [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109257.
- [14] VASUDEVAN K R, RAMACHANDARAMURTHY V K, VENUGOPAL G, et al. Variable speed pumped hydro storage: A review of converters, controls and energy management strategies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110156.
- [15] WANG R, YANG W J, JI L T, et al. Regulation intensity assessment of pumped storage units in daily scheduling for renewable energy consumption [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 56: 103027.
- [16] YANG W J, YANG J D. Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment [J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 720-732.
- [17] KUMAR M, DAS S. Modified active power-MRAS for limited range variable speed sensorless brushless doubly-fed reluctance machine drive [J]. *COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2023, 42(2): 425-448.
- [18] GUAN W D, ZHANG J S, WANG P, et al. Head variation adaptive control of small-scale doubly-fed pumped storage units [J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 239: 111277.
- [19] HUANG Y F, YANG W J, ZHAO Z G, et al. Active power fluctuations and control in hydraulic disturbance of variable speed pumped storage plants [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60: 106666.
- [20] HUANG Y F, YANG W J, ZHAO Z G, et al. Dynamic modeling and favorable speed command of variable-speed pumped-storage unit during power regulation [J]. *Renewable Energy*, 2023, 206: 769-783.
- [21] GAO C Y, YU X Y, NAN H P, et al. Rotating speed pulling-back control and adaptive strategy of doubly-fed variable speed pumped storage unit [J]. *Renewable Energy*, 2024, 232: 121044.
- [22] 井浩然, 李佳, 赵红生, 等. 双馈变速抽水蓄能全工况转换过程建模与仿真 [J]. *电力建设*, 2023, 44(10): 41-50.
- JING H R, LI J, ZHAO H S, et al. Modeling and simulation of operating condition conversion of doubly-fed variable speed pumped storage [J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(10): 41-50.
- [23] MERABET A, ESHAFT H, TANVIR A A. Power-current controller based sliding mode control for DFIG-wind energy conversion system [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(10): 1155-1163.
- [24] KUMARI R, RAJ CHELLIAH T. Design and implementation of a redundant control system for variable speed hydro generators [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 156: 109710.
- [25] LI C M, ZHANG B L, CAO Y L, et al. Reinforcement learning-based backstepping sliding mode heading control for unmanned sailboats [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 327: 120936.
- [26] 林葵, 郝明彪, 王天成, 等. 基于反步滑模法的无人驾驶车辆横向稳定性控制 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(10): 497-506.
- LIN F, HAO M B, WANG T C, et al. Lateral stability control of autonomous vehicle based on backstepping sliding mode method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(10): 497-506.
- [27] DANG X J, ZHAO X A, DANG C, et al. Incomplete differentiation-based improved adaptive backstepping integral sliding mode control for position control of hydraulic system [J]. *ISA Transactions*, 2021, 109: 199-217.
- [28] 韩思凡, 秦超, 徐安鹏, 等. 光电跟踪转台反步滑模控制策略研究 [J]. *电光与控制*, 2023, 30(7): 95-99.
- HAN S F, QIN C, XU A P, et al. Reverse sliding mode control strategy of photoelectric tracking turntable [J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(7): 95-99.
- [29] LIU M Y, WANG P L, GE C C, et al. An additional guide vane opening control for doubly-fed variable-speed pumped hydro storage to improve frequency response [J]. *Energy*, 2025, 324: 135973.
- [30] ZHANG P C, CHENG Y G, HU Z A, et al. CFD-based hydraulic-mechanical-electrical coupled simulation method for variable-speed pumped storage units [J]. *Energy*, 2025, 329: 136701.
- [31] HU J M, TAO D J, SUN Y T, et al. Analysis of operating

- characteristics of variable speed pumped storage motor-generator [J]. IEEE Access , 2023 , 11: 52117-52128.
- [32] 杨欣. 水泵水轮机全特性空间曲面描述与水力过渡过程调节控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- YANG X. Deal on Characteristic Curves of Pump-turbine & Study on the Regulating Control of Hydraulic Transients [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology , 2012.
- [33] WANG H , LI C S , TAN X Q , et al. Multi-timescale analysis and quantification of dynamic regulation characteristics of DFIM-based variable-speed pumped storage units in alleviating wind power fluctuations [J]. Journal of Energy Storage , 2024 , 88: 111482.
- [34] 张庆超, 马瑞卿, 皇甫宜耿, 等. 电机转速环节 Super-Twisting 算法二阶滑模控制律设计与研究 [J]. 西北工业大学学报, 2016 , 34(4) : 669-676.
- ZHANG Qingchao , MA Ruiqing , HUANGFU Yigeng , et al. Second-order sliding mode control based on Super-Twisting algorithm for the speed outer loop of motors [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University , 2016 , 34(4) : 669-676.

(责任编辑 王海锋)