

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240353

# 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

郭成, 杨宣铭, 王林玲, 杨灵睿

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 针对直驱风电机组网侧换流器电流内环放大次同步振荡分量导致的次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题, 提出了一种基于电流内环滑模自抗扰控制(sliding mode-active disturbance rejection control, SM-ADRC)策略。首先, 鉴于滑模控制(sliding mode control, SMC)存在高频切换进而影响控制效果的问题, 设计了基于改进型的指数趋近律, 采用边界可变幂函数代替趋近律原有的符号函数。其次, 引入自抗扰控制的扩张状态观测器, 该观测器能实时估计次同步振荡分量, 并以观测量的形式补偿电流内环, 弱化了 SM-ADRC 对网侧控制器参数的依赖程度, 并进一步切断次同步振荡分量的传播路径。最后, 搭建了基于风机网侧电流内环 SM-ADRC 的直驱风电场电磁暂态模型, 通过与电流内环 PI 控制和 SMC 对 SSO 的抑制效果进行对比, 验证了所提 SM-ADRC 策略的优越性。

**关键词:** 直驱风电场; 弱交流电网; 次同步振荡; 滑模自抗扰控制

## Sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct-drive wind farm based on current inner loop sliding mode active disturbance rejection control

GUO Cheng, YANG Xuanming, WANG Linling, YANG Lingrui

(Faculty of Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** A sliding mode active disturbance rejection control (SM-ADRC) strategy based on the current inner loop of the grid-side converter is proposed to address the problem of sub-synchronous oscillation (SSO) resulting from the amplification of the SSO components. First, considering the issue of high-frequency switching in sliding mode control (SMC) that affects the control performance, an improved exponential reaching law is designed, by replacing the original sign function with a boundary variable power function in the reaching law. Then, an extended state observer with active disturbance rejection control is introduced to estimate the SSO components in real-time and compensate for the current inner loop as observed quantities. This weakens the dependence of SM-ADRC control on the parameters of the grid-side controller and further cuts off the propagation path of the SSO components. Finally, an electromagnetic transient model of the direct-drive wind farm based on grid-side current inner loop SM-ADRC control is established. By comparing the SSO suppression effect with the current inner loop PI control and SMC control, the superiority of the proposed SM-ADRC strategy is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367002).

**Key words:** direct-drive wind farm; weak AC grid; sub-synchronous oscillation; sliding mode active disturbance rejection control

## 0 引言

随着“碳达峰”与“碳中和”目标的提出, 我国正在积极构建以新能源为主体的新型电力系统,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52367002); 云南省科技厅联合基金重点项目资助(202201BE070001-15)

新能源装机容量占比逐年提高<sup>[1-3]</sup>。但是, 高比例风电机组接入远离负荷中心的弱交流电网易诱发次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题<sup>[4-6]</sup>, 影响电力系统的安全稳定运行。

直驱型风电机组具有可靠性高、运行维护简单等优点<sup>[7]</sup>, 因而在风力发电领域得到广泛应用。现有研究表明, 直驱风电场并网诱发次同步振荡问题

是由风机网侧换流器(grid-side converter, GSC)与弱交流电网相互作用引起的<sup>[8]</sup>。文献[9]基于系统阻抗的角度切入,建立了考虑直流电压外环、锁相环(phase locked loop, PLL)等不对称控制环节影响下计及频率耦合效应(次/超同步振荡频率)的等效阻抗模型,分析了网侧控制器参与因子对频率耦合效应的影响。文献[10]研究了GSC控制部分对系统次同步振荡的影响,建立了单逆变器并网系统的复合电流环模型,证明了电流内环中存在正反馈通道,次同步振荡分量可能通过该反馈通道进一步加深振荡。文献[11]分析了直驱风电机组SSO传播机理,认为电流内环PI控制器是诱发SSO问题的关键因素,相较于电压外环,电流内环对次同步振荡分量的反应更为灵敏。上述文献表明:不合适的电流内环PI控制器参数可能导致扰动分量放大,并在GSC与交流电网的相互作用下,产生次同步振荡分量,导致系统失稳。

因此,阻断GSC与交流电网相互作用而产生的正反馈路径,能有效抑制直驱风电场并入弱交流电网诱发的SSO。目前,从GSC角度出发,抑制直驱风电场SSO的措施分为两类。第一类是在不改变风电机组原有结构的前提下,优化GSC参数,达到抑制SSO的目的。文献[12]通过建立直驱风机的导纳模型,分析了电流内环控制器参数对负电导特性的影响。文献[13]提出一种基于阻抗比稳定判据的电流内环参数自适应调整算法,采用极点配置法进行PI参数优化设计,以达到抑制SSO的目的,但PI参数的改变可能会对系统原有控制效果产生影响<sup>[14]</sup>,甚至诱发低频振荡。第二类是在GSC控制环节施加附加阻尼控制器<sup>[15]</sup>,它能提取振荡信号并对其进行超前或滞后处理,以抵消原有振荡信号。文献[16]采用粒子群算法优化附加阻尼控制器参数,在多工况运行下验证了该控制器的适应性。文献[17]针对低频振荡与次同步振荡存在阻尼耦合问题,设计协调多个通道附加阻尼控制器,改善系统振荡模式。附加阻尼控制策略能有效抑制SSO,但所涉及的控制环节较多,参数整定工作较为复杂。上述文献表明:现有的SSO抑制策略可能受到网侧控制器参数的影响,进而造成抑制效果的不足。

针对上述抑制策略中存在易受网侧控制器参数影响的问题,可以借鉴滑模控制(sliding mode control, SMC)抑制SSO。SMC因对控制器参数变化不敏感且有优良的动态响应特性,在电力系统领域得到了较为广泛的应用<sup>[18]</sup>。文献[19]将滑模控制应用在GSC电流内环,从理论上阐述了控制器参数的设计过程,并证明了SMC能有效降低电流总谐波

畸变率。文献[20]针对电流内环PI控制器对次同步振荡分量的放大问题,采用SMC代替PI控制,并通过仿真验证了该策略的可行性。上述文献均采用传统的指数趋近律控制,然而该趋近律可能造成状态变量的高频切换,进而影响控制效果<sup>[21]</sup>。文献[22]针对指数趋近律中符号函数所引起的高频切换,提出了一种新型滑模趋近律,有效提高了开关磁阻电机的工作性能。文献[23]采用新型滑模趋近律与自抗扰控制相结合,进一步改善了永磁同步电机的性能。自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是一种非线性控制方法,因其控制过程中不依赖控制对象的精确数学模型,又能对控制过程中不确定因素进行估计与补偿而得到广泛的应用<sup>[24]</sup>。文献[25]指出直驱风电场接入弱交流电网诱发SSO的本质是小干扰过渡到发散振荡的过程,提出一种自抗扰控制策略抑制SSO,自抗扰控制器将任何频率下的次同步振荡扰动视为总扰动,对扰动进行观测估计并补偿,有效阻止小扰动发散。

因此,为了进一步提高控制系统抑制SSO的能力,本文提出了一种基于ADRC改进的电流内环滑模自抗扰控制(sliding mode-active disturbance rejection control, SM-ADRC)。该方法设计了一种改进型的指数趋近律,采用边界可变幂函数代替趋近律原有的符号函数,解决了控制系统在滑模面因高频切换造成的控制效果不足的问题。引入自抗扰控制的扩张状态观测器,以观测量的形式补偿电流内环,弱化了SM-ADRC对网侧控制器参数的依赖程度。首先,建立直驱风电场接入弱交流电网的数学模型,分析了电流内环PI控制器所主导的SSO传播路径。次同步振荡分量受到网侧控制器与弱交流电网的相互作用,进一步加深系统SSO。其次,设计了基于改进型的指数趋近律,采用边界可变幂函数代替指数趋近律原有的符号函数。然后,通过引入ADRC的扩张状态观测器,对电流内环的扰动量进行实时观测与补偿,从而实现对SSO的抑制。最后,搭建了基于电流内环SM-ADRC控制的直驱风电场接入弱交流电网的电磁暂态模型,在多种工况下验证了SM-ADRC的适应性。通过对比分析PI控制、SMC与本文所提SM-ADRC策略,验证了SM-ADRC的优越性。

## 1 直驱风机数学模型及SSO传播特性

### 1.1 直驱风机数学模型

直驱风电机组通常由风力机、永磁同步发电机、交-直-交换流器及滤波器组成。直驱风电机组控制结构原理如图1所示。图中直驱风机的出口侧电压为

690 V, 经一级升压变压器(0.69 kV/35 kV)汇入 35 kV 集电线路, 再经由二级升压变压器(35 kV/220 kV)接入 220 kV 主交流电网。图 1 中:  $L_s$ 、 $R$  分别为网

侧换流器出口线路电感和电阻;  $U_{dc}$  为直流侧输出电压;  $U_{dc\_ref}$  为风机直流侧电压的参考值。

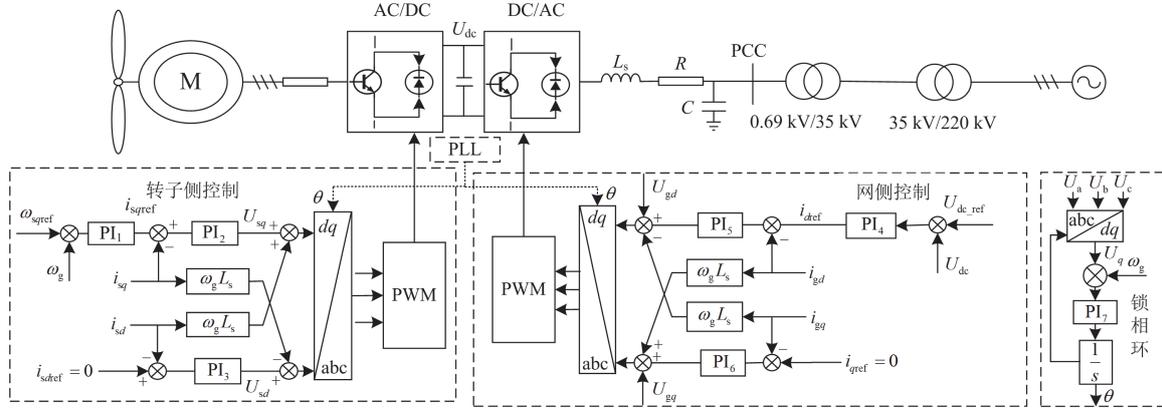


图 1 直驱风机控制结构原理

Fig. 1 Principle of direct-drive wind turbine generator control structure

## 1.2 直驱风机网侧控制

GSC 控制部分采用电压外环与电流内环控制策略, 电压外环维持直流侧母线电压稳定, 电流内环调节有功功率与无功功率, 模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_d = (i_{dref} - i_{gd})(K_{p5} + \frac{K_{i5}}{s}) + Ri_{gd} - \omega_g i_{gq} L_s + U_{gd} \\ U_q = (i_{qref} - i_{gq})(K_{p6} + \frac{K_{i6}}{s}) + Ri_{gq} + \omega_g i_{gd} L_s + U_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_d$ 、 $U_q$  分别为网侧换流器输出电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  分别为直驱风机输出电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  分别为直驱风机输出电流  $d$ 、 $q$  轴分量的参考值;  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  分别为并网点电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega_g$  为同步角速度;  $K_{p5}$ 、 $K_{i5}$  和  $K_{p6}$ 、 $K_{i6}$  分别对应 GSC 控制原理中电压外环、电流内环 PI 控制器的比例、积分系数。

## 1.3 直驱风机锁相环控制模型

锁相环跟踪并网点电压相角, 实现与电网相位保持同步。同时, 锁相环提供直驱风机 GSC 控制部分电气量派克变换所需的相角。PLL 采取定向矢量控制方式, 即电网电压定在  $q$  轴上, 实现与电网同步的目的。锁相环控制模型如式(2)所示。

$$\theta = \int [\omega_g + (K_{p7} + \frac{K_{i7}}{s}) U_q] dt \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为锁相环输出相角;  $K_{p7}$ 、 $K_{i7}$  分别为 PLL 控制系统 PI 控制器的比例、积分系数。

通常情况下,  $U_q$  取为 0。当系统处于稳态时刻, 锁相环输出的相角为  $\theta = \omega t$ 。当  $U_q$  受到次同步振荡

电压干扰时, 锁相环会输出含有次同步振荡分量的相角  $\theta_s$ 。

## 1.4 直驱风机网侧换流器 SSO 传播机理分析

直驱风机接入弱交流电网后, 受到 GSC 参数与弱交流电网的影响, 首先并网点处电流受到干扰发生畸变, 产生次同步振荡电流  $\Delta i_{g\_sub}$ 。该电流分量会衍生出次同步振荡干扰电压  $\Delta U_{g\_sub}$ 。锁相环根据并网点电压提供 GSC 控制部分  $i_{gabc}$ 、 $U_{gabc}$ , 进行派克变换形成  $i_{gdq}$ 、 $U_{gdq}$  所需相角。由于受到次同步振荡干扰电压  $\Delta U_{g\_sub}$  的影响, 锁相环输出相应的次同步振荡干扰相角  $\theta_s$ 。因此, 在干扰相角  $\theta_s$  的影响下,  $i_{gabc}$ 、 $U_{gabc}$  经过派克变换形成  $i_{gdq}$ 、 $U_{gdq}$  时, 会衍生出次同步振荡干扰电流  $\Delta i_{gdq\_sub}$ 、电压  $\Delta U_{gdq\_sub}$ , 这些干扰分量也会参与电压、电流内外环 PI 控制。

因 PI 控制器带宽参数设计原因, 电流内环对次同步振荡分量反应更加灵敏。因此, 电流内环 PI 控制器的积分环节会对扰动量产生放大效果, 形成干扰电流  $\Delta i_{d\_sub}^2$ 、 $\Delta i_{q\_sub}^2$ 。最后, 被放大的干扰分量又与干扰相角  $\theta_s$  进行派克反变换, 输出新的三相次同步振荡干扰分量  $\Delta i_{abc\_sub}^2$ 、 $\Delta U_{abc\_sub}^2$ , 并再次参与上述传播路径, 对诱发 SSO 产生正反馈助增效果, 反馈路径如图 2 所示。

综合上述 SSO 传播机理分析可知, GSC 电流内环 PI 控制器放大次同步振荡分量是直驱风电机组并网诱发 SSO 的关键因素。因此, 本文采用电流内环 SM-ADRC 代替原有的 PI 控制, SM-ADRC 不含有

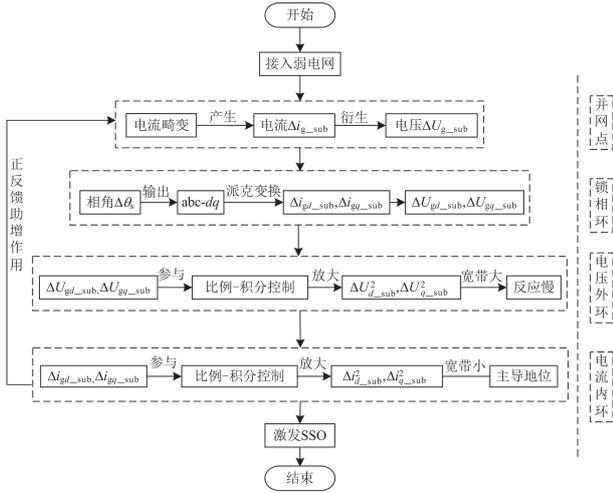


图 2 SSO 传播路径

Fig. 2 SSO propagation path

积分环节，不会产生较强的放大作用，同时能观测扰动量并对电流内环作出补偿，维持并网电流的稳定性，达到阻断 SSO 传播的目的。

## 2 电流内环滑模自抗扰控制(SM-ADRC)

### 2.1 基于边界可变幂函数改进的指数趋近律

在滑模控制中，系统状态变量的运动主要分为两个阶段：第一阶段为状态变量运动至滑模面的趋近运动；第二阶段为状态变量在滑模面的滑动模态运动，滑模控制的运动原理以相平面的方式表达如图 3(a)所示。

因此，滑模控制中，趋近律的选择关系到状态变量在滑模面的运动性能。传统滑模控制一般选取指数趋近律，如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{S}_d = -\varepsilon_d \operatorname{sgn}(S_d) - K_d S_d \\ \dot{S}_q = -\varepsilon_q \operatorname{sgn}(S_q) - K_q S_q \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\dot{S}_d$ 、 $\dot{S}_q$ 为滑模面函数的导数； $\varepsilon_d$ 、 $\varepsilon_q$ 、 $K_d$ 和 $K_q$ 为趋近律正系数； $S_d$ 、 $S_q$ 分别为 $d$ 、 $q$ 轴滑模面； $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为系统符号函数。

因为符号函数 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 存在的固有特性，导致系统变量在滑模面附近高频切换，可能会降低滑模控制抑制 SSO 的效果。因此，为了更好地抑制直驱风电机组诱发的 SSO，提出一种改进型的指数趋近律，引入边界可变幂函数替代控制系统原有的符号函数。改进型的指数趋近律如式(4)所示。

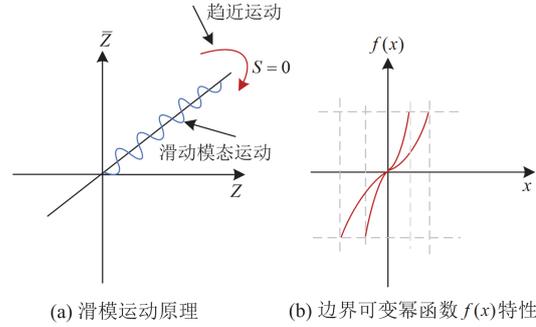
$$\begin{cases} \dot{S}_d = -\xi_d \cdot f(S_d) - K_d S_d \\ \dot{S}_q = -\xi_q \cdot f(S_q) - K_q S_q \end{cases} \quad (4)$$

式中， $f(\cdot)$ 为边界可变幂函数。 $f(x)$ 的表达式如式

(5)所示。

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > \gamma \\ \frac{x \cdot |x|}{\gamma^2}, & -\gamma \leq x \leq \gamma \\ -1, & x < -\gamma \end{cases} \quad (5)$$

边界可变幂函数 $f(x)$ 的曲线特性如图 3(b)所示。



(a) 滑模运动原理 (b) 边界可变幂函数 $f(x)$ 特性

图 3 滑模运动原理与可变幂函数 $f(x)$ 特性图

Fig. 3 Plot of the principle of sliding mode motion and the properties of the variable power  $f(x)$  function

由图 3(b)可知，当系统状态远离滑模面时，通过采用原有指数趋近律，确保控制系统的响应速度；当系统状态接近滑模面时，采用边界可变幂函数代替符号函数，降低了系统变量在滑模面的切换频率，进一步提高了控制系统的抑制效果。

此外，通过改变 $\gamma$ 值的大小，可以调节控制系统的响应速度。当 $\gamma$ 值较大时，边界可变幂函数 $f(x)$ 曲线较为平缓，状态变量能够较缓地进入滑模面，但是较缓的函数会影响控制系统的响应速度；当 $\gamma$ 值较小时，边界可变幂函数 $f(x)$ 曲线较为陡峭，控制系统响应速度得到提升，但可能致使控制系统抑制 SSO 的效果不足。因此，选取合适的 $\gamma$ 值，能有效改善状态变量的运动性能，进一步提高 SM-ADRC 抑制 SSO 的能力。

### 2.2 ADRC 扩张状态观测器

扩张状态观测器(extended state observer, ESO)是电流内环 SM-ADRC 的核心部分，它把所有发散至电流内环的次同步振荡分量视为系统总扰动，输出相应的补偿量来抵消扰动量。扩张状态观测器的控制结构如式(6)所示。

$$\begin{cases} e_x = Z_{1x} - i_{gx} \\ \dot{Z}_{1x} = Z_{2x} - \beta_{1x} f_{al}(e_x, \alpha_x, \delta_x) + b_0 U_x \\ \dot{Z}_{2x} = -\beta_{2x} f_{al}(e_x, \alpha_x, \delta_x) \end{cases} \quad (6)$$

式中：下标“ $x$ ”表示对应 $d$ 轴或者 $q$ 轴的 ESO； $Z_{1x}$ 表示电流跟踪信号的观测估计值； $Z_{2x}$ 表示总扰动

的观测估计值;  $\beta_{1x}$ 、 $\beta_{2x}$  表示误差校正因子;  $e_x$  表示输入误差变量;  $b_0$  为动态补偿因子;  $f_{al}$  函数表示扩张状态观测器的核心部分, 算法如式(7)所示。

$$f_{al}(e_x, \alpha_x, \delta_x) = \begin{cases} \frac{e_x}{\delta^{1-\alpha}}, & |e_x| \leq \delta \\ |e_x|^\alpha \operatorname{sgn}(e_x), & |e_x| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为非线性因子,  $0 < \alpha < 1$ ;  $\delta$  为滤波因子。

鉴于 SM-ADRC 控制环节较长、待调节的参数较多, 且 GSC 电流内环控制是一阶的, 不需要更高阶变量。因此, 设计 SM-ADRC 过程中不需要使用跟踪微分器部分。

### 2.3 电流内环 SM-ADRC 结构设计

电流内环 SM-ADRC 控制器采用滑模控制为主体, 引入自抗扰控制器估计次同步振荡分量并反馈补偿于 SM-ADRC 控制器。该控制结合了滑模控制不会放大次同步振荡分量与自抗扰控制实时反馈补偿阻断次同步振荡传播的特点。同时, 在扩张状态观测器的观测补偿作用下, 有效缓解了 SM-ADRC 对 GSC 参数的依赖程度, 进一步提升了电流内环抑制 SSO 的能力。因此, SM-ADRC 能够解决电流内环 PI 控制器主导的直驱风电机组接入弱交流电网诱发的 SSO 问题。

为了确保对  $dq$  轴电流保持精确的跟踪效果, 在 SM-ADRC 设计过程中, 以  $i_{gd}$  和  $i_{gq}$  跟踪效果设计滑模面。鉴于系统控制过程产生的高频切换问题, 采用基于改进型的指数趋近律控制的 SM-ADRC。然后, 构建扩张状态观测器观测估计  $dq$  轴电流、电压, 输出电流观测估计值与系统总扰动补偿值, 防止并网点电流发生畸变, 确保并网点电流平衡。SM-ADRC 电流内环控制器结构设计如图 4 所示。

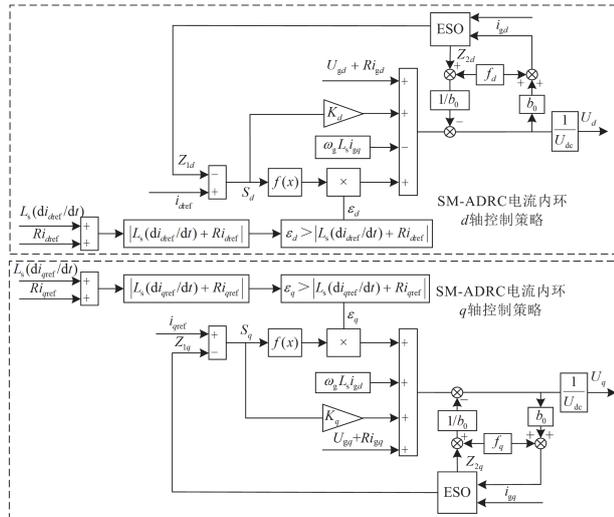


图 4 SM-ADRC 电流内环控制框图

Fig. 4 Block diagram of SM-ADRC current inner loop control

电流内环 SM-ADRC 滑模面的构造如式(8)所示。

$$\begin{cases} S_d = i_{dref} - i_{gd} = 0 \\ S_q = i_{qref} - i_{gq} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由风机原理图可知, GSC 电流内环控制在  $dq$  坐标系下的数学方程可表示为

$$\begin{cases} U_d = L_s \frac{di_{gd}}{dt} + Ri_{gd} - \omega_g L_s i_{gq} + U_{gd} \\ U_q = L_s \frac{di_{gq}}{dt} + Ri_{gq} + \omega_g L_s i_{gd} + U_{gq} \end{cases} \quad (9)$$

整理后可得

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = \frac{U_d}{L_s} - \frac{Ri_{gd}}{L_s} + \omega_g i_{gq} - \frac{U_{gd}}{L_s} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = \frac{U_q}{L_s} - \frac{Ri_{gq}}{L_s} - \omega_g i_{gd} - \frac{U_{gq}}{L_s} \end{cases} \quad (10)$$

当系统状态轨迹到达预设滑模面, 为了提高系统的控制效果, 本文采用改进型的指数趋近律控制的 SM-ADRC, 如式(4)所示。

根据式(4)、式(8)~式(10), 可得基于指数趋近律的电流内环控制结构, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} i_{dref} - i_{gd} = - \left( \frac{U_d}{L_s} - \frac{Ri_{gd}}{L_s} + \omega_g i_{gq} - \frac{U_{gd}}{L_s} + f_d \right) \\ i_{qref} - i_{gq} = - \left( \frac{U_q}{L_s} - \frac{Ri_{gq}}{L_s} - \omega_g i_{gd} - \frac{U_{gq}}{L_s} + f_q \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $f_d$ 、 $f_q$  分别表示  $d$ 、 $q$  轴的次同步振荡扰动量。  $f_d$ 、 $f_q$  所包含的扰动量如式(12)所示。

$$\begin{cases} f_d = \frac{\Delta U_{d\_sub}}{L_s} - \frac{R\Delta i_{gd\_sub}}{L_s} + \omega_g \Delta i_{gq\_sub} - \frac{\Delta U_{gd\_sub}}{L_s} \\ f_q = \frac{\Delta U_{q\_sub}}{L_s} - \frac{R\Delta i_{gq\_sub}}{L_s} - \omega_g \Delta i_{gd\_sub} - \frac{\Delta U_{gq\_sub}}{L_s} \end{cases} \quad (12)$$

最后, 采用扩张状态观测器的观测电流值代替电流内环  $dq$  轴输出电流, 降低 SM-ADRC 对电流内环参数的依赖。采用扩张状态观测器输出的系统总扰动量来抵消次同步振荡分量, 进一步提高了 SM-ADRC 策略的抑制效果, 表达式如式(13)所示。

$$\begin{cases} S_d = i_{dref} - Z_{1d} \\ S_q = i_{qref} - Z_{1q} \\ U_d = \frac{1}{U_{dc}} \left[ L_s (\varepsilon_d f(S_d) + K_d S_d) - \omega_g L_s i_{gq} + U_{gd} - \frac{f_d + Z_{2d}}{b_0} + Ri_{gd} \right] \\ U_q = \frac{1}{U_{dc}} \left[ L_s (\varepsilon_q f(S_q) + K_q S_q) + \omega_g L_s i_{gd} + U_{gq} - \frac{f_q + Z_{2q} + Ri_{gq}}{b_0} \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $Z_{1d}$ 、 $Z_{1q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电流跟踪信号的观测估计值;  $Z_{2d}$ 、 $Z_{2q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴总扰动的观

测估计值。

根据前文建立的 SSO 传播模型可知,次同步振荡扰动电流最先在直驱风机并网点产生。然后,电压也会随之产生扰动量,这些扰动量经过派克变换后以旋转坐标的形式进入电流内环。当次同步振荡干扰分量传入至电流内环 SM-ADRC 控制器,通过观测值补偿扰动量来阻止次同步振荡干扰量的传播。同时,SM-ADRC 控制器未含 PI 控制器中积分环节,对干扰量没有放大的作用,该项扰动量的存在不会在风机网侧构成次同步振荡正反馈回路,确保了抑制次同步振荡的有效性。

上述分析从理论上阐述了 SM-ADRC 抑制 SSO 的可行性,电流内环 SM-ADRC 设计流程如图 5 所示。SM-ADRC 解决了 PI 控制器对次同步振荡分量的放大作用,减少了系统与弱交流电网的相互作用,进而阻断了 SSO 的传播路径,从而避免了系统继续衍生其他次同步振荡分量,防止 SSO 的发生。

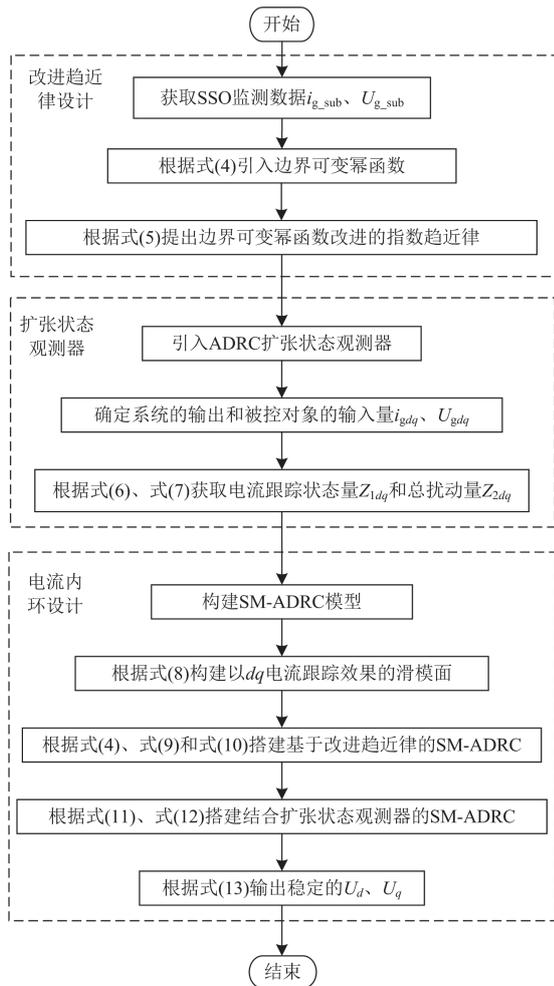


图 5 电流内环 SM-ADRC 设计流程图

Fig. 5 Flow chart of current inner loop SM-ADRC

### 3 仿真验证

#### 3.1 参数设计

根据 IEEE 标准定义,采用系统短路比(short circuit ratio, SCR)区分交流电网的强弱程度。当系统 SCR 小于 3 时,认为该交流电网是弱电网。为了验证本文所提的电流内环 SM-ADRC 策略的有效性,在电磁暂态仿真软件中搭建直驱风电场接入弱交流电网诱发 SSO 的仿真模型。

在单台直驱风机的基础上并联理想受控电流源等效 10 台风电机组并网,如图 6 所示,单台风机的装机容量为 1.5 MW,风电机组参数见表 1。

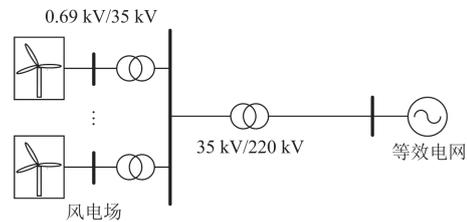


图 6 直驱风电场并网

Fig. 6 Direct-drive wind farm grid connection

表 1 直驱风机参数

Table 1 Parameter of direct-drive wind turbine generator

参数	数值	参数	数值
额定功率 $P/\text{MW}$	1.50	电压外环比例系数 $K_{p,dc}$	0.05
网侧电压 $U_{abc}/\text{V}$	690	电压外环积分系数 $K_{i,dc}$	500
滤波电感 $L_s/\text{mH}$	0.15	电流内环比例系数 $K_p$	1.00
直流侧电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	9000	电流内环积分系数 $K_i$	0.50
直流侧电压 $U_{dc}/\text{V}$	1130	ESO 参数 $\beta_1$	9 200 000
趋近律正系数 $K_d$	28	ESO 参数 $\beta_2$	8000

#### 3.2 不同电网强度 SM-ADRC 与 PI 控制效果分析

设置风速为 13 m/s,待直驱风机并网稳定运行一段时间后,分别模拟两组不同强度的弱交流电网,经计算后第一组电网强度对应的 SCR 为 2.6,第二组电网强度对应的 SCR 为 2.2,对比结果如图 7 所示。图 8 为 SM-ADRC 与 PI 对比控制下的局部电压放大图。

直驱风电机组采用 PI 控制时,在接入弱电网(SCR 为 2.6)后,GSC 输出有功功率、直流侧电压、三相电压、三相电流迅速发散振荡。由图 7 所示的振荡波形可知,电流比电压振荡更为严重,与前文 SSO 传播模型中的推断相符。对 a 相电流进行快速傅里叶分析(fast fourier transform, FFT),结果如图 9(a)所示。a 相电流中含有两组次/超同步振荡分量,频率分别为 34/66 Hz、18/82 Hz。

当直驱风电机组采用本文所提的电流内环 SM-ARDC 策略代替 PI 控制时, 在接入弱交流电网后, GSC 侧输出有功功率、直流电压、三相电压、三相

电流在接入瞬间发生轻微暂态过程, 而后转入稳定运行状态, 并未发生 SSO, a 相电流频谱分析结果见图 9(b)所示。

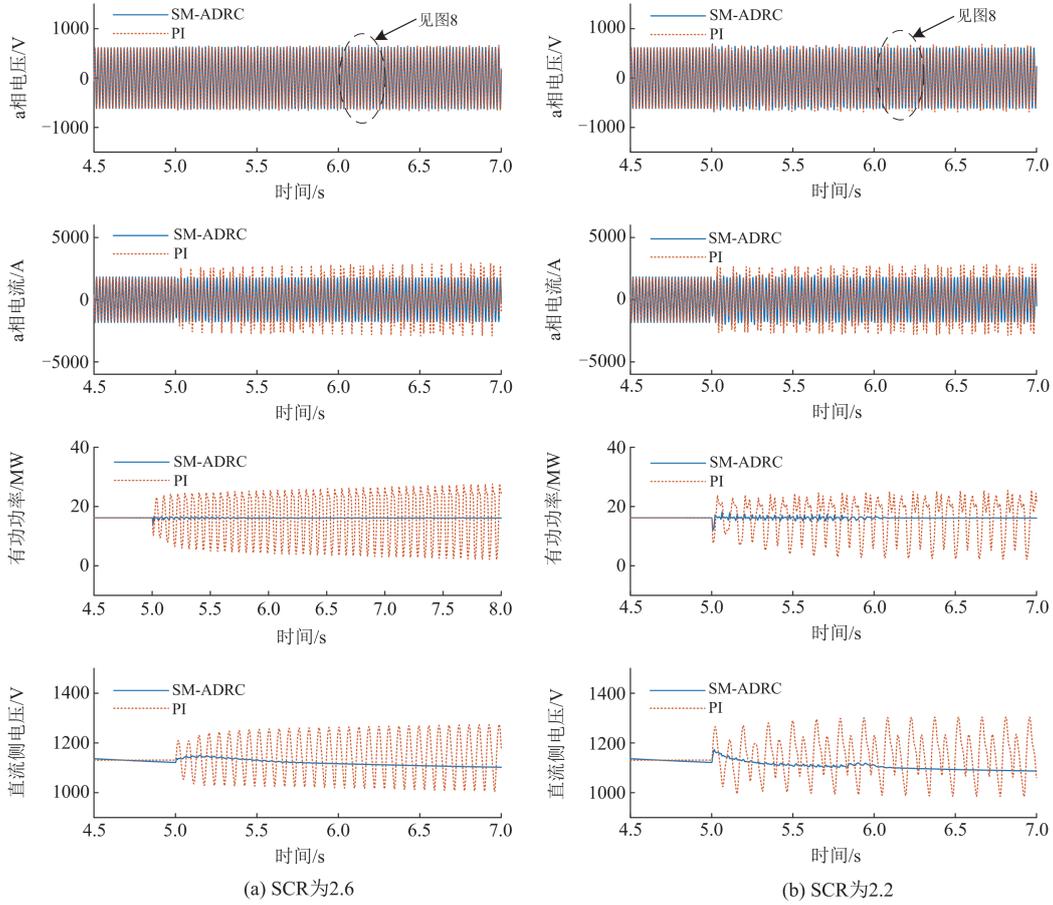


图 7 不同电网强度下 SM-ADRC 与 PI 控制策略对比

Fig. 7 Comparison of SM-ADRC and PI control strategies under different grid strengths

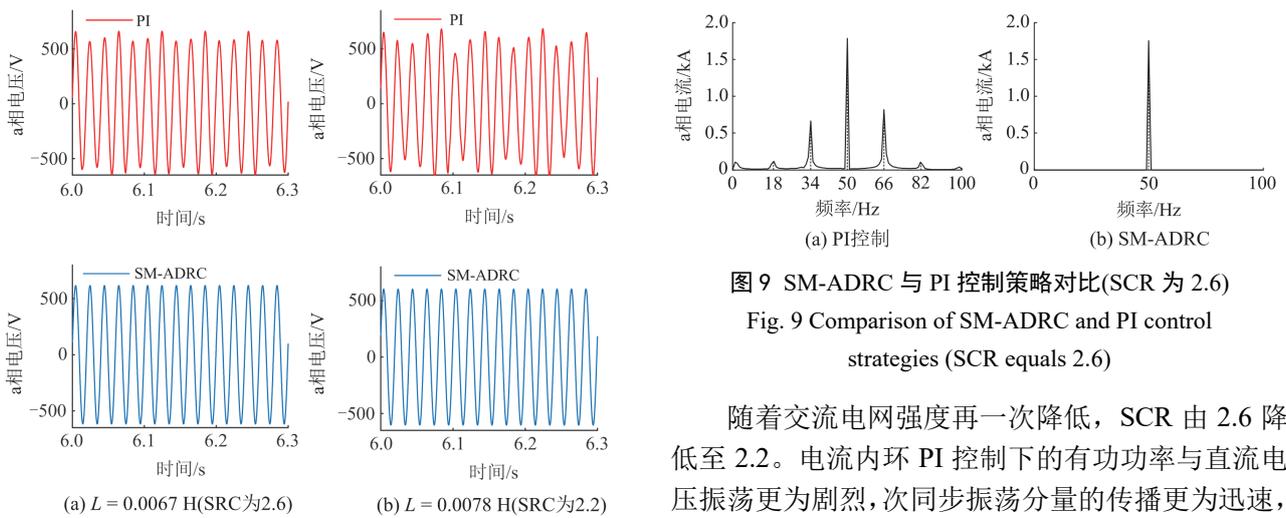


图 8 局部电压放大对比

Fig. 8 Local voltage amplification comparison

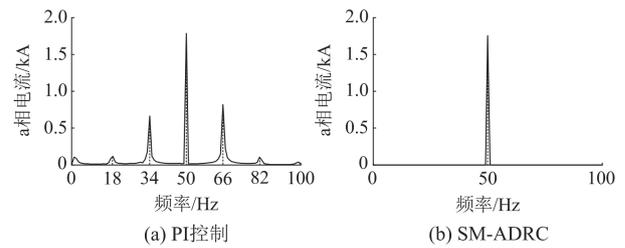


图 9 SM-ADRC 与 PI 控制策略对比(SCR 为 2.6)

Fig. 9 Comparison of SM-ADRC and PI control strategies (SCR equals 2.6)

随着交流电网强度再一次降低, SCR 由 2.6 降低至 2.2。电流内环 PI 控制下的有功功率与直流电压振荡更为剧烈, 次同步振荡分量的传播更为迅速, 有功功率与直流电压的波形振荡变化趋势一致, 系统严重失稳。对 a 相电流 FFT 分析, 结果如图 10(a)

所示, 电流振荡频率更为复杂。其中, 次/超同步振荡频率 36/64 Hz、23/77 Hz 所对应的幅值较大, 其他振荡频率对应的幅值较小。但是, 相较于 PI 控制, 电流内环 SM-ADRC 并未发生 SSO, a 相电流的频谱分析中并未出现其他次/超频率分量, 如图 10(b)所示。

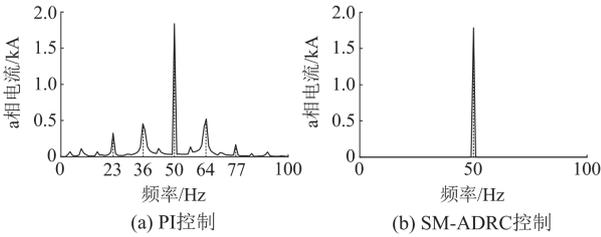


图 10 SM-ADRC 与 PI 控制策略 FFT 对比(SCR 为 2.2)

Fig. 10 Comparison of SM-ADRC and PI control strategies (SCR equals 2.2)

通过直驱风机接入弱交流电网的对比仿真可知, 相较于 PI 控制, 电流内环 SM-ADRC 控制器对弱交流电网下直驱风电机组诱发的 SSO 有较好的抑制效果。

### 3.3 SM-ADRC 策略适应性分析

为了验证电流内环 SM-ADRC 策略在其他工况下的适应能力, 设置低风速下诱发 SSO, 进行时域仿真分析, 并与 PI 控制对比分析, 结果如图 11 所示。

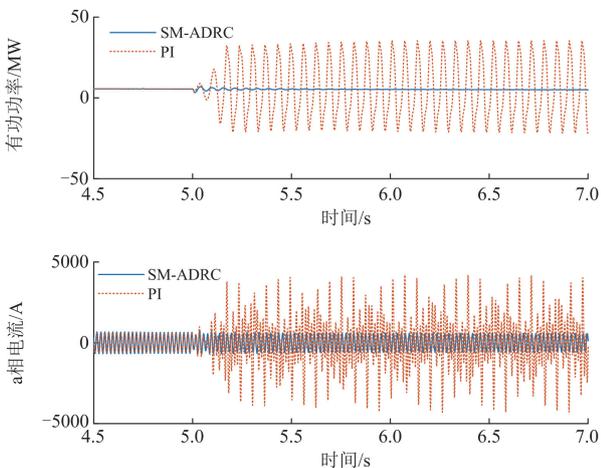


图 11 低风速工况下抑制效果对比

Fig. 11 Comparison of suppression effects under low wind speed conditions

低风速情况下, 直驱风机接入弱交流电网易诱发 SSO。设置风速为 7 m/s, 待风机并网稳定运行后, 第 5 s 时模拟运行环境 SCR 降低至 2.6, 保持 SM-ADRC 控制器参数不变。对比结果如图 11 所示, 采用 PI 控制电流内环, 直驱风电场接入弱交流电网

后, GSC 侧有功功率、a 相电流迅速发生 SSO, 而采用 SM-ADRC 策略在低风速的情况下仍能抑制 SSO, 保证直驱风机的稳定运行。

上述工况仿真结果表明, 电流内环 SM-ADRC 策略在低风速运行环境下能有效切断次同步振荡分量的传播途径, 验证了本文所提控制策略在低风速工况下仍能保持良好的适应性。

### 3.4 SM-ADRC 与传统趋近律 SMC 抑制效果对比分析

为了验证电流内环 SM-ADRC 策略的优越性, 本文设置了基于改进指数趋近律控制的 SM-ADRC 与传统指数趋近律控制的 SMC 电流内环对比仿真分析。设置风速为 13 m/s, 待直驱风电场稳定运行后, 再次模拟电网强度降低, 波形对比结果如下所示。

在 SCR 为 2.6 电网强度下, 改进指数趋近律的 SM-ADRC 与传统指数趋近律的滑模控制均能较好地抑制 SSO, 如图 12 所示。但是相较于电流内环 SM-ADRC 控制, 由有功功率对比图可知, 在传统指数趋近律的滑模控制下, 因受到控制系统在滑模面高频切换的影响, 进而造成 SMC 抑制效果的不稳定, 直驱风电机组 GSC 输出有功功率仍有轻微振荡现象。在第 5 s 交流电网强度降低的暂态瞬间, SMC 输出有功功率瞬时值下降更为严重, 控制效果没有改进指数趋近律的 SM-ADRC 稳定, 虽能有效抑制 SSO, 却在此后维持了轻微振荡的状态。

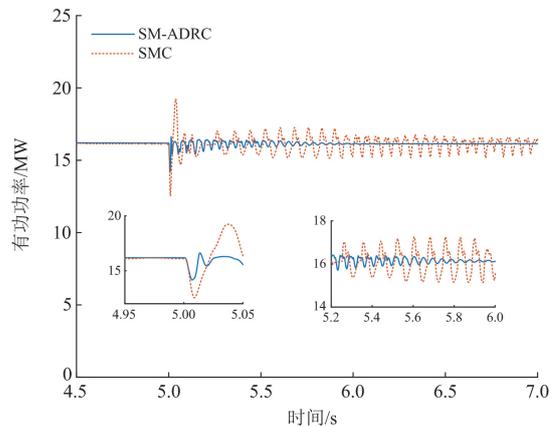


图 12 SM-ADRC 与 SMC 控制策略对比(SCR 为 2.6)

Fig. 12 Comparison of SM-ADRC and SMC control strategies (SCR equals 2.6)

在改进趋近律的 SM-ADRC 下, 直驱风电机组有功功率在暂态瞬间的振幅变化更小, 经历暂态状态后快速收敛, 抑制时间更为迅速。将上述两种控制策略下的电流进行幅频分析, 如图 13 所示, 出现两组振荡模态, 对应频率分别是 30 Hz 和 70 Hz, 数

据见表 2。上述对比结果表明, 改进趋近律的 SM-ADRC 解决了控制系统在滑模面的高频切换问题, 在 SM-ADRC 下, 有功功率未曾出现小幅度的振荡, 对 SSO 的抑制有较好的效果。

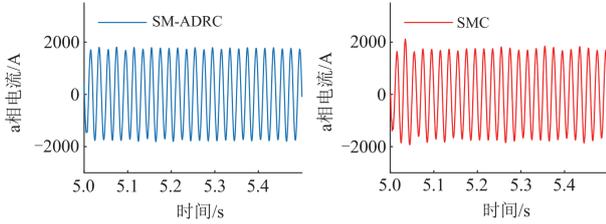


图 13 SM-ADRC 与 SMC 控制策略局部电流对比(SCR 为 2.6)  
Fig. 13 Comparison of local current between SM-ADRC and SMC control strategy (SCR equals 2.6)

表 2 SM-ADRC 与 SMC 抑制效果对比(SCR 为 2.6)  
Table 2 Comparison of suppression effects of SM-ADRC with SMC (SCR equals 2.6)

振荡模式	振荡频率/Hz	相对基波幅值/%	
		SMC 控制	SM-ADRC 控制
1	30.0	1.0	0.30
2	70.0	0.92	0.25

在 SCR 为 2.2 的电网强度下, 相较于 PI 控制下诱发的严重 SSO, 传统指数趋近律的滑模控制仍能维持系统运行, 但抑制效果没有 SM-ADRC 显著。如图 14 所示, 随着交流电网强度的降低, 滑模控制的抑制效果也逐渐降低, 直驱风电机组有功功率的瞬时值在暂态发生瞬间下降得更为严重, 并在此后仍有振荡发生。对其电流波形进行 FFT 分析, 发现出现两组振荡模式, 分别在频率 40 Hz 和 60 Hz 处有轻微振荡, 振荡幅值较小, 如图 15 所示, 幅频分析结果见图 16 所示, 幅频数据见表 3。

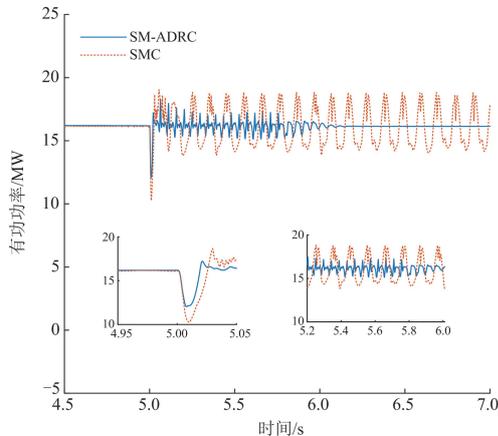


图 14 SM-ADRC 与 SMC 控制功率对比(SCR 为 2.2)  
Fig. 14 Comparison of control power of SM-ADRC and SMC (SCR equals 2.2)

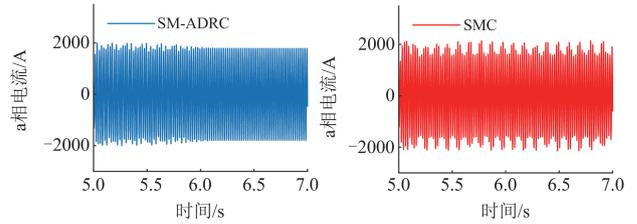


图 15 SM-ADRC 与 SMC 控制策略电流对比(SCR 为 2.2)  
Fig. 15 Current comparison between SM-ADRC and SMC control strategy (SCR equals 2.2)

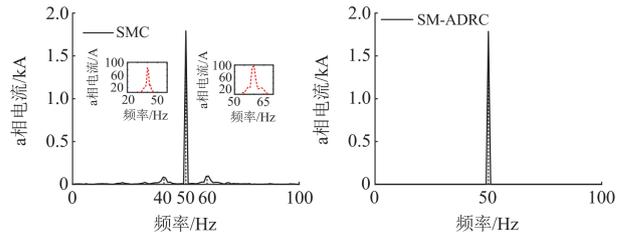


图 16 电流幅频特性对比(SCR 为 2.2)  
Fig. 16 Comparison of amplitude-frequency characteristics of current (SCR equals 2.2)

表 3 SM-ADRC 与 SMC 抑制效果对比(SCR 为 2.2)  
Table 3 Comparison of suppression effects of SM-ADRC and SMC (SCR equals 2.2)

振荡模式	振荡频率/Hz	相对基波幅值/%	
		SMC 控制	SM-ADRC 控制
1	40.0	4.8	0.42
2	60.0	5.4	0.39

由上述对比仿真结果可知, 相较于指数趋近律的滑模控制, 本文所提电流内环 SM-ADRC 策略能有效解决控制系统在滑模面高频切换而造成的控制效果不稳定的问题。在发生 SSO 的暂态瞬间, 有效确保了直驱风电机组的稳定运行, 发挥了较好的抑制效果。通过 SM-ADRC 与传统指数趋近律的 SMC 对比分析, 验证了本文所提控制策略的优越性。

## 4 结论

针对直驱风电场接入弱交流电网诱发的 SSO 问题, 本文提出一种基于电流内环 SM-ADRC 策略, 得出主要结论如下所述。

1) 针对 PI 控制器放大次同步振荡分量问题, 提出一种基于电流内环 SM-ADRC 策略。通过搭建直驱风电场接入弱交流电网的仿真模型, 验证了本文所提控制策略抑制 SSO 的有效性, 并在低风速工况下验证了 SM-ADRC 的适应性。

2) 鉴于传统指数趋近律存在的高频切换问题,

提出了一种基于边界可变幂函数改进的指数趋近律,克服了符号函数在滑模面高频切换而引发的控制效果不稳定问题。通过在不同强度的弱交流电网下与传统指数趋近律的电流内环 SMC 抑制 SSO 效果对比分析,验证了本文所提的控制策略能够有效改善控制系统在滑模面的切换问题,确保了抑制 SSO 的有效性。

### 参考文献

- [1] 王盼盼, 陈武晖, 田书新, 等. 风火打捆系统次同步模式相互作用特性[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 91-100.  
WANG Panpan, CHEN Wuhui, TIAN Shuxin, et al. Interaction characteristics of subsynchronous modes of a wind-thermal bundled system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 91-100.
- [2] 陈露洁, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2297-2310.  
CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2297-2310.
- [3] VERMA N, KUMAR N, KUMAR R. Battery energy storage-based system damping controller for alleviating sub-synchronous oscillations in a DFIG-based wind power plant[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-17.
- [4] DONG Xin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Measurement-driven diagnostics of mechanism and source of subsynchronous oscillations in power systems with renewable power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 5366-5381.
- [5] 王杨, 王超群, 晁苗苗, 等. 基于同步相量数据幅频特征的次超同步振荡模式辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 1-11.  
WANG Yang, WANG Chaoqun, CHAO Miaomiao, et al. Sub-and super-synchronous oscillation mode identification based on amplitude and frequency characteristics of synchronous phasor data[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 1-11.
- [6] 伍双喜, 王晰, 刘洋, 等. 基于构网型储能的风电场-弱电网次同步振荡抑制方法[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 147-155.  
WU Shuangxi, WANG Xi, LIU Yang, et al. Subsynchronous damping control of grid-forming BESS in wind farms connected to a weak AC grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 147-155.
- [7] 秦婷, 刘怀东, 方伟, 等. 含直驱型风机电力系统的动态安全域[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4123-4130.  
QIN Ting, LIU Huaidong, FANG Wei, et al. Dynamic security region of power systems with direct-drive permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4123-4130.
- [8] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. 锁相环控制对永磁直驱风机并网次同步振荡稳定性的影响——控制参数安全域[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 142-149.  
REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Influence of PLL control on sub-synchronous oscillation stability of grid-connected PMSG: control parameter safety region[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 142-149.
- [9] 徐海亮, 聂飞, 王诗楠. 弱电网下永磁风机网侧变流器频率耦合效应关键作用因子评估及控制对策[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1687-1697.  
XU Hailiang, NIE Fei, WANG Shinan. Key factors evaluation and suppression strategy of frequency-coupling mechanism for PMSG grid-side converter in weak AC grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1687-1697.
- [10] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1061-1067.  
WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [11] 蔡维正, 郭昆丽, 刘璐雨, 等. 基于一阶 LADRC 控制的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 175-184.  
CAI Weizheng, GUO Kunli, LIU Luyu, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on first-order LADRC for direct-drive wind turbines[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 175-184.
- [12] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4662-4670, 4891.  
SONG Ruihua, GUO Jianbo, LI Baiqing, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4662-4670, 4891.
- [13] 徐万万, 彭志鹏, 刘江, 等. 基于阻抗比参数自适应的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. 控制工程, 2023, 30(7): 1163-1170.  
XU Wanwan, PENG Zhipeng, LIU Jiang, et al. Sub-

- synchronous oscillation mitigation strategy based on adaptive adjustment of parameters with impedance ratio for direct-drive wind turbines[J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(7): 1163-1170.
- [14] BI Tianshu, LI Jingyi, ZHANG Peng, et al. Study on response characteristics of grid-side converter controller of PMSG to sub-synchronous frequency component[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(7): 966-972.
- [15] LIU Yiqi, ZHENG Junyuan, CHEN Qichao, et al. MMC-STATCOM supplementary wide-band damping control to mitigate subsynchronous control interaction in wind farms[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 141: 108171.
- [16] 周佩朋, 宋瑞华, 李光范, 等. 直驱风电机组次同步振荡阻尼控制方法及其适应性[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 177-184.
- ZHOU Peipeng, SONG Ruihua, LI Guangfan, et al. Damping control method of subsynchronous oscillation for direct drive wind turbine generator and its adaptability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 177-184.
- [17] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 机侧与网侧多通道附加阻尼控制器参数协调综合抑制低频振荡和次同步振荡[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(11): 50-56, 62.
- CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Parameter coordination of generator-side and grid-side multi-channel supplementary damping controllers to suppress low-frequency oscillation and sub-synchronous oscillation comprehensively[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(11): 50-56, 62.
- [18] ZHOU Weixiang, WANG Yueying, LIANG Yinzheng. Sliding mode control for networked control systems: a brief survey[J]. *ISA Transactions*, 2022, 124: 249-259.
- [19] SEBAALY F, VAHEDI H, KANAAN H Y. et al. Design and implementation of space vector modulation-based sliding mode control for grid-connected 3L-NPC inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(12): 7854-7863.
- [20] 王刚, 高本锋, 王晓, 等. 基于滑模控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(4): 163-172.
- WANG Gang, GAO Benfeng, WANG Xiao, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct drive wind farm based on sliding mode control[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2023, 44(4): 163-172.
- [21] 邵保领, 刘凌, 胡铭遥. 面向永磁同步电机负载转矩观测的自抗扰改进滑模控制[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(3): 204-211.
- SHAO Baoling, LIU Ling, HU Mingyao. Improved sliding mode control with disturbance rejection for load torque observation of permanent magnet synchronous motors[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(3): 204-211.
- [22] 李宗霖, 陈昊, 戚湧, 等. 基于自抗扰滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制策略[J/OL]. *电工技术学报*, 1-14[2024-03-08]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231277.
- LI Zonglin, CHEN Hao, QI Yong, et al. Torque sharing function control strategy for switched reluctance motor based on active disturbance rejection sliding mode control[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*: 1-14[2024-03-08]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231277.
- [23] 赵峰, 罗雯, 高锋阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 28-35.
- ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, et al. An improved sliding mode control for PMSM considering sliding mode chattering and disturbance compensation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 28-35.
- [24] 段茜月, 陈燕东, 徐元璨, 等. 一种改进线性扩张状态观测器的自抗扰控制宽频带振荡抑制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 12-24.
- DUAN Xiyue, CHEN Yandong, XU Yuancan, et al. A wideband oscillation suppression method for active disturbance rejection control with an enhanced linear expansion state observer[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 12-24.
- [25] 高本锋, 易友川, 邵冰冰, 等. 基于自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 148-157.
- GAO Benfeng, YI Youchuan, SHAO Bingbing, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on ADRC for D-PMSGs based wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 148-157.

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2024-05-26

作者简介:

郭成(1978—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事电能质量分析与控制、电力系统稳定分析研究工作。E-mail: gc325@126.com

(编辑 魏小丽)