

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230421

# 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

王浩<sup>1,2</sup>, 聂晶莹<sup>1</sup>, 李斌<sup>1,2</sup>, 张国澎<sup>1,2</sup>, 韦延方<sup>1,2</sup>, 王晓卫<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对并网型交直流混合微电网交流侧电压不平衡时会产生交流电流负序分量导致直流母线电压二倍频脉动的问题, 提出了一种直流侧母线电压分数阶滑模控制以及交流侧负序电流抑制方法。首先, 基于同步旋转坐标系下电网电压不平衡时交直流混合微电网互联接口变换器的数学模型, 设计电压外环变结构滑模控制器。然后, 根据电压不平衡时互联接口变换器的功率传输特性, 提取交流侧三相电压的正序分量, 得到交流侧负序电流抑制指令。接着, 采用分数阶滑模趋近律设计内环电流解耦控制器, 并利用李雅普诺夫函数进行稳定性校验。最后, 基于 Matlab/Simulink 搭建的交直流混合微电网模型, 验证了所提控制策略相较传统 PI 控制不仅抑制了三相电流的不平衡, 而且将响应速度提升了近 50%。

**关键词:** 交直流混合微电网; 互联接口变换器; 电压不平衡; 分数阶滑模控制; 正负序分离; 电压稳定

## Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance

WANG Hao<sup>1,2</sup>, NIE Jingying<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Guopeng<sup>1,2</sup>, WEI Yanfang<sup>1,2</sup>, WANG Xiaowei<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Key Laboratory of Intelligent Direction and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the negative sequence component of AC current is generated when the AC side voltage is unbalanced in grid-connected AC-DC hybrid microgrid, which leads to the double frequency fluctuation of DC bus voltage, a fractional order sliding mode control method of DC bus voltage and negative sequence current suppression method of AC side are proposed. First, based on the mathematical model of AC-DC hybrid microgrid interconnecting interface converter when the grid voltage is unbalanced in synchronous rotating coordinate system, the outer voltage loop variable structure sliding mode controller is designed. Then, according to the power transmission characteristics of the interconnected interface converter when the voltage is unbalanced, the positive sequence component of the three-phase voltage on the AC side is extracted, and the negative sequence current suppression command on the AC side is obtained. Next, the fractional order sliding mode reaching law is used to design the inner loop current decoupling controller, and the Lyapunov function is used to verify the stability. Finally, the AC/DC hybrid microgrid model built on Matlab/Simulink verifies that compared with the traditional PI control, the proposed control strategy not only restrains the three-phase current imbalance, but also improves the response speed by nearly 50%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114).

**Key words:** AC/DC hybrid microgrid; interconnect interface converter; voltage imbalance; fractional order sliding mode control; positive and negative sequence separation; voltage stability

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52177114); 河南省自然科学基金项目资助(212300410147); 河南省科技攻关项目资助(232102240036); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助(NSFRF230419); 河南理工大学青年骨干教师资助计划项目(2022XQG-15)

## 0 引言

为解决传统化石能源供应不足及其过度使用造成的环境污染等问题,以可再生能源为基础的分布式发电技术日益成熟<sup>[1-2]</sup>。因分布式发电具有显著的随机性和间歇性,能够高效利用可再生能源并发挥分布式电源作用的微电网成为电力系统行业的主流<sup>[3-6]</sup>。其中,通过互联接口变换器(interlinking interface converter, IIC)连接交流子网与直流子网的交直流混合微电网综合了交流微电网和直流微电网的优势,具有重要的研究意义<sup>[7-9]</sup>。

交直流混合微电网因位于电力系统末端且自身容量较小,外部电网时常处于不对称运行状态,进而导致混合微电网交流侧三相电压不平衡,影响混合微电网的安全稳定运行<sup>[10-12]</sup>。IIC 则是协调交直流混合微电网能量流动的核心装置,使各子网间能够相互支撑,实现功率的传输。能量的频繁流动造成直流母线电压波动,交流不平衡电压通过 IIC 与直流电压交互,给交直流混合微电网的安全稳定运行带来了巨大的隐患<sup>[13-14]</sup>。

针对微电网中 IIC 的控制问题,国内外学者已开展了大量研究。文献[15]采用交流侧电压前馈解耦方案,设计 PI 控制器解决控制量间的耦合问题;文献[16]在独立交直流混合微电网中,通过自适应下垂控制确保两侧系统频率与电压维持在最优范围内,但 PI 控制和下垂控制都是通过线性变换实现控制目标,对于非线性时变系统仍然具有较大的局限性;文献[17]针对常规下垂控制无法为交流频率和直流电压的动态响应过程提供惯性支撑这一问题,提出一种双自适应参数虚拟同步机控制策略,使系统具备良好的频率和电压调节特性,但并未验证该控制在并网条件下的效果;文献[18]基于 Fryze-Buchholz-Depebrock 功率理论的谐波电流检测法,提出在实现直流母线电压稳定的基础上治理交流母线谐波电流的控制策略,但该控制策略在系统响应速度的性能方面略有不足,且增大了计算难度;文献[19]基于 V2G 技术研究互联接口变换器的控制,实现电动汽车与电网的双向互动,但在控制过程中采用单极性 PWM 调制,输出波形的谐波含量相对较高;文献[20]提出一种结合线性扩张状态观测器的滑模控制,保证了直流母线电压的稳定性,但并未考虑该控制在交直流混合微电网中的适用性。在实际的电力系统中,由于负载用电的随机性等因素,电网电压不平衡的情况普遍存在,因此上述理想状态下的控制策略应用于电网电压不平衡的情况中,可能会导致直流母线电压的二倍频脉动、交流侧的

电流不对称等问题,进而影响交直流混合微电网的正常运行。

关于电压不平衡时交直流混合微电网中 IIC 的控制策略,文献[21]增加电压、电流补偿信号,补偿不平衡负载引起的畸变,但只针对三相逆变器进行了仿真验证,并未检验三相整流器的适用性;文献[22]提出线性有源抗扰控制的三相组合逆变器三相电压不平衡补偿策略,但三相组合逆变器拓扑的复杂度提升,使成本也有所增加;文献[23]提出一种三电平 T 型整流器模型预测直流控制策略简化系统的控制模型。但该控制仅对电网电流的畸变率进行抑制,并未考虑直流电压的控制;文献[24]通过分析不平衡电压条件下的功率流,提出了一种基于超级电容补偿互联接口变换器的系统,但该系统主要侧重于交流负序电流的抑制,在直流母线电压的控制方面略有不足;文献[25]在直流侧引入功率补偿电路,实现交直流母线电压的统一控制,但交流侧电流的畸变率并没有得到有效的抑制。综上所述,关于电网电压不平衡下混合微电网直流侧电压的稳定控制及交流侧负序电流的抑制,目前研究存在以下不足:1) 以直流侧电压稳定或交流侧负序电流抑制为单一控制目标,较少考虑二者统筹或有机联系;2) 传统 PI 控制在直流侧电压稳定控制暂稳态效果方面已接近瓶颈,而以滑模控制为代表的现代控制方法具备较大潜力;3) 现有文献对电网电压不平衡时交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制较少涉及。

为此,为了实现并网型交直流混合微电网在交流侧电压不平衡时对负序分量的抑制以及直流侧母线电压的稳定,本文提出了一种基于 IIC 直流侧电压稳定的分数阶滑模控制策略以及交流侧电流负序分量的抑制方法。首先,利用对称分量法对交流侧电压、电流进行分解,得到电压不平衡条件下 IIC 的正负序数学模型;然后,设计电压外环调节方程,并利用  $T/4$  延时法提取交流侧不平衡电压的正序分量,得到负序电流抑制指令;接着,利用分数阶趋近律设计电流内环解耦控制器,并根据李雅普诺夫函数进行稳定性校验;最后,基于 Matlab/Simulink 搭建的交直流混合微电网仿真模型验证了所提控制策略的有效性。

## 1 混合微电网结构与数学模型

### 1.1 交直流混合微电网结构

交直流混合微电网一般由交流子网、直流子网以及互联接口变换器构成,其拓扑结构如图 1 所示。当微电网内部接入不平衡负载或分布式电源后,并

网运行的微电网从配电网吸收负序电流，从而在线路阻抗上产生负序压降，进而导致微电网母线电压三相不平衡，影响交直流混合微电网的正常运行。此时，IIC 作为连接交直流母线的桥梁，能够控制交直流子网之间的能量流动，对维持交直流混合微电网的稳定运行起着决定性作用。

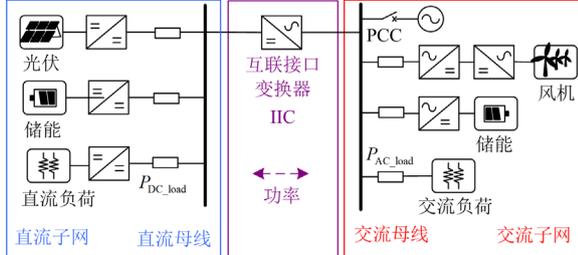


图 1 交直流混合微电网系统

Fig. 1 AC/DC hybrid microgrid system

## 1.2 互联接口变换器结构及数学模型

当电网不平衡时，利用对称分量法对三相不对称各量进行分析，仅考虑正序分量和负序分量，在同步旋转坐标系中，根据图 2 所示的拓扑结构描述其数学模型。图中： $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为三相电网电压； $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为交流侧三相电压； $L$  为输入电感； $R$  为等效阻抗； $C$  为直流侧电容； $U_{dc}$  为直流侧电压； $R_L$  为负载； $i_{dc}$  为直流侧电流。

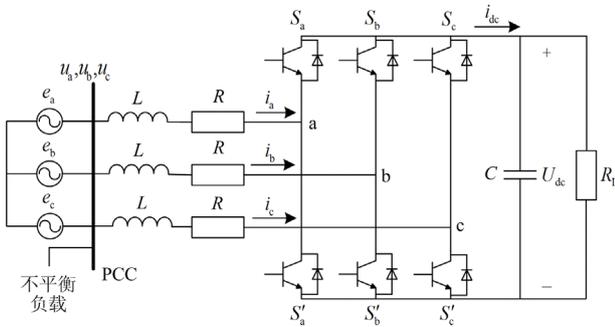


图 2 互联接口变换器拓扑结构

Fig. 2 Interconnected interface converter topology

在交流侧电压平衡且稳定的情况下，通过坐标变换，可推导出互联接口变换器在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{S_d}{L} \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L} \\ \frac{S_d}{C} & \frac{S_q}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $u_d$ 、 $u_q$  分别为交流侧三相电压的  $d$ 、 $q$  轴分量； $i_d$ 、 $i_q$  分别为交流侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量； $S_d$  为  $d$  轴控制参数； $S_q$  为  $q$  轴控制参数； $\omega$  为角频率。

在实际电网运行过程中，由于各种原因常常造成电网电压不平衡。当交流侧电压不平衡时，互联接口变换器在同步旋转坐标系下的数学模型描述为

$$\begin{cases} \frac{di_d^+}{dt} = -\frac{R}{L}i_d^+ + \omega i_q^+ - \frac{S_d^+}{L}U_{dc} + \frac{u_d^+}{L} \\ \frac{di_d^-}{dt} = -\frac{R}{L}i_d^- + \omega i_q^- - \frac{S_d^-}{L}U_{dc} + \frac{u_d^-}{L} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{di_q^+}{dt} = -\frac{R}{L}i_q^+ - \omega i_d^+ - \frac{S_q^+}{L}U_{dc} + \frac{u_q^+}{L} \\ \frac{di_q^-}{dt} = -\frac{R}{L}i_q^- - \omega i_d^- - \frac{S_q^-}{L}U_{dc} + \frac{u_q^-}{L} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{S_d^+}{C}i_d^+ + \frac{S_q^+}{C}i_q^+ - \frac{i_{dc}}{C} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{S_d^-}{C}i_d^- + \frac{S_q^-}{C}i_q^- - \frac{i_{dc}}{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $u_d^+$ 、 $u_q^+$ 、 $u_d^-$ 、 $u_q^-$  分别为交流侧电压的  $d$ 、 $q$  轴正负序分量； $i_d^+$ 、 $i_q^+$ 、 $i_d^-$ 、 $i_q^-$  分别为交流侧电流的  $d$ 、 $q$  轴正负序分量； $S_d^+$ 、 $S_d^-$  为  $d$  轴控制参数的正负序分量； $S_q^+$ 、 $S_q^-$  为  $q$  轴控制参数的正负序分量。

## 2 交流侧负序电流抑制

### 2.1 互联接口变换器功率传输特性

当电压不平衡时，根据瞬时功率理论，IIC 传输的瞬时有功功率和无功功率均为直流分量和二倍频分量之和，可表示为

$$\begin{cases} P(t) = P_0 + P_1 \cos(2\omega t) + P_2 \sin(2\omega t) \\ Q(t) = Q_0 + Q_1 \cos(2\omega t) + Q_2 \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(u_d^+i_d^+ + u_q^+i_q^+ + u_d^-i_d^- + u_q^-i_q^-) \\ P_1 = 1.5(u_d^+i_d^- + u_q^+i_q^- + u_d^-i_d^+ + u_q^-i_q^+) \\ P_2 = 1.5(u_q^-i_d^+ - u_d^-i_q^+ - u_q^+i_d^- + u_d^+i_q^-) \\ Q_0 = 1.5(u_q^+i_d^+ - u_d^+i_q^+ + u_q^-i_d^- - u_d^-i_q^-) \\ Q_1 = 1.5(u_q^+i_d^- - u_d^+i_q^- + u_q^-i_d^+ - u_d^-i_q^+) \\ Q_2 = 1.5(u_d^+i_d^- + u_q^+i_q^- - u_d^-i_d^+ - u_q^-i_q^+) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $P(t)$ 、 $Q(t)$  分别为瞬时有功功率和瞬时无功功率； $P_0$ 、 $Q_0$  分别为有功功率和无功功率的直流分量； $P_1$ 、 $P_2$  为有功功率的二倍频分量； $Q_1$ 、 $Q_2$  为无功功率的二倍频分量。

从式(5)、式(6)中可以看出, 当网侧电压不平衡时, IIC 交流侧有功功率和无功功率均含有二次分量, 并且有功功率的二次分量会在直流侧产生二次谐波。

综上所述, 在实际电网运行过程中, 不平衡电压会导致直流母线电压出现二倍频脉动, 并且交流侧电流会出现负序分量, 使得电能质量大幅下降, 造成经济损失。因此为实现互联接口变换器的正常运行, 需要保证交流侧电流的正弦度以及对称度, 同时消除直流母线电压的二倍频脉动。

## 2.2 交流侧负序电流抑制

当电网电压不平衡时, 若采用电网电压平衡条件下设计的控制策略, 会在直流侧产生二倍频脉动, 且并网电流会有负序分量。负序分量的存在会使 IIC 各个功率开关电流负荷分配不平衡, 并在工作过程中可能产生的过电流会对变换器的硬件造成损坏。因此, 抑制互联接口变换器并网电流的负序分量是电网电压不平衡控制的主要目标。

本文采用  $T/4$  延时法提取交流侧三相不平衡电压的正序分量, 建立  $u_q^+ = 0$  的正序电压矢量坐标系, 同时令负序电流  $i_d^- = i_q^- = 0$ , 并将其代入式(6), 在只考虑有功、无功稳态分量的情况下, 可得

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2}(u_q^+ i_q^+ + u_d^+ i_d^+) \\ Q_0 = \frac{3}{2}(u_q^+ i_d^+ - u_d^+ i_q^+) \end{cases} \quad (7)$$

则可求得抑制网侧电流负序分量的电流内环指令值为

$$\begin{bmatrix} i_q^{+*} \\ i_d^{+*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3[(u_q^+)^2 + (u_d^+)^2]} \begin{bmatrix} u_q^+ & -u_d^+ \\ u_d^+ & u_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $i_d^{+*}$ 、 $i_q^{+*}$  分别为  $i_d$ 、 $i_q$  参考值。

若要实现单位功率因数控制, 则令瞬时平均无功功率  $Q_0 = 0$ , 瞬时平均有功功率与直流侧电压相对应, 计算公式为

$$P_0 = i_{dc}^* U_{dc}^* \quad (9)$$

式中:  $i_{dc}^*$  为直流侧电流给定值;  $U_{dc}^*$  为直流侧电压给定值。

按照上述公式推导, 正序电流指令框图如图 3 所示, 该环节保证对 IIC 进行准确、快速的控制。

## 3 直流侧电压滑模控制

滑模变结构控制算法在非线性系统控制中的优越性, 使其成为电力电子控制领域的一个重要研究方向。为使并网运行的交直流混合微电网直流侧母线电压在能量频繁流动时减小电压波动, 同时提高

系统的响应速度, 设计了基于 SVPWM 的互联接口变换器混合微电网直流母线电压控制策略。

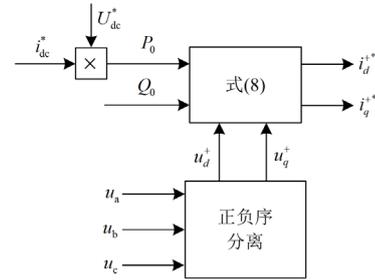


图 3 正序电流指令框图

Fig. 3 Block diagram of positive sequence current instruction

### 3.1 电压外环变结构滑模控制

电压外环的控制目标是使被控变量跟踪参考值, 选取参考值和实际值的误差作为状态变量。当系统启动时, 状态变量的值较大, 系统的控制主要是由非线性的误差反馈率起作用, 确保系统具有良好的启动特性。按照控制目标设计滑模面如下。

$$S = (U_{dc}^* - U_{dc}) + \beta \left( \frac{dU_{dc}^*}{dt} - \frac{dU_{dc}}{dt} \right) \quad (10)$$

式中,  $\beta$  为电压环滑模控制参数。

将式(1)代入式(10)可得

$$S = \left[ (U_{dc}^* - U_{dc}) + \beta \frac{dU_{dc}^*}{dt} + \frac{\beta}{C} (i_{dc} - S_q i_q) \right] \frac{C}{\beta S_d} - i_{dc} = 0 \quad (11)$$

由三相平衡系统单位功率因数稳态运行可得

$$S_q = -\frac{\omega L i_d}{U_{dc}} \quad (12)$$

$$S_d = -\frac{u_d - R i_d}{U_{dc}} \quad (13)$$

$$u_d = \sqrt{3} \times E_{rms} \quad (14)$$

式中,  $E_{rms}$  为输入交流电压相电压有效值。

联立式(11)—式(14), 可得外环电压调节方程为

$$i_{dc}^* = \left[ U_{dc}^* - U_{dc} + \frac{\beta}{C} i_{dc} \right] \times \frac{C \times U_{dc}}{\beta (\sqrt{3} E_{rms} - R i_d)} \quad (15)$$

根据式(13)可以画出如图 4 所示的滑模变结构电压外环控制框图。在该控制系统中, 当系统受到扰动时, 外环滑模控制器能够根据观测值迅速做出响应, 提高系统的动态性能。一般选取电压给定值  $U_{dc}^* = 700 \text{ V}$ 。

从图 4 可以看出, 当互联接口变换器采用双闭环控制系统时, 电压外环的输出就是三相电压不平衡时抑制负序电流的输入指令, 再结合不平衡电压正负序分离的结果, 保证电流内环对互联接口变换

器准确的控制。

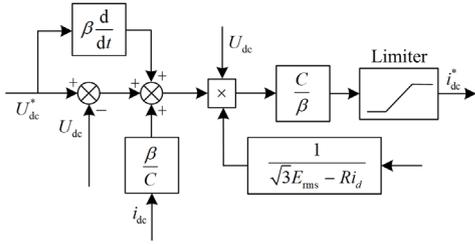


图 4 滑模变结构电压外环控制框图

Fig. 4 Voltage out-loop control block diagram of sliding mode variable structure

### 3.2 电流内环分数阶滑模控制

电流内环的波动会引起电压外环控制下的直流侧电压波动，本文利用同步旋转坐标系中电流分数阶滑模调节器输出的空间电压矢量指令，经过 SVPWM 使互联接口变换器的空间电压矢量跟踪给定值，提高电压利用率，降低直流母线电压上的二倍频脉动，以期达到控制电流的目的。电流内环分数阶滑模控制要确保网侧交流电流能快速跟踪指令电流值，即选取参考值和实际值的误差作为状态变量，据此设计滑动面为

$$\begin{cases} S_{id} = i_d - i_d^{*+} = 0 \\ S_{iq} = i_q - i_q^{*+} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中： $S_{id}$  为  $d$  轴电流控制参数； $S_{iq}$  为  $q$  轴电流控制参数。

为使系统能够在滑模面上做滑模运动，首先设计一个滑动向量  $\delta$ ，表示为

$$\delta = \begin{bmatrix} S_{id} \\ S_{iq} \end{bmatrix} \quad (17)$$

为有效抑制抖振，选择合适的趋近律，确保系统状态变量能在有限时间内到达滑模面。本文将分数阶微积分算子引入滑模趋近律设计中，构建式(18)所示的分数阶指数趋近律，可以使被控系统以较小的抖振快速收敛到给定滑模面，从而在一定程度上提高系统的控制效率。对滑动向量  $\delta$  求导可得

$$\dot{\delta} = \begin{bmatrix} -\varepsilon_d (D^\alpha \text{sign}(S_{id})) - k_d S_{id} \\ -\varepsilon_q (D^\alpha \text{sign}(S_{iq})) - k_q S_{iq} \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

式中： $D^\alpha$  为分数阶微积分算子， $\alpha$  为分数阶阶次，且  $0 \leq \alpha < 1$ ，其中  $\alpha = 0$  时是特殊情况，式(18)为整数阶指数趋近律； $\varepsilon_d$ 、 $\varepsilon_q$ 、 $k_d$ 、 $k_q$  为常值系数，均大于 0。

为实现电流内环解耦控制，将耦合电流从控制律中移除，可推导出

$$\begin{cases} U_{dc} u_d^* - u_d = -\varepsilon_d (D^\alpha \text{sign}(S_{id})) - k_d S_{id} - \omega L i_q \\ U_{dc} u_q^* - u_q = -\varepsilon_q (D^\alpha \text{sign}(S_{iq})) - k_q S_{iq} + \omega L i_d \end{cases} \quad (19)$$

式中， $u_d^*$ 、 $u_q^*$  为电流内环输出值。

以  $d$  轴电流控制为例，根据式(19)给出如图 5 所示的  $d$  轴电流分数阶滑模控制框图， $q$  轴上的电流滑模控制器采用相同的程序。

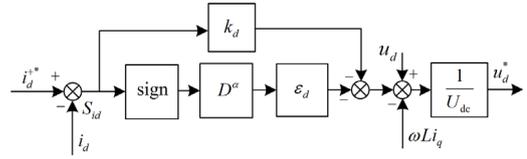


图 5  $d$  轴电流分数阶滑模控制框图

Fig. 5 Block diagram of  $d$ -axis current fractional order sliding mode control

### 3.3 稳定性校验

对于给定滑模面，控制方程(19)能使被控系统在有限时间内到达稳定，取 Lyapunov 函数为

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (20)$$

为保证系统的稳定性，需满足式(21)，即

$$\begin{cases} \dot{V}_d = S_{id} \dot{S}_{id} = S_{id} (-\varepsilon_d (D^\alpha \text{sign}(S_{id})) - k_d S_{id}) \\ \dot{V}_q = S_{iq} \dot{S}_{iq} = S_{iq} (-\varepsilon_q (D^\alpha \text{sign}(S_{iq})) - k_q S_{iq}) \end{cases} \quad (21)$$

式中， $\dot{V}_d$ 、 $\dot{V}_q$  分别表示对 Lyapunov 函数的  $d$ 、 $q$  轴求导。

以  $d$  轴电流为例，式(21)可改写为

$$\dot{V}_d = -\varepsilon_d |S_{id}| \text{sign}(S_{id}) (D^\alpha \text{sign}(S_{id})) - k_d S_{id}^2 \quad (22)$$

且当  $0 \leq \alpha < 1$  时，有式(26)<sup>[26]</sup>。

$$\text{sign}(D^\alpha \text{sign}(S_{id})) = \text{sign}(S_{id}) \quad (23)$$

则联立式(22)、式(23)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= -\varepsilon_d |S_{id}| \text{sign}(D^\alpha \text{sign}(S_{id})) (D^\alpha \text{sign}(S_{id})) - k_d S_{id}^2 = \\ &= -\varepsilon_d |S_{id}| |D^\alpha \text{sign}(S_{id})| - k_d S_{id}^2 \leq \\ &= -\varepsilon_d |D^\alpha \text{sign}(S_{id})| |S_{id}| \leq \\ &= -\varepsilon_d |D^\alpha \text{sign}(S_{id})| (2V_d)^{1/2} \leq \\ &= -k V_d^{1/2} \end{aligned} \quad (24)$$

式中， $k > 0$ ，所以式(24)是负定的，因此系统会在有限时间内收敛到 0。

同理可证得  $q$  轴电流控制器在有限时间内收敛到 0。综上所述，三相电压不平衡时，基于空间矢量调制的电压变结构、电流分数阶滑模控制器总控制框图如图 6 所示。

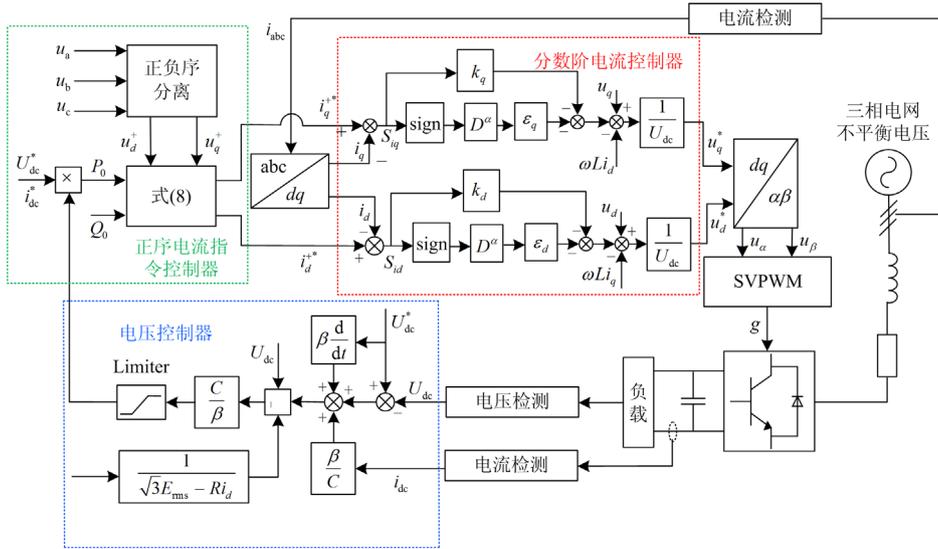


图 6 互联接口变换器总控制框图

Fig. 6 General control block diagram of the interconnection interface converter

### 4 仿真实证

为验证所提策略的正确性和有效性，本文基于 Matlab/Simulink 平台搭建了如图 2 所示的交直流混合微电网互联接口变换器模型。对比了平衡状态下的传统滑模控制、传统 PI 控制以及本文所提控制在电压不平衡时的控制效果，主电路及不同控制系统的具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型主电路及控制系统参数表

Table 1 Simulation model main circuit and control system parameter table

控制方法	双环滑模控制	PI 控制
控制参数	$\beta = 0.006$	$K_{vp} = 0.83$
	$k_d = 100$	$K_{vi} = 47$
	$\varepsilon_d = 200$	$K_{ip} = 9.6$
	$k_q = 50$	$K_{ii} = 22.5$
	$\varepsilon_q = 200$	
主电路参数	A 相交流额定电压 $u_a = 311\text{ V}$	
	交流滤波电感 $L = 0.004\text{ H}$	
	交流侧等效电阻 $R = 0.1\ \Omega$	
	直流母线电压 $U_{dc} = 800\text{ V}$	
	直流侧滤波电容 $C = 3300\ \mu\text{F}$	
阻性负载 $R_L = 40\ \Omega$		
给定值	$U_{dc}^* = 700\text{ V}$ $i_q^* = 0$	

#### 4.1 交流侧三相不平衡电压

仿真过程中交直流混合微电网系统保持并网运行，仿真时长为 0.5 s。在主电路交流侧接入不对称

负载，使系统中生成负序电压，造成交流侧母线电压不平衡，仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，负序电压的存在使得 A 相电压跌落 30%，导致交直流混合微电网运行在交流侧电压不平衡状态下。

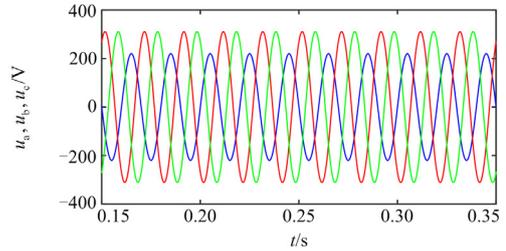


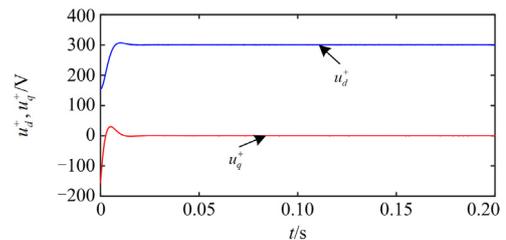
图 7 交流侧三相电压

Fig. 7 AC-side three-phase voltage

当电网电压发生不平衡时，采用  $T/4$  延时法可以将正负序电压快速稳定地分离出来，且  $T/4$  延时法具有较少的延时器、计算量更小、实现更简单，大大提高了控制系统的运行速度，图 8 为交流侧三相电压的正负序直流分量。

#### 4.2 未采用负序电流抑制

传统滑模控制在三相电压平衡时对直流母线电



(a) 正序直流分量

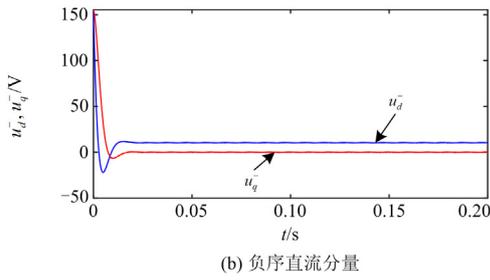


图 8 交流侧三相电压正负序直流分量

Fig. 8 AC side three-phase voltage positive and negative sequence DC component

压的控制以及交流电流的控制具有优越性，但当电压不平衡时，理想状态下的控制策略会受到负序分量的干扰，导致交流侧电流出现不对称现象，性能显著下降，如图 9(a)所示；且直流母线电压存在二倍频脉动，使其在给定值附近存在较大波动，影响微电网的稳定运行，如图 9(b)所示。

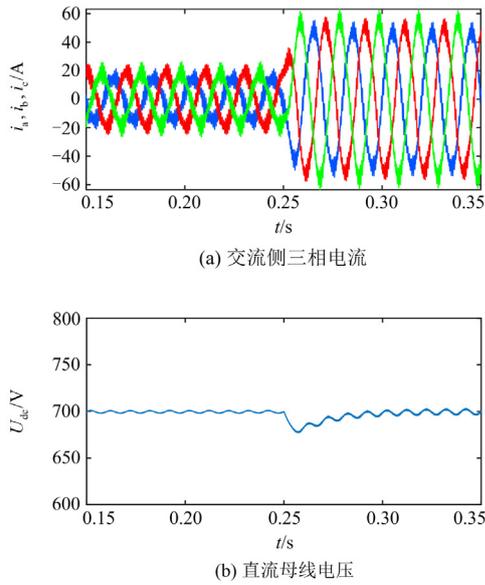


图 9 未采用负序电流抑制的仿真波形

Fig. 9 A simulation waveform without negative sequence current suppression

### 4.3 采用负序电流抑制的整流模式

本文所提控制策略是在电压平衡状态下 IIC 传统滑模控制的基础上，添加了电流分数阶滑模控制器以及负序电流抑制方法维持直流母线电压的稳定和抑制交流电流的畸变，采用负序电流抑制的三相整流电流仿真波形，如图 10 所示。

当加入负序电流抑制策略后，对比本文所提控制策略以及传统 PI 控制，从图 10 中可以看出，两种控制策略在加入平衡电流后，由于负序电流分量

得到抑制，使得互联接口变换器交流侧的三相电流基本对称，但相较于传统 PI 控制，本文所提控制策略的电流波形谐波含量明显更少，波形更接近正弦波。

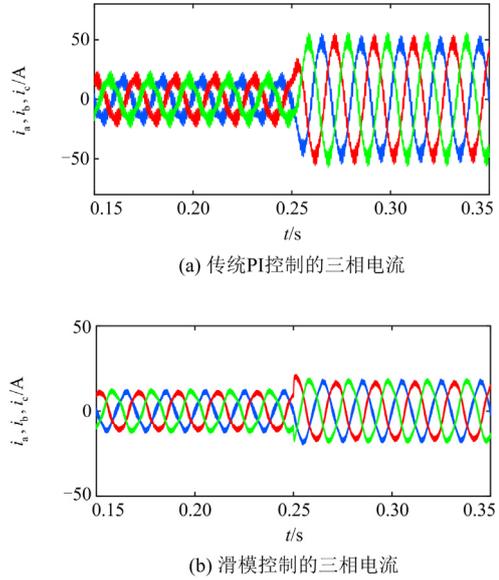


图 10 采用负序电流抑制的三相整流电流仿真波形

Fig. 10 Three-phase rectifier current simulation waveform using negative sequence current suppression

图 11 为整流模式下采用负序电流抑制策略时的直流母线电压波形，从图中可以看出，相较于图 9(b)中未采用负序电流抑制策略的情况，直流母线电压的二倍频脉动得到了有效抑制，且相比传统 PI 控制本文所提的分数阶滑模控制在启动时的响应速度得

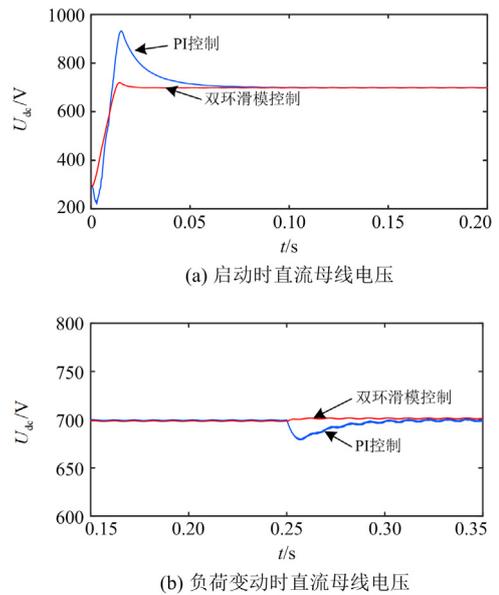


图 11 采用负序电流抑制的直流母线电压仿真波形(整流)

Fig. 11 DC-link voltage simulation waveform using negative sequence current rejection (rectifier)

到明显提升, 超调抑制效果也比 PI 控制性能优越; 在负荷变动时, 滑模控制的调节时间也比 PI 控制更短, 具有更好的鲁棒性。由此验证了负序电流抑制策略的有效性, 不仅能够保留滑模控制的优越性, 同时还抑制了三相电流的不平衡。

#### 4.4 采用负序电流抑制的逆变模式

根据直流侧母线电压的需求, IIC 能够实现自主切换整流逆变模式。两种模式切换的功率流向图如图 12 所示, 当功率正向流动时, 接口变换器工作在整流状态, 当功率反向流动时, 变换器工作在逆变状态, 从图中可以看出, 在该控制策略下两种模式间能够平滑切换, 有功功率没有出现明显冲击, 但由于不平衡电压存在负序分量, 输出有功功率会出现小幅波动, 但在可接受的范围内, 可忽略不计。因此, 所提出的电压不平衡下抑制交流侧负序电流分量的分数阶滑模控制在整流、逆变的切换过程中满足平滑切换的要求, 并平稳过渡到稳态运行。

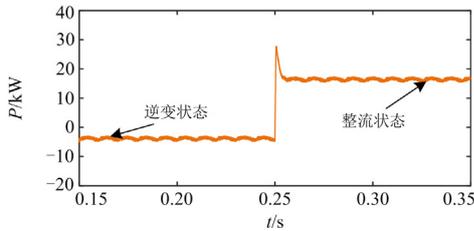
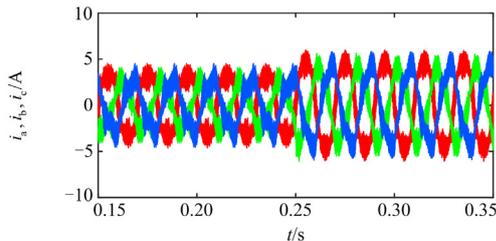


图 12 自主切换功率流向图

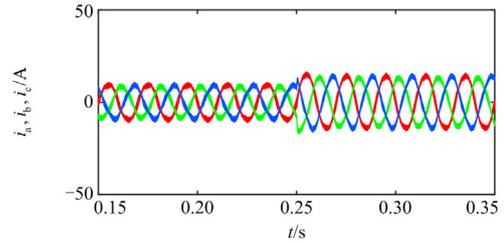
Fig. 12 Autonomous switching power flow direction diagram

当互联接口变换器工作在逆变状态时, 加入负序电流抑制策略后, 分数阶滑模控制和传统 PI 控制下的三相电流波形如图 13 所示, 二者在经过负序电流分量抑制后, 其三相电流基本对称, 但滑模控制比传统控制下的逆变电流具有更好的正弦度, 且谐波含量明显较少。

逆变模式下采用负序电流抑制的直流母线电压仿真波形如图 14 所示。在逆变过程中, 相较于传统 PI 控制, 滑模控制下的直流母线电压追踪在响应速度及鲁棒性能上均比较优越, 且由电压不平衡造成的二倍频脉动也得到了有效抑制。



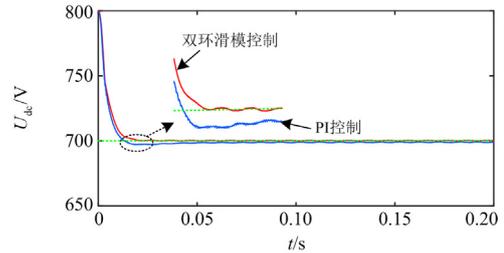
(a) 传统PI控制的三相电流



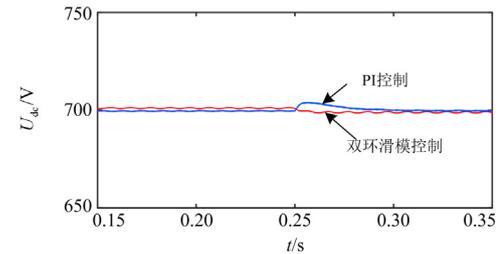
(b) 滑模控制的三相电流

图 13 采用负序电流抑制的三相逆变电流仿真波形

Fig. 13 Three-phase inverter current simulation waveform using negative sequence current rejection



(a) 启动时直流母线电压



(b) 负荷变动时直流母线电压

图 14 采用负序电流抑制的直流母线电压仿真波形(逆变)

Fig. 14 DC-link voltage simulation waveform using negative sequence current rejection (inverter)

上述仿真结果表明, 电压不平衡下抑制交流侧负序电流分量的分数阶滑模控制不仅可以实现负序电流的抑制, 获得对称度良好的三相电流波形, 能够对直流母线电压进行控制, 降低二倍频脉动, 而且相较于传统 PI 控制, 具有更为优越的控制效果。

## 5 结论

本文提出了一种抑制交流侧负序电流分量的分数阶滑模控制, 解决了并网型交直流混合微电网交流侧电压不平衡时会产生交流电流负序分量从而导致直流母线电压二倍频脉动的问题, 通过理论分析和仿真验证, 得出以下结论。

1) 理想状态下 IIC 的滑模控制受到负序分量的影响, 使三相电流出现不对称现象, 直流母线电压二倍频脉动增加, 因此不适用于电压不平衡下的变

换器, 需要利用对称分量法分离正负序电压, 并加入负序电流抑制策略平衡三相电流。

2) 负序电流分量得到有效抑制后, 通过内环分数阶滑模控制确保直流母线电压稳定在给定值附近, 降低二倍频脉动, 响应速度较传统 PI 控制提升近 50%, 并抑制瞬态响应的超调现象, 当负载发生变动后, 该控制策略具有很好的鲁棒性, 能够抵御外部扰动, 使母线电压快速恢复到稳定值。

3) 该控制策略不仅能在交流侧电压不平衡情况下实现交流侧电流的正弦化、对称化及直流侧电压的稳定, 而且能根据直流子网能量需求自主切换工作状态, 完成整流/逆变的双向切换, 有效改善了交直流混合微电网的运行品质。

### 参考文献

- [1] 徐良德, 郭挺, 吴晗, 等. 考虑多场景满意度评价的可再生能源规划[J]. 供用电, 2022, 39(12): 89-97.  
XU Liangde, GUO Ting, WU Han, et al. Renewable energy planning based on multi scenario technology and satisfaction evaluation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 89-97.
- [2] 蔡浩, 施凯, 唐静, 等. 基于改进蚁狮优化算法的可再生能源分布式电源优化配置[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 88-95.  
CAI Hao, SHI Kai, TANG Jing, et al. Optimal configuration of renewable energy distributed power generation based on improved ant-lion optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 88-95.
- [3] 岑海凤, 杨翔宇, 王雨潼, 等. 基于生存性评估的含微电网的保底电网网架构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 109-117.  
CEN Haifeng, YANG Xiangyu, WANG Yutong, et al. A planning method for secure power networks with microgrids based on survivability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 109-117.
- [4] 米阳, 彭建伟, 陈博洋, 等. 基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 1-10.  
MI Yang, PENG Jianwei, CHEN Boyang, et al. Fully distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 1-10.
- [5] HU C C, CAI Z X, ZHANG Y X, et al. A soft actor-critic deep reinforcement learning method for multi-timescale coordinated operation of microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 423-432.
- [6] 陈景文, 肖妍, 莫瑞瑞, 等. 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 59-66.  
CHEN Jingwen, XIAO Yan, MO Ruirui, et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 59-66.
- [7] 王浩, 康博阳, 郑征, 等. 考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2023, 45(5): 2009-2018.  
WANG Hao, KANG Boyang, ZHENG Zheng, et al. Power coordinated control strategy of AC-DC hybrid microgrid considering flexible energy storage for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2023, 45(5): 2009-2018.
- [8] 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 Qiming, ZHANG Xin, LAI Yusheng, et al. Back-stepping sliding-mode control strategy for a three-level direct matrix converter in unbalanced grid conditions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 73-85.
- [9] 王祺, 秦文萍, 张宇, 等. 不平衡工况下新能源并网变换器韧性分析及优化控制[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4337-4346.  
WANG Qi, QIN Wenping, ZHANG Yu, et al. Toughness analysis and optimal control of renewable energy grid-connected converters under unbalanced voltage condition[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4337-4346.
- [10] 刘龙峰, 韩肖清, 任春光, 等. 不平衡工况下混合微电网交直流母线接口变换器多模态运行控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4003-4012.  
LIU Longfeng, HAN Xiaoqing, REN Chunguang, et al. Multi-mode operation control scheme for AC/DC interfacing converter under unbalanced conditions in hybrid microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4003-4012.
- [11] ZHANG L, RUAN X B, REN X Y. Second-harmonic current reduction and dynamic performance improvement in the two-stage inverters: an output impedance perspective[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(1): 394-404.
- [12] HUANG Y P, MA X X. Research on microgrid technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 320-328.
- [13] 高超, 杨其国, 李永星. 微电网关键控制技术综述[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(3): 1-5, 10.  
GAO Chao, YANG Qiguo, LI Yongxing. Summary on key control technology of microgrid[J]. Techniques of Automation & Applications, 2015, 34(3): 1-5, 10.
- [14] 姚卫波, 徐晔, 黄克峰, 等. 基于前馈解耦的交直流混

- 合微电网双向 AC-DC 变换器控制策略研究[J]. 电气技术, 2022, 23(5): 25-33.
- YAO Weibo, XU Ye, HUANG Kefeng, et al. Research on bidirectional AC-DC converter feedforward decoupling control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(5): 25-33.
- [15] 田浩, 黄文焘, 余墨多, 等. 交直流混合独立微网互联变换器自适应双向下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7063-7074.
- TIAN Hao, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Adaptive bidirectional droop control strategy for the interlinking converter in the islanding hybrid AC/DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7063-7074.
- [16] 黄子远. 基于双自适应参数混合微网虚拟同步机控制策略研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- HUANG Ziyuan. Control strategy of hybrid microgrid virtual synchronous machine based on dual-adaptive parameters[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [17] 孟润泉, 高晗, 魏明, 等. 电流畸变时 AC/DC 双向功率变换器的控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 210-217.
- MENG Runquan, GAO Han, WEI Ming, et al. Control strategy of AC/DC bidirectional power converter when current distortion[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(6): 210-217.
- [18] 荆磊, 张俊峰, 邱茂航, 等. 基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器控制技术及电流畸变问题的研究[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 45-50.
- JING Lei, ZHANG Junfeng, QIU Maohang, et al. Research on control technology and current distortion of bidirectional AC/DC converter based on V2G[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 45-50.
- [19] 王新, 许翔, 吴博宁, 等. 直流微电网双向 AC/DC 变换器鲁棒前馈控制策略研究[J]. 电子科技, 2022, 35(6): 64-69.
- WANG Xin, XU Xiang, WU Boning, et al. Research on robust feedforward control strategy of bidirectional AC/DC converter for DC microgrid[J]. Electronic Science and Technology, 2022, 35(6): 64-69.
- [20] HU C B, WANG Y, LUO S, et al. Voltage control strategy of islanded three-phase voltage source converter under unbalanced loads based on disturbance observer[C] // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, Jeju, Korea (South): 2199-2204.
- [21] LI H, BIAN H, NIU X, et al. Linear active disturbance rejection control based on three-phase unbalanced voltage compensation strategy in microgrid[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2018, Tianjin, China: 538-543.
- [22] LI X Y, ZHANG C H, CHEN A, et al. Model predictive direct current control strategy for three-level T-type rectifier under unbalanced grid voltage conditions[C] // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, 2018: 1514-1519.
- [23] 郭文娇, 任春光, 王磊, 等. 电压不平衡时交直流双向功率变换器的控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 925-930.
- GUO Wenjiao, REN Chunguang, WANG Lei, et al. Control method of bidirectional AC/DC converter with unbalanced voltage in hybrid micro-grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 925-930.
- [24] 赵多, 贾燕冰, 任春光, 等. 基于双向接口变换器的混合微电网交直流母线电压统一控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3105-3114.
- ZHAO Duo, JIA Yanbing, REN Chunguang, et al. Unified control strategy of AC/DC bus voltage in hybrid microgrid based on bidirectional interfacing converter[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3105-3114.
- [25] YIN C, HUANG X, CHEN Y, et al. Fractional-order exponential switching technique to enhance sliding mode control[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 44(4): 705-726.
- 
- 收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-06-06
- 作者简介:
- 王浩(1988—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为交直流混合微电网运行与控制; E-mail: wangh@hpu.edu.cn
- 聂晶莹(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合微电网互联接口变换器控制; E-mail: niejingy@163.com
- 李斌(1987—)男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为微电网虚拟同步发电机控制。E-mail: libin@hpu.edu.cn
- (编辑 许威)