

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.011

# 基于反馈精确线性化解耦的 FMSS 改进滑模控制策略

马文忠<sup>1</sup>, 余欢<sup>1</sup>, 李维国<sup>2</sup>, 孟繁丞<sup>1</sup>, 刘星宇<sup>1</sup>, 么旻蕊<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580;

2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要:** 柔性多状态开关 (flexible multi-state switch, FMSS) 存在非线性和强耦合的特点, 传统的比例积分 (proportional integral, PI) 控制难以实现输出功率的完全解耦, 且存在 PI 参数调节困难、系统动态响应速度慢及鲁棒性差等问题。文中首先利用反馈精确线性化将 FMSS 由高阶非线性系统转化为 2 个完全独立的一阶线性系统, 实现了有功和无功电流的完全解耦; 然后针对传统滑模控制 (sliding mode control, SMC) 趋近速度慢、系统收敛性能差以及运动抖动大等问题, 设计了一种基于自适应趋近率的改进 SMC 算法, 对电压外环和电流内环进行优化, 并通过 Lyapunov 函数研究了所提算法的稳定性; 最后在 Simulink 软件中, 对三端口 FMSS 在输出功率扰动、交流电压暂降及系统参数摄动等工况下进行仿真分析, 结果表明所提控制策略增强了系统的鲁棒性和抗干扰能力, 可有效提升系统的动态响应速度。

**关键词:** 智能配电网; 柔性多状态开关 (FMSS); 模块化多电平换流器; 反馈精确线性化; 改进滑模控制; 完全解耦

**中图分类号:** TM564

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0092-10

## 0 引言

双碳时代背景下, 间歇性分布式能源的大规模接入和新型负荷的多元化发展给传统配电网带来了馈线功率失衡、电压波动越限、供电可靠性降低等电能质量问题, 严重影响配电网运行的稳定性和安全性<sup>[1-4]</sup>。

柔性多状态开关 (flexible multi-state switch, FMSS) 作为一种灵活的新型电力电子设备, 由智能软开关 (soft open point, SOP) 演变发展而来<sup>[5-6]</sup>。FMSS 可以在配电网的多个关键节点取代传统联络开关, 实现配电网的柔性互联与配电系统潮流的灵活可控, 提高配电网对分布式能源的消纳能力<sup>[7-8]</sup>。目前, FMSS 已成为构建新型智能配电系统的关键。模块化多电平换流器 (modular multi-level converter, MMC) 具有电压质量高、可拓展性好以及开关损耗低等特点, 可以提高系统容量和电压水平<sup>[9-10]</sup>, 因此文中以 MMC 作为端口主电路拓扑, 并以三端口 FMSS 为研究对象。

文献[11-13]在考虑 FMSS 接入的情况下, 对配电网运行优化进行了研究, 但未提及 FMSS 本身的控制策略; 文献[14]利用比例积分 (proportional integral, PI) 双闭环协同控制实现对输出功率的精确控制, 但是三端口有 12 个 PI 参数, 整定困难, 且抗

干扰能力欠缺; 文献[15-16]对传统下垂控制进行改进, 实现了功率合理分配, 但电流内环仍为 PI 控制, 参数敏感且鲁棒性不足; 文献[17]提出一种改进模型预测控制, 减少了 PI 控制环节, 提高了系统动态响应速度, 但存在计算量大、预测延时等问题; 文献[18]采用无差拍控制设计电流内环, 但是要进行参数辨识, 且参数严重摄动时, 其控制精度会下降。

上述文献研究了 FMSS 的控制策略, 但均未考虑 FMSS 非线性强耦合的本质特征。反馈精确线性化方法可以将 FMSS 由非线性系统转化为线性系统, 实现状态变量的完全解耦, 从而简化控制器设计, 提高系统运行性能<sup>[19-21]</sup>。滑模控制 (sliding mode control, SMC) 作为一种非线性控制方法, 其基本思想是将状态空间划分为多个子空间, 每个子空间对应唯一的控制结构, 迫使状态变量沿着边界滑动<sup>[21-22]</sup>。与传统线性控制相比, SMC 具有更快的动态响应速度以及更强的鲁棒性, 在电机驱动及功率变流器中得到广泛应用<sup>[20-25]</sup>, 在三端口 FMSS 控制中具有广泛应用前景。

文中首先利用反馈精确线性化将 FMSS 的非线性模型线性化, 实现了有功和无功电流的完全解耦; 然后提出一种自适应新型趋近率, 能够合理调节 SMC 的趋近速度, 实现系统的平滑收敛, 并设计平滑性能更强的激活函数, 进一步减少运动抖动; 接着针对电压外环和电流内环, 分别设计改进 SMC, 减少了 PI 控制环节, 能有效提高系统动态响应速度并增强稳定性。

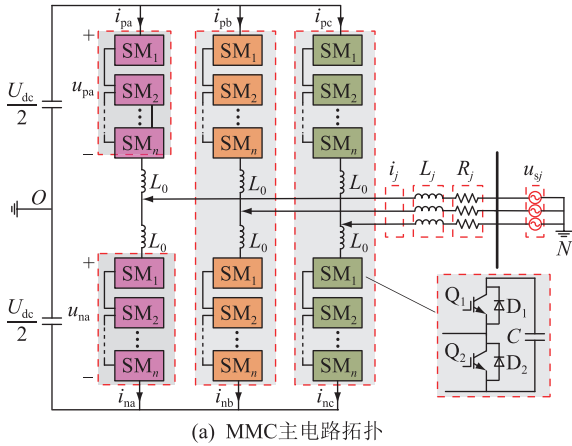
收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877215); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2019MEE094)

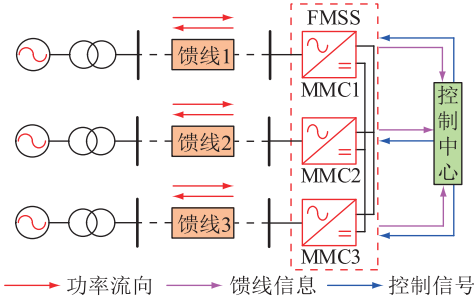
## 1 FMSS 拓扑分析与建模

### 1.1 FMSS 拓扑

三端口 FMSS 所采用的 MMC 拓扑如图 1(a) 所示,配电网接入拓扑如图 1(b) 所示。图中  $u_{sj}$ 、 $i_j$  分别为交流侧系统电压和电流 ( $j=a, b, c$ , 表示 a、b、c 三相);  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $u_{pj}$ 、 $u_{nj}$  分别为  $j$  相上、下桥臂端口电压;  $i_{pj}$ 、 $i_{nj}$  分别为  $j$  相上、下桥臂电流;  $L_0$  为桥臂电感;  $L_j$ 、 $R_j$  分别为交流侧滤波电感和电阻; 点  $O$  为直流侧虚拟中性点; 点  $N$  为网侧接地点; 半桥子模块由 2 个开关管  $Q_1$  和  $Q_2$ 、2 个功率二极管  $D_1$  和  $D_2$  以及储能电容  $C$  组成。



(a) MMC 主电路拓扑



(b) FMSS 配电网接入拓扑

图 1 三端口 FMSS 系统拓扑

Fig.1 Topology of three-port FMSS system

### 1.2 FMSS 数学模型

首先根据图 1(a) 建立 MMC 的数学模型,  $u_{ON}$  为直流侧虚拟中性点到网侧接地点的电势差, 推导出关于上、下桥臂的方程式, 具体如下:

$$u_{sj} = \frac{U_{dc}}{2} + u_{ON} - u_{pj} - L_0 \frac{di_{pj}}{dt} + L_j \frac{di_j}{dt} + R_j i_j \quad (1)$$

$$u_{sj} = -\frac{U_{dc}}{2} + u_{ON} + u_{nj} + L_0 \frac{di_{nj}}{dt} + L_j \frac{di_j}{dt} + R_j i_j \quad (2)$$

将式(1)和式(2)相加并化简可得:

$$u_{sj} = u_{ON} + e_j + L \frac{di_j}{dt} + R i_j \quad (3)$$

式中:  $L$  为等效电感,  $L = L_j + L_0/2$ ;  $R$  为等效电阻,  $R = R_j$ ;  $e_j$  为虚拟电势,  $e_j = (u_{nj} - u_{pj})/2 = s_j U_{dc}$ ,  $s_j$  为  $j$  相开关函数。

当 FMSS 系统三相平衡时, 可以认为  $u_{ON} = 0$ , 进而得到简化后的 MMC 状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_a U_{dc} \\ s_b U_{dc} \\ s_c U_{dc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

将 MMC 在 abc 坐标系下的状态方程映射在 dq 旋转坐标系下, 得到:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} & -s_d U_{dc} \\ u_{sq} & -s_q U_{dc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得, MMC 交流侧输出电流由网侧电压和虚拟电势共同决定。

三端口 FMSS 直流侧动态数学模型如下:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=1}^3 i_{dck} = \sum_{k=1}^3 (s_{ak} i_{ak} + s_{bk} i_{bk} + s_{ck} i_{ck}) \quad (6)$$

式中:  $i_{dck}$  为端口  $k$  直流侧输出电流;  $s_{ak}$ 、 $s_{bk}$ 、 $s_{ck}$  分别为端口  $k$  的 a、b、c 相开关函数;  $i_{ak}$ 、 $i_{bk}$ 、 $i_{ck}$  分别为端口  $k$  交流侧电流的 a、b、c 相分量。

根据瞬时功率理论, 各端口输出功率如下:

$$\begin{cases} P_k = \frac{3}{2} (u_{sdk} i_{dk} + u_{sqk} i_{qk}) \\ Q_k = \frac{3}{2} (u_{sqk} i_{dk} - u_{sdk} i_{qk}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_k$ 、 $Q_k$  分别为端口  $k$  向直流侧输入的有功和无功功率;  $u_{sdk}$ 、 $u_{sqk}$  分别为端口  $k$  网侧电压的 d、q 轴分量;  $i_{dk}$ 、 $i_{qk}$  分别为端口  $k$  交流侧电流的 d、q 轴分量。

当系统稳定时, 认为直流电压变化率为零, 结合式(6)可得有功功率平衡关系:

$$\begin{cases} P_k = U_{dc} i_{dck} \\ \sum_{k=1}^3 P_k = U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} = 0 \quad k = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 当系统稳定运行且忽略损耗时, 三端口 FMSS 输入和输出的有功功率守恒。

### 1.3 FMSS 基本控制策略

在正常运行状态下, FMSS 主要工作在  $U_{dc}$ - $Q$  模式和  $P$ - $Q$  模式。在系统发生故障时, FMSS 可以通过工作模式的平滑切换, 使端口工作在  $U_{ac}$ - $f$  模式, 对配电网提供三相电压以及频率支撑, 实现非故障区域不间断供电<sup>[26-27]</sup>。三端口 FMSS 工作模式如表 1 所示, 其中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别代表端口 1、端口 2、端口 3。

表 1 三端口 FMSS 工作模式

Table 1 Control modes of three-port FMSS

序号	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	运行场景
1	U <sub>dc</sub> -Q 控制	P-Q 控制	P-Q 控制	正常运行
2	P-Q 控制	U <sub>dc</sub> -Q 控制	P-Q 控制	正常运行
3	P-Q 控制	P-Q 控制	U <sub>dc</sub> -Q 控制	正常运行
4	U <sub>ac</sub> -f 控制	U <sub>dc</sub> -Q 控制	P-Q 控制	T <sub>1</sub> 失电
5	U <sub>dc</sub> -Q 控制	U <sub>ac</sub> -f 控制	P-Q 控制	T <sub>2</sub> 失电
6	U <sub>dc</sub> -Q 控制	P-Q 控制	U <sub>ac</sub> -f 控制	T <sub>3</sub> 失电

采用稳态逆模型<sup>[14]</sup>针对传统功率外环控制器进行改进,直流电压外环控制器采用所提改进 SMC 进行优化,进而提高外环调节速率并有效地消除稳态误差。

## 2 FMSS 输入-输出反馈精确线性化

### 2.1 模型反馈精确线性化分析

将 FMSS 数学方程改写为仿射非线性模型<sup>[20-21]</sup>,具体如下:

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + G(x)u \quad (9)$$

$$y = h(x) = [h_1(x) \ h_2(x)]^T \quad (10)$$

其中:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 + \frac{u_{sd}}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 + \frac{u_{sq}}{L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$G(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{U_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{U_{dc}}{L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_d \\ s_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dref} - x_1 \\ i_{qref} - x_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\omega$ 为交流侧角频率; $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$ 分别为  $d$ 、 $q$  轴电流内环参考值,由理想计算值和 PI 补偿量两部分组成。

根据相关非线性控制理论<sup>[28-30]</sup>,得到 FMSS 仿射非线性系统反馈精确线性化的充要条件,经过分析推导,证明了系统模型可以实现反馈精确线性化,具体证明过程见文献[19]。

### 2.2 坐标变换和控制率

假定经过反馈精确线性化后,得到新的控制变

量为:

$$u^* = A(x) + B(x)u + \frac{R}{L}v \quad (16)$$

其中:

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{R}{L}x_1 - \omega x_2 - \frac{u_{sd}}{L} \\ \frac{R}{L}x_2 + \omega x_1 - \frac{u_{sq}}{L} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} \frac{U_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & \frac{U_{dc}}{L} \end{bmatrix} \quad (18)$$

选择坐标变换矩阵如下:

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} \quad (19)$$

结合式(9)一式(15)与式(19)可得新的线性系统:

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1^* \\ u_2^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

由式(15)可见,系统实现了输入输出线性化,以及无功和有功电流的完全解耦。对式(20)进行改写,可以得到原系统的反馈控制向量为:

$$u = \begin{bmatrix} \frac{L}{U_{dc}} \left( u_1^* + \omega x_2 + \frac{u_{sd}}{L} \right) - \frac{R}{U_{dc}} i_{dref} \\ \frac{L}{U_{dc}} \left( u_2^* - \omega x_1 + \frac{u_{sq}}{L} \right) - \frac{R}{U_{dc}} i_{qref} \end{bmatrix} \quad (21)$$

## 3 改进 SMC 设计

### 3.1 新型滑模趋近率设计

为保证系统趋近运动的动态性能,须设计指数趋近率<sup>[23]</sup>。传统的指数趋近率表达式如下:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad \varepsilon, q > 0 \quad (22)$$

式中: $s$ 为滑模面函数; $\varepsilon$ 、 $q$ 为趋近率控制参数。符号函数  $\operatorname{sgn}(s)$  在滑模面附近的平滑性能较差,会造成系统运动抖振,影响控制性能。文献[20]引入饱和函数  $\operatorname{sat}(s)$  来减小系统抖振,但是饱和函数边界层厚度选取较为麻烦,偏大会导致控制器不够精确灵敏,偏小会带来数值振荡;文献[23]引入一种变速趋近率来降低滑模面附近的抖振,但是动态响应速度较慢且稳定性有待提高。文中设计平滑性更加优越的激活函数如下:

$$\operatorname{sm}(s) = \frac{e^{ns} - 1}{e^{ns} + 1} \quad (23)$$

式中:常数  $n > 0$ , 用于调整函数斜率, 保证函数在  $[-1, 1]$  区间内连续变化, 且  $n$  越小函数曲线越平滑。传统趋近率使用等速趋近项  $-\varepsilon \text{sgn}(s)$ , 系统动态响应速度较慢, 无法有效抑制系统抖振, 因此文中设计了一种自适应趋近系数  $\beta(s)$ , 实现趋近速度自适应调节, 其表达式如下:

$$\beta(s) = \frac{1}{\mu_1 + e^{-\mu_2(1+\text{sgn}(s)s)}} \quad (24)$$

式中:  $\mu_1, \mu_2$  均为大于零的常数, 并引入  $\text{sgn}(s)$  对滑模面函数进行方向判定。当系统远离滑模面时, 趋近运动速度加快; 当系统靠近滑模面时, 减缓趋近速度, 保证系统平滑收敛, 降低抖振现象。

文中所提自适应新型趋近率如式(25)所示。

$$\dot{s} = -\frac{\varepsilon(e^{ns} - 1)}{[\mu_1 + e^{-\mu_2(1+\text{sgn}(s)s)}](e^{ns} + 1)} - qs \quad \varepsilon, q > 0 \quad (25)$$

为验证所提新型趋近率的有效性, 将其与传统趋近率、文献[20]所提改进型趋近率和文献[23]所提变速趋近率进行对比, 结果如图2所示。可以清楚看到, 文中方法可以更快地趋近于滑模面, 实现系统状态变量的平滑收敛, 减少了抖振现象, 增强了系统的抗干扰能力。同时, 对切换函数进行趋近运动方向判定后, 缓解了方向变动所带来的趋近延迟, 系统的动态响应速度进一步提高, 验证了所提新型趋近率的有效性。

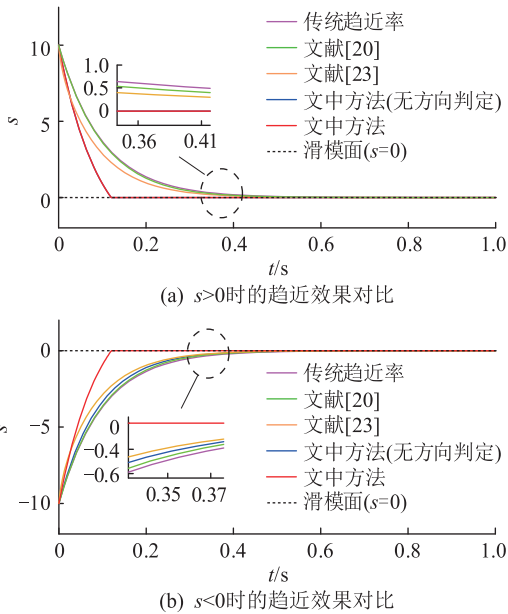


图2 不同趋近率的效果对比

Fig.2 Comparison of the effect of different approach rates

### 3.2 电压外环改进 SMC 设计

由式(6)可推导出:

$$U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} = P_1 + P_2 + \frac{3}{2}(s_d i_d + s_q i_q) \quad (26)$$

以端口3作为定直流电压控制端口, 式(26)中的  $s_d, s_q, i_d, i_q$  均为端口3参数。选择积分滑模面来消除线性滑模面存在的稳态误差, 如式(27)所示。

$$s_0 = v_0 + c_0 \int v_0 dt \quad (27)$$

式中:  $s_0$  为电压积分滑模面函数;  $c_0$  为滑模面控制参数;  $v_0$  为直流电压误差信号,  $v_0 = U_{dref} - U_{dc}$ , 其中  $U_{dref}$  为直流电压参考值。

对式(27)求导数可以推出式(28)如下:

$$\dot{s}_0 = -\frac{dU_{dc}}{dt} + c_0 v_0 \quad (28)$$

结合式(25)和式(26)可推导出:

$$P_1 + P_2 + \frac{3}{2}(s_d i_d + s_q i_q) = CU_{dc}(c_0 v_0 + \varepsilon_0 \beta(s_0) \text{sm}(s_0) + q_0 s_0) \quad (29)$$

当 FMSS 系统三相平衡且处于稳态时, 结合式(6)和式(29)可以求出  $d$  轴电流参考值为:

$$i_{dref} = \frac{2U_{dc}}{3(u_{sd} - Ri_d)} \times [CU_{dc}(\varepsilon_0 \beta(s_0) \text{sm}(s_0) + q_0 s_0) - P_1 - P_2] \quad (30)$$

### 3.3 电流内环改进 SMC 设计

电流内环滑模面设计如式(31)所示。

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 + c_1 \int v_1 dt \\ v_2 + c_2 \int v_2 dt \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中:  $s_1, s_2$  为积分滑模面;  $c_1, c_2$  为滑模面控制参数。

当系统到达稳态时, 滑模面  $s_1$  和  $s_2$  的导数为 0, 再结合式(15)和式(20)可得新系统控制率:

$$u^* = \begin{bmatrix} u_1^* \\ u_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R}{L} - c_1\right) v_1 - \varepsilon_1 \beta(s_1) \text{sm}(s_1) - q_1 s_1 \\ \left(\frac{R}{L} - c_2\right) v_2 - \varepsilon_2 \beta(s_2) \text{sm}(s_2) - q_2 s_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

结合式(27)和式(16)可得原系统控制量:

$$u = \frac{L}{U_{dc}} \begin{bmatrix} u_1^* \\ u_2^* \end{bmatrix} + \frac{1}{U_{dc}} \begin{bmatrix} -Ri_{dref} + \omega Lx_2 + u_{sd} \\ -Ri_{qref} - \omega Lx_1 + u_{sq} \end{bmatrix} \quad (33)$$

由上述推导可得系统整体控制框架如图3所示。其中,  $P_{ref}, Q_{ref}$  分别为有功和无功功率参考值;  $\Sigma P_{ref}$  为 PQ 端口有功功率参考值之和;  $u_{cirref}$  为阀组级环流抑制电压控制信号;  $u_{cref}$  为电容电压均衡控制信号。

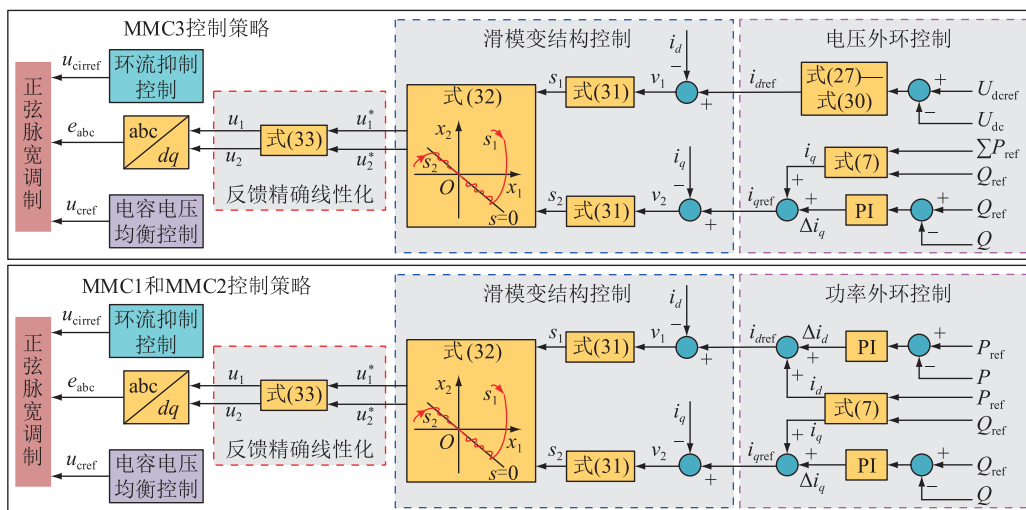


图3 三端口 FMSS 整体控制框图

Fig.3 Overall control block diagram of three-port FMSS

### 3.4 系统稳定性分析

为保证滑动模态存在且系统状态变量的运动轨迹能在有限时间内收敛至滑模面,选择 Lyapunov 函数对系统稳定性进行分析。将 Lyapunov 函数表示为  $V(s) = s^2/2$ ,对于电压积分滑模面  $s_0$ ,分析过程如下:

$$\dot{V}(s_0) = s_0 \dot{s}_0 = -s_0 \varepsilon_0 \beta(s_0) \text{sm}(s_0) - q_0 s_0^2 \quad (34)$$

当  $s_0 > 0$  时,  $-s_0 \varepsilon_0 \beta(s_0) \text{sm}(s_0) < 0, -q_0 s_0^2 < 0$ , 则  $\dot{V}(s_0) = s_0 \dot{s}_0 < 0$ ; 当  $s_0 < 0$  时,  $-s_0 \varepsilon_0 \beta(s_0) \text{sm}(s_0) < 0, -q_0 s_0^2 < 0, \dot{V}(s_0) = s_0 \dot{s}_0 < 0$  仍然成立。所以  $s_0$  满足 Lyapunov 稳定条件:

$$\dot{V}(s_0) = s_0 \dot{s}_0 < 0 \quad (35)$$

同理可得  $s_1$  和  $s_2$  也满足 Lyapunov 稳定条件,故所提控制算法可以保证系统闭环稳定运行。

## 4 系统仿真分析

为了验证文中所提控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建图 1 所示三端口 FMSS 模型。三端口 MMC 换流器在底层控制上均采用环流抑制策略和基于子模块电容电压排序算法的均压控制策略,调制方式采用最近电平逼近策略。设定系统在正常运行时,端口 1 和端口 2 工作在 P-Q 模式,端口 3 工作在  $U_{dc}$ -Q 模式,3 个端口具有相同的系统参数,如表 2 所示。

### 4.1 改进 SMC 优化分析

对传统 SMC、文献[20]中 sat 改进控制、文献[23]中变速 SMC 和文中所提自适应 SMC 算法进行仿真对比,研究文中算法的优化性能,并对 3.1 节中的理论分析进行验证。端口 2 的有功和无功功率参

表 2 系统仿真参数

Table 2 System simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流电压额定值/kV	40	MMC 桥臂电感/mH	5
交流电压额定值/kV	10	MMC 子模块电容/mF	0.25
MMC 额定容量/(MV·A)	10	单相桥臂子模块个数	10

考值分别为 0.2 p.u. 和 0.3 p.u.,设端口 2 有功功率在  $t=0.02$  s 时由 0.2 p.u. 跃变至 0.4 p.u.,无功功率在  $t=0.03$  s 时由 0.3 p.u. 跌落至 0.1 p.u.,仿真结果如图 4 所示。

由图 4(a) 和图 4(c) 输出功率响应曲线可知,采用文中方法能降低启动时的功率超调,更快到达稳定值;受到扰动时,输出功率能保持较低的动态波动,并快速重新到达稳定状态,输出功率更加平滑。且由图 4(b) 和图 4(d) 功率局部放大图计算可知,文献[23]的有功振荡约为 5.81%,无功振荡约为 2.54%,而文中方法的有功振荡约为 3.69%,无功振荡约为 0.803%,进一步降低了功率稳态振荡,实现了系统暂稳态性能的提升。

在系统启动过程中,输出功率超调量及动态过渡时间如表 3 所示。文中方法下有功功率超调量在 5% 以内,相较于传统 SMC、文献[20]和文献[23]所提方法,分别下降了 74.4%、71.6% 和 60.2%,动态响应速度分别提高了 4.64 倍、4.45 倍和 3.1 倍;同时,无功功率超调量分别下降了 94.18%、93.08% 和 90.49%,动态响应速度分别提高了 2.95 倍、2.81 倍和 2.21 倍。由上述分析可知,文中方法能明显减小系统在暂态过程中的波动,并提高系统到达稳态的动态响应速度。

当系统的输出功率受到扰动时,对应的超调量

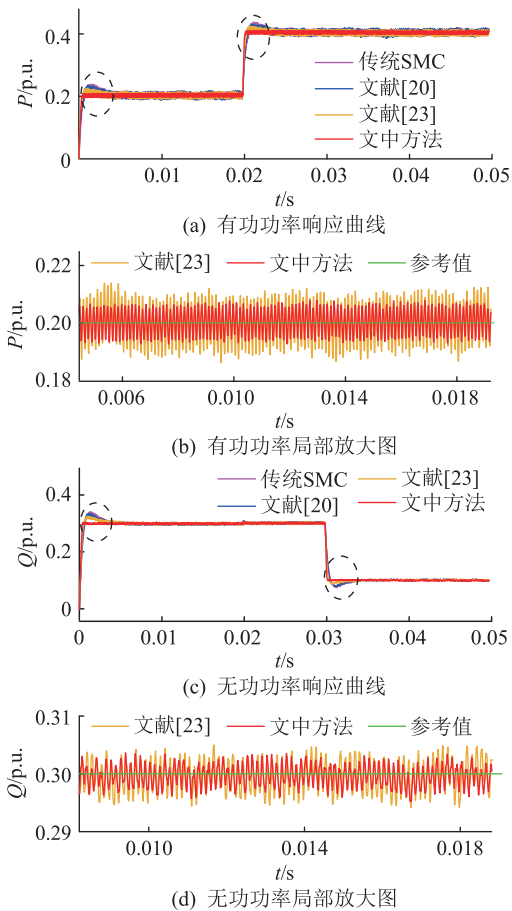


图4 端口2输出功率曲线

Fig.4 Output power curves of port 2

表3 系统启动时输出功率超调量及过渡时间

Table 3 Output power overshoot and transition time at system startup

控制器类型	功率类型	超调量/%	响应时间/s
传统 SMC	有功	18.75	0.005 57
	无功	13.40	0.005 97
文献[20]	有功	16.91	0.005 34
	无功	11.27	0.005 76
文献[23]	有功	12.05	0.003 72
	无功	8.22	0.004 85
文中方法	有功	4.80	0.001 20
	无功	0.78	0.001 51

及动态响应时间如表4所示。文中所提方法下的有功功率与其他3种方法相比,超调量分别下降了69.16%、64.38%和55.93%,动态响应速度分别提高了3.75倍、3.58倍和2.58倍;无功功率超调量分别下降了95.56%、94.39%和88.37%,动态响应速度分别提高了1.57倍、1.48倍和1.19倍。由上述分析可见,在系统受扰动后,文中方法仍然能够保持良好的动态性能。

通过表3和表4的数据分析,验证了3.1节中的结论,即文中方法能有效减少系统的动态过渡时

表4 系统受扰动时输出功率超调及过渡时间

Table 4 Output power overshoot and transition time when the system is disturbed

控制器类型	功率类型	超调量/%	响应时间/s
传统 SMC	有功	8.43	0.005 70
	无功	27.28	0.005 40
文献[20]	有功	7.30	0.005 50
	无功	21.56	0.005 20
文献[23]	有功	5.90	0.004 30
	无功	10.40	0.004 60
文中方法	有功	2.60	0.001 21
	无功	1.21	0.002 10

间,增强系统鲁棒性和抗干扰能力。

### 4.2 三端口 FMSS 动态仿真验证

针对多种工况进行对比仿真,验证文中方法的动态性能和抗干扰能力。设置三端口 FMSS 的初始状态:端口1输出功率参考值为  $P_{1ref} = 0.3 \text{ p.u.}$ ,  $Q_{1ref} = 0.5 \text{ p.u.}$ ;端口2、端口3分别为  $P_{2ref} = 0.2 \text{ p.u.}$ ,  $Q_{2ref} = 0.3 \text{ p.u.}$ ,  $Q_{3ref} = -0.4 \text{ p.u.}$ 。

#### 4.2.1 系统输出功率扰动下的对比仿真

模拟端口1受到分布式电源和新型负荷接入影响,发生功率波动,对PI控制和文中SMC控制进行仿真对比,三端口输出响应曲线如图5所示。

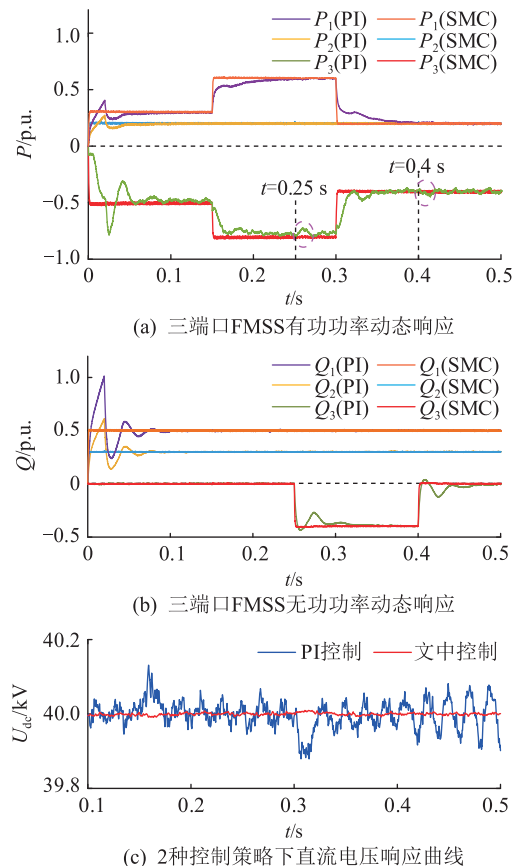


图5 功率扰动下系统输出响应

Fig.5 Response of system under power disturbance

在PI控制下,输出功率响应速度较慢,在系统启动时和受扰动后均大约需要0.1s达到稳定,在 $t=0.15\text{ s}$ 和 $t=0.3\text{ s}$ 时,直流母线电压受系统有功功率扰动影响,产生较大波动,振荡幅值分别为136.56V和132.40V,且当端口3的无功功率在0.25s和0.4s受到扰动时,其有功功率和直流电压也被影响,这反应了PI控制下有功和无功功率的解耦不彻底。而在文中控制下,启动时和受扰动后输出功率均能在0.002s内到达稳定,动态响应速度提高了约50倍,在 $t=0.15\text{ s}$ 和 $t=0.3\text{ s}$ 时,直流母线电压波动得到抑制,振荡幅值分别为7.63V和4.71V,系统抗干扰性能得到显著提高,并且解除了输出功率间的耦合,增强了系统的稳定性。

#### 4.2.2 系统交流侧电压暂降下的对比仿真

为验证文中控制在电压暂降期间的抗干扰能力,在 $t=0.2\text{ s}$ 时,模拟端口1交流侧系统电压幅值发生50%跌落,持续1s。系统在PI控制和文中控制下的动态响应如图6和图7所示。在PI控制下,电流出现振荡呈发散趋势,持续0.095s后才达到稳定,且输出功率波动较大;而在文中控制下,电流响应快、稳定性强,输出功率几乎不受影响。

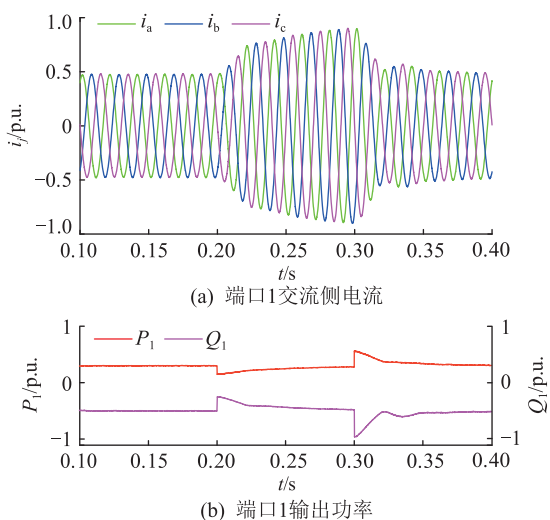


图6 PI控制下端口1输出响应

Fig.6 Response of port 1 under PI control

#### 4.2.3 系统电气参数严重摄动下的对比仿真

针对参数严重摄动下的抗扰性进行分析,系统馈线电阻和电感分别为 $0.1\ \Omega$ 和 $18\text{ mH}$ 。在 $t=0.15\text{ s}$ 时,端口3馈线等效阻抗下降60%,系统响应如图8所示。在PI控制下,电流幅值上升了约7.8A,直流电压波动幅值约为20.2V,且由c相电流可知电流质量有所下降。而在文中控制下,直流电压波动幅值约为1.8V,电流质量保持较好状态且幅值几乎没有变化,在参数不准确时仍然具备较好的控制

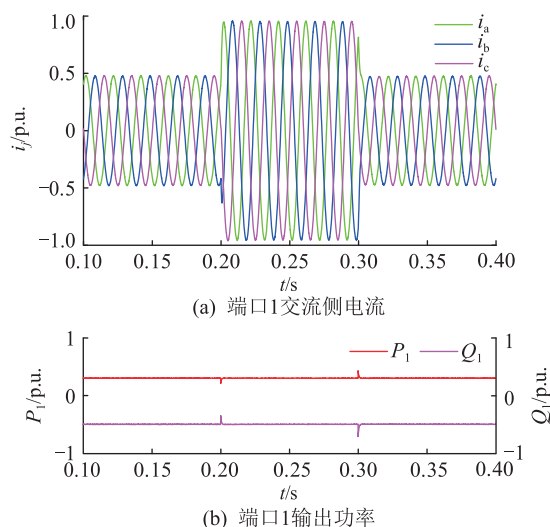


图7 文中控制下端口1输出响应

Fig.7 Response of port 1 under the proposed control 性能。

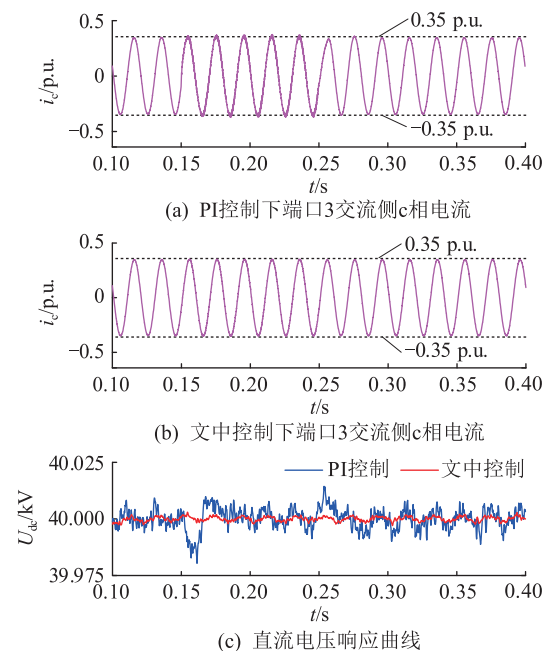


图8 参数严重扰动下端口3输出响应

Fig.8 Response of port 3 under severe parameter perturbation

#### 4.3 $U_{ac}$ - $f$ 工作模式验证

为了验证失电情况下文中控制的有效性,设定馈线1出现故障,所连负荷为纯阻性负载,其值为 $120\ \Omega$ 。端口1工作在 $U_{ac}$ - $f$ 控制模式下。三端口交流侧输出如图9所示。图9(a)为失电侧交流输出响应曲线,可以看到输出电压和输出电流平滑稳定,FMSS起到了三相电压支撑作用。图9(b)和图9(c)表明端口2和端口3保持正常稳态,未受到端口1的影响,文中控制可以保证非故障区域的不间断供电。

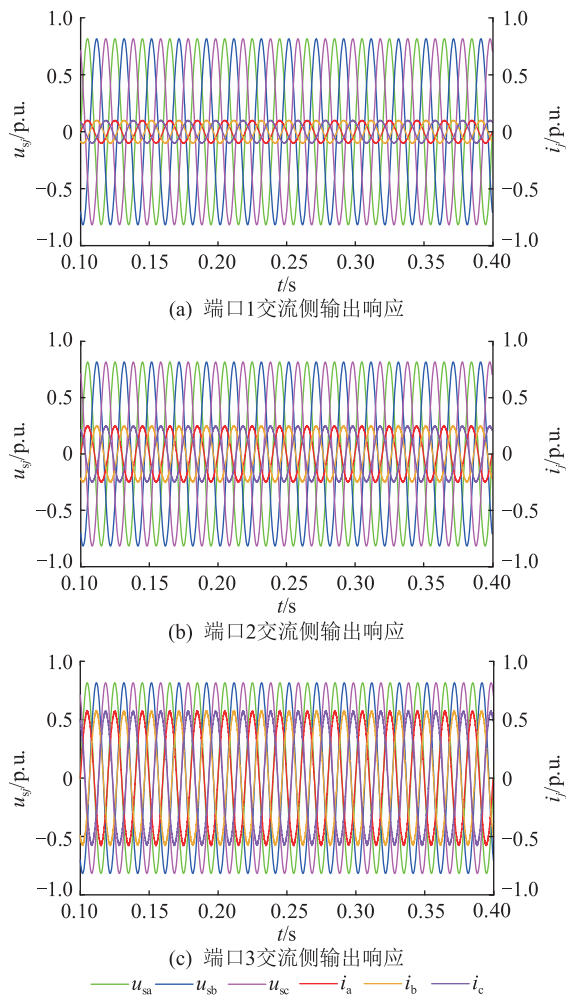


图9 三端口 FMSS 交流侧输出响应  
Fig.9 AC side response of three-port FMSS

## 5 结论

文中针对配电网中的 FMSS 存在非线性和强耦合的特点,提出一种基于反馈精确线性化解耦的改进 SMC 策略,并在 Simulink 软件中对所提控制算法进行了验证。文中主要工作及结论如下:

(1) 建立三端口 FMSS 的仿射非线性系统模型,通过反馈精确线性化,实现系统的线性化以及输出功率的完全解耦,从而降低了控制器设计难度,提高系统运行性能;

(2) 针对传统 SMC 趋近速度慢、系统收敛性能差以及运动抖振大等问题,提出一种改进 SMC 算法,设计基于自适应趋近系数  $\beta(s)$  的新型趋近率,并采用性能更加优越的激活函数进行平滑处理,合理调整趋近速度,实现系统在滑模面附近的平滑收敛,仿真结果表明所提控制算法可以有效提高系统动态响应速度,并增强鲁棒性;

(3) 在经典工况下与 PI 控制做了大量仿真对比,进一步验证了所提算法具备较强的抗干扰能

力,动态性能良好,可以有效解决 FMSS 传统 PI 双闭环控制存在的问题与不足。

文中所提改进 SMC 算法丰富了三端口 FMSS 在配电网中的应用,有效提升了系统的暂稳态性能,可为后续智能配电网和新型电力系统的建设提供新的方案。

## 参考文献:

- [1] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):2-12.  
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8):2-12.
- [2] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3):1899-1910.
- [3] JI H R, WANG C S, LI P, et al. Quantified analysis method for operational flexibility of active distribution networks with high penetration of distributed generators [J]. Applied Energy, 2019, 239:706-714.
- [4] 霍群海,李梦菲,粟梦涵,等. 柔性多状态开关应用场景分析 [J]. 电力系统自动化,2021,45(8):13-21.  
HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Analysis on application scenarios of flexible multi-state switch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8):13-21.
- [5] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势 [J]. 电网技术,2020,44(12):4664-4676.  
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks [J]. Power System Technology, 2020, 44(12):4664-4676.
- [6] 李峥,何国豪,陈武,等. 共用模块的柔性多状态开关新型调制方法 [J]. 电力工程技术,2023,42(1):35-42.  
LI Zheng, HE Guohao, CHEN Wu, et al. Novel modulation method of flexible multi-state switch sharing module [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1):35-42.
- [7] GONG J F, DANG D S, LI Y, et al. Research on key technologies of SNOP suitable for distribution network [C]//2021 IEEE 3rd International Conference on Circuits and Systems (ICCS). Chengdu, China. IEEE, 2022:213-217.
- [8] 班国邦,袁旭峰,徐玉韬,等. 柔性互联配电网供电能力概率评估 [J]. 电网与清洁能源,2022,38(2):10-17.  
BAN Guobang, YUAN Xufeng, XU Yutao, et al. Probabilistic evaluation of power supply capability of flexible interconnected distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2):10-17.
- [9] LIU W X, XU Y H. Reliability model of MMC-based flexible interconnection switch considering the effect of loading state uncertainty [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(3):358-367.
- [10] 马文忠,吕清琛,张彦,等. 配电网故障状态下柔性多状态开关故障电流抑制策略 [J]. 电网技术, 2021, 45(11):



- 4251-4258.
- MA Wenzhong, LYU Qingchen, ZHANG Yan, et al. Suppression strategy for fault current of flexible multi-state switch in distribution network fault state[J]. Power System Technology, 2021, 45(11):4251-4258.
- [11] 马骏超,周洁洁,彭琰,等. 柔性多状态开关多端口协调优化调控方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4):1161-1171.
- MA Junchao, ZHOU Jiejie, PENG Yan, et al. Multi-port-coordinated optimization control method for flexible multi-state switch[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4):1161-1171.
- [12] IVIC D R, STEFANOV P C. An extended control strategy for weakly meshed distribution networks with soft open points and distributed generation[J]. IEEE Access, 2021, 9:137886-137901.
- [13] 王灿,吴耀文,孙建军,等. 基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8):77-85.
- WANG Can, WU Yaowen, SUN Jianjun, et al. Bi-layer load balancing method in active distribution network based on flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8):77-85.
- [14] HOU Y X, XU Y M, WANG Z Q, et al. Research on application of three-port SNOF based on dual closed-loop control in distribution network[C]//2017 IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). Chennai, India. IEEE, 2017:389-395.
- [15] 蔡云旖,屈子森,杨欢,等. 柔性多状态开关改进型下垂控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2488-2497.
- CAI Yunyi, QU Zisen, YANG Huan, et al. Research on improved droop control strategy for soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2488-2497.
- [16] 李梦菲,杨欢,赵荣祥,等. 基于模糊逻辑的柔性多状态开关协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17):35-42.
- LI Mengfei, YANG Huan, ZHAO Rongxiang, et al. Fuzzy logic based coordinated control strategy for flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17):35-42.
- [17] WANG Z, SHENG L, HUO Q, et al. An improved model predictive control method for three-port soft open point[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(10):1-22.
- [18] 张国荣,王泰文,侯立凯,等. 柔性多状态开关参数辨识无差拍控制[J/OL]. 电测与仪表:1-12[2022-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201216.1141.004.html>.
- ZHANG Guorong, WANG Taiwen, HOU Likai, et al. Parameter identification of flexible multi-state switches for deadbeat control[J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation:1-12[2022-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201216.1141.004.html>.
- [19] LI Z, HAO Q R, GAO F, et al. Nonlinear decoupling control of two-terminal MMC-HVDC based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):376-386.
- [20] 侯传羽,李岚,赵楠,等. DFIG 网侧变换器反馈线性化与滑模控制[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3):47-54.
- HOU Chuanyu, LI Lan, ZHAO Nan, et al. Feedback linearization and sliding mode control of DFIG grid-side converter[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3):47-54.
- [21] 鲁裕婷,都洪基,朱鑫要. 经 VSC-HVDC 系统并网的风电场反馈线性化滑模控制[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5):91-97.
- LU Yuting, DU Hongji, ZHU Xinyao. Feedback linearization sliding mode control of wind farm connected with VSC-HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5):91-97.
- [22] 王浩宇,张雨婷,张乔,等. 一种基于滑模观测器的动车组整流器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22):81-91.
- WANG Haoyu, ZHANG Yuting, ZHANG Qiao, et al. Research on control strategy of EMU rectifier based on sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22):81-91.
- [23] 杨朋威,康祎龙,苗世洪,等. V/v 牵引供电系统中铁路功率调节器的改进滑模控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(6):2218-2229.
- YANG Pengwei, KANG Yilong, MIAO Shihong, et al. Improved sliding mode control strategy for railway static power conditioner in V/v traction power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2218-2229.
- [24] YANG Q C, SAEEDIFARD M. Sliding mode control of the modular multilevel converter[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA. IEEE, 2018:1036-1043.
- [25] 张康,王丽梅. 基于反馈线性化的永磁直线同步电机自适应动态滑模控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19):4016-4024.
- ZHANG Kang, WANG Limei. Adaptive dynamic sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor based on feedback linearization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19):4016-4024.
- [26] 张国荣,沈聪,彭勃,等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10):3050-3058.
- ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multi-state switch in the case of feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3050-3058.
- [27] FU K, YI H, ZHUO F, et al. Self-healing control strategy based on SNOF under severe fault condition[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Nanjing, China. IEEE, 2022:3077-3083.
- [28] 卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2008.

- LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. Nonlinear control of power system [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [29] ISIDORI A. Nonlinear control systems[M]. New York: Springer, 1995.
- [30] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- LIU Jinkun. MATLAB simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

作者简介:



马文忠

马文忠(1968),男,博士,教授,研究方向为多端柔性直流输电、智能微网及其控制等(E-mail:mawenzhong@126.com);

余欢(1998),男,硕士在读,研究方向为柔性配电装备控制与保护技术;

李维国(1984),男,硕士,工程师,从事新能源技术研究工作。

## Improved sliding mode control strategy for flexible multi-state switch based on feedback accurate linearization decoupling

MA Wenzhong<sup>1</sup>, YU Huan<sup>1</sup>, LI Weiguo<sup>2</sup>, MENG Fancheng<sup>1</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, YAO Minrui<sup>1</sup>

(1. Institute of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:** Flexible multi-state switch (FMSS) has the characteristics of nonlinearity and strong coupling. It is difficult to achieve complete decoupling of output power through traditional proportional integral (PI) control. There are some problems in PI control such as difficulty in adjusting PI parameters, slow system dynamic response speed, and poor robustness. Firstly, feedback accurate linearization is used to transform the FMSS from a high-order nonlinear system into two completely independent first-order linear systems, realizing the complete decoupling of active and reactive currents. Then, aiming at the problems of slow approach speed, poor system convergence performance and large motion chattering of traditional sliding mode control, an improved sliding mode control based on adaptive approach rate is designed to optimize the voltage outer loop and the current inner loop, and the stability of the proposed algorithm is verified by Lyapunov function. Finally, the simulation analysis of the three-port FMSS are carried out in the Simulink software under the conditions of output power disturbance, AC voltage sag and system parameter perturbation. The results show that the proposed control enhances the robustness and anti-interference ability of the system, and it can effectively increase the dynamic response speed of the system.

**Keywords:** smart distribution network; flexible multi-state switch (FMSS); modular multi-level converter; feedback accurate linearization; improved sliding mode control; full decoupling

(编辑 方晶)