

不平衡电网下 MMC-UPFC 的反演-滑模控制策略*

程启明^{1,2} 张梁^{1,2} 程尹曼³ 张磊³ 渠博岗^{1,2}

(1. 上海电力大学自动化工程学院 上海 200090; 2. 上海市电站自动化技术重点实验室 上海 200090;

3. 上海电力公司市北供电分公司 上海 200041)

摘要:针对模块化多电平变流器(MMC)-统一潮流控制器(UPFC)采用的控制方法存在的问题,本文提出了一种基于 MMC-UPFC 的反演控制(BSC)与滑模控制(SMC)组合而成的反演-滑模控制(BSC-SMC)非线性控制策略,这种控制策略既保留了 SMC 的抗干扰能力强等性能,也兼具 BSC 响应速度快等优点。首先,根据 MMC-UPFC 的拓扑结构,建立并联侧 MMC 变换器、串联侧 MMC 变换器的数学模型;其次,在不平衡条件下进行了正、负序分解,并设计了 MMC-UPFC 在不平衡条件下 BSC-SMC 控制器,并证明了控制系统的稳定性;最后,在 MATLAB/Simulink 软件平台搭建 MMC-UPFC 仿真模型进行仿真验证,通过把本文所提 BSC-SMC 控制策略与 PID 控制策略在接收端电源电压单相跌落、串联侧注入电压两种不同工况下进行了仿真比较,验证了 BSC-SMC 控制策略除具有 SMC 控制策略的抗扰性强特点外,还同时具有 BSC 控制策略的响应速度快和超调量小特点,且本文控制系统的稳定性更强、鲁棒性更好,从而验证了本文所提 BSC-SMC 控制策略的有效性和优越性。

关键词:统一潮流控制器;模块化多电平换流器;不平衡电网;反演-滑模控制;PID 控制

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Backstepping-based sliding-mode control strategy of MMC-UPFC under unbalanced power grid

Cheng Qiming^{1,2} Zhang Liang^{1,2} Cheng Yinman³ Zhang Lei³ Qu Bogang^{1,2}

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology, Shanghai 200090, China;

3. North Power Supply Branch Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200041, China)

Abstract: In response to the problems of the control method used in modular multilevel converter (MMC)-unified power flow controller (UPFC), a nonlinear control strategy combining back stepping control (BSC) and sliding mode control (SMC) based on MMC-UPFC is proposed in this paper. This control strategy not only retains the strong anti-interference ability of SMC, but also has the advantages of fast response speed of BSC. Firstly, according to the topology of MMC-UPFC, the mathematical models for the parallel-side and the series-side of MMC converter is established. Secondly, positive and negative sequence decomposition is carried out under unbalanced conditions, and the BSC-SMC controller for MMC-UPFC under unbalanced conditions is designed, and the stability of the control system is proved. Finally, a MMC-UPFC simulation model is established on the MATLAB/Simulink software platform for simulation verification, by comparing the BSC-SMC control strategy with PID control strategy under two different operating conditions: Single-phase drop of power supply voltage at the receiving end and injection voltage on the series-side of MMC, the proposed BSC-SMC control strategy not only has the strong anti-interference characteristics of SMC control strategy, but also has the characteristics of fast response speed and small overshoot of BSC control strategy, the stability and robustness of the control system are stronger, the effectiveness and superiority of BSC-SMC control strategy is verified.

Keywords: unified power flow controller; modular multilevel converter; unbalanced power grid; backstepping-based sliding-mode control; PID control

0 引言

安全可靠的电网不仅对于能源安全有着重要的作用,更是社会经济平稳、有序发展的重要保障。统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[1]结合了交流电压调节、电压补偿等功能。

UPFC 包括串联变流器和并联变流器两个部分,通过控制两个变流器,UPFC 同时可调节节点电压、线路潮流和线路阻抗。然而,基于传统电压源变流器的 UPFC 受限于其较差的输出波形,且开关器件的电压与电流较小而扩展困难。模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)^[2]可以输出大功率、高电压且可靠性和功率密度高,目前已广泛应用。UPFC 与 MMC 结合在一起的 MMC-UPFC^[3-4]也已推出且在高压大容量场合得到实际应用^[5-6]。

目前 UPFC 的变流器的研究重点在于建模方法、拓扑结构^[7]、控制策略^[8]、优化配置^[9]和实际工程应用,本文仅讨论 UPFC 的控制策略。文献[10]中 UPFC 采用最广泛使用的线性 PID 控制,其中将电压注入分为有功和无功两部分;文献[11]提出 MMC-UPFC 基于 PID 控制的交叉解耦策略,但系统参数变化时,其响应速度慢、调试周期长且稳定性一般。为此,非线性控制方法被用于 UPFC 控制上。例如,文献[12]通过控制系统的状态反馈,可以实现对系统的稳定控制,从而提高系统的故障穿越能力;文献[13]引入无源控制理论,能够实现系统潮流的控制,但此法依赖于被控对象模型,若对象大范围变动或模型参数改变,则系统的控制精度变低和响应时间变长;文献[14]将滑模控制应用于 UPFC 控制中,但需要根据系统动态特性进行参数调整,较难实现在线优化控制,同时还存在高频抖动问题;文献[15]引入无源滑模控制,该策略具有很好的线路潮流控制功能,提高了系统动态性能,但系统结构复杂;文献[16]将反演控制与自适应相结合,该方法在反演控制基础上直接加入自适应变量,但计算复杂,且应用于过多回路,其控制效果难以实现。

综上所述,目前 MMC-UPFC 控制策略通常采用 PID 控制,但 PID 控制是一种单变量、线性对象的控制方法,而 MMC-UPFC 为多变量、非线性对象,若在 MMC-UPFC 对象上采用 PID 控制时,当系统大范围变化时系统控制性能会变差,此外 PID 参数整定也困难。为此,非线性控制或智能控制方法被用于 UPFC 控制上,但这些方法存在结构复杂、计算量大、理论难懂、成熟度差等问题。

反演控制(back-stepping control, BSC)^[17]把复杂的非线性系统多次拆分为子系统并进行稳定控制,从而稳

定控制整个大系统。但由于系统的内部参数的变化和外部信号的扰动,反演控制的稳态精度、鲁棒性和抗扰性会降低。滑模控制(sliding-mode control, SMC)^[18-19]能够强迫系统沿着预定的滑模面附近运行,从而使系统快速稳定在平衡状态,它对系统内部或外部变化不敏感。文献[20]把反演控制与滑模控制组合形成反演-滑模控制(BSC-SMC)可以解决反演控制的问题,但此文仅针对理想的电网电压平衡状态。而实际系统中电网三相电压常处于不平衡状态。电网不平衡的负序分量会导致 MMC 的直流侧产生两倍频纹波电压,这些谐波分量会在交流连接电抗器后产生电压谐波,进而加重了电网的不平衡程度。当 MMC 交流电流中负序分量过大时,会导致换流器的过流现象,危及 MMC-UPFC 系统的安全运行。因此,需要采取补偿措施来抵消电网负序分量,从而保证 MMC-UPFC 系统在不平衡工况下的安全稳定运行和可靠潮流调节能力。

为了解决电网不平衡情况下 MMC-UPFC 的潮流跟踪问题,本文提出了在电网不平衡下 MMC-UPFC 的 BSC-SMC 控制策略,设计了 MMC-UPFC 不平衡条件下正、负序的 BSC-SMC 控制器,并在 MATLAB/Simulink 平台将 BSC-SMC 控制与 PID 控制进行比较,以验证 BSC-SMC 控制的优势。

1 MMC-UPFC 的系统结构和建模

1.1 MMC-UPFC 系统结构

图 1 为 MMC-UPFC 主电路结构。UPFC 由串、并联侧两部分组成,其中:变流器采用 MMC 结构,且以背靠背的形式连接同一条直流母线,并联侧 MMC 通过与系统进行有功交换来维持直流侧电压的稳定,又可以向母线提供无功功率;串联侧变流器经过向系统中注入可变电电压 u_{12} 来调节系统的潮流。MMC 有三相,每一相共有上下两个桥臂,每个桥臂有 N 个半桥结构的子模块(sub module, SM)和 1 个桥臂电感组成。

图 1 中, u_{sj} 、 u_{rj} ($j = a, b, c$) 分别为交流系统发送端、接收端的相电压, R_l 、 L_l 为线路电阻、电感, u_1 、 u_2 分别为并、串联变流器节点交流母线电压, u_{12j} ($j = a, b, c$) 为串联侧 MMC 注入到系统中的可变电电压, u_{shj} 、 u_{sej} 、 i_{shj} 、 i_{sej} ($j = a, b, c$) 分别为 MMC 并联侧和串联侧的输出电压、电流, u_{sej1} 为变压器 T 一次侧电压, i_{rj} ($j = a, b, c$) 为串联侧电容电流, i_{rj} 为线路电流, U_{dc} 为直流侧母线电压, R_1 、 L_1 和 R_2 、 L_2 为 MMC 串联侧和并联侧的交流连接电阻、电感, L_m 为桥臂电感, u_{dc} 为直流母线电压, C_1 为串联侧电容, C_2 为子模块电容, P_r 、 Q_r 分别为注入接收端系统的有功功率和无功功率。

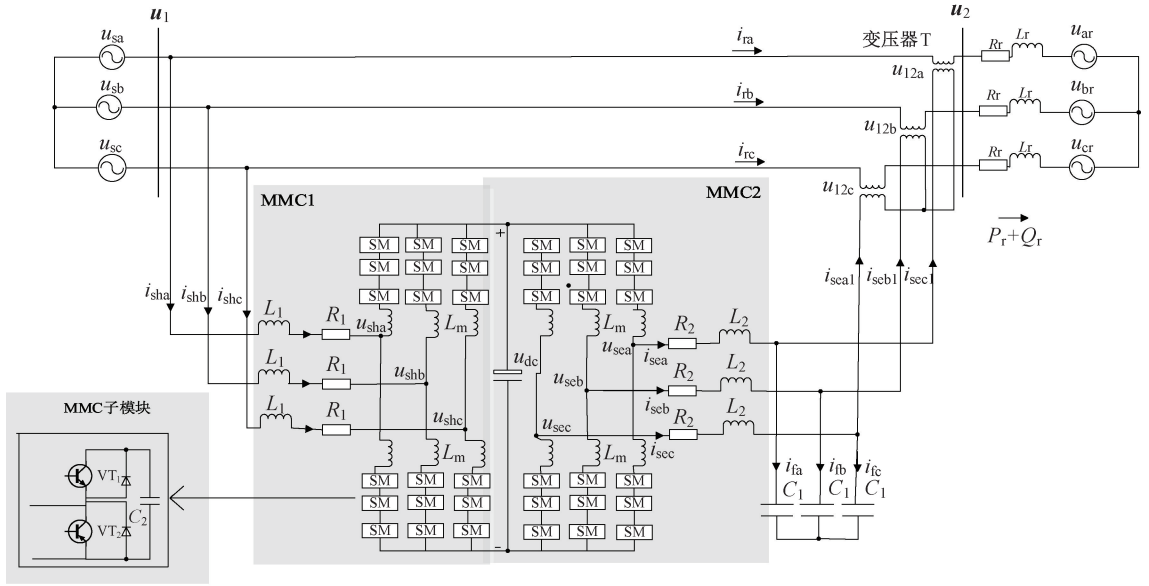


图1 MMC-UPFC 的系统结构

Fig. 1 Topology of MMC-UPFC system

1.2 MMC-UPFC 数学模型建立

由 Kirchhoff 电路定律可得到并联侧 MMC 变换器的数学模型为:

$$u_{shj} = u_{sj} - L_{eq} \frac{di_{shj}}{dt} - R_{eq} i_{shj} \quad (1)$$

式中: R_{eq}, L_{eq} 为并联侧 MMC 的等效电阻、等效电感, $R_{eq} = R_1, L_{eq} = L_1 + L_m/2$ 。

将式(1)转换成 dq 坐标系可得:

$$\begin{cases} \frac{di_{shd}}{dt} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{shd} + \omega i_{shq} + \frac{u_{sd} - u_{shd}}{L_{eq}} \\ \frac{di_{shq}}{dt} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{shq} - \omega i_{shd} + \frac{u_{sq} - u_{shq}}{L_{eq}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为电网基频角速度, $\omega = 2\pi f, f = 50 \text{ Hz}$ 。

同理, 串联侧变换器补偿到 MMC-UPFC 接收端的电压、串联侧 MMC 变换器的数学模型为:

$$u_{12j} = u_{vj} - u_{sj} + L_r \frac{di_{vj}}{dt} + R_r i_{vj} \quad (3)$$

$$u_{sej} = u_{12j} + L_{eq} \frac{di_{sej}}{dt} + R_{eq} i_{sej} \quad (4)$$

$$\frac{du_{12}}{dt} = \frac{1}{C_1} (i_{sc} - i_r) \quad (5)$$

若串联侧变压器 T 的变压比为 k 时, 则 $u_{sej1} = k u_{sej}$ 。

将式(3)~(5)转换成 dq 坐标系下数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rd} + \omega i_{rq} + \frac{u_{sd} - u_{rd}}{L_r} + \frac{u_{12d}}{L_r} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rq} - \omega i_{rd} + \frac{u_{sq} - u_{rq}}{L_r} + \frac{u_{12q}}{L_r} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{sed}}{dt} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sed} + \omega i_{seq} + \frac{u_{sd} - u_{12d}}{L_{eq}} \\ \frac{di_{seq}}{dt} = \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{seq} + \omega i_{sed} + \frac{u_{sq} - u_{12q}}{L_{eq}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{du_{12d}}{dt} = \omega u_{12q} - \frac{1}{C_1} i_{rd} + \frac{1}{C_1} i_{sed} \\ \frac{du_{12q}}{dt} = -\omega u_{12d} - \frac{1}{C_1} i_{rq} + \frac{1}{C_1} i_{seq} \end{cases} \quad (8)$$

2 电网不平衡条件下 MMC-UPFC 的 BSC-SMC 控制器设计

MMC-UPFC 常用的控制策略为 PID 控制。虽然 PID 控制方法成熟简单, 但在不平衡运行工况下控制响应变慢, 稳态性变差。因此, PID 控制难以达到理想的控制效果。

BSC 控制参数更少, 响应更快, 特别是具有非线性大范围局渐近稳定性, 但 BSC 更依赖于控制对象的数学模型, 当 MMC-UPFC 在内部扰动和外部干扰下, 系统特性会发生变化, 响应速度会变慢, 鲁棒性变差; SMC 控制与对象模型无关, 且不受外界扰动影响。BSC 与 SMC 结合在一起形成 BSC-SMC 控制可解决 BSC 控制的问题。

BSC 在三相电网电压不平衡时, 利用串并联换流器进行不平衡治理。通过建立正、负序内环控制系统的 BSC-SMC 控制器, UPFC 并联侧负序控制系统通过并联换流器输出的负序电流抵消三相不平衡时产生的负序电流分量; 串联侧通过向电网注入负序电压来补偿不平衡

电压。通过 BSC-SMC 控制产生控制信号,经由载波移相调制生成触发脉冲。

2.1 不平衡条件下并联侧 MMC 的 BSC-SMC 控制器设计

并联换流器向交流母线注入线路中所需的电流负序分量,从而实现母线三相电流平衡。通过建立正、负序系统 BSC-SMC 控制器,正序控制系统调节电流 i_{sh} 正序的有功、无功分量,从而控制交流母线电压和注入的无功功率,同时为 UPFC 维持直流电压 u_{dc} 不变;负序控制系统由并联换流器输出的负序电流来抵消通过控制线路三相不平衡时引发的负序电流分量。

根据式(2)可得不平衡条件下 MMC-UPFC 并联侧在 d, q 坐标系下的正序数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_{shd}^+}{dt} = -\frac{R_{eq} i_{shd}^+}{L_{eq}} + \omega i_{shq}^+ + \frac{u_{sd}^+ - u_{shd}^+}{L_{eq}} \\ \frac{di_{shq}^+}{dt} = -\frac{R_{eq} i_{shq}^+}{L_{eq}} - \omega i_{shd}^+ + \frac{u_{sq}^+ - u_{shq}^+}{L_{eq}} \end{cases} \quad (9)$$

不平衡条件下 MMC-UPFC 并联侧正序 BSC-SMC 控制律可推出为^[20]:

$$\begin{cases} u_{shd}^+ = u_{sd}^+ + \omega L_{eq} i_{shq}^+ - R_{eq} i_{shd}^+ - L_{eq} \dot{i}_{shdref}^+ - \\ k_1 L_{eq} \frac{\dot{i}_{shdref}^+ + \lambda_1 \text{sat}(i_{shd}^+ - i_{shdref}^+)}{\varepsilon_1 - k_1} \\ u_{shq}^+ = u_{sq}^+ - \omega L_{eq} i_{shd}^+ - R_{eq} i_{shq}^+ - L_{eq} \dot{i}_{shqref}^+ - \\ k_2 L_{eq} \frac{\dot{i}_{shqref}^+ + \lambda_2 \text{sat}(i_{shq}^+ - i_{shqref}^+)}{\varepsilon_2 - k_2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_1, k_2 为 d, q 轴反演控制系数,它们为正数; λ_1, λ_2 和 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为 d, q 轴滑模控制的趋近率系数,且都为正数; $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数。

同理可推出类似的并联侧负序 BSC-SMC 公式。

2.2 不平衡条件下串联侧 MMC 的 BSC-SMC 控制器设计

MMC-UPFC 串联侧作为三相不平衡时抑制负序电流的主要载体。由式(6)、(7)、(8)可以得到不平衡条件下 MMC-UPFC 串联侧在 d, q 坐标系下的正序数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}^+}{dt} = -\frac{R_r i_{rd}^+}{L_r} + \omega i_{rq}^+ + \frac{u_{sd}^+ - u_{rd}^+}{L_r} + \frac{u_{12d}^+}{L_r} \\ \frac{di_{rq}^+}{dt} = -\frac{R_r i_{rq}^+}{L_r} - \omega i_{rd}^+ + \frac{u_{sq}^+ - u_{rq}^+}{L_r} + \frac{u_{12q}^+}{L_r} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{sed}^+}{dt} = -\frac{R_{eq} i_{sed}^+}{L_{eq}} + \omega i_{seq}^+ + \frac{u_{12q}^+ - u_{sed}^+}{L_{eq}} \\ \frac{di_{seq}^+}{dt} = \frac{R_{eq} i_{seq}^+}{L_{eq}} - \omega i_{sed}^+ + \frac{u_{12d}^+ - u_{seq}^+}{L_{eq}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{du_{12d}^+}{dt} = \omega u_{12q}^+ - \frac{1}{C_1} i_{rd}^+ + \frac{1}{C_1} i_{sed}^+ \\ \frac{du_{12q}^+}{dt} = -\omega u_{12d}^+ - \frac{1}{C_1} i_{rq}^+ + \frac{1}{C_1} i_{seq}^+ \end{cases} \quad (13)$$

串联侧正序电流环参考值为:

$$\begin{cases} i_{rdref}^+ = \frac{2}{3} \frac{P_r^{ref} u_{2d}^+ - Q_r^{ref} u_{2q}^+}{(u_{2d}^+)^2 + (u_{2q}^+)^2} \\ i_{rqref}^+ = \frac{2}{3} \frac{P_r^{ref} u_{2q}^+ + Q_r^{ref} u_{2d}^+}{(u_{2d}^+)^2 + (u_{2q}^+)^2} \end{cases} \quad (14)$$

同理可推出类似的串联侧负序 BSC-SMC 公式。

串联侧通过向电网注入负序电压来补偿不平衡电压,从而抑制负序电流的影响。为了控制串联侧输出所需的补偿电压,MMC 负序电流环的参考值被设置为 0。即 $i_{rdref}^- = i_{rqref}^- = 0$ 。

不平衡条件下 MMC-UPFC 串、并联侧反演-滑模控制系统的总体框如图 2 所示。图中,并联侧换流器正序电流参考值由功率外环以及定直流电压经 PI 控制得到,负序参考电流与线路三相不平衡所产生的负序电流分量相抵消。串联换流器正序电流参考值由功率外环得到,负序电流参考值直接给定为 0。串并联侧换流器通过反演-滑模控制(BSB-SMC),同时结合直流电容电压控制和环流与均压控制,产生的控制信号经由载波移相调制生成触发脉冲,从而控制换流器开关的通断。

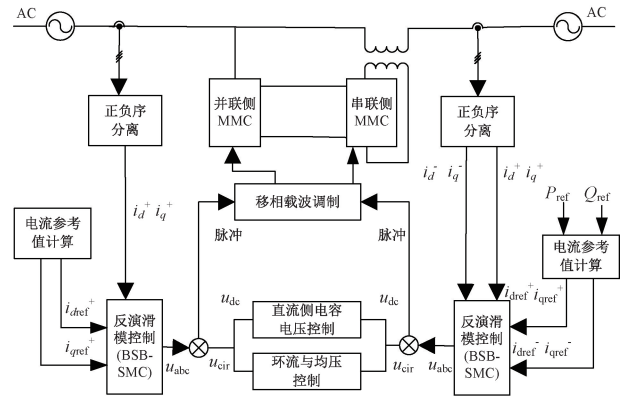


图 2 不平衡条件下 MMC-UPFC 反演-滑模控制系统的总体框图

Fig. 2 General block diagram of MMC-UPFC BSB-SMC control system under unbalanced conditions

3 仿真结果分析

为了验证 MMC-UPFC 在不平衡电网下 BSC-SMC 控制策略的有效性,本文在 MATALB/Simulink 仿真平台搭建仿真模型,模拟了接收端电源电压单相跌落、负荷不平

平衡两种运行工况,并将 BSC-SMC 控制与 PID 控制进行比较 BSC。MMC-UPFC 系统及其控制器参数如表 1 所示。

1) 工况 1——接收端电源电压单相跌落

本文在 0.2 s 时将接收端电压 a 相单相暂降 10% 以此来模拟不平衡工况,且在 0.4 s 时投入负序不平衡控制系统,设置有有功功率值恒定为 200 kW,无功功率为 0 Var。

表 1 MMC-UPFC 系统及控制器参数

Table 1 Parameters of MMC-UPFC system and its controllers

参数	数值
交流侧电压有效值 u_s/kV	10
系统两端电压相位差/(°)	10
桥臂模块数 N	12
串联变压器比	1 : 1
桥臂电感 L_m/mH	5
交流连接电感 $L_1, L_2/mH$	2.5
子模块电容值 C_2/mF	0.47
子模块电容电压 u_c/kV	1.0
串联侧滤波电容 C_1/mF	0.5
接收端线路阻抗 Ω	j0.002
PID 控制参数 K_p, K_i, K_d	30,10,0
反演滑模控制参数 ε, λ, k	100,0.8, 210

图 3、4 分别为两种控制策略下并联侧换流器输出电流、并联侧输出电流负序分量对比曲线。由图可见,0.2 s 之前,系统处于平衡状态,并联侧换流器输出电流平衡,负序电流为 0;在 0.2 s 时由于电网发生单相暂降不平衡,换流器输出电流中出现负序分量,换流器输出电流不平衡,0.4 s 时两种控制策略投入控制,负序回路投入补偿,换流器开始输出负序电流分量来补偿线路电流,因此,此时换流器输出电流仍为不平衡状态。由图可见,不平衡状态下两种控制状态下,PID 控制效果谐波大,到达平衡时间长,BSC-SMC 控制响应快,波形好。

2) 工况 2——串联侧注入电压

图 5 为两种控制方法下的串联注入电压和电压负序分量对比曲线。由图可见,0.2 s 前系统处于平衡状态,串联侧注入电压,负序分量为 0,电压波形为正弦,0.2 s 后系统发生不平衡暂降,串联侧注入电压受到影响,产生负序分量,因此,此时电压不平衡;在 0.4 s 后串联侧的负序补偿环节投入运行,而串联侧的变流器输出负序补偿电压,此时串联变流器的注入电压仍处于不平衡状态。由图 5 可见,两种控制方法均能够在发生不平衡暂降时注入电压,但本文所提 BSC-SMC 控制的速度更快且波形质量更好。

图 6 为两种控制方法下线路传输功率控制效果图。由图可见,0.2 s 时由于系统不平衡导致线路有功、无功均出现两倍频波动,0.4 s 后投入不平衡控制,MMC-UPFC 分别对负序电流和电压进行补偿,有效地抑制了

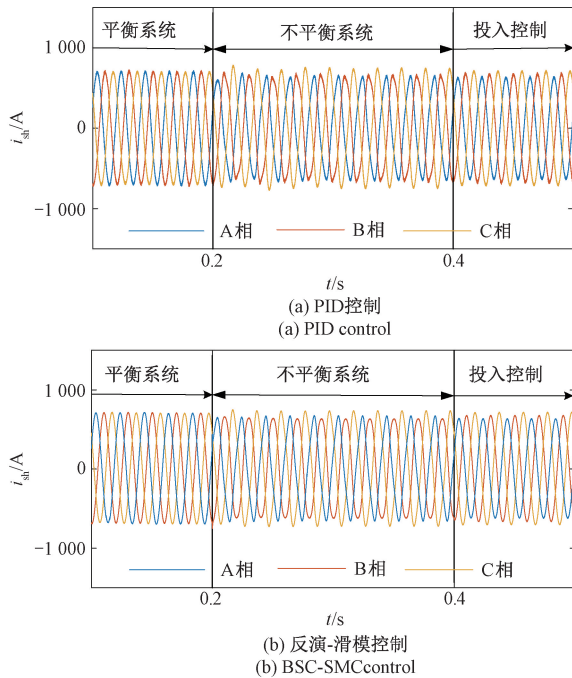


图 3 两种控制策略下并联侧换流器输出电流
Fig. 3 Output current of parallel-side converter under two control strategies

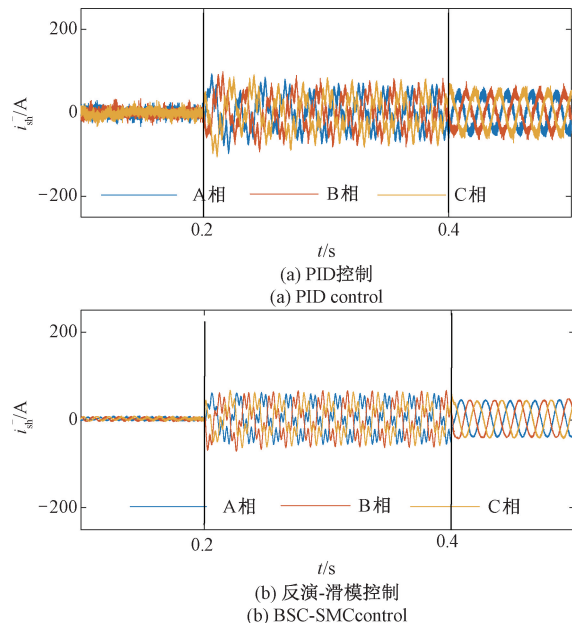


图 4 两种控制策略下并联侧换流器输出电流负序分量
Fig. 4 Output current of negative sequence component of parallel-side converter under two control strategies

两倍频谐波的产生,使系统的潮流能快速地回复到稳定状态。因此,两种控制方法均能在不平衡工况下实现潮流控制,但本文所提的 BSC-SMC 控制反应速度更快、超调更低。

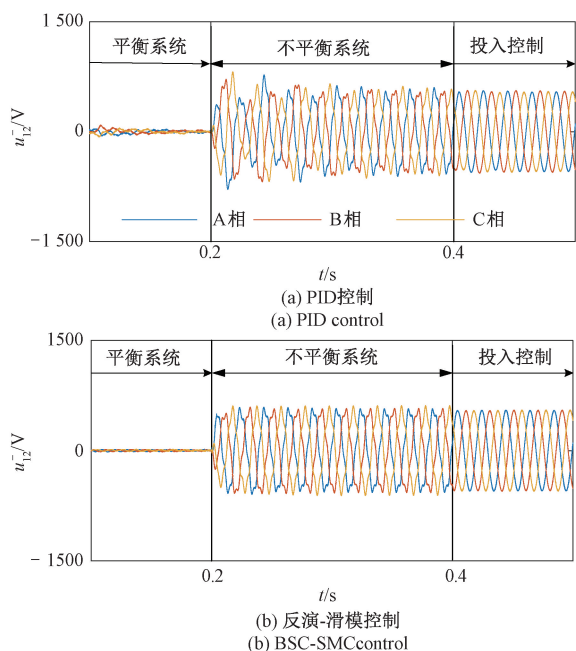


图 5 两种控制方法下串联侧注入电压负序分量
Fig. 5 Injection voltage of negative sequence component of series-side under two control methods

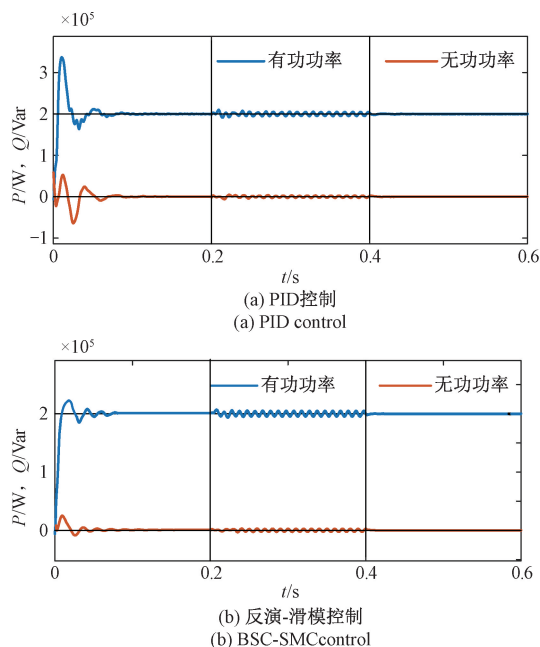


图 6 两种控制方法下线路有功无功潮流波形
Fig. 6 Active and reactive power flow waveform of line under two control methods

4 结 论

本文提出了不平衡电网下 MMC-UPFC 的 BSC-SMC

控制策略,并在接收端电源电压单相跌落、负荷不平衡两种工况下把 BSC-SMC 控制与 PID 控制进行仿真比较, BSC-SMC 控制能够很好地实现不平衡电网下 MMC-UPFC 功能,并准确监控线路潮流。与 PID 控制相比, BSC-SMC 控制除具有 SMC 控制的抗扰性强特点外,还同时具有 BSC 控制的响应速度快和超调量小特点。当然, BSC-SMC 控制也存在着控制结构更为复杂,控制参数更多等缺点需进一步研究。

参考文献

- [1] HAQUE M M, ALI M S, WOLFS P, et al. A UPFC for voltage regulation in LV distribution feeders with a DC-link ripple voltage suppression technique [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56 (6): 6857-6870.
- [2] 陈晓龙, 韩小文, 李永丽, 等. 适用于 MMC 直流电网的源网配合式电容型直流断路器 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 155-166.
CHEN X L, HAN X W, LI Y L, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 155-166.
- [3] 满九方, 郝全睿, 高厚磊, 等. 基于 MMC-UPFC 对称分量控制的输电线路三相不平衡治理 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7143-7153.
MAN J F, HAO Q R, GAO H L, et al. Suppression of three-phase unbalanced current of transmission lines based on symmetrical component control of MMC-UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7143-7153.
- [4] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC 动态建模及内部特性仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 67-75.
SONG J Y, FENG X Q, CUI F B, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 67-75.
- [5] KONG X, GONG X, LI J, et al. Analysis on the transmission line power flow control strategy of the UPFC project in western Nanjing power grid [C]. Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China: IEEE, 2018: 1-5.
- [6] LIN J, ZHANG B, GAO L, et al. Multi-mode coordination system control strategy and its operation performance of western Nanjing power grid UPFC project [C]. Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China: IEEE,

- 2018; 1-6.
- [7] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. UPFC 与同步机轴系的强动态相互作用机理及影响评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1117-1129.
- REN B X, DU W J, WANG H F, et al. Mechanism and impact evaluation of strong dynamic interaction between UPFC and generator shaft[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1117-1129.
- [8] 孔祥平, 袁宇波, 高磊, 等. 含 UPFC 线路的距离保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5219-5226.
- KONG X P, YUAN Y B, GAO L, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226.
- [9] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的 UPFC 优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 42-48.
- LIU CH, WU J, HAO L X, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.
- [10] 田志浩, 摆世彬, 韩连山, 等. 基于 MMC-UPFC 的新型双环电压稳定控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 105-111.
- TIAN ZH H, BAI SH B, HAN L SH, et al. a new double-loop voltage stability control strategy based on MMC-UPFC [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 105-111.
- [11] 李又丰, 马志鹏. 基于 MMC-UPFC 的双环解耦控制研究[J]. 电子测试, 2021(22): 60-62.
- LI Y F, MA ZH P. Research on dual-loop control based on MMC-UPFC[J]. Electronic Test, 2021(22): 60-62.
- [12] 周建萍, 周安杰, 茅大钧, 等. 不平衡电网下 MMC-UPFC 的反馈线性化滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(5): 481-487.
- ZHOU J P, ZHOU AN J, MAO D J, et al. Feedback linearization sliding mode control of MMC-UPFC under unbalanced grid voltage [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(5): 481-487.
- [13] 程启明, 王玉娇, 程尹曼, 等. 非理想条件下 MMC-SAPF 的无源控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7023-7032.
- CHENG Q M, WANG Y J, CHENG Y M, et al. Research on passive control strategy of MMC-SAPF under non-ideal conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7023-7032.
- [14] HAMACHE A, BENSIDHOUM M O, OUSLIMANI A. Multivariable discrete time sliding mode control based UPFC for power flow tracking over an UHV interconnection[C]. Proceedings of 2019 Algerian Large Electrical Network Conference (CAGRE), Algiers, Algeria, 2019: 1-6.
- [15] 柯顺超, 朱森, 陈阳, 等. 基于 MMC-UPFC 无源性滑模变结构控制的电网不平衡治理策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 1078-1086.
- KE SH CH, ZHU M, CHEN Y, et al. Treatment strategy of unbalanced grid voltage conditions based on MMC-UPFC passive sliding-mode variable structure control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1078-1086.
- [16] 王伟然, 吴嘉欣, 张懿, 等. 永磁同步电机模糊自适应自适应积分反步控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 724-733.
- WANG W R, WU J X, ZHANG Y, et al. Fuzzy self-tuning adaptive integral backstepping control for permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 724-733.
- [17] 宋金秋, 段彬, 付程, 等. 电网不平衡工况下高频链矩阵变换器非线性反步控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 761-772.
- SONG J Q, DUAN B, FU CH, et al. Nonlinear backstepping control strategy for high-frequency link matrix converter under unbalanced grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 761-772.
- [18] 张友鹏, 金煜翔, 杨军霞, 等. 高速列车分布式 super-twisting 滑模控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 187-196.
- ZHANG Y P, JIN Y X, YANG J X, et al. Research on distributed super-twisting sliding mode control of high-speed train[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 187-196.
- [19] 崔楠, 许家群. Buck 变换器导通模式转换滑模 PI 混合控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 254-262.
- CUI N, XU J Q. Hybrid control strategy with sliding mode and PI controller for Buck converter considering conduction mode [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 254-262.
- [20] 程启明, 张昕, 赖宇生, 等. 电网不平衡工况下三电平直接矩阵变换器反步滑模控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 73-85.
- CHENG Q M, ZHANG X, LAI Y SH, et al. Back-stepping sliding-mode control strategy for three-level direct matrix converter under unbalanced grid conditions [J]. Power

System Protection and Control, 2023, 51(8): 73-85.

作者简介



程启明 (通信作者), 1984 年于苏州大学获得学士学位, 1988 年于浙江大学获得硕士学位, 现为上海电力大学教授, 主要研究方向为新能源发电控制和电力电子控制。

E-mail: chengqiming@sina.com

Cheng Qiming (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Suzhou University in 1984, M. Sc. degree from Jiangjin University in 1988, respectively. Now he is a professor in Shanghai University of Electric Power. His

main research interests include new energy generation control and power electronic control.



张梁, 2022 于福州大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电控制和电力电子控制。

E-mail: 2642036182@qq.com

Zhang Liang received his B. Sc. degree

from Fuzhou university in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Shanghai University of Electric Power. His main research interests include new energy generation control and power electronic control.