

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250491

基于 SPSM-MPC 的海上风电系统陆上换流站优化控制策略

李慧¹, 钱磊¹, 范新桥¹, 魏玲²

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 102206; 2. 中国电力企业联合会电力发展研究院, 北京 100053)

摘要: 海上风电并网系统中基于模块化多电平换流器的陆上换流站, 在风电出力突变、设备投切及电网电压跌落等工况下易引发扰动。针对此问题, 提出一种融合斜率无源滑模与模型预测控制(slope passivity-based sliding mode-model predictive control, SPSM-MPC)的优化策略。该策略以电流内环控制为核心, 采用无源滑模(passivity-based sliding mode, PSM)控制搭建基础框架, 通过引入斜率调节机制构建斜率无源滑模(slope passivity-based sliding mode, SPSM)控制策略。并将模型预测控制(model predictive control, MPC)有机嵌入调制算法体系。利用仿真模型对比传统 PI、PSM 与 SPSM-MPC 这 3 种策略在系统正常运行及 3 种典型扰动工况下的动态性能。结果表明: SPSM-MPC 策略可将系统稳态运行输出电流 THD 降至 4.45%, 风电出力突变响应时间缩短至 2 ms, 电网电压跌落工况下有功稳定时间缩短至 0.15 s。SPSM-MPC 策略通过斜率机制与预测控制的协同作用, 有效提升了系统在动态扰动下的鲁棒性, 为海上风电并网系统的稳定运行提供了新的控制方案。

关键词: 风电并网; 模块化多电平换流器; 无源滑模控制; 模型预测控制; 最近电平逼近调制

Optimized control strategy for onshore converter stations of offshore wind power systems based on SPSM-MPC

LI Hui¹, QIAN Lei¹, FAN Xinqiao¹, WEI Ling²

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China;
2. Electric Power Development Research Institute, CEC, Beijing 100053, China)

Abstract: In offshore wind power grid-connected systems, onshore converter stations based on modular multilevel converters are prone to disturbances under operating conditions such as sudden variations in wind power output, equipment switching, and grid voltage sags. To address this issue, an optimized control strategy integrating slope passivity-based sliding mode control and model predictive control (SPSM-MPC) is proposed. The strategy is centered on inner current loop control. A passivity-based sliding mode (PSM) controller is first employed to establish the basic control framework, upon which a slope regulation mechanism is introduced to construct the slope passivity-based sliding mode (SPSM) control strategy. Meanwhile, model predictive control (MPC) is organically embedded into the modulation algorithm framework. Simulation models are used to compare the dynamic performance of three control strategies: conventional PI, PSM, and SPSM-MPC, under normal system operation and three typical disturbance conditions. The results show that the SPSM-MPC strategy reduces the steady-state output current THD to 4.45%, shortens the response time to sudden wind power variations to 2 ms, and reduces the active power stabilization time to 0.15 s under grid voltage sag conditions. Through the synergistic effect of the slope mechanism and predictive control, the SPSM-MPC strategy effectively enhances system robustness under dynamic disturbances, providing a new control scheme for the stable operation of offshore wind power grid-connected systems.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Beijing (No. 3232045).

Key words: wind power grid connection; modular multilevel converter; passivity-based slide mode control; model predictive control; nearest level modulation

0 引言

随着新能源发电技术的蓬勃发展, 以风能、太

阳能为代表的可再生能源在电力系统中的渗透率持续提升, 其并网消纳问题的重要性日益凸显。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)作为海上风电与陆地电网互联的核心设备, 其动态性能直接决定了系统稳定性与电能质量水平。然而,

基金项目: 北京市自然科学基金项目资助(3232045)

海上风电并网系统中的陆上换流站不仅需要应对风力发电固有的波动性与间歇性,还需应对由海风风速突变、阵风效应引发的频繁功率波动;加之其通常接入远离负荷中心的弱电网,缺少强电网支撑,因此对电压调节与系统稳定的要求更为严苛,也更易受到各类扰动影响。这使得 MMC 并网逆变器在运行中面临多重技术挑战——诸如风电出力突变、设备投切、电压跌落等干扰,不仅会影响逆变器的正常工作,严重时甚至可能导致系统失稳^[1-3]。

为了应对这些挑战,国内外学者们围绕并网逆变器控制策略展开了广泛研究,目前相关研究主要聚焦于抑制各种振荡的补偿技术。文献[4]提出了一种附加前馈振荡抑制措施,通过直接注入补偿信号来抑制特定频率扰动。但是,此类方法高度依赖于精确扰动的建模。为降低对高精度控制器模型的依赖性,文献[5]利用自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)通过反馈补偿的方式提高了逆变器输出的电能质量。然而,补偿类方法极易产生补偿偏差,降低补偿技术对系统扰动的抑制效果。文献[6]提出一种基于扰动观测器(disturbance observer, DOB)的补偿策略,通过实时估计与抵消扰动以提升系统鲁棒性。可是,DOB 存在动态响应速度与稳态精度的固有矛盾,尤其在快速时变扰动下易产生相位滞后,限制了其在工程中的应用。文献[7]通过组合 PI 调节器的前馈补偿与全状态反馈补偿来平衡系统动态响应与稳态精度之间的矛盾,但是线性 PI 控制器的固定参数整定难以适应 MMC 并网逆变器这类非线性时变系统的动态特性,会导致系统鲁棒性受限。

滑模控制是一种具有强鲁棒性的非线性控制方法,它采用变结构控制机理通过预设的滑动模态自适应地补偿其扰动参数,能有效克服系统的不确定性,在高速动车^[8]、无人机^[9-10]等领域中得到了广泛应用。文献[11]针对基于磁链在线辨识的异步电机超螺旋滑模控制问题,设计了一种改进的超螺旋滑模速度控制器(improved super-twisting sliding mode speed controller, IMSTSMC),显著提升了系统的控制精度和参数鲁棒性。文献[12]针对构网型变流器在电网对称故障下暂态功角失稳和故障电流越限问题,将改进型积分滑模面引入控制结构中,有效提高了构网型变流器的故障穿越能力及故障切除后的恢复速率。

MMC 作为典型的非线性系统,其开关动态特性、子模块电容电压耦合特性以及复杂工况下的强不确定性,对控制策略的鲁棒性与非线性适应能力提出了更高要求。滑模控制在解决 MMC 环流抑制、

故障诊断、不平衡工况下的功率控制等关键问题中已展现出显著优势。文献[13]针对 MMC 子模块数量较多、故障难以定位的问题,提出了一种基于子模块电压滑模观测器与桥臂电流滑模观测器的故障交叉诊断与定位方法,实现了单一子模块故障时的精确定位。针对 MMC 内部环流导致系统损耗增加的问题,文献[14-15]以滑模控制为基础,通过设计非线性控制器实现对环流的快速跟踪与抑制,优化 MMC 运行性能,降低了功率损耗,提高了系统鲁棒性。文献[16]针对风力发电并网系统在面对扰动时易发生频率偏差等问题,提出了一种基于虚拟同步发电机的内模-滑模 MMC 控制策略,它将滑模控制与虚拟同步发电机技术、内模控制相融合,增强了 MMC 在风电功率波动和电网扰动下的鲁棒性,保障了系统高效运转。文献[17]提出一种适应电网电压不平衡工况下的滑模变结构控制策略,它是以功率平衡、电流谐波抑制等控制目标设定参考值,采用滑模变结构控制器来快速跟踪参考值,实现对 MMC 的精准控制,改善了电能质量,提升了系统稳定性。文献[18]提出了一种分数阶积分滑模控制策略,以提升系统在不平衡条件下的 MMC 动态性能,通过运用分数阶微积分记忆特性,控制 MMC 交流侧输出电流与直流侧环流,削减了谐波含量,提高了电能质量。为了改善非理想条件下基于 MMC 的电力电子变压器动态性能,文献[19]将基于 MMC 的欧拉-拉格朗日模型的无源控制器用于内环电流控制,并与滑模控制相结合,克服了无源控制依赖系统参数的弊端,增强了系统的抗干扰能力,加快了响应速度。

尽管滑模控制具有强鲁棒性这一显著优势,但其趋近律的离散性会导致系统不可避免地存在抖振问题。当前解决抖振问题的方法大致有两种:1)改进控制律以实现切换函数的连续化^[20-22],但该方法会牺牲滑模控制的强鲁棒性;2)引入高阶滑模算法^[23-25],将切换项置于滑模变量的高阶导数中,借积分滤波来削弱抖振,不过该模型较复杂,求解难度较大。

本文以提升海上风电系统陆上换流站中 MMC 并网逆变器的动态性能为研究核心,将无源滑模(passivity-based sliding mode, PSM)控制应用于电流内环控制架构。在此基础上,引入斜率调节机制,通过简洁高效的优化路径,有效抑制传统滑模控制中普遍存在的抖振问题。同时,在调制环节融入模型预测控制(model predictive control, MPC)技术,进一步提升海上风电并网电能质量。两种控制策略有机结合,构建起强鲁棒性与高精度兼容的复合控制

体系,旨在为新能源并网消纳领域提供更具优势的控制解决方案。

1 基于 MMC 并网逆变器的无源模型

在海上风电柔性直流外送系统中,各功能单元协同构建能量传输网络,其系统拓扑结构如图 1 所示,主要包括海上风电场、海上升压变压器、交流海缆、海上换流站及陆上换流站等关键环节。

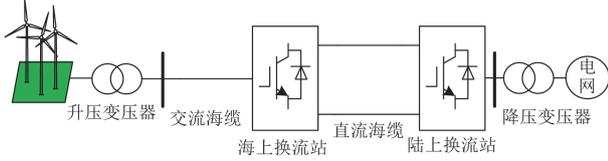


图 1 海上风电柔性直流输电系统

Fig. 1 Offshore wind power flexible DC transmission system

陆上换流站作为海上风电柔性直流外送系统与陆上交流电网的核心衔接枢纽,其控制策略的优化设计不仅直接影响并网点电能质量与系统动态稳定性,还深刻影响交直流混联电网的交互协调能力。为实现精准高效的控制目标,无源控制(passivity-based control, PBC)策略从能量流动本质出发,通过预先规划能量分配路径、引入阻尼调节机制,驱动系统状态变量误差逐步收敛至 0,在理想工况下能够有效保障系统的稳定运行。鉴于此,本文首先构建基于 MMC 并网逆变器的无源数学模型。

图 2 为 MMC 并网逆变器的单相拓扑。其中: R_0 和 L_0 分别为桥臂电阻和电感; i_{pj} 和 i_{nj} 分别为上下桥臂电流($j = a, b, c$); u_{pj} 和 u_{nj} 分别为上下桥臂电压; i_{sj} 和 u_{sj} 分别为交流侧电流和电压; R_s 和 L_s 分别为交流侧等效电阻和电感; $U_{oo'}$ 为直流侧中点 o 对地 o' 的电压; U_{dc} 为系统直流侧电压。由 KVL 和 KCL,列出单相 MMC 的状态方程表达式和电流表达式,分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}U_{dc} + u_{pj} + R_0 \cdot i_{pj} + L_0 \frac{di_{pj}}{dt} + \\ L_s \frac{di_{sj}}{dt} + R_s \cdot i_{sj} + u_{sj} - U_{oo'} = 0 \\ \frac{1}{2}U_{dc} - u_{nj} - R_0 \cdot i_{nj} + L_0 \frac{di_{nj}}{dt} + \\ L_s \frac{di_{sj}}{dt} + R_s \cdot i_{sj} + u_{sj} - U_{oo'} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{sj} = i_{pj} - i_{nj} \quad (2)$$

定义差模信号 u_{diff} 如式(3)所示。

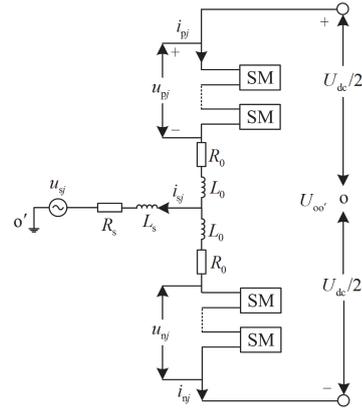


图 2 单相 MMC 并网逆变器拓扑

Fig. 2 Topology of single-phase MMC grid-connected inverter

$$u_{diff} = \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} \quad (3)$$

令等效电阻 $R = \frac{R_0}{2} + R_s$, 等效电感 $L = \frac{L_0}{2} + L_s$,

联立式(1)一式(3),经 Park 变换后得到

$$\begin{cases} u_{diffd} = L \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L \cdot i_{sq} + R \cdot i_{sd} + u_{sd} \\ u_{diffq} = L \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L \cdot i_{sd} + R \cdot i_{sq} + u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{diffd} 和 u_{diffq} 分别为差模信号经 $abc-dq$ 变换后的 d, q 轴分量; i_{sd} 和 i_{sq} 分别为交流侧电流 i_{sj} 经 $abc-dq$ 变换后的 d, q 轴分量; ω 为电网角频率; u_{sd} 和 u_{sq} 分别为交流侧电压 u_{sj} 经 $abc-dq$ 变换后的 d, q 轴分量。

由式(4)建立 MMC 并网逆变器的欧拉-拉格朗日模型为

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{R}^*\mathbf{x} = \mathbf{U} \quad (5)$$

式中: \mathbf{M} 为正定的储能矩阵; \mathbf{x} 为状态矩阵; \mathbf{J} 为互联矩阵,反映了系统内部的耦合关系; \mathbf{R}^* 为耗散矩阵,反映了系统的耗散特性; \mathbf{U} 为系统与外部能量的交换矩阵。各矩阵的表达式分别为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}^* = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{diffd} - u_{sd} \\ u_{diffq} - u_{sq} \end{bmatrix}$$

然而,在实际工程应用中,陆上换流站并网逆变器需频繁应对风电出力突变、设备投切及电网电压跌落等复杂动态工况,其运行环境难以满足 PBC 对系统严格无源约束的理想假设条件。滑模控制(sliding mode control, SMC)凭借其强鲁棒性优势,恰好能弥补 PBC 在实际复杂场景中的局限性,因

此, 本文融合无源控制的全局能量优化特性与滑模控制的局部动态鲁棒性, 将 PSM 嵌入 MMC 主控制器的电流内环控制环节。

2 基于 SPSM-MPC 的并网逆变器控制策略

2.1 电流内环的优化策略

根据滑模控制理论, 假设内环电流的期望平衡点为^[19]

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: i_{sd}^* 和 i_{sq}^* 分别为 d 、 q 轴电流的期望平衡点, 即内环电流参考值。

此时, 系统的状态变量误差 \mathbf{x}_e 表达式为

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^* \quad (7)$$

为了加快系统收敛速度, 取系统的阻尼耗散项为

$$\mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = (\mathbf{R}^* + \mathbf{R}_a) \mathbf{x}_e \quad (8)$$

式中: \mathbf{R}_d 为耗散项系数; \mathbf{R}_a 为注入阻尼的正定矩阵, 可表示为

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 \\ 0 & R_{a2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: R_{a1} 和 R_{a2} 为系统注入阻尼。

选取平衡电网下的 d 、 q 轴滑模面 S_1 和 S_2 分别为

$$\begin{cases} S_1 = i_{sd} - i_{sd}^* \\ S_2 = i_{sq} - i_{sq}^* \end{cases} \quad (10)$$

定义趋近律 \dot{S}_1 和 \dot{S}_2 分别为

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -\lambda_1 \text{sat}(S_1) - k_1 S_1 \\ \dot{S}_2 = -\lambda_2 \text{sat}(S_2) - k_2 S_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数; λ_1 、 λ_2 和 k_1 、 k_2 均为趋近率系数, 且均大于 0。

联立式(5)一式(11), 将式(4)改写为^[19]

$$\begin{cases} u_{\text{diff}d} = u_{sd} - \omega L i_{sq} + R i_{sd}^* - P_1 \lambda_1 \text{sat}(S_1) \\ u_{\text{diff}q} = u_{sq} - \omega L i_{sd} + R i_{sq}^* - P_2 \lambda_2 \text{sat}(S_2) \end{cases} \quad (12)$$

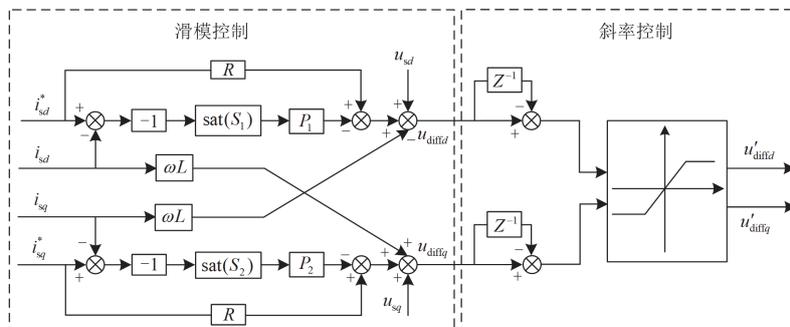


图 3 SPSM 控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of SPSM control

P_1 和 P_2 的表达式分别为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{L}{R + R_{a1} - k_1 L} \\ P_2 = \frac{L}{R + R_{a2} - k_2 L} \end{cases} \quad (13)$$

传统滑模控制中, 趋近律的离散特性易引发系统抖振问题, 这一现象会严重恶化系统的动态性能。而斜率控制通过对滑模输出信号变化率的限制, 能够有效抑制抖振。为此, 本文在无源滑模控制基础上引入斜率控制机制, 提出斜率无源滑模(slop passivity-based sliding mode, SPSM)控制策略。该策略依据式(12)中 $u_{\text{diff}d}$ 和 $u_{\text{diff}q}$ 的变化情况, 来判断系统状态是处于动态阶段还是稳态阶段, 并分别针对 SPSM 的动态区域和稳态区域设置斜率限制。具体的设置原则为: 在动态区域设置较大的斜率值, 以确保系统能够实现快速响应; 在稳态区域设置较小的斜率值, 以提高系统的输出精度。

以 d 轴为例, 首先计算 $u_{\text{diff}d}$ 的变化情况, 其表达式为

$$\Delta u_{\text{diff}d} = u_{\text{diff}d,t} - u_{\text{diff}d,t-1} \quad (14)$$

式中: $\Delta u_{\text{diff}d}$ 为 d 轴输出电压的差值; $u_{\text{diff}d,t}$ 和 $u_{\text{diff}d,t-1}$ 分别为电流内环当前时刻与前一时刻 d 轴输出电压。

然后, 设置变化量的限制条件为

$$\Delta u_{\text{diff}d}^{\text{lim}} = \begin{cases} R_d^{\text{max}} \cdot \Delta t, & \Delta u_{\text{diff}d} > R_d^{\text{max}} \cdot \Delta t \\ R_d^{\text{min}} \cdot \Delta t, & \Delta u_{\text{diff}d} < R_d^{\text{min}} \cdot \Delta t \\ \Delta u_{\text{diff}d}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: R_d^{max} 和 R_d^{min} 分别为 d 轴斜率的上、下限; Δt 为时刻差。

最后, 得到 d 轴电压信号更新后的表达式为

$$u'_{\text{diff}d} = u_{\text{diff}d,t-1} + \Delta u_{\text{diff}d}^{\text{lim}} \quad (16)$$

q 轴同理。于是, 可得本文所提 SPSM 控制策略的结构如图 3 所示, 其中 Z^{-1} 为延时函数。

2.2 调制器的优化策略

MMC 并网逆变器中的调制器通常采用最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)算法, 该算法具有实现简单、计算效率高等优点。但是, 它的控制精度依赖于电平数量, 且动态响应滞后。为提升 MMC 并网逆变器的动态性能, 本文在传统 NLM 算法中嵌入 MPC 策略, 提出一种 NLM-MPC 复合算法。该算法通过优化子模块开关状态的动态调节机制, 实现其输出电压对目标电压的高精度跟踪, 进而改善系统动态响应特性。在保证 NLM-MPC 算法精度的前提下, 为降低 MMC 的建模复杂度, 本文对图 2 所示的拓扑结构进行简化等效处理, 将上下桥臂子模块组分别抽象为受控电压源模型, 简化后的等效电路如图 4 所示。

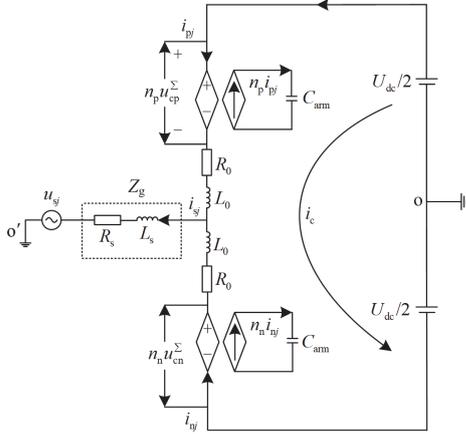


图 4 单相 MMC 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of single-phase MMC

图 4 中: i_c 为 MMC 上下桥臂间环流; Z_g 为交流侧等效阻抗; n_p 和 n_n 分别为上、下桥臂调制信号; u_{cp}^Σ 和 u_{cn}^Σ 分别为上、下桥臂电容电压之和; C_{arm} 为桥臂等效电容。由图 4 可知, MMC 状态方程表达式为

$$\begin{cases} \frac{di_g}{dt} = \frac{n_n}{L} u_{cn}^\Sigma - \frac{n_p}{L} u_{cp}^\Sigma - \left(\frac{2Z_g}{L} + \frac{R}{L} \right) i_g \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{n_n}{2L} u_{cn}^\Sigma - \frac{n_p}{2L} u_{cp}^\Sigma - \frac{R}{L} i_c + \frac{U_{dc}}{2L} \\ \frac{du_{cp}^\Sigma}{dt} = \frac{n_p}{2C_{arm}} i_g + \frac{n_p}{C_{arm}} i_c \\ \frac{du_{cn}^\Sigma}{dt} = -\frac{n_n}{2C_{arm}} i_g + \frac{n_n}{C_{arm}} i_c \end{cases} \quad (17)$$

在不考虑外部阻抗的情况下, 采用前向欧拉法

对式(17)进行离散化处理, 得到离散时间域的状态方程表达式为

$$\begin{cases} i_g(k+1) = i_g(k) + T \left[\frac{n_n(k)u_{cn}^\Sigma(k) - n_p(k)u_{cp}^\Sigma(k)}{L} - \frac{R}{L} i_g(k) \right] \\ i_c(k+1) = i_c(k) - T \left[\frac{n_n(k)u_{cn}^\Sigma(k) - n_p(k)u_{cp}^\Sigma(k)}{2L} + \frac{R}{L} i_c(k) - \frac{U_{dc}}{2L} \right] \\ u_{cp}^\Sigma(k+1) = u_{cp}^\Sigma(k) + T \left[\frac{n_p(k)}{2C_{arm}} i_g(k) + \frac{n_p(k)}{C_{arm}} i_c(k) \right] \\ u_{cn}^\Sigma(k+1) = u_{cn}^\Sigma(k) - T \left[\frac{n_n(k)}{2C_{arm}} i_g(k) + \frac{n_n(k)}{C_{arm}} i_c(k) \right] \end{cases} \quad (18)$$

式中: k 为离散步长; T 为采样时间; $i_g(k)$ 为 k 时刻输出的交流侧电流; $i_c(k)$ 为 k 时刻的桥臂环流; $u_{cp}^\Sigma(k)$ 和 $u_{cn}^\Sigma(k)$ 分别为 k 时刻上、下桥臂子模块电容电压之和; $n_p(k)$ 和 $n_n(k)$ 分别为 k 时刻上、下桥臂投入的子模块数量。

NLM-MPC 的目标优化需综合考量多维度因素。本文以 MMC 交流侧电流误差 J_1 、上下桥臂电压平衡 J_2 、桥臂环流 J_3 和子模块切换平滑度 J_4 的加权和最小化为优化目标, 其数学表达式为

$$J = \min_{[n_p(k), n_n(k)]} [\omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3 + \omega_4 J_4] \quad (19)$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和 ω_4 分别为各个子目标函数的权重, 各子目标函数的表达式分别为

$$\begin{cases} J_1 = \sum_{k=1}^{N_p} [i_g(k) - i_{gf}(k)]^2 \\ J_2 = \sum_{k=1}^{N_p} [u_{cp}^\Sigma(k) - u_{cn}^\Sigma(k)]^2 \\ J_3 = \sum_{k=1}^{N_p} [i_c(k)]^2 \\ J_4 = \sum_{k=1}^{N_p} \{ [n_p(k) - n_p(k-1)]^2 + [n_n(k) - n_n(k-1)]^2 \} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $i_{gf}(k)$ 为 k 时刻交流侧输出电流参考值; N_p 为优化预测步长。若 MMC 桥臂子模块总数为 N , 上、下桥臂子模块的投切数量需满足约束条件式(21)。

$$0 \leq n_p(k), n_n(k) \leq N \quad (21)$$

综上所述, 将主控制器与调制器的优化策略相结合, 构建基于斜率无源滑模与模型预测控制(slop passivity-based sliding mode-model predictive control, SPSM-MPC)的海上风电并网逆变器控制架构, 如图 5 所示。

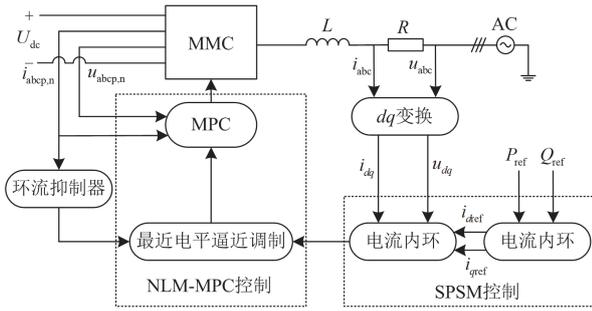


图5 基于 SPSM-MPC 的海上风电并网逆变器控制框图

Fig. 5 Block diagram of offshore wind grid-connected inverter based on SPSM-MPC

3 仿真实证

为验证本文所提 SPSM-MPC 策略的有效性, 参照 IEC61400-21 标准核心测试项, 选取 3 类典型扰动工况进行仿真对比: 1) 模拟风电场自然条件下的功率突变工况; 2) 占实际运维扰动事件 68% 的环流抑制器投切工况; 3) 校验系统故障穿越能力的电网电压跌落工况。基于 Simulink 仿真平台搭建了 MMC 并网逆变器的电磁暂态模型, 其中, 直流侧采用直流电压源进行等效建模, 交流侧电网则以理想交流源模拟, 并网逆变器控制策略采用经典的定有功-无功控制。在有功功率控制环节, 分别采用双闭环 PI、PSM 和 SPSM-MPC 控制策略, 对比分析并网逆变器在正常运行以及 3 种典型扰动工况下的动态性能指标, 重点探究输出电流的第 2、3 和 4 次谐波分量的占比变化规律。基本仿真参数见表 1, 各运行工况仿真时长均为 2 s。

表 1 基本仿真参数

Table 1 Basic simulation parameters

模块	参数名称	数值
逆变器	桥臂子模块数	22
	直流侧电压/kV	11
	交流侧电网电压/kV	6.6
	桥臂电感/H	0.0135
	子模块电容/ μF	7
	交流侧等效电阻/ Ω	0.4
	交流侧等效电感/mH	1.2
双闭环 PI 控制器	功率外环 k_p	0.0003
	功率外环 k_i	0.07
	电流内环 k_p	13.857
	电流内环 k_i	158.576
SPSM 控制器	功率外环 k_p	0.045
	功率外环 k_i	0.002 187 5
NLM-MPC 控制器	采样周期/ μs	50
	优化预测步长 N_p	15

3.1 正常运行工况

假定系统输出有功功率为 1.8 MW, 当系统投入运行至稳定状态时, 双闭环 PI、PSM 和 SPSM-MPC 这 3 种策略下交流侧输出 A 相电压和电流的波形如图 6 所示。由图 6 可知, 3 种控制策略下 A 相电压波形质量均较好; 但是, 当系统处于稳态运行时, PSM 策略下的 A 相电流波形仍不平稳, 而双闭环 PI 与 SPSM-MPC 策略下的 A 相电流波形较稳定, 且稳定时间基本相同。

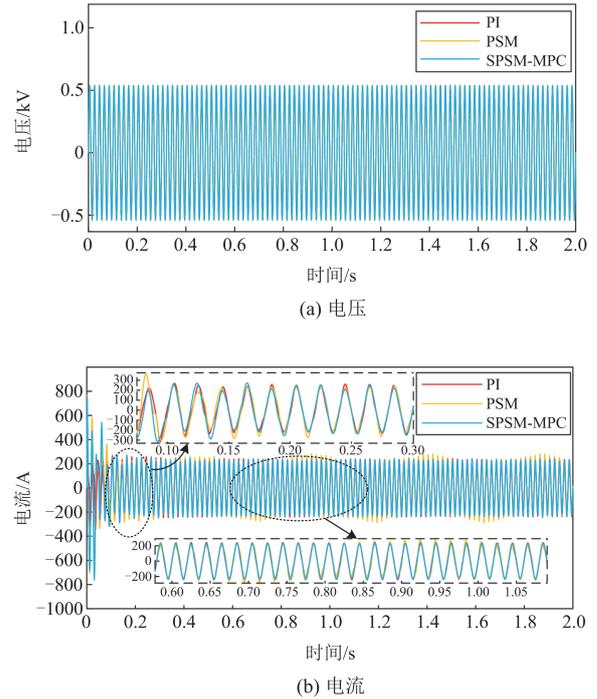


图 6 3 种策略在正常工况下 A 相输出波形对比

Fig. 6 Comparison of A-phase output waveform under three strategies during normal operation

进一步采用 FFT 对逆变器交流侧输出的 A 相电压和电流波形开展谐波分析, 对比结果如图 7 所示。由图 7 可知, 3 种控制策略下 A 相电压波形总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 均为 0%, 全部满足并网要求; 但是, 双闭环 PI、PSM 和 SPSM-MPC 这 3 种控制策略下 A 相电流波形 THD 分别为 6.13%、12.91% 和 4.45%, 说明 SPSM-MPC 策略下输出电流波形质量最佳。

图 8 为 3 种控制策略下输出有功功率的波形对比。由图 8 可知, 3 种策略下输出功率的性能差异比较明显: 双闭环 PI 策略下, 大致 0.2 s 后系统趋近稳定, 稳态波动幅度最大; PSM 策略较前者在动态性能与稳态精度上有所提升, 系统运行 0.12 s 后系统趋近稳定, 但稳态值仍然存在一定偏差; SPSM-

MPC 策略在系统运行 0.08 s 后便趋于稳定, 且稳态波动幅度最小, 功率输出精度最高。

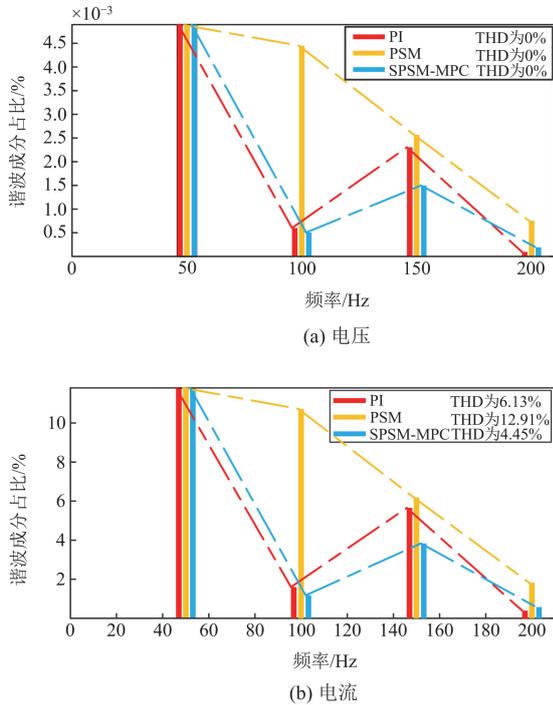


图 7 3 种策略在正常工况下 A 相输出谐波占比
Fig. 7 Comparison of A-phase harmonic contents under three strategies during normal operation

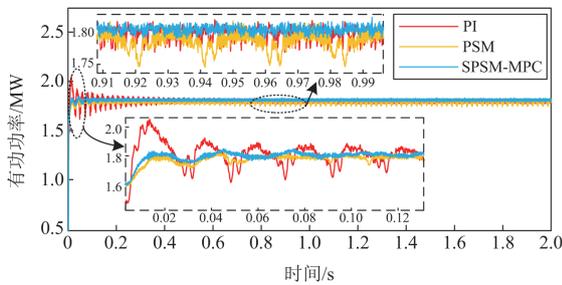


图 8 3 种策略在正常工况下输出有功功率波形对比
Fig. 8 Comparison of output active power waveform under three strategies during normal operation

3.2 风电出力突变

在实际工程场景中, 受海上风速随机波动等因素影响, MMC 并网逆变器可能会面临功率动态变化的情况。假定并网逆变器输送功率在 $t=1$ s 时由 1.8 MW 阶跃至 3.6 MW, 观察双闭环 PI、PSM 和 SPSM-MPC 这 3 种控制策略下交流侧输出的 A 相电流波形和有功功率波形, 对比结果如图 9 所示。

由图 9(a)可知, 风电出力发生突变后, 前两种策略下逆变器输出的 A 相电流波动较大, 而 SPSM-MPC 策略则能有效应对风电出力突变工况; 由图

9(b)可知, 3 种策略均能实现输出功率对目标值的跟踪控制, 但动态响应存在显著差异: 双闭环 PI 策略的有功响应存在明显滞后与振荡现象, 功率突变后需 15 ms 才能进入稳态; PSM 策略的动态性能较双闭环 PI 策略有所提升, 稳态建立时间缩短至 11.7 ms, 但仍存在抖振问题; 采用 SPSM-MPC 策略时, 系统仅需 2 ms 即可在风电出力突变后恢复稳定, 不仅有效抑制了抖振现象, 而且显著提高了有功功率输出精度。

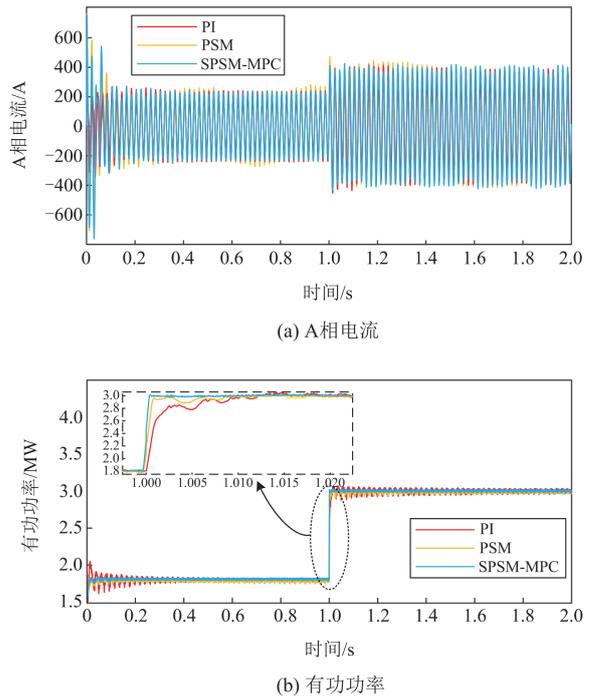


图 9 3 种策略在功率阶跃下输出波形对比
Fig. 9 Comparison of output waveform under three strategies during power step changes

3.3 环流抑制器投入

在实际工程场景中, MMC 内部环流会导致功率损耗增加与系统成本上升, 因此环流抑制器通常在系统进入稳态后投入运行, 但抑制器的投切操作会对系统产生扰动。为验证 3 种控制策略对该类扰动的抑制能力, 设定系统在运行到 1 s 时投入环流抑制器, 观察双闭环 PI、PSM 和 SPSM-MPC 这 3 种控制策略下交流侧输出的 A 相电流、有功功率和 A 相桥臂环流波形, 对比结果如图 10 所示。

由图 10(a)可知, 环流抑制器投入瞬间, 双闭环 PI 与 PSM 策略下交流侧电流波形出现显著畸变, 且系统稳定时间均较长, 而 SPSM-MPC 策略下电流波形无明显畸变, 且动态响应速度显著优于前两种策略。

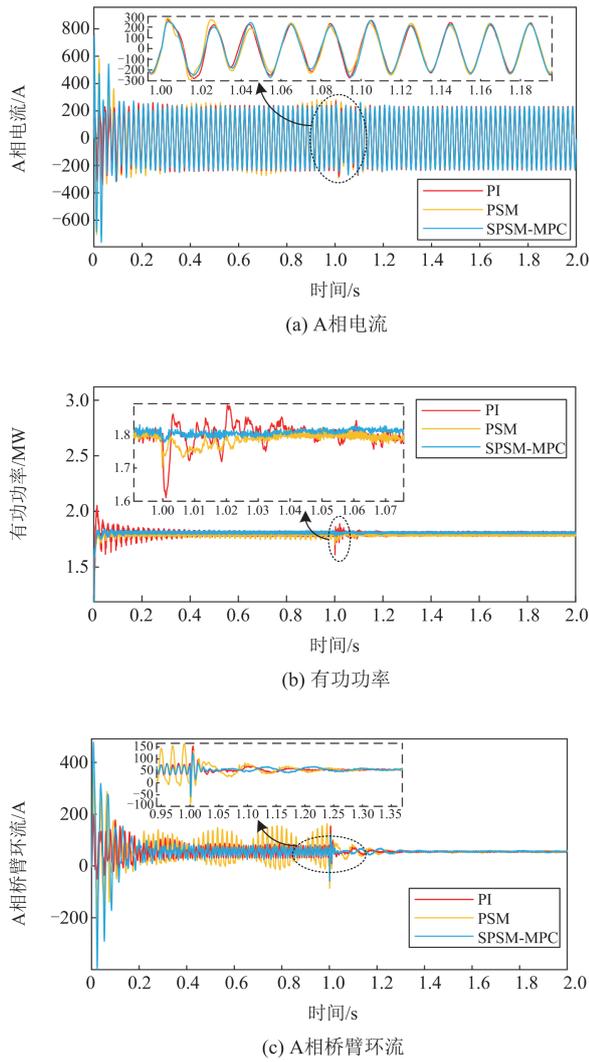


图 10 3 种策略在环流抑制器投入时输出波形对比

Fig. 10 Comparison of output waveform under three strategies during circulating current suppressor activation

由图 10(b)可知, 双闭环 PI 策略下, 逆变器输出有功功率存在波动, 尤其是在环流抑制器投入瞬间出现剧烈振荡; PSM 策略的有功功率波动幅度较双闭环 PI 策略有所减小, 但其瞬态调节时间较长, 约 25 ms 后才进入稳态; 而 SPSM-MPC 策略展现出优异的动态稳定性, 不仅稳态误差最小, 且仅需约 5 ms 即可在扰动后恢复稳定, 有功功率波形全程保持平滑。

由图 10(c)可知, 在环流抑制器未投入时 ($t < 1$ s), PSM 策略下, 桥臂环流在 $t = 0.4$ s 进入稳态, 但稳态误差较大, 波动明显; 双闭环 PI 策略的桥臂环流至 $t = 0.5$ s 才趋于稳定, 且响应速度滞后; 而 SPSM-MPC 策略的桥臂环流在 $t = 0.3$ s 即达稳态, 且稳态精度显著优于前两者, 表明 SPSM-MPC 策

略在无环流抑制器辅助时仍能满足一定的系统稳定性要求。当投入环流抑制器之后 ($t > 1$ s), PSM 策略的桥臂环流出现大幅波动, 稳态精度劣化并伴随大量谐波分量; 双闭环 PI 策略的环流超调量也高于 SPSM-MPC 策略, 而 SPSM-MPC 策略在抑制扰动的同时, 维持了环流波形的低谐波特性与快速响应能力。

3.4 电网电压跌落

在实际工程场景中, MMC 并网逆变器可能因电网电压跌落而引发系统扰动。为了验证本文提出的控制策略具有故障穿越能力, 假定系统在 $t = 0.6$ s 时, 交流侧电网三相电压由 6.6 kV 跌落至 2.64 kV (即跌落至原电压的 40%), 并在持续 0.4 s 后恢复正常。图 11 为电网电压跌落期间 3 种控制策略下交流侧输出的 A 相电压和有功功率波形对比。

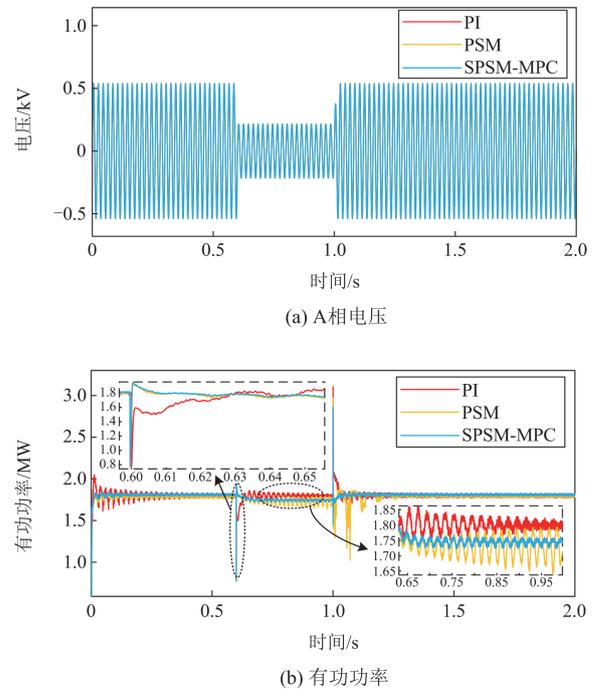


图 11 3 种策略在电网电压跌落下输出波形对比

Fig. 11 Comparison of output waveforms of three strategies when power grid voltage falls

由图 11 可知, 在电网电压跌落期间, 双闭环 PI、PSM 策略下的有功功率波形均存在抖振现象, 系统稳定时间较长; 当故障恢复之后, 二者的有功波形均表现出较大超调, 需 0.3 s 左右才能逐渐趋于稳定, 且故障加剧了 PSM 策略下抖振对系统的不利影响。相比之下, 在电网电压跌落期间, SPSM-MPC 策略下的有功功率输出始终保持平稳, 当电压跌落发生 0.15 s 之后, 有功波形则达到稳定输出。这表明 SPSM-MPC 策略不仅充分发挥了滑模控制的强

鲁棒性,有效抑制了抖振问题,还展现出优异的故障穿越能力。

4 结论

为解决海上风电并网逆变器在风电出力突变、设备投切及电网电压跌落工况下的扰动问题,提出一种 SPSM-MPC 的优化策略,并通过与双闭环 PI、PSM 等策略仿真对比,得出以下结论。

1) 稳态性能优化:在系统稳态运行时,SPSM-MPC 策略可有效抑制滑模控制固有的高频抖振现象,同时将输出电流 THD 控制在 4.45%,显著提升了海上风电并网的电能质量。

2) 动态鲁棒性提升:针对风电出力突变、设备投切扰动、电网电压跌落等典型工况,SPSM-MPC 策略可将风电出力突变响应时间缩短至 2 ms,电网电压跌落工况下有功稳定时间缩短至 0.15 s,不仅展现出优异的鲁棒稳定性与动态调节能力,更显著增强了风电机组并网系统的抗干扰能力与快速响应特性。

3) 工程应用价值:所提策略在 IEC61400-21 标准规定的风电并网 3 类典型扰动场景中均通过有效性验证,具备明确的工程应用潜力。该策略为 MMC 并网逆变器在复杂工况下的参数优化设计提供了重要理论支撑,对于提升海上风电并网系统的可靠性与稳定性具有切实的工程指导意义。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] ZHANG T, YAO J, LIN Y, et al. Impact of control interaction of wind farm with MMC-HVDC transmission system on distance protection adaptability under symmetric fault[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(2): 83-101.
- [3] CAI Z, WEI C, PENG S, et al. Comprehensive reliability analysis of fractional frequency offshore wind power systems considering environmental impact and overall structure: a case study in China[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(1): 64-75.
- [4] 黄通, 陈新, 张东辉, 等. 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网稳定性分析及其阻抗控制优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(23): 8987-8999.
HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 8987-8999.
- [5] WANG B, SHEN Z, LIU H, et al. Linear ADRC direct current control of grid-connected inverter with LCL filter for both active damping and grid voltage induced current distortion suppression[J]. *IET Power Electronics*, 2018, 11(11): 1748-1755.
- [6] SARIYILDIZ E. A guide to design disturbance observer-based motion control systems in discrete-time domain[C]// *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, March 7-9, 2021, Kashiwa, Japan: 1-6.
- [7] CHENG C, XIE S, XU J, et al. State and disturbance observer based current control scheme for LCL filtered single phase grid tied inverters under nonideal conditions[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 10(1): 336-348.
- [8] 李中奇, 周靓, 杨辉. 高速动车组数据驱动无模型自适应积分滑模预测控制[J]. *自动化学报*, 2024, 50(1): 194-210.
LI Zhongqi, ZHOU Liang, YANG Hui. Data-driven model-free adaptive integral sliding mode predictive control for high-speed electric multiple unit[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(1): 194-210.
- [9] 蔡运颂, 许璟, 牛玉刚. 基于自适应多尺度超螺旋算法的无人机集群姿态同步控制[J]. *自动化学报*, 2023, 49(8): 1656-1666.
CAI Yunsong, XU Jing, NIU Yugang. Attitude consensus control of UAV swarm based on adaptive multi-scale super-twisting algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(8): 1656-1666.
- [10] LIAN S, MENG W, SHAO K, et al. Full attitude control of a quadrotor using fast nonsingular terminal sliding mode with angular velocity planning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 70(4): 3975-3984.
- [11] 谢国超, 段纳, 万昌晖, 等. 基于磁链在线辨识的异步电机超螺旋滑模控制[J]. *自动化学报*, 2025, 51(5): 1092-1102.
XIE Guochao, DUAN Na, WAN Changhui, et al. Super-twisting sliding mode control for asynchronous motor based on flux online identification[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(5): 1092-1102.
- [12] 夏向阳, 赵晓悦, 梁军, 等. 基于有功-无功联合控制的构网型变流器暂态稳定性提升方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(11): 114-125.
XIA Xiangyang, ZHAO Xiaoyue, LIANG Jun, et al. Transient stability enhancement method for grid-forming converter based on joint control of active and reactive power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(11): 114-125.
- [13] 白志红, 蒋守赞, 郭咏春. 基于双重滑模观测器的 MMC 开关管开路故障诊断与定位策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(14): 147-156.
BAI Zhihong, JIANG Shouzan, GUO Yongchun. Open-circuit fault diagnosis and location strategy of switches in

- modular multilevel converter based on dual sliding mode observers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(14): 147-156.
- [14] LI S, LI P, ZHENG Z, et al. Fractional order sliding mode control for circulating current suppressing of MMC[J]. *Electrical Engineering*, 2023, 105(6): 3791-3800.
- [15] 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, 7123.
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, 7123.
- [16] 王喜泉, 何山, 闫学勤, 等. 基于 VSG 及内模-滑模的 MMC 控制策略研究[J]. *可再生能源*, 2023, 41(7): 942-948.
WANG Xiquan, HE Shan, YAN Xueqin, et al. Research on MMC control strategy based on VSG and internal model-sliding mode[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(7): 942-948.
- [17] 孙伟莎, 程启明, 程尹曼, 等. 不平衡电网电压下 MMC 滑模变结构控制策略[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(9): 310-317.
SUN Weisha, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. MMC control strategy based on sliding mode variable structure under unbalanced grid voltage[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 310-317.
- [18] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 94-103.
WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 94-103.
- [19] 程启明, 李剑辉, 赖宇生, 等. 非理想条件下基于 MMC 的电力电子变压器的无源滑模控制策略[J]. *高压技术*, 2023, 49(4): 1556-1566.
CHENG Qiming, LI Jianhui, LAI Yusheng, et al. Passivity-based sliding-mode control strategy for power electronic transformer based on MMC under non-ideal conditions[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1556-1566.
- [20] 杨建湘, 范毅然, 熊建斌, 等. 用于孤岛模式下光储直流微网的改进超螺旋 MPPT 控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(12): 104-116.
YANG Jianxiang, FAN Yiran, XIONG Jianbin, et al. Improved super-twisting MPPT control strategy for PV-storage DC microgrid in islanded mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(12): 104-116.
- [21] 陈闯, 王勃, 于泳, 等. 基于改进指数趋近律的感应电机滑模转速观测器研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(增刊 1): 155-163.
CHEN Chuang, WANG Bo, YU Yong, et al. An improved exponential reaching law based-sliding mode observer for speed-sensorless induction motor drives[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(S1): 155-163.
- [22] 郭成, 杨宣铭, 王林玲, 等. 基于电流内环滑模自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(4): 85-95.
GUO Cheng, YANG Xuanming, WANG Linling, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct-drive wind farm based on current inner loop sliding mode active disturbance rejection control[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(4): 85-95.
- [23] 陈旭, 皇金锋, 李聪林. 双极性直流微电网的改进型高阶滑模自抗扰控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 111-122.
CHEN Xu, HUANG Jinfeng, LI Conglin. Improved high-order sliding mode active disturbance rejection control for bipolar DC microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 111-122.
- [24] 赵凯辉, 易金武, 刘文昌, 等. 一种永磁同步电机无模型超螺旋快速终端滑模控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 88-98.
ZHAO Kaihui, YI Jinwu, LIU Wenchang, et al. A model-free super-twisting fast terminal sliding mode control method for a permanent magnet synchronous motor[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 88-98.
- [25] 吕玉映, 赵凯辉, 游鑫, 等. 基于双扰动观测器的永磁同步电机双惯量系统无模型递归终端滑模控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(21): 129-139.
LÜ Yuying, ZHAO Kaihui, YOU Xin, et al. Model-free recursive terminal sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor dual inertia system based on a double disturbance observer[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(21): 129-139.

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-08-04

作者简介:

李慧(1976—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统稳定与控制、新能源发电预测技术; E-mail: lhbxy@bistu.edu.cn

钱磊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统控制与稳定性分析; E-mail: 2023020455@bistu.edu.cn

范新桥(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制、源网荷储协同调控。E-mail: fxq8226@bistu.edu.cn

(编辑 周金梅)