

# 基于SMC的交直流混合微电网接口换流器控制策略

苏小玲<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>1</sup>, Josep M. Guerrero<sup>2</sup>, 赵鑫<sup>2</sup>

1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206
2. 奥尔堡大学能源技术系, 奥尔堡 9220

**摘要** 根据交直流混合微电网拓扑和并网运行特点,建立了接口换流器的数学模型,设计了基于滑模控制(sliding-mode control, SMC)的接口换流器控制系统,并通过设计趋近律规定了滑模控制过程中系统在正常运动阶段的状态轨迹,保证滑模控制的品质。为证明控制系统在实际应用中的可行性,在dSPACE 1006平台上建立了实验模型。仿真和实验结果表明,该控制系统可以提高接口换流器在不确定和非线性条件下的鲁棒性和快速响应性,保证微电网稳定运行。

**关键词** 混合微电网;接口换流器;滑模控制;趋近律;鲁棒性

将分布式电源(distributed generation, DG)和负荷组成小型发电系统,以微电网的形式接入大电网与大电网互为支撑,是发挥分布式电源系统效能的最有效的方式<sup>[1-3]</sup>。微电网可分为交流、直流以及交直流混合3类,其中交直流混合微电网既含有交流母线又含有直流母线。根据DG及负荷特点,采用交、直流混合供电的灵活运行模式,避免了DG和负荷接入交流微电网或直流微电网时需要进行多次换流造成的诸多电能质量问题。同时降低了投入成本及损耗,达到充分利用分布式能源的目的。

混合微电网中的双向接口换流器连接交、直流母线,可根据实际需要,工作在整流和逆变模式;在交、直流母线之间的功率交换过程中担任着支撑和协调的角色;对系统的稳定运行及电能质量的提高有重要作用<sup>[4,5]</sup>。文献[6]提出了交直流微电网的协调控制策略。文献[7]设计了定电压控制法。文献[8]则介绍了电压频率控制方法,这些方法均能够有效维持母线电压稳定,但由于接口换流器模型是典型的非线性多输入多输出系统,模型中含有状态变量和控制变量的乘积,并且状态变量间存在耦合,常规控制策略难以满足输出零稳态误差、快速动态响应、输入电流畸变小和单位功率因数的要求<sup>[9]</sup>。同时,由于间歇性电源和大量非线性设备的存在,使得接口换流器两侧都存在扰动和谐波,增加了接口换流器的控制难度。此外,由于小信号假设,常规线性和非线性控制策略,无法适用于大信号工作条件。当出现大的瞬态变化

时,变换器的行为无法充分地反映出来<sup>[10]</sup>。

作为一种在设计选择中具有高度灵活性的控制方法,滑模控制比其他非线性控制方法更易于实现<sup>[11-13]</sup>。文献[2]提出基于自适应全局滑模控制的微电网稳定控制策略,控制交流微电网在不同模式下的稳定运行。文献[14]利用滑模控制稳定三相整流桥的直流侧电压、保证系统的单位功率因数。文献[15]将滑模控制用于单相逆变器,针对逆变器的并网、孤岛两种运行方式分别设计了控制方法。

系统的滑模控制的运动过程由两部分组成:第一段是在连续控制下的正常运动阶段,它在状态空间中的运动轨迹全部位于切换面以外,或者有限地穿过切换面;第二段是在切换面附近且沿切换面向稳定点运动的滑模运动阶段。在所有滑动模态段上都存在着抖动运动。只有最终滑动段才可按极点配置或最优控制等方法保证它的品质,而且这一段运动对系统的扰动和干扰具有完全自适应性(不变性)。对正常运动阶段,仅达到条件,只能保证运动到达切换面,完全无法保证这段运动的品质,如快速性及超调量等。此外,加在系统上的扰动和干扰也将对这段运动产生较强烈的影响。

在实际控制系统中,由于系统参数变化、外部扰动及检测技术限制等因素的影响,通常难以获得控制对象的精确模型,且匹配条件往往难以满足,使得传统滑模控制无法达到理想的品质。而且对于多控制系统,从到达条件确定各个变结构控制是比较困难的。因此,本文在前期工作<sup>[2]</sup>的基础上,

收稿日期:2015-11-24;修回日期:2015-12-29

基金项目: 中丹国际合作项目(2014DFG72620)

作者简介: 苏小玲, 博士研究生, 研究方向为分布式发电, 微电网技术, 电子信箱: elevelusu@163.com; 韩民晓(通信作者), 教授, 研究方向为电力电子技术  
在电力系统中的应用, 电子信箱: hanminxiao@ncepu.edu.cn

引用格式: 苏小玲, 韩民晓, Josep M. Guerrero, 等. 基于SMC的交直流混合微电网接口换流器控制策略[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 299-304; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.050

提出了基于滑模控制的交直流混合微电网接口换流器控制系统,并采用趋近律的概念,规定滑模控制过程中系统在正常运动阶段的状态轨迹,从而简化控制算法。

## 1 交直流混合微电网的结构

混合微电网的典型结构为交流系统和直流系统按各自的原则组成微电网,由四象限运行的接口换流器连接,如图1所示。直流系统为并联式结构,储能系统、直流负荷、光伏系统等DG通过直流母线并联。交流系统结构与直流系统结构相似,DG及负荷并联到交流母线上;混合微电网由交流母线经馈线接入电网。

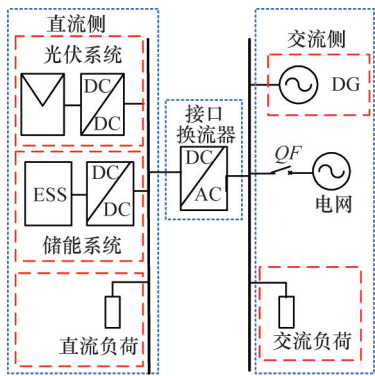


图1 交直流混合微电网

Fig. 1 AC/DC hybrid microgrid

微电网一般并配电网运行,微电网与主电网之间灵活交换功率。当微电网并网运行时,微电网有主电网这一相对可靠的能量来源,交流母线的电压和频率由主电网支撑。接口换流器可稳定直流母线电压,抑制DG、负荷造成的功率波动,保证微电网的电能质量;同时控制微电网交流母线与直流母线之间的潮流。

## 2 双向接口换流器模型

### 2.1 电路结构

接口换流器电路结构如图2所示, $U_{dc}$ 为直流侧电压。 $u_a, u_b, u_c$ 与 $i_a, i_b, i_c$ 分别表示交流侧相电压与电流。 $L$ 和 $C$ 为滤波电感、电容。 $r$ 为换流桥、电感及线路等效串联电阻, $r_l$ 为滤波电容等效串联电阻。

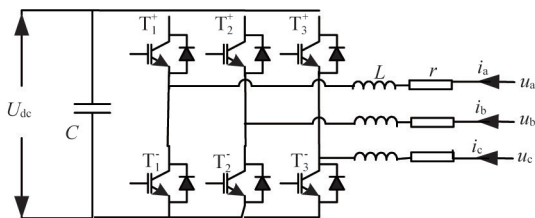


图2 接口换流器电路结构

Fig. 2 Typology of the interface convertor

## 2.2 数学模型

根据图2可知,三相静止坐标系下接口换流器的状态方程为

$$\begin{cases} u_a = L \frac{di_a}{dt} + r i_a + u_{cna} \\ u_b = L \frac{di_b}{dt} + r i_b + u_{cnb} \\ u_c = L \frac{di_c}{dt} + r i_c + u_{cnc} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u_{cna}, u_{cnb}, u_{cnc}$ 为接口换流器桥中点控制电压。对矩阵进行 $T_{abc \rightarrow dq}$ 变换后,可得换流器旋转坐标系下的状态方程为

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + r i_d + u_{cond} \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + r i_q + u_{conq} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $u_d, u_q$ 和 $i_d, i_q$ 分别为两相旋转坐标系下接口换流器交流侧电压、电流; $u_{cond}, u_{conq}$ 为旋转坐标系下接口换流器桥中点控制电压。设接口换流器交流侧电流参考值为 $i_{dref}, i_{qref}$ ,取参考信号与状态变量之差作为新的状态变量,系统的状态方程整理为

$$\begin{cases} L \dot{e}_d = u_d + \omega L i_q - r i_d - u_{cond} - L i_{dref} \\ L \dot{e}_q = u_q - \omega L i_d - r i_q - u_{conq} - L i_{qref} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $e_d = i_d - i_{dref}, e_q = i_q - i_{qref}$ 。

## 3 控制系统设计

滑模控制的运动过程由两部分组成:第1段是系统在连续控制下的正常运动阶段,它在状态空间中的运动轨迹全部位于切换面以外,或者有限地穿过切换面;第2段是系统在切换面附近且沿切换面向稳定点运动的滑模运动阶段。所有滑动模态段都存在着抖动运动,只有最终滑动段才可按极点配置或最优控制等方法保证其品质,而且这一段运动对系统的摄动和干扰具有完全的自适应性(不变性)。对正常运动阶段,仅到达条件,只能保证运动到达切换面。完全无法保证这段运动的品质,如快速性及超调量等<sup>[6]</sup>。此外,加在系统上的摄动和干扰也将对这段运动产生较强烈的影响。因此,本文通过设计趋近律,规定了滑模控制过程中系统在正常运动阶段的状态轨迹。

接口换流器的交流侧和直流侧都存在扰动,而微电网交流母线直接与电网相连,运行相对稳定。因此,本文为接口换流器设计了静止坐标系下的双闭环控制系统,稳定混合微电网直流母线电压。该系统包括电流内环和电压外环,可以保证接口换流器交流侧电流正弦且单位功率因数以及直流侧电压稳定。

### 3.1 电压外环

若忽略等效电阻和其他损耗,根据系统的状态方程,可以得到接口换流器直流侧和交流侧的瞬时功率表达式,即

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} U_{dc} + U_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (4)$$

式中, $U_{dc}, i_{dc}$ 分别为接口换流器直流侧电压、电流;设接口换

流器直流侧电压参考值为  $U_{dref}$ , 取参考信号与状态变量之差作为新的状态变量, 式(4)整理为

$$\dot{e}_{dc} = \frac{3}{2CU_{dc}}(u_d i_d + u_q i_q) - \frac{\dot{i}_{dc}}{C} - \dot{U}_{dref} \quad (5)$$

式中,  $e_{dc} = U_{dc} - U_{dref}$

积分滑模面具有稳态误差小、可削弱抖振等优点, 因此本文采用积分滑模面。电压外环的滑模面为

$$\sigma_{dc} = e_{dc} + k_{dc} \int e_{dc} dt \quad (6)$$

式中,  $k_{dc}$  为滑模面的积分项系数。考虑到算法的复杂程度及控制系统的效果, 选择趋近率为

$$\dot{\sigma}_{dc} = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_{dc}) - \alpha_{dc} \sigma_{dc} \quad (7)$$

式中,  $\varepsilon$  为小的正常数;  $\text{sign}(\cdot)$  为符号函数。将式(6)代入式(7), 化简可得

$$\dot{e}_{dc} + k_{dc} e_{dc} = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_{dc}) - \alpha_{dc} \sigma_{dc} \quad (8)$$

根据系统的状态方程以及式(8), 可得接口换流器内环电流参考值为

$$i_{dref} = \frac{2C}{3u_d} U_{dc} (-\varepsilon \text{sign}(\sigma_{dc}) - \alpha_{dc} \sigma_{dc} - k_{dc} e_{dc}) + \frac{2}{3u_q} U_{dc} \dot{i}_{dc} + \frac{2}{3u_q} C U_{dc} \dot{U}_{dref} \quad (9)$$

### 3.2 电流内环

电流内环的滑模面设计为

$$\begin{cases} \sigma_d = (i_d - i_{dref}) + k_{d1} \int (i_d - i_{dref}) dt \\ \sigma_q = (i_q - i_{qref}) + k_{q1} \int (i_q - i_{qref}) dt \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $k_{d1}$ 、 $k_{q1}$  为滑模面的积分项系数。考虑到算法的复杂程度及控制系统的效果, 选择趋近率为

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_d = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_d) - \alpha_d \sigma_d \\ \dot{\sigma}_q = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_q) - \alpha_q \sigma_q \end{cases} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11), 化简可得

$$\begin{cases} \dot{e}_{id} + k_{d1} e_{id} = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_d) - \alpha_d \sigma_d \\ \dot{e}_{iq} + k_{q1} e_{iq} = -\varepsilon \text{sign}(\sigma_q) - \alpha_q \sigma_q \end{cases} \quad (12)$$

根据系统的状态方程及式(12), 设计接口换流器的控制为

$$\begin{cases} u_{cond1} = u_{cond1} + u_{cond2} \\ u_{conq1} = u_{conq1} + u_{conq2} \end{cases} \quad (13)$$

且

$$u_{cond1} = L(-\varepsilon \text{sign}(\sigma_d) + \alpha_d \sigma_d + k_{d1} e_{id} - Li_{refd}) \quad (14)$$

$$u_{cond2} = u_d + \omega L i_q - r i_d \quad (15)$$

$$u_{conq1} = L(-\varepsilon \text{sign}(\sigma_q) + \alpha_q \sigma_q + k_{q1} e_{iq} - Li_{refq}) \quad (16)$$

$$u_{cond2} = u_d - \omega L i_q - r i_d \quad (17)$$

通过选择合适的状态反馈系数  $k_{d1}$ 、 $k_{q1}$  及系数  $\alpha_d$ 、 $\alpha_q$  可以保证系统的鲁棒性, 同时也可以调整接口换流器的动态特性。

## 4 仿真分析

利用 Matlab 仿真软件建立图 1 混合微电网的仿真模型, 交、直流母线上的 DG 分别通过逆变器和 DC/DC 并网, 向微电网注入功率。接口换流器交流侧电压参考值设为 220 V, 50Hz; 接口换流器滤波器电感为 1.8 mH; 直流母线电压额定值为 650 V。

### 4.1 算例 1

微电网直流母线负荷 16 kW, DG 输出 12 kW。0.4 s DG 输出降为 8 kW。接口换流器控制直流母线电压。仿真结果如图 3 所示。

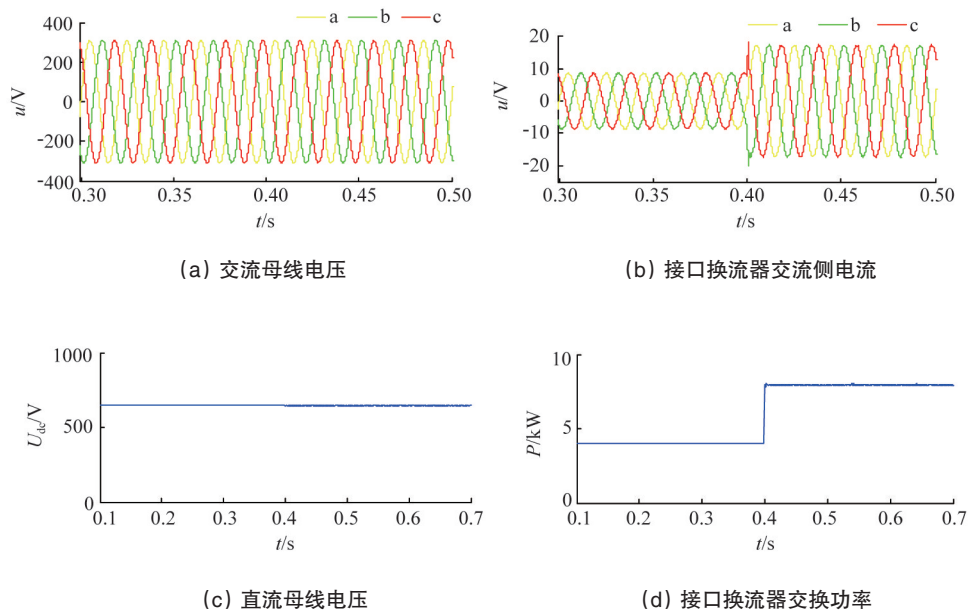


图 3 算例 1 仿真结果

Fig. 3 Simulation results of example 1

## 4.2 算例2

微电网直流母线负荷 16 kW, DG 输出 12 kW。0.4 s DG 输出提高 8 kW, 直流母线负荷减少 8 kW。接口换流器控制直流母线电压。仿真结果如图 4 所示。

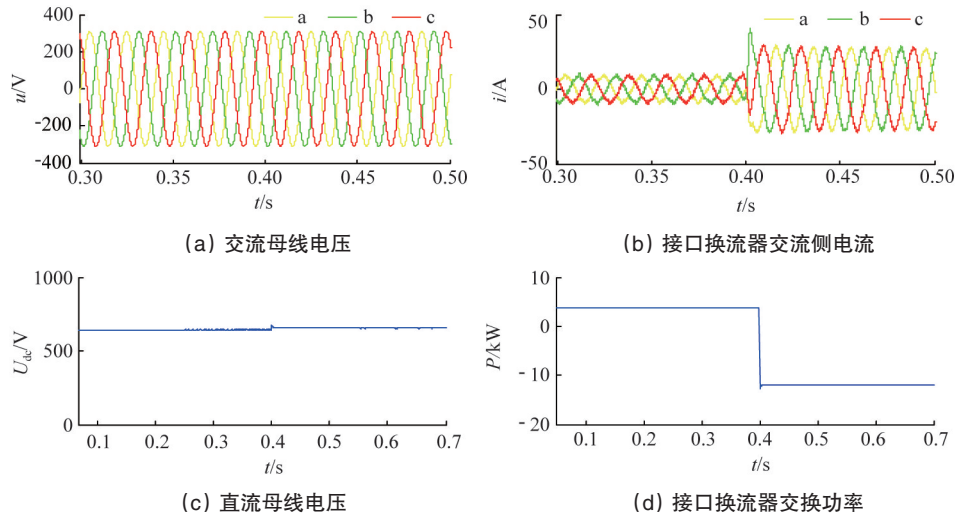


图 4 算例2仿真结果

Fig. 4 Simulation results of example 2

仿真结果表明,直流母线上有大扰动时,接口换流器可以稳定直流母线的电压,保证重要负荷的供电。同时,接口换流器可以控制微电网交流母线与直流母线之间的潮流,抑制 DG、负荷造成的功率波动,保证微电网的稳定运行。

## 5 实验结果

### 5.1 实验平台

为了证明本文提出的控制系统的可实现性和有效性,在 dSPACE 1006 平台上对模型进行了验证。实验平台如图 5 所示,实验负载为电阻箱。图 6 为实验电路。



图 5 实验平台

Fig. 5 dSPACE setup

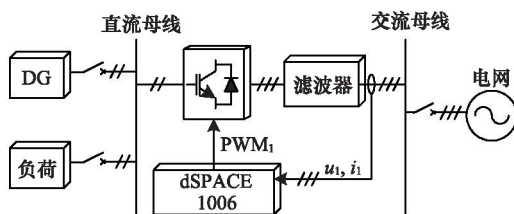


图 6 实验电路结构

Fig. 6 Setup topology

接口换流器由 1 台容量为 2.2 kV·A 的 Danfoss 换流器、滤波器及 dSPACE 1006 控制系统构成。换流器采用 PWM 调制,载波频率设为 10 kHz,其他电路参数与仿真模型一致。

### 5.2 验证实验

微电网并网运行,直流母线上的负荷为 1.68 kW, DG 的输出功率由 1.5 kW 减少到 0.9 kW,图 7 为直流母线电压波形,图 8 为交流母线电压波形,图 9 为接口换流器的交流侧电流波形。

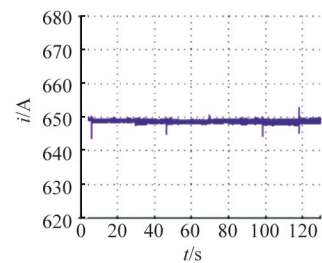


图 7 直流母线电压

Fig. 7 Voltage waveform of DC bus

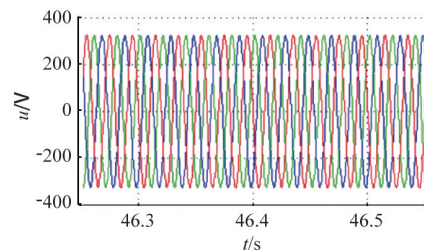


图 8 交流母线电压

Fig. 8 Voltage waveform of AC bus

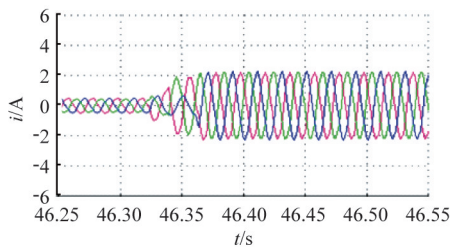


图9 接口换流器交流侧电流波形

Fig. 9 AC current waveform of the interface convertor

### 5.3 对比实验

为做对比分析,本文为接口换流器建立了基于PI (proportion-integration)控制器的双闭环控制系统作为对照实验<sup>[17]</sup>。微电网并网运行,直流母线上的负荷由0.36 kW增加到0.78 kW,图10为采用PI控制器后,接口换流器的交流侧电流波形。

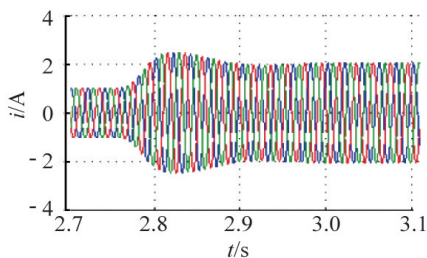


图10 接口换流器交流侧电流波形

Fig. 10 AC current waveform of the interface convertor

在实验过程中,微电网交流、直流母线电压始终保持稳定,接口换流器交流侧的电流随交流母线上功率缺额的变化而变化。接口换流器采用本文提出的基于滑模控制的控制系统后,其鲁棒性和响应速度明显高于基于PI的控制系统。

## 6 结论

在分析交直流混合微电网并网运行时接口换流器的数学模型及特性的基础上,提出了基于滑模控制的接口换流器控制系统,并通过设计趋近律规定了滑模控制过程中系统在正常运动阶段的状态轨迹,保证滑模控制系统的品质。根据混合微电网的拓扑设计了实验和仿真算例。在仿真和实验过程中,接口换流器稳定直流母线的电压,保证重要负荷的供电;同时可以控制微电网交流母线和直流母线之间的潮流,抑制DG、负荷造成的功率波动,保证微电网的运行。仿真和实验结果证明,接口换流器可以保证微电网在不确定和非线性条件下的鲁棒性和稳定性,该控制系统的有效性、正确性以及在实际应用中的可行性。

## 参考文献 (References)

- [1] Vovos P, Kiprakis A, Wallace A, et al. Centralized and distributed voltage control: Impact on distributed generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (1): 476-483.
- [2] 苏小玲, 韩民晓, 孙海. 基于自适应全局滑模控制的微电网稳定控制策略[J]. 电机工程学报, 2014, 34(31): 5534-5541.  
Su Xiaoling, Han Minxiao, Sun Hai. Stability control strategy for microgrid based on adaptive total sliding-mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5534-5541.
- [3] Shafiee Q, Guerrero J M, Vasquez J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [4] Eghtedarpour N, Farjah E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [5] 陆晓楠, 孙凯, Josep Guerrero, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.  
Lu Xiaonan, Su Kai, Josep Guerrero, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [6] Liu Xiong, Wang Peng, Loh P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 1-9.
- [7] Akbari M, Golkar M A, Tafreshi S M M. Voltage control of a hybrid AC/DC microgrid in grid-connected operation mode[C]//Innovative Smart Grid Technologies—India (ISGT India), 2011 IEEE PES. IEEE, 2011: 358-362.
- [8] Akbari M, Golkar M A, Tafreshi S M M. Firefly algorithm-based voltage and frequency control of a hybrid AC-DC microgrid[C]//Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012 Proceedings of 17th Conference on. IEEE, 2012: 1-7.
- [9] 帅定新, 谢运祥, 王晓刚. 三相PWM整流器混合非线性控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 30-35.  
Shuai Dingxin, Xie Yunxiang, Wang Xiaogang. Novel hybrid nonlinear control method for three-phase PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 30-35.
- [10] 张明锐, 黎娜, 杜志超, 等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19.  
Zhang Mingrui, Li Na, Du Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.
- [11] Moharana A, Dash P K. Input-output linearization and robust sliding mode controller for the VSC-HVDC transmission link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 1952-1961.
- [12] Utkin V. Variable structure system with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic and Control, 1979, 22(2): 212-222.
- [13] Dai M, Marwali M N, Jin W J, et al. A three-phase four-wire inverter control technique for a single distributed generation unit in island mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 322-331.
- [14] 赵葵银. PWM整流器的模糊滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 49-53.  
Zhao Kuiyin. PWM rectifier with fuzzy sliding mode variable structure control[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2006, 21(7): 49-53.
- [15] Wai R J, Lin C Y, Huang Y C, et al. Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation

- applications[J]. IEEE Transactions on, Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1542-1555.
- [16] 高为炳, 程勉. 变结构控制系统的品质控制[J]. 控制与决策, 1989 (4): 1-6.
- Gao Weibing, Chen Mian. Quality control of variable structure control systems[J]. Control and Decision, 1989(4): 1-6.
- [17] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- Zhang Xing, Zhang Chongwei. PWM converter and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

## Control system for AC/DC hybrid microgrid interface convertor based on SMC

SU Xiaoling<sup>1</sup>, HAN Minxiao<sup>1</sup>, Josep M. Guerrero<sup>2</sup>, ZHAO Xin<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
2. Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark

**Abstract** This paper first analyzes the AC/DC hybrid microgrid operating characteristics and the mathematical model of the interface convertor according to the operation mode. Then it develops a control system for the interface convertor based on sliding-mode control (SMC). A reaching law is designed to ensure the performance of this control system. An experimental setup is developed based on dSPACE 1006. Simulation and experimental results illustrate that the control system is insensitive to parametric uncertainty or external disturbances. The fast dynamic response and robust control performance of the interface convertor can ensure the stable operation of the microgrid.

**Keywords** hybrid microgrid; interface convertor; sliding-mode control; reaching law; robust

(责任编辑 刘志远)