

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201116

# 交直流混合微电网母线接口参数自适应 VSG 控制策略

张 良, 范广胜, 黄南天, 吕 玲, 蔡国伟, 王雪松

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

**摘要:**针对交直流混合微电网的母线接口变换器采用传统 VSG 控制策略时存在母线频率的超调量与暂态过程时间矛盾, 以及传输功率的暂态过程长期处于超调状态问题, 提出一种交直流混合微电网母线接口参数自适应 VSG 控制策略。该控制策略可以使接口变换器的传输功率、母线频率的超调量减小; 可以优化系统的动态调节能力, 进而缩短暂态过程。建立了符合母线接口变换器 VSG 的数学模型, 在 VSG 数学模型的基础上引出了参数自适应 VSG 控制策略。通过仿真, 对比参数自适应 VSG 控制策略与传统 VSG 控制策略的控制效果, 验证了所提出的控制策略的有效性和可行性。

**关键词:** VSG; 超调量; 传输功率; 混合微电网; 参数自适应

## Adaptive VSG control strategy for interlinking converter in an AC/DC hybrid microgrid

ZHANG Liang, FAN Guangsheng, HUANG Nantian, LÜ Ling, CAI Guowei, WANG Xuesong

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,  
Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** When the traditional Virtual Synchronous Generator (VSG) control strategy is adopted for a bus interlinking converter of an AC/DC hybrid microgrid, there is a contradiction between the overshoot of bus frequency and the transient process time. In addition the transmission power transient process is in overshoot state for a long time. Thus an adaptive VSG control strategy for AC/DC hybrid microgrid bus interlinking parameters is proposed. This control strategy can reduce the overshoot of the transmission power of the interlinking converter and the bus frequency. It can optimize the dynamic adjustment capability of the system, thereby shortening the transient process. A mathematical model conforming to the VSG of the bus interlinking converter is established, and a parameter adaptive VSG control strategy is derived on the basis of the VSG mathematical model. Through simulation, the control effect of traditional VSG control strategy and parameter adaptive VSG control strategy is compared, and the practicability and availability of the proposed control strategy is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607031) and Jilin Science and Technology Innovation Development Project (No. 20190104138).

**Key words:** VSG; overshoot; transmission power; hybrid microgrid; parameter adaptive

## 0 引言

近年来, 随着对微电网需求的增加, 混合微电网进入了人们的视线<sup>[1-6]</sup>。从组成可以看出, 其兼具交流、直流微电网的特点, 即: 可以孤岛、并网运行, 减少电力变换环节, 进而降低能量损耗。

在交直流混合微电网中, 选择合适的接口变换

器控制策略对系统的稳定运行至关重要。文献[7-8]中提出双向下垂的控制方法, 此方法是将交流频率以及直流电压通过公式进行统一化, 对比统一化的值来判断功率的流向。但是下垂控制策略的动态响应时间很短, 在接入电网时, 系统缓冲时间不足, 而且随着微电网中分布式电源的增加, 会降低混合微电网系统的虚拟惯量, 系统的稳定性会受到影响。针对系统虚拟惯量低导致系统不稳定的问题, 提出虚拟同步电机控制策略<sup>[9-10]</sup>, 根据同步电机固有的转子运动方程, 使微电网系统的惯性有所提升, 提

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51607031); 吉林市科技创新发展计划项目资助(20190104138)

高微电网传输功率和交流频率的响应能力, 增强混合微电网抗干扰能力, 但是和同步发电机一样, 该控制策略的阻尼系数和虚拟惯量是固定的, 因此缺乏一定的动态调节能力。系统所需要的参数值会随着运行工况的不同而不同, 如果能使阻尼系数与虚拟惯量随运行工况进行动态调节, 那么系统的动态调节能力问题将会得到解决。基于上述思想, 文献[11-14]提出了参数自适应虚拟同步机控制策略, 该控制策略在虚拟同步机模型的基础上引入虚拟惯量和阻尼系数自适应环节, 在优化系统的动态响应特性的同时, 解决了动态调节能力缺失的问题。但是该方法仅适用于交流微电网中功率正向流动的情况。对于功率可以正向流动、反向流动、双向流动的交直流混合微电网的动态调节能力与动态响应特性的优化问题, 仍未提出有效的控制策略。

针对如何解决交直流混合微电网母线接口交流频率、传输功率的动态响应特性和系统的动态调节能力等问题, 本文提出了交直流混合微电网母线接口参数自适应 VSG 控制策略。该策略通过交直流侧投切负荷, 构建虚拟惯量和阻尼与频率偏移量间的自适应关系, 使得系统可根据其暂态过程中不同阶段的系统特性来自由配置虚拟惯量和阻尼系数。该控制策略可使系统在相同负荷扰动下受到的冲击减小, 从而降低了系统在振荡过程中的超调量和动态响应时间, 有效提高了系统的动态调节能力。最后通过 Matlab/Simulink 仿真, 验证所提控制方法的有效性以及可行性。

## 1 虚拟同步发电机的基本原理

### 1.1 交直流混合微电网的拓扑结构

图 1 为传统的混合微电网的结构图<sup>[15]</sup>, 由三部分构成: 交流微电网、直流微电网以及接口变换器。根据微电网的实际需求, 可运行于并网模式和离网模式。

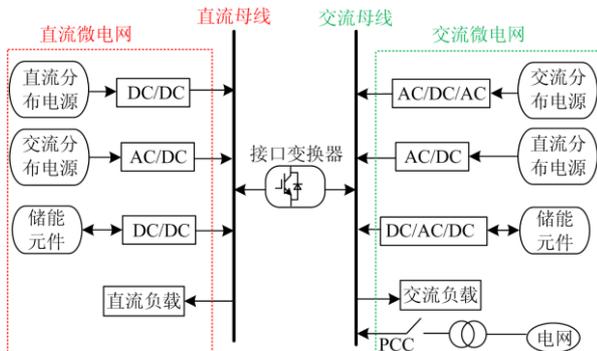


图 1 交直流混合微电网典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topology of AC/DC hybrid microgrid

### 1.2 VSG 控制策略

根据图 2 所示的混合微电网交直流母线接口变换器结构, 设  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{I}$  分别为电压  $e_{abc}$ 、 $u_{abc}$  和电流  $i_{abc}$  的合成相量。以  $\mathbf{U}$  为参考相量, 则接口变换器交流侧电压方程和功率传输方程分别近似为<sup>[16]</sup>

$$\dot{\mathbf{E}} = \dot{\mathbf{U}} + jX_L \dot{\mathbf{I}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_t = \frac{\mathbf{U}\mathbf{E}}{X_L} \sin \delta \\ Q_t = \frac{\mathbf{U}\mathbf{E}}{X_L} \cos \delta - \frac{U^2}{X_L} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为电压相量  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{U}$  的相角差。

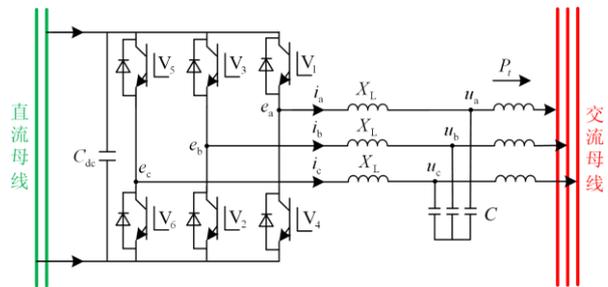


图 2 接口变换器结构

Fig. 2 Structure of the interlinking converter

由式(2)可知, 控制相角差可以实现功率的双向流动, 并且本文规定接口变换器有功功率传输正方向为直流侧流向交流侧。

在交流微电网或者直流微电网侧负载过重的情况下, 为了更好地均衡分配有功功率, 交、直流微电网, 均采用下垂控制策略<sup>[17-20]</sup>。虽然传统的下垂控制策略能够实现交直流混合微电网有功功率的均衡分配, 使电压和频率保持在一定范围内, 但随着负荷的突增或突减, 不能给系统一个缓冲时间, 基于此, 根据文献[9,11]提出交直流混合微电网母线接口变换器 VSG 控制策略, 控制框图如图 3 所示。该控制框图主要包含三部分: 有功-电压控制、有功-频率控制、无功-电压控制。

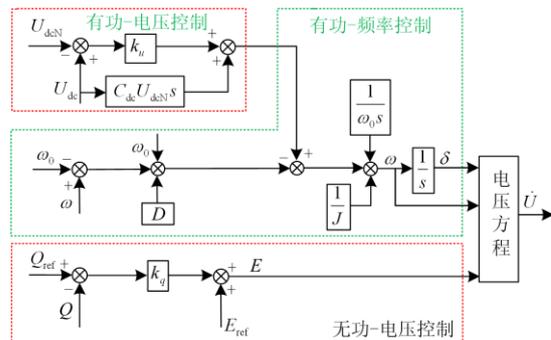


图 3 混合微电网接口变换器的 VSG 控制

Fig. 3 VSG control of hybrid microgrid interlinking converter

有功-频率控制满足式(3)。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为 VSG 的虚拟角频率;  $\omega_0$  为额定角频率;  $J$  为虚拟惯量;  $D$  为阻尼系数;  $P_m$ 、 $P_e$  分别为机械功率和电磁功率。

有功-电压控制满足式(4)。

$$\Delta P_2 \approx k_u (u_{dc} - U_{dcN}) + C_{dc} U_{dcN} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (4)$$

式中:  $u_{dc}$ 、 $U_{dcN}$  分别为直流母线实际电压与额定电压;  $C_{dc}$  为直流侧电容;  $k_u$  为直线下垂系数;  $\Delta P_2$  为直流微电网中的有功功率变化。

无功-电压控制满足式(5)。

$$E = E_{ref} + k_q (Q_{ref} - Q) \quad (5)$$

式中:  $E$  为虚拟电势有效值;  $E_{ref}$  为空载电势有效值;  $k_q$  为无功-电压下垂系数;  $Q_{ref}$  为 VSG 的输入无功功率;  $Q$  为 VSG 的输出无功功率。

混合微电网的交、直流侧通过单个接口变换器连接, 整个系统瞬时有功功率变化量相同, 即

$$\Delta P_2 = \Delta P_e \quad (6)$$

式中,  $\Delta P_e$  为交流微电网的有功变化量, 其中  $\Delta P_e = P_m - P_e$ 。

最终给出混合微网接口变换器的拓扑和控制策略图, 如图 4 所示。

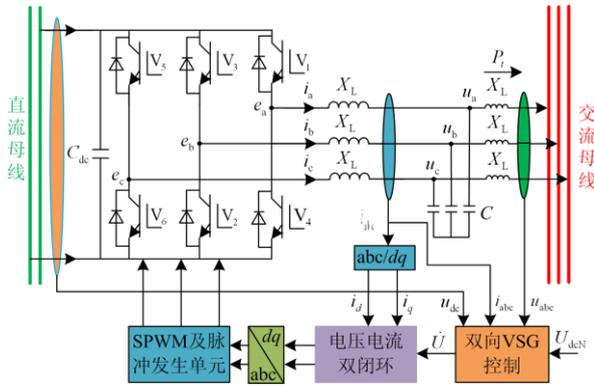


图 4 混合微网接口变换器的拓扑和控制策略图

Fig. 4 Topology and control strategy of hybrid microgrid interlinking converter

为了更加精确地模拟传统的同步发电机特性, 在 VSG 频率控制环节加入了原动机的调节方程。

$$P_m = P_{ref} - K_\omega (\omega - \omega_0) \quad (7)$$

式中:  $P_{ref}$  为给定有功;  $K_\omega$  为调差系数。

通过在逆变器控制算法中引入式(3)、式(7), 使

逆变器更准确地模拟同步发电机外特性。联立式(3)、式(7)可得式(8)。

$$\frac{\omega - \omega_0}{P_{ref} - P} = \frac{1}{J\omega_0 s + D\omega_0 + K_\omega} = -\frac{m_p}{\tau s + 1} \quad (8)$$

式中:  $\tau$  为惯性时间常数;  $m_p$  为有功-频率下垂系数;  $P$  为输出的有功功率。

一般来说, 对于某一个确定的同步发电机来说, 虚拟惯量和阻尼系数是不变的。但对于 VSG 来说, 阻尼系数和虚拟惯量可以根据实际需求进行动态调节, 但其调节程度并不是没有限制, 而是要控制在一定的范围<sup>[18]</sup>, 若能在有效的参数范围内对系统进行调节, 则暂态的响应过程可以被优化。

## 2 参数自适应 VSG 控制策略

### 2.1 虚拟惯量 $J$ 和阻尼系数 $D$ 对 VSG 特性的影响

#### 2.1.1 系统的虚拟惯量 $J$ 和阻尼系数 $D$ 对母线接口的传输有功功率 $P$ 的影响

二阶模型自然振荡角频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\zeta$  分别为<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{EU}{J\omega_0 Z}} \\ \zeta = 0.5D\sqrt{\frac{\omega_0 Z}{JEU}} + 0.5K_\omega\sqrt{\frac{Z}{JEU\omega_0}} \end{cases} \quad (9)$$

若取  $0 < \zeta < 1$ , 误差为  $\pm 2\%$ , 则二阶系统对应的超调量  $\sigma$  和调节时间  $t_s$  分别为

$$\begin{cases} \sigma = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \\ t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知, 二阶系统动态性能由虚拟惯量  $J$ 、阻尼系数  $D$  共同决定。当虚拟惯量  $J$  恒定时, 阻尼系数  $D$  越大, 阻尼比  $\zeta$  越大, 超调量  $\sigma$  越小, 调节时间  $t_s$  越短; 当阻尼系数  $D$  恒定时, 虚拟惯量  $J$  越大, 阻尼比  $\zeta$  越小, 超调量  $\sigma$  越大, 调节时间  $t_s$  越长。结论: 系统的虚拟惯量  $J$  与阻尼系数  $D$  共同决定虚拟同步发电机输出有功功率在暂态过程中的超调量。

#### 2.1.2 虚拟惯量 $J$ 和阻尼系数 $D$ 对频率 $f$ 输出特性的影响

化简式(8)得

$$\Delta P = (J\omega_0 s + D\omega_0 + K_\omega) \Delta\omega \quad (11)$$

由式(11)可以得出如下结论:  $\Delta P$ 、 $J$  和  $K_\omega$  恒定时, 那么阻尼系数  $D$  越大, 角频率偏差  $\Delta\omega$  越小; 当将  $\Delta\omega$  近似为  $d\omega/dt$ ,  $\Delta P$ 、 $D$  和  $K_\omega$  恒定时, 那么随着虚拟惯量  $J$  变大, 角速度变化率  $d\omega/dt$  就越小,

由于  $\omega = 2\pi f$ ，所以角速度变化率  $d\omega/dt$  与频率变化率  $df/dt$  变化趋势一致。因此，要想让系统的频率具有良好的稳定性，可以调整其影响因素：虚拟惯量  $J$  和阻尼系数  $D$ 。

### 2.2 暂态过程分析

为了更好地理解参数自适应虚拟同步发电机控制策略，需要对系统暂态过程进行详细分析，根据暂态过程中的频率与功率的变化，判断虚拟惯量与阻尼系数的变化规律。

由于虚拟同步发电机与同步发电机具有类似的功角曲线、频率振荡曲线<sup>[11]</sup>，如图 5 所示。故可以将同步发电机的曲线作为虚拟同步发电机的曲线，进而进行暂态过程分析。

在分析系统的暂态过程中，可以假定系统的虚拟惯量与阻尼系数均为恒定值，将一个暂态过程分为四个具有代表性的区间：①  $t_1-t_2$ ；②  $t_2-t_3$ ；③  $t_3-t_4$ ；④  $t_4-t_5$ 。阶段①中  $\omega > \omega_0$  且  $d\omega/dt > 0$ ，阶段③中  $\omega < \omega_0$  且  $d\omega/dt < 0$ ，并且在阶段①、③下的  $|\omega - \omega_0|$  的值均逐渐变大，会导致转子偏移量的增加，为了降低转子偏移量的增加，可以采取增加虚拟惯量的措施。阶段②中  $\omega > \omega_0$  且  $d\omega/dt < 0$ ，阶段④中  $\omega < \omega_0$  且  $d\omega/dt > 0$ ，并且在阶段②、④下的  $|\omega - \omega_0|$  的值均逐渐变小，会导致转子角速度很难在短时间内恢复到稳态值，为了让转子角速度快速恢复到稳态值，可以采取减小虚拟惯量的措施。

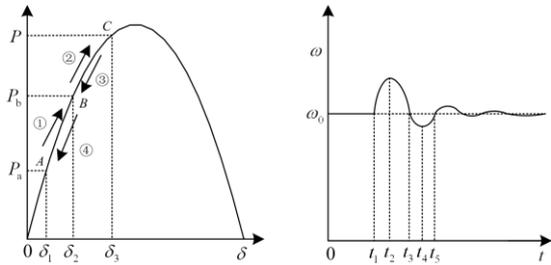


图 5 同步发电机功角和频率振荡曲线

Fig. 5 Power angle and frequency oscillation curve of synchronous generator

由上述理论分析可以得出：当  $\Delta\omega(d\omega/dt)$  的值大于 0 时，需要增加虚拟惯量，增加虚拟惯量会使系统的抗干扰能力增强，但是会牺牲一定的响应速度，为了解决这个问题，在增加虚拟惯量  $J$  的同时减少阻尼系数  $D$ ；当  $\Delta\omega(d\omega/dt)$  的值小于 0 时，减小虚拟惯量，减小虚拟惯量会使转子角速度快速恢复到稳态值，为了更快地恢复到稳态值，可以在减小虚拟惯量  $J$  的同时增大阻尼系数  $D$ 。

### 2.3 参数自适应控制

通过暂态过程分析可知：每一个暂态过程中虚

拟惯量与阻尼系数都是紧密联系、密不可分的。如果能将二者协同起来，会使系统的暂态性能大幅度提升。因此利用虚拟惯量和阻尼系数与系统中频率偏移的关系，建立了参数自适应控制策略，满足式 (12) 和式 (13)。

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta\omega \cdot (d\omega/dt) \leq 0 \cup \frac{|d\omega/dt|}{2\pi} \leq T_J \\ J_0 + K_J |\omega - \omega_0| & \Delta\omega \cdot (d\omega/dt) > 0 \cap \frac{|d\omega/dt|}{2\pi} > T_J \end{cases} \quad (12)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & \frac{|\Delta\omega|}{2\pi} \leq T_D \\ K_D (J_0 - K_J |\omega - \omega_0|) & \frac{|\Delta\omega|}{2\pi} > T_D \end{cases} \quad (13)$$

式中： $J_0$ 、 $D_0$  为虚拟同步发电机稳定运行时的虚拟惯量值、阻尼系数值，其值的设定参考文献[21]； $K_J$  为虚拟惯量的调节系数，该系数与  $\Delta\omega(d\omega/dt)$  正负相同，即  $\Delta\omega(d\omega/dt)$  仅仅决定  $K_J$  的正负，但与具体数值大小无关； $K_D$  为阻尼-惯性比， $|K_D| = |D_0/J_0|$ ； $T_J$ 、 $T_D$  分别为频率变化率阈值和频差阈值，其值的设定参考文献[11]。

虚拟惯量参数自适应理论控制图如图 6 所示，阻尼系数参数自适应理论控制图如图 7 所示，总体流程图如图 8 所示。

当交直流混合微电网系统中负荷突增或者突减时，交流母线的角频率  $\omega$  会发生变化，将角频率  $\omega$  作为虚拟惯量自适应理论控制的输入量，接着会产

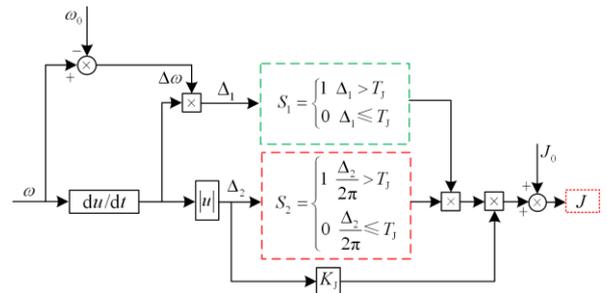


图 6 虚拟惯量自适应理论控制图

Fig. 6 Theoretical control chart of adaptive moment of inertia

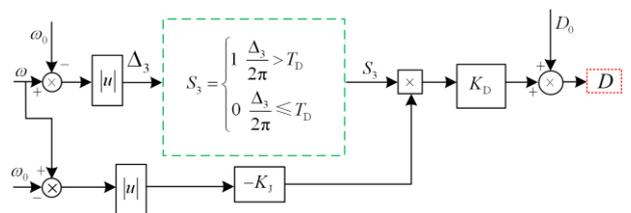


图 7 阻尼系数自适应理论控制图

Fig. 7 Theoretical control chart of adaptive damping coefficient

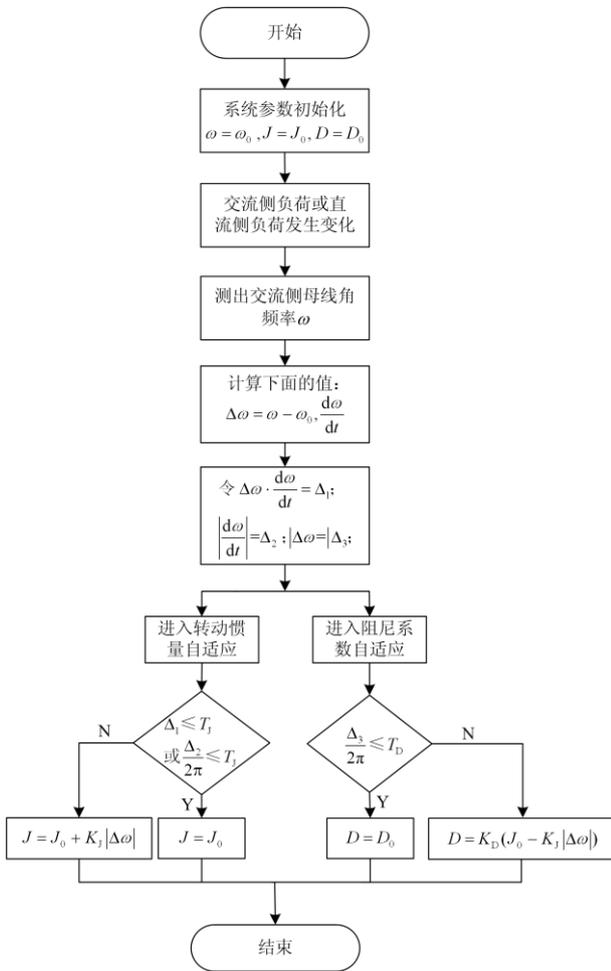


图 8 参数自适应控制流程图

Fig. 8 Flow chart of parameter adaptive control

生 2 个判断量, 分别为  $(\omega - \omega_0)d\omega/dt = \Delta_1$ 、 $|d\omega/dt| = \Delta_2$ 。如果  $\Delta_1$  的值小于频率变化率阈值  $T_I$ , 系统不会进行自适应过程, 此时输出  $J = J_0$ ; 如果  $\Delta_2/2\pi$  的值小于频率变化率阈值  $T_I$ , 系统也不会进行自适应过程, 同样会输出  $J = J_0$ 。如果上述两种情况均不满足, 那么系统会进行虚拟惯量自适应过程, 即输出值满足  $J = J_0 + K_J |\omega - \omega_0|$ , 与此同时, 交流母线的角频率  $\omega$  也会作为阻尼系数自适应控制的输入量, 产生一个判断量, 即  $|\omega - \omega_0| = \Delta_3$ 。如果  $\Delta_3/2\pi$  的值小于频差阈值  $T_D$ , 那么系统不会进行自适应过程, 此时输出  $D = D_0$ ; 如果  $\Delta_3/2\pi$  的值大于频差阈值  $T_D$ , 那么系统会进行自适应过程, 输出值满足  $D = K_D (J_0 - K_J |\omega - \omega_0|)$ 。

交直流混合微电网系统按照上述的参数自适应过程进行参数选择, 理论上会使系统中频率以及传输功率得到两方面的优化。其一: 频率和传输功

率的超调量得到较好的控制; 其二: 频率和传输功率的暂态过程会有所缩减, 仿真分析部分会对两方面进行验证。

## 2.4 直流侧电容对直流母线电压的影响

在交直流混合微电网运行过程中, 直流侧往往会并联直流电容, 直流电容的充放电功率为<sup>[22]</sup>

$$P_C = C_{dc} U_{dcN} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (14)$$

式中:  $P_C$  为电容的充放电功率;  $U_{dcN}$  为直流母线额定电压;  $C_{dc}$  为直流侧电容。

由式(14)可知, 为了减小直流母线电压变化率  $du_{dc}/dt$ , 需要增加直流侧电容  $C_{dc}$  的值, 增加直流侧  $C_{dc}$  的值, 直流侧微网的惯性时间常数  $H$  会增加, 直流侧微网的惯性时间常数如式(15)所示<sup>[23]</sup>。

$$H = \frac{\frac{1}{2} C_{dc} U_{dcN}^2}{S_{NC}} \quad (15)$$

式中:  $C_{dc}$  为并联电容值;  $S_{NC}$  为电容的容量。

考虑到微网的实际情况, 电容取值为  $1\,500\ \mu\text{F}$ , 既满足了系统的经济性又满足了系统的稳定性, 图 9 给出了直流母线电压随电容变化的仿真波形图。

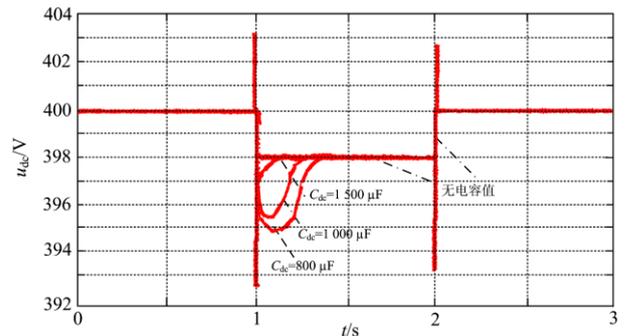

 图 9  $C_{dc}$  变化仿真波形

 Fig. 9 Simulation results of  $C_{dc}$  change

## 3 仿真分析

交直流混合微电网的接口变换器主要有 3 种工作模式, 分别为逆变模式、整流模式、不动作。当交流侧负载大于直流侧负载时, 接口变换器处于逆变模式, 传输功率  $P_T > 0$ ; 当交流侧负载小于直流侧负载时, 接口变换器处于整流模式, 传输功率  $P_T < 0$ ; 当交直流侧均工作在轻载或重载状态时,  $P_T = 0$ 。本文主要研究孤岛模式下的仿真, 其初始运行状态为交、直流侧工作在轻载状态,  $P_T = 0$ , 仿真时长为 3 s。仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真主要参数

Table 1 Main parameters of simulation

参数	数值
有功功率参考值 $P_{ref}/kW$	10
无功功率参考值 $Q_{ref}/var$	0
直流电压额定值 $U_{dc,N}/V$	400
交流相电压额定值 $u_{ac,N}/V$	110
交流频率额定值 $f_N/Hz$	50
直线下垂系数 $k_w/(kW/V)$	1 000
无功下垂系数 $k_q/(var/V)$	0.01
调差系数 $K_\omega$	0
直流电容 $C_{dc}/\mu F$	1 500
频率变化阈值 $T_f/Hz$	0.1
频差阈值 $T_D/(Hz/s)$	0.15
虚拟惯量 $J_0/(kg \cdot m^2)$	0.2
阻尼系数 $D_0/(N \cdot m \cdot s/rad)$	2
虚拟惯量的调节系数 $K_I$	0.15
阻尼-惯性比 $K_D$	10

### 3.1 逆变模式

$t=1\text{ s}$  交流侧负荷增加 3 kW;  $t=2\text{ s}$  交流侧负荷减少 3 kW。图 10—图 12 分别为采用 VSG 控制和参数自适应 VSG 控制时,接口变换器交流频率  $f$ 、正向传输功率  $P_f$  和直流电压  $u_{dc}$  的仿真结果。

由图 10 可以看出:当交流侧负荷突增时,若选用传统的 VSG 控制策略,其频率振荡的幅值约为 0.37 Hz,要达到新的稳态,暂态过程时间约为 0.2 s;

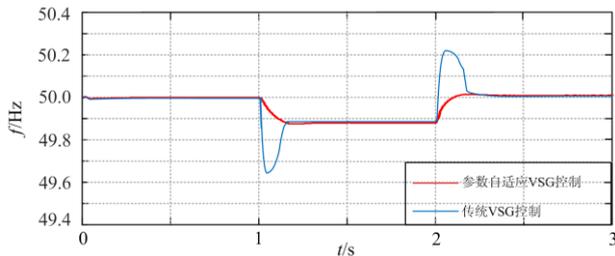


图 10 交流母线频率  
Fig. 10 AC bus frequency

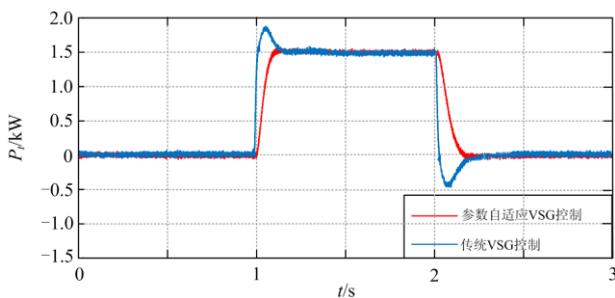


图 11 接口变换器传输功率  
Fig. 11 Transmission power of interlinking converter

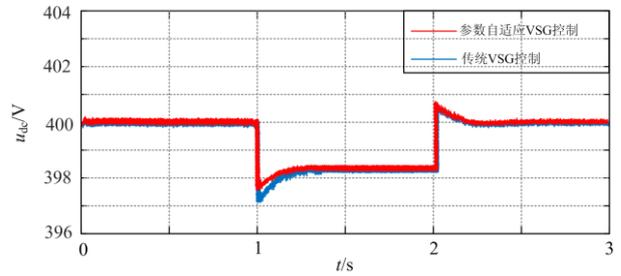


图12 直流母线电压  
Fig. 12 DC bus voltage

采用参数自适应 VSG 控制策略时,不仅频率振荡的幅值被很好地限制在 0.2 Hz 以内,而且能够比较平滑地过渡到新的稳态,且暂态过程持续约 0.2 s;而当交流侧负荷突减时,若采用 VSG 控制方法,其频率振荡的幅值约 0.21 Hz,要达到新的稳态,暂态过程时间约为 0.2 s;采用参数自适应 VSG 控制策略时,频率几乎毫无振荡地较为平滑地过渡到稳态,且暂态过程持续约 0.2 s。

由图 11 可以看出:当交流侧负荷突增时,若采用 VSG 控制方法,VSG 输出的有功功率的超调量约为 27%;当采用参数自适应 VSG 控制方法,超调量几乎为 0,且有功功率能够较为平滑地过渡至新的稳态。

由图 12 可以看出:采用 VSG 控制策略与参数自适应 VSG 控制策略,定值的电容均为直流侧电压提供了一定的惯性且效果几乎相同,波动在允许的范围。

由图 10—图 12 可知,微电网处于逆变模式下,两种方法最终所达到的稳态基本一致,说明了改进后的方法并没有对系统稳定值造成影响。

### 3.2 整流模式

$t=1\text{ s}$  时,直流侧负荷增加 3 kW;  $t=2\text{ s}$  时,直流侧负荷减少了 3 kW。图 13—图 15 分别为采用 VSG 控制和参数自适应 VSG 控制时,接口变换器的交流频率  $f$ 、反向传输功率  $P_r$ 、直流母线电压  $u_{dc}$  的仿真波形。

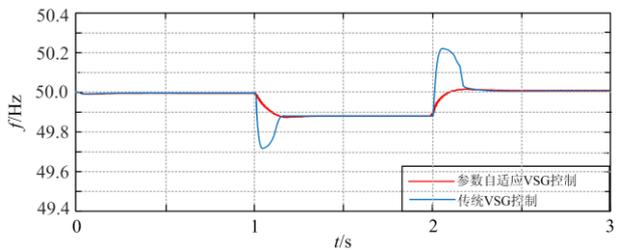


图 13 交流母线频率  
Fig. 13 AC bus frequency

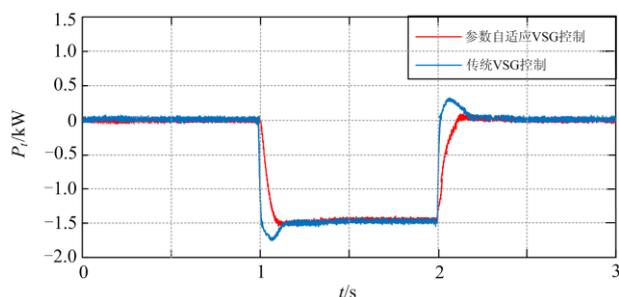


图 14 接口变换器传输功率

Fig. 14 Transmission power of interlinking converter

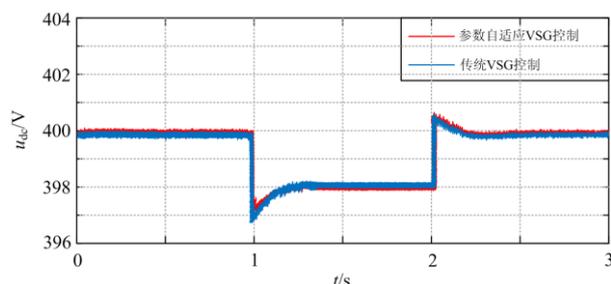


图 15 直流母线电压

Fig. 15 DC bus voltage

由图 13 可以看出: 当直流侧负荷突然增加时, 若采用 VSG 控制方法, 其频率振荡的幅值约 0.29 Hz, 要达到新的稳态, 暂态过程时间约为 0.2 s; 当参数自适应 VSG 控制策略被应用在系统中时, 不仅频率能被很好地限制在 0.2 Hz 以内, 而且能够比较平滑的过渡到新的稳态, 且暂态过程持续约 0.2 s; 而当直流负荷突减时, 若采用 VSG 控制方法, 其频率振荡的幅值约 0.22 Hz, 要达到新的稳态, 暂态过程时间约为 0.2 s; 当参数自适应 VSG 控制策略被应用在系统中时, 频率几乎毫无振荡地较为平滑地过渡到稳态, 且暂态过程持续约 0.2 s。

由图 14 可以看出: 当直流侧负荷突然增加时, 若采用 VSG 控制方法, VSG 输出的有功功率的超调量约为 17%; 采用参数自适应 VSG 控制方法, 超调量几乎为 0, 且有功功率能够平滑地过渡至新的稳态。

由图 15 可以看出, 采用 VSG 控制策略与参数自适应 VSG 控制策略, 定值的电容均为直流侧电压提供了一定的惯性且效果几乎相同, 波动在允许的范围。

由图 13—图 15 可知, 混合微网处于整流模式下, 两种方法最终所达到的稳态基本一致, 说明了改进后的方法并没有对系统稳定值造成影响。

### 3.3 模式切换

$t = 1$  s 时, 交流侧负荷增加 1.5 kW;  $t = 20$  s 时, 直流负荷增加了 3 kW。图 16—图 18 分别为采用 VSG 控制和参数自适应 VSG 控制时, 接口变换器的交流频率  $f$ 、双向传输功率  $P_t$ 、直流母线电压  $u_{dc}$  的仿真波形。

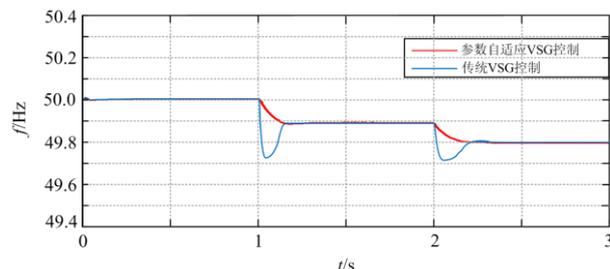


图 16 交流母线频率

Fig. 16 AC bus frequency

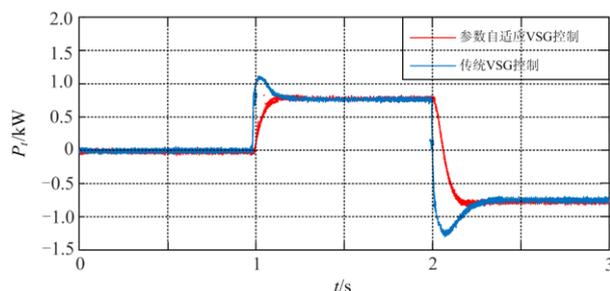


图 17 接口变换器传输功率

Fig. 17 Transmission power of interlinking converter

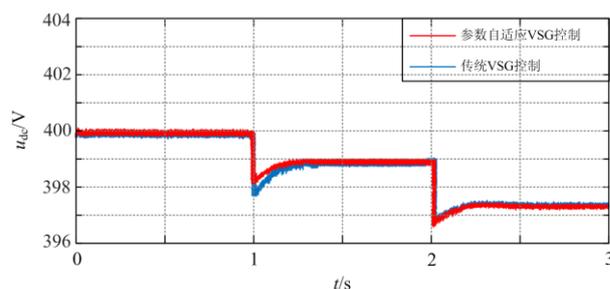


图 18 直流母线电压

Fig. 18 DC bus voltage

由图 16 可以看出, 当交流侧负荷突然增加时, 若采用 VSG 控制方法, 其频率振荡的幅值约 0.28 Hz, 要达到新的稳态, 暂态过程时间约为 0.2 s; 当参数自适应 VSG 控制策略被应用在系统中时, 不仅频率能被很好地限制在 0.2 Hz 以内, 而且能够比较平滑地过渡到新的稳态, 且暂态过程持续约 0.2 s; 而当直流侧负荷突增时, 若采用 VSG 控制方法, 其频率振荡的幅值约 0.3 Hz, 要达到新的稳态, 暂态

过程时间约为 0.2 s；当参数自适应 VSG 控制策略被应用在系统中时，频率几乎毫无振荡地较为平滑地过渡到稳态，且暂态过程持续约 0.2 s。

由图 17 可以看出，当交流侧负荷突然增加时，若采用 VSG 控制方法，VSG 输出的有功功率的超调量约为 53%；当采用参数自适应 VSG 控制方法，超调量几乎为 0，且有功功率能够平滑地过渡至新的稳态。

由图 18 可以看出，采用 VSG 控制策略与参数自适应 VSG 控制策略，定值的电容均为直流侧电压提供了一定的惯性且效果几乎相同，波动在允许的范围。

综上所述，采用参数自适应 VSG 控制策略在解决频率超调量和暂态过程时间冲突问题以及传输功率的超调量等问题方面更具有优越性。同时，模式切换下，两种方法最终所达到的稳态值基本一致，再次说明了改进后的方法并没有对系统稳定性造成影响。

为了说明参数自适应 VSG 控制理论的有效性，图 19—图 20、图 21—图 22 与图 23—图 24 分别给出了交直流混合微电网系统处于逆变模式、整流模式、模式切换下的虚拟惯量与阻尼系数的变化情况。

情况 1：逆变模式

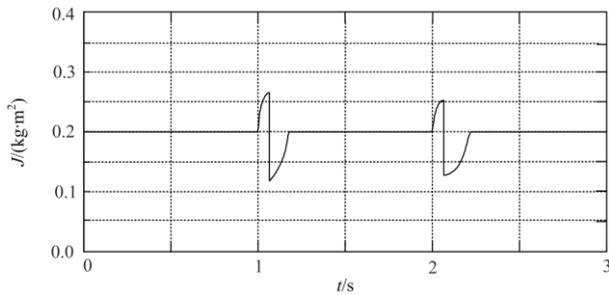


图 19 虚拟惯量的变化情况  
Fig. 19 Variation of moment inertia

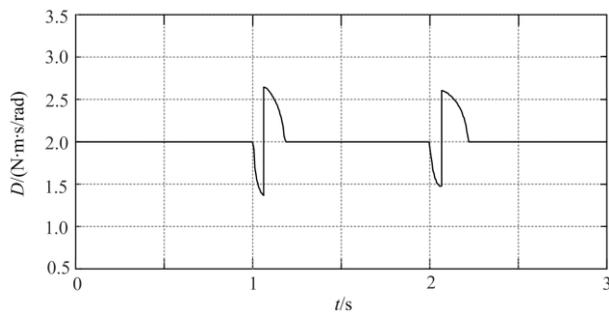


图 20 阻尼系数的变化情况  
Fig. 20 Variation of damping coefficient

情况 2：整流模式

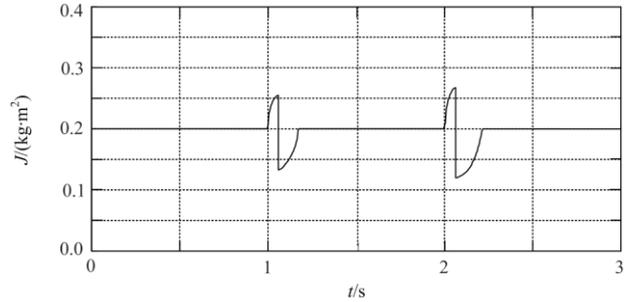


图 21 虚拟惯量的变化情况  
Fig. 21 Variation of moment inertia

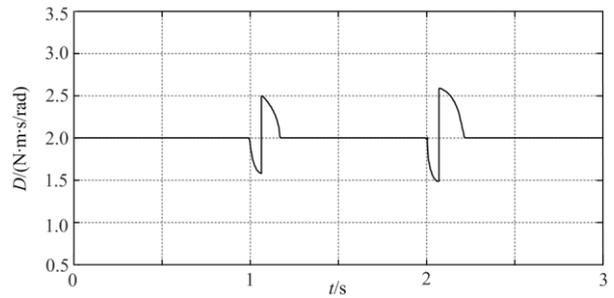


图 22 阻尼系数的变化情况  
Fig. 22 Variation of damping coefficient

情况 3：模式切换

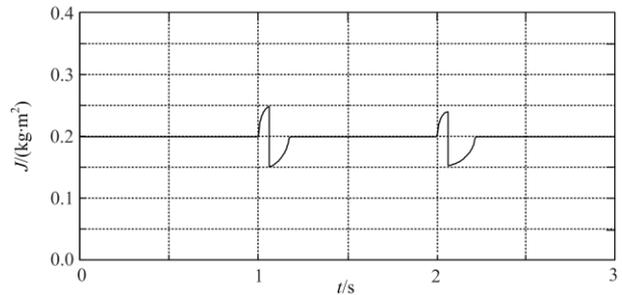


图 23 虚拟惯量的变化情况  
Fig. 23 Variation of moment inertia

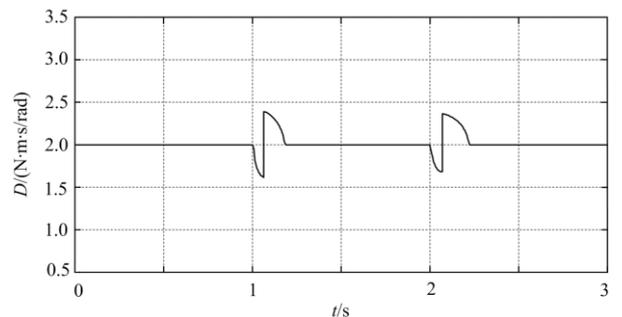


图 24 阻尼系数的变化情况  
Fig. 24 Variation of damping coefficient

由图 10、图 11 可知, 交流侧负荷突然增加, 会出现 2 个阶段。阶段①: 交流母线的  $\omega < \omega_0$  且  $d\omega/dt < 0$ , 由图像可以观察到  $|\omega - \omega_0|$  逐渐变大, 会导致在系统的频率和传输功率的超调量增大的同时, 暂态过程时间变长, 应该在增大虚拟惯量  $J$  的同时减少阻尼系数  $D$  来改善超调量和暂态过程时间。阶段②: 交流母线的  $\omega < \omega_0$  且  $d\omega/dt > 0$ , 由图像可以观察到  $|\omega - \omega_0|$  逐渐减小, 使频率和功率尽快恢复到稳定值, 应该在减小虚拟惯量  $J$  的同时增大阻尼系数  $D$ 。

交流侧负荷突然减少, 同样会产生 2 个阶段。

阶段①:  $\omega > \omega_0$  且  $d\omega/dt > 0$ , 由图像可以观察到  $|\omega - \omega_0|$  逐渐减小, 会导致在系统的频率和传输功率的超调量增大的同时, 暂态过程时间变长, 应该在增大虚拟惯量  $J$  的同时减少阻尼系数  $D$  来改善超调量和暂态过程时间。阶段②:  $\omega > \omega_0$  且  $d\omega/dt < 0$ , 由图像可以观察到  $|\omega - \omega_0|$  逐渐减小, 使频率和功率尽快恢复到稳定值, 应该在减小虚拟惯量  $J$  的同时增大阻尼系数  $D$ 。

由以上分析结果得出: 逆变过程的虚拟惯量与阻尼系数的自适应过程与图 19、图 20 基本吻合。

同理可以得出: 整流过程的虚拟惯量与阻尼系数的自适应过程与图 21、图 22 基本吻合; 模式切换过程的虚拟惯量与阻尼系数的自适应过程与图 23、图 24 基本吻合, 说明了参数自适应控制的有效性。

## 4 结论

交直流混合微电网中电源的出力是随系统负荷的需要变化的, 出力的不同可能会导致系统的频率、传输有功功率的暂态过程过长, 甚至超调量超出安全阈值, 给微电网的安全稳定运行带来巨大挑战。为了解决上述问题, 本文提出参数自适应 VSG 控制策略。无论微电网处于单一的整流模式、单一的逆变模式以及复杂的切换模式, 都会得出同样的结论:

(1) 参数自适应 VSG 控制策略能对系统频率和传输有功功率的超调量进行良好改善, 提高了系统的安全性。

(2) 参数自适应 VSG 控制策略能解决系统频率的超调量与暂态过程时间的矛盾, 即相同的暂态时间, 自适应 VSG 控制策略超调更小, 提高了系统的暂态稳定性。

(3) 参数自适应 VSG 控制策略采用定值的电容对直流母线的改善效果不明显, 有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] QI C, WANG K, FU Y, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 9(6): 6095-6105.
- [2] 焦皎, 孟润泉, 任春光, 等. 交直流微电网 AC/DC 双向功率变换器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 84-92.  
JIAO Jiao, MENG Runquan, REN Chunguang, et al. Bidirectional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 85-92.
- [3] 施静容, 李勇, 贺隹, 等. 一种提升交直流混合微电网动态特性的综合惯量控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 337-345.  
SHI Jingrong, LI Yong, HE Li, et al. A comprehensive inertia control method for improving the dynamic characteristics of hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 337-345.
- [4] 张国荣, 丁晓通, 彭勃, 等. 交直流混合微电网互联变流器改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 46(14): 50-58.  
ZHANG Guorong, DING Xiaotong, PENG Bo, et al. Improved control strategy for an AC/DC hybrid microgrid interlinking converter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 46(14): 50-58.
- [5] SAU-BASSOLS J, ZHAO Q, GARCIA-GONZALEZ J, et al. Optimal power flow operation of an interline current flow controller in a hybrid AC/DC meshed grid[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 177(12): 1-9.
- [6] DING Guangqian, GAO Feng, ZHANG Song, et al. Control of hybrid AC/DC microgrid under islanding operational conditions[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(3): 223-232.
- [7] PEYGHAMI S, MOKHAARI H, BLAABJERG F. Autonomous operation of a hybrid AC/DC microgrid with multiple interlinking converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6480-6488.
- [8] LOH P C, LI Ding, CHAI Yikang, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [9] 李峰, 秦文萍, 任春光, 等. 混合微电网交直流母线接口变换器虚拟同步电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3776-3787.  
LI Feng, QIN Wenping, REN Chunguang, et al. Virtual synchronous motor control strategy for interfacing

- converter in hybrid AC/DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3776-3787.
- [10] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.  
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [11] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731.  
CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.
- [12] 田雨青, 郑天文, 陈来军, 等. 基于自适应调节的虚拟同步发电机频率控制[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 76-79.  
TIAN Yuqing, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. The frequency control of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 76-79.
- [13] 殷桂梁, 董浩, 代亚超, 等. 光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 192-199.  
YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 192-199.
- [14] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.  
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [15] NEJABATKHAH F, LI Yunwei. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [16] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [17] 刘尧, 林超, 陈滔, 等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率-电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 16-21, 133.  
LIU Yao, LIN Chao, CHEN Tao, et al. Reactive power-voltage control strategy of AC microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 16-21, 133.
- [18] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.  
MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [19] SHI M, CHEN X, ZHOU J, et al. Advanced secondary voltage recovery control for multiple HESSs in a droop-controlled DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3828-3839.
- [20] LIN Y, XIAO W. Novel piecewise linear formation of droop strategy for DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6747-6755.
- [21] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [22] 李生虎, 鲍正杰, 董王朝, 等. 基于直流电容充放电双阈值判据的 VSC-HVDC 区域电网频率控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(3): 26-32.  
LI Shenghu, BAO Zhengjie, DONG Wangzhao, et al. Research on regional power system Frequency control based on dual-threshold criterion of DC capacitor charging and discharging[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(3): 26-32.
- [23] 朱晓荣, 蔡杰, 王毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49-58.  
ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58.

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-11-25

作者简介:

张良(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为V2G信息交互、多能源互联网优化控制、配电网信息系统; E-mail: xiaozhanghit@163.com

范广胜(1991—), 男, 硕士, 研究方向为交直流混合电网控制策略。E-mail: 5995187@qq.com

(编辑 魏小丽)