

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240397

孤岛模式下交直流混合微电网互联变流器新型控制策略

李忠文^{1,2}, 李沛阳^{1,2}, 程志平¹, 王义^{1,2}, 随权¹

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039)

摘要: 孤岛模式下交直流混合微电网可以通过互联变流器(interlinking converter, IC)实现交流微电网和直流微电网的功率互济。针对孤岛模式下 IC 采用传统下垂控制和基于比例积分(proportional-integral, PI)的电流控制方案存在惯性小、动态性能差的问题, 提出了基于虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的新型控制策略。首先, 在传统下垂控制的基础上, 通过引入交流频率和直流电压的微分量, 提出了改进的 VSG 控制方法, 以提升系统的电压和频率稳定性。然后, 在 IC 的电流环, 提出了固定时间滑模控制(sliding mode control, SMC)方法, 提高了系统的动态性能。接着, 在交流微电网和直流微电网中引入了功率二次控制, 实现了系统电压和频率恢复。最后, 基于远宽 StarSim 硬件在环实时仿真平台搭建的交直流混合微电网模型, 验证了所提新型控制策略可以实现交直流微电网子系统间功率互济, 提升了系统的惯性和动态控制性能。

关键词: 交直流混合微电网; 互联变流器; 功率互济; 虚拟同步机控制; 滑模控制; 二次控制

A novel control strategy for an interlinking converter in an islanded hybrid AC/DC microgrid

LI Zhongwen^{1,2}, LI Peiyang^{1,2}, CHENG Zhiping¹, WANG Yi^{1,2}, SUI Quan¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. National Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China)

Abstract: In islanded mode, an AC/DC hybrid microgrid can realize power mutual support between the AC microgrid and the DC microgrid through an interlinking converter (IC). There is a problem in that the IC adopting the traditional droop control and the current control method based on proportional-integral (PI) has small inertia and poor dynamic performance in the islanded mode. Thus a novel control strategy based on a virtual synchronous generator (VSG) is proposed. First, based on traditional droop control, the improved VSG control method is proposed by introducing the difference of AC frequency and DC voltage to improve the stability of the system voltage and frequency. Then, in the current loop of the IC, fixed time sliding mode control (SMC) is proposed to improve the dynamic performance of the system. Next, power secondary control is introduced into the AC and DC microgrids to realize system voltage and frequency recovery. Finally, an AC/DC hybrid microgrid model built on the StarSim hardware-in-the-loop real-time simulation platform verifies that the proposed novel control strategy can realize power mutual support between AC/DC microgrid subsystems, improving system inertia and dynamic control performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62273312).

Key words: AC/DC hybrid microgrid; interlinking converter; power mutual support; virtual synchronous generator control; sliding mode control; secondary control

0 引言

直流微电网具有电能转化率高、成本低、可靠

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62273312); 河南省优秀青年科学基金(232300421094); 中国博士后科学基金面上资助(2022M712879); 郑州大学博士后科学基金(22120016)

性高的优点, 成为未来微电网发展的趋势^[1-2], 而传统的交流微电网发展已经比较健全, 直流微电网与交流微电网在未来一段时间内将长期共存。这时, 交直流混合微电网得到了越来越多的关注, 融合了交流微电网和直流微电网各自的优点, 由于其更高的灵活性、可靠性和低损耗已成为微电网的发展趋势和研究热点之一^[3-5]。交直流混合微电网同时包括

交流负荷、交流电源、直流负荷、直流电源以及互联变流器(interlinking converter, IC)。交直流混合微电网中 IC 对维持系统稳定、可靠、经济运行起到重要作用。交直流混合微电网中的 IC 最主要的功能就是当一侧功率不足时, 需要另一侧基于自身状况提供功率支撑^[6], 从而通过功率互济提高系统运行稳定性与经济性。

由于交直流混合微电网复杂的结构, 单一的控制策略往往无法满足控制需求, 因此需要更加复杂的控制策略, 故交直流混合微电网的控制策略可以采用分层控制^[7]。分层控制一般包括一次控制、二次控制和三次控制^[8]。一次控制通常采用下垂控制, 用于交流微电网和直流微电网对频率和电压进行调节; 二次控制的目的是实现交流微电网频率和直流微电网电压的恢复; 三次控制的目标是实现微电网的经济运行。IC 作为连接交流微电网和直流微电网的桥梁, 选择合适的控制策略对实现两侧功率平衡以及交直流混合微电网的稳定运行具有重要意义。IC 的功率控制策略通常包括固定功率控制、直流侧或交流侧单向支撑控制、交直流双向功率支撑控制。双向支撑控制可以灵活地满足不同负载的电力需求和增强系统的稳定性。为了通过 IC 实现交直流混合微电网双向功率支撑, 文献[9]针对低压交直流混合微电网, 根据交直流两侧的电压信息得出 IC 需要传输的功率, 文献[10]考虑线路补偿压降, 在没有互联通信的情况下实现交流微电网和直流微电网功率的准确传输。文献[11-12]提出基于下垂控制的 IC 的控制策略, 但下垂控制并不能为微电网提供惯性支持, 故而有较差的动态性能, 并且低惯性会使电力系统稳定性变差^[13], 尤其是孤岛微电网的电压和频率面临着失稳的风险^[14]。为了引入惯性支撑, 文献[15-18]提出基于频率变化率和电压变化率的 IC 的功率控制方法^[15,17]和虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略^[16,18], 以提升交流频率和直流电压的稳定性。文献[19]通过在下垂系数中引入交流微电网频率的倍数和直流微电网电压的倍数的微分量, 增加系统惯性, 提高系统动态性能。

然而, 上述控制方案中, 电流控制环仍采用比例积分(proportional-integral, PI)控制策略, 难以进一步提高系统控制性能, 文献[20-21]所研究的对象分别为直流微电网和并网支撑型逆变器, 其电流环均采用滑模控制(sliding-mode control, SMC), 相较于 PI 控制, 系统性能得到了改善。文献[22]针对机器人轨迹跟踪问题, 提出了固定时间 SMC, 通过李亚普诺夫理论证明了系统跟踪误差能在固定时间内变

为零, 具有良好的动态性能。文献[23]提出了一种直流侧母线电压分数阶滑模控制, 与传统 PI 控制相比, 所提控制策略使得响应速度得到提升。因此本文在电流控制环中引入固定时间 SMC, 与 PI 控制方法相比, 其动态性能更优。

针对交直流混合微电网子系统, 文献[24]采用考虑双边子网惯量约束的 IC 的动态功率控制方法, 引入了电压和频率的变化率控制, 从而提升微电网的动态性能, 文献[25]提出了综合惯性控制策略来提升微电网的惯性, 从而提升系统稳定性。但上述文献都仅考虑一次控制, 尽管改善了系统的动态性能, 但仍然存在稳态电压和频率偏差的问题, 无法恢复到标称值, 因此本文引入了二次控制, 实现了交流微电网频率和直流微电网电压的恢复。

本文提出了一种新型的 IC 控制策略, 通过引入交流微电网频率和直流微电网电压的微分量, 使系统惯性得以动态增加, 系统超调降低, 提高了系统的动态性能, 增强了微电网系统的动态稳定性。在电流控制回路, 本文提出了一种基于固定时间 SMC 方法, 具有鲁棒性和快速响应的优点, 同时跟踪误差能在固定时间内变为零, 具有较好的动态性能。交流微电网和直流微电网在原有下垂控制的基础上增加了二次控制, 实现交流频率和直流电压的恢复, 更符合电网运行的实际情况。最终通过与下垂控制和基于 PI 的电流环对比, 验证了该改进控制策略的优越性。

1 交直流混合微电网拓扑及其控制策略

1.1 交直流混合微电网拓扑结构

图 1 为典型的交直流混合微电网拓扑结构, 主要包括交流微电网、直流微电网以及 IC。交直流混合微电网的运行模式通常有离网和并网两种模式, 往往通过控制交流母线处的静态开关(static transfer switch, STS)来实现二者的切换。交流微电网包括交流微源、储能和负载, 交流微电网中的风力发电机和燃气轮机通过 AC/AC 变换器与交流母线相连, 光伏发电则通过 DC/AC 变换器与交流母线相连; 直流微电网包括直流微源、储能和负载, 直流微电网中的风力发电机通过 AC/DC 变换器与直流母线相连, 光伏发电则通过 DC/DC 变换器与直流母线相连; IC 通常用双向 DC/AC 变换器来表示, 与交流母线和直流母线相连, 起到平衡两侧功率和增强系统稳定性的作用。

并网模式下, 交流母线电压和频率由大电网支撑, IC 采用恒压模式维持直流电压的稳定, 稳定性强; 孤岛模式下, 由于缺少电网的支撑, 需要通过

制定合适的 IC 控制策略,来协调交流微电网和直流微电网的功率平衡,维持直流电压和交流频率的稳定。本文研究的是孤岛模式下的 IC 控制策略,通过制定合适的控制策略来实现孤岛模式下交直流混合微电网的稳定运行。

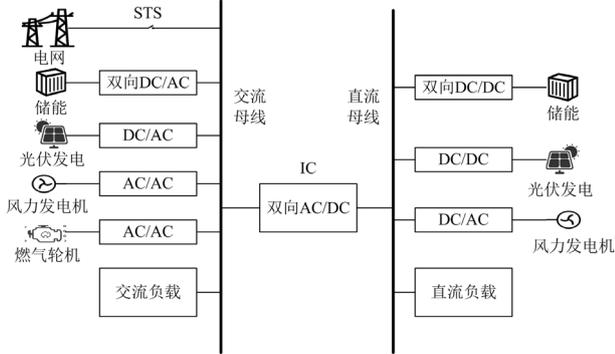


图1 交直流混合微电网典型结构

Fig. 1 Typical structure of hybrid AC/DC microgrid

1.2 直流微电网中分布式电源控制方式

直流微电网子系统中,分布式电源通常采用下垂控制来调节逆变器接口的电压。典型的下垂控制包括电压-电流下垂和电压-功率下垂^[26]。对于直流微电网,考虑二次控制后,改进的下垂控制可以设计为

$$V_{dc} = V_{dc}^* - m_{dc} \cdot (P_{dc}^* - P_{dc}) + \Delta\xi_{dc} \quad (1)$$

$$\Delta\xi_{dc} = k_{dc}^p \cdot (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{dc}^i \cdot \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (2)$$

式中: V_{dc} 和 V_{dc}^* 分别表示直流微电网子系统直流电压及其标称值; P_{dc} 和 P_{dc}^* 分别表示直流微电网子系统实际输出有功功率和额定有功功率; m_{dc} 为电压-

功率下垂系数; $\Delta\xi_{dc}$ 为电压二次控制调整项; k_{dc}^p 和 k_{dc}^i 分别为直流微电网子系统二次控制的比例和积分系数。

1.3 交流微电网中分布式电源控制方式

交流微电网子系统中,分布式电源通常采用下垂控制来调节逆变器接口的电压和频率。典型的下垂控制包括有功功率-频率下垂和无功功率-电压下垂^[26]。对于交流微电网,考虑二次控制后,改进后的下垂控制可以设计为

$$\omega_{ac} = \omega_{ac}^* - m_{ac} \cdot (P_{ac}^* - P_{ac}) + \Delta\xi_{ac} \quad (3)$$

$$V_{ac} = V_{ac}^* - n_{ac} \cdot (Q_{ac}^* - Q_{ac}) \quad (4)$$

$$\Delta\xi_{ac} = k_{ac}^p \cdot (\omega_{ac}^* - \omega_{ac}) + k_{ac}^i \cdot \int (\omega_{ac}^* - \omega_{ac}) dt \quad (5)$$

式中: ω_{ac} 和 ω_{ac}^* 分别表示交流微电网子系统频率及其额定值; V_{ac} 和 V_{ac}^* 分别表示交流微电网子系统交流电压及其标称值; P_{ac} 和 P_{ac}^* 分别表示交流微电网子系统实际输出有功功率和额定有功功率; Q_{ac} 和 Q_{ac}^* 分别表示交流微电网子系统实际输出无功功率和额定无功功率; m_{ac} 为有功功率-频率下垂系数; n_{ac} 为无功功率-电压下垂系数; $\Delta\xi_{ac}$ 为频率二次控制调整项; k_{ac}^p 和 k_{ac}^i 分别为交流微电网子系统二次控制的比例和积分系数。

2 IC 的改进 VSG 控制策略

2.1 交直流混合微电网电路模型

图2为带有 L 滤波器的交直流混合微电网系统的电路模型,其中 R 和 L 分别表示 L 滤波的电阻和电感,下标 d 和 q 表示 $d-q$ 参考系中的相应变量。

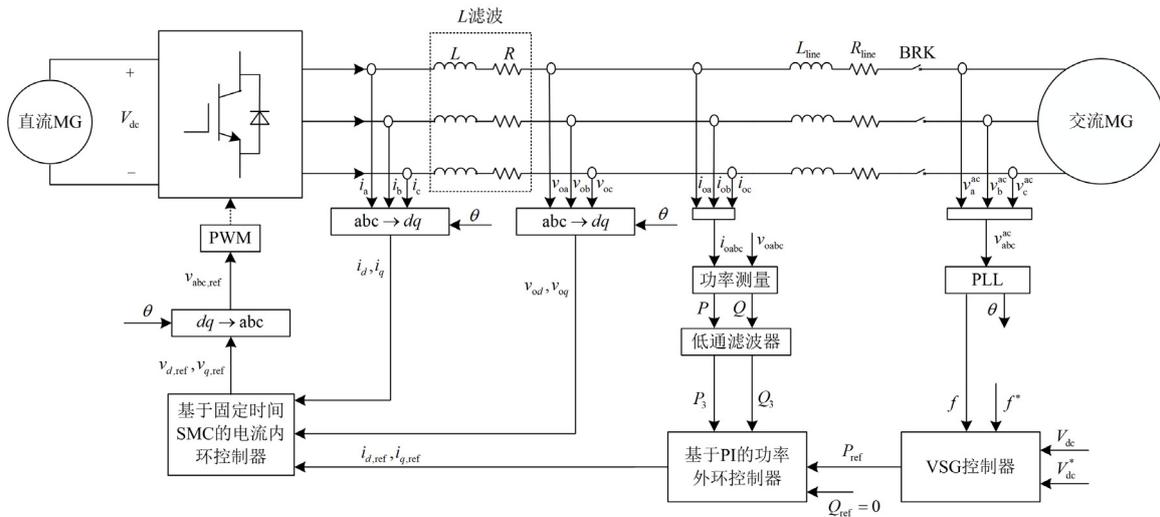


图2 交直流混合微电网互联变流器控制框架

Fig. 2 Control structure of interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid

如图2所示,所提改进控制策略包括VSG控制回路、基于PI的功率外环控制回路和基于固定时间SMC的电流内环控制回路,对于这些控制回路而言,只需要测量本地功率和电流信息,不需要交流微电网和直流微电网之间的通信。

本文通过直流微电网和交流微电网的信息来计算出IC需要传输的功率,由于直流微电网不传输无功功率,因此本文中IC只考虑有功功率的传输^[27]。

在 $d-q$ 参考系中,IC侧电感上的电压平衡方程可以推导为

$$\begin{cases} L \cdot \dot{i}_d = v_d - v_{od} - R \cdot i_d + \omega \cdot L \cdot i_q \\ L \cdot \dot{i}_q = v_q - v_{oq} - R \cdot i_q - \omega \cdot L \cdot i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_d 和 v_q 分别为 L 滤波前测量的三相电压的 d 、 q 轴分量; v_{od} 和 v_{oq} 分别为 L 滤波后测量的三相电压的 d 、 q 轴分量; i_d 和 i_q 分别为 L 滤波前测量的三相电流的 d 、 q 轴分量; ω 为IC输出电压的角频率。

2.2 VSG控制回路

假定交流微电网的容量 P_{\max}^{ac} 与直流微电网的容量 P_{\max}^{dc} 满足关系式: $P_{\max}^{\text{ac}} : P_{\max}^{\text{dc}} = K : 1$, 交流和直流微电网中松弛端子的实际输出有功功率 P_{ac} 和 P_{dc} 的比值为容量比 K ^[12], 交流和直流端子预期输出的功率误差 ΔP 定义为

$$\Delta P = P_{\text{ac}} - K \cdot P_{\text{dc}} \quad (7)$$

交流与直流微电网的实际输出有功功率满足类似式(1)的下垂特性, 由此式(7)可以修改为

$\Delta P = [P_{\text{ac}}^* + k_{\text{ac}}(\omega_{\text{ac}}^* - \omega_{\text{ac}})] - K[P_{\text{dc}}^* + k_{\text{dc}}(V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}})]$ (8)
式中: k_{ac} 为IC的交流侧下垂系数; k_{dc} 为IC的直流侧下垂系数。

IC的主要功能是通过其控制策略减少甚至消除式(8)中的 ΔP , 从而实现控制目标。外环功率的参考值根据交流侧频率和直流侧电压信息得到, 与以往的下垂控制不同, 本文通过引入交流频率倍数和直流侧电压倍数的微分量, 并采用VSG控制策略得到外环功率的参考值。改进后的下垂控制如式(9)所示。

$$\Delta P = [P_{\text{ac}}^* + k_{\text{ac}}(\omega_{\text{ac}}^* - \omega_{\text{ac}}) + J \cdot \frac{d\omega_{\text{ac}}}{dt}] - K[P_{\text{dc}}^* + k_{\text{dc}}(V_{\text{dc}}^* - V_{\text{dc}}) + C_v \cdot \frac{dV_{\text{dc}}}{dt}] \quad (9)$$

式中: J 为交流频率微分数; C_v 为直流电压微分数。

为了使微电网经济运行, 减小发电成本, 对IC

引入上层优化调度控制信号, 则新的有功功率参考 P_{ref} 为

$$P_{\text{ref}} = \Delta P + P_1 \quad (10)$$

式中, P_1 为上层控制器下达的功率调整指令。

2.3 基于固定时间SMC的电流内环控制回路

电流控制回路的目的是快速准确地跟踪功率外环控制回路提供的参考电流 $i_{d,\text{ref}}$ 和 $i_{q,\text{ref}}$, 定义 d 、 q 轴电流追踪误差 e_{id} 和 e_{iq} 分别为

$$\begin{cases} e_{id} = i_{d,\text{ref}} - i_d \\ e_{iq} = i_{q,\text{ref}} - i_q \end{cases} \quad (11)$$

对于SMC方法, 滑模函数被定义为 $s(x)$, 滑模面通常描述为 $s(x) = 0$, 并且当系统轨迹到达滑模面时, 系统动力学取决于滑模面方程。SMC的基本概念是设计一个稳定的滑模函数和控制律, 这个控制律引导系统动力学到达滑模面, 以保证所期望的控制效果, 滑模设计具体步骤如下。

1) 设计一个稳定的滑模函数, 当系统动力学在所设计表面时, 该函数提供所需的控制性能。

2) 设计一个反馈控制律, 以确保系统轨迹收敛到滑模表面。

电流回路控制器的控制目标是精确地跟踪参考电流, 因此, 为了保证跟踪误差固定时间收敛, 相应的 d 、 q 轴滑模函数 S_{id} 和 S_{iq} 分别定义为

$$\begin{cases} S_{id} = e_{id} + \gamma_1 \int e_{id}^{\frac{m_1}{n_1}} dt + \beta_1 \int e_{id}^{\frac{p_1}{q_1}} dt \\ S_{iq} = e_{iq} + \gamma_1 \int e_{iq}^{\frac{m_1}{n_1}} dt + \beta_1 \int e_{iq}^{\frac{p_1}{q_1}} dt \end{cases} \quad (12)$$

式中: γ_1 和 β_1 表示电流环持续消除控制偏差的权重因子, $\gamma_1 > 0$, $\beta_1 > 0$; m_1 、 n_1 、 p_1 、 q_1 为正奇数且满足 $m_1 > n_1$, $p_1 < q_1 < 2p_1$ 。

根据式(12), S_{id} 和 S_{iq} 的导数表示为

$$\begin{cases} \dot{S}_{id} = \dot{e}_{id} + \gamma_1 e_{id}^{\frac{m_1}{n_1}} + \beta_1 e_{id}^{\frac{p_1}{q_1}} \\ \dot{S}_{iq} = \dot{e}_{iq} + \gamma_1 e_{iq}^{\frac{m_1}{n_1}} + \beta_1 e_{iq}^{\frac{p_1}{q_1}} \end{cases} \quad (13)$$

通常认为 $di_{d,\text{ref}}/dt = 0$, 忽略参数不确定性, 根据式(6)、式(11)、式(13)可推导出 v_d 和 v_q 分别为

$$\begin{cases} v_d = v_{od} + Ri_d - \omega Li_q - L(\dot{S}_{id} - \gamma_1 e_{id}^{\frac{m_1}{n_1}} - \beta_1 e_{id}^{\frac{p_1}{q_1}}) \\ v_q = v_{oq} + Ri_q - \omega Li_d - L(\dot{S}_{iq} - \gamma_1 e_{iq}^{\frac{m_1}{n_1}} - \beta_1 e_{iq}^{\frac{p_1}{q_1}}) \end{cases} \quad (14)$$

滑模趋近率设计为

$$\begin{cases} \dot{S}_{id} = -\frac{\gamma_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2m_2-1}{n_2}} - \frac{\beta_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2p_2-1}{q_2}} \\ \dot{S}_{iq} = -\frac{\gamma_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{iq}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2m_2-1}{n_2}} - \frac{\beta_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{iq}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2p_2-1}{q_2}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\gamma_2 > 0$ 和 $\beta_2 > 0$; m_2 、 n_2 、 p_2 、 q_2 为正奇数且满足 $m_2 > n_2$, $p_2 < q_2$ 。

因此可求得 v_d 和 v_q 分别为

$$\begin{cases} v_d = v_{od} + Ri_d - \omega Li_q + L \left[\frac{\gamma_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2m_2-1}{n_2}} + \frac{\beta_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2p_2-1}{q_2}} + \gamma_1 e_{id}^{\frac{m_1}{n_1}} + \beta_1 e_{id}^{\frac{p_1}{q_1}} \right] \\ v_q = v_{oq} + Ri_q - \omega Li_d + L \left[\frac{\gamma_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{iq}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2m_2-1}{n_2}} + \frac{\beta_2}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_{iq}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2p_2-1}{q_2}} + \gamma_1 e_{iq}^{\frac{m_1}{n_1}} + \beta_1 e_{iq}^{\frac{p_1}{q_1}} \right] \end{cases} \quad (16)$$

以下引理给出了系统固定时间稳定的充分条件。

引理 1 如果存在一个连续径向有界函数 $V(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}_+ \cup \{0\}$ 满足^[22]:

$$V(x) \leq -k_1 V^p(x) - k_2 V^q(x) \quad (17)$$

式中, $k_1, k_2 > 0, p > 1, 0 < q < 1$ 。则称系统为全局固定时间稳定。其收敛时间 T 满足:

$$T \leq T_{\max} := \frac{1}{k_1(p-1)} + \frac{1}{k_2(1-q)} \quad (18)$$

证明选取 Lyapunov 函数 V_d 和 V_q , 如式(19)所示。

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{2} S_{id}^2 \\ V_q = \frac{1}{2} S_{iq}^2 \end{cases} \quad (19)$$

根据式(15)、式(19)得到 V_d 的导数表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_d = \dot{S}_{id} S_{id} = & -\gamma_2 \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2m_2}{n_2}} - \beta_2 \left(\frac{S_{id}}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{2p_2}{q_2}} = \\ & -\gamma_2 (V_d)^{\frac{m_2}{n_2}} - \beta_2 (V_d)^{\frac{p_2}{q_2}} \end{aligned} \quad (20)$$

根据引理 1 可得趋近阶段的时间满足:

$$T_1 < T_{\max 1} := \frac{1}{\gamma_2} \frac{n_2}{m_2 - n_2} + \frac{1}{\beta_2} \frac{q_2}{q_2 - p_2} \quad (21)$$

当系统到达滑模面时, 根据式(13)有

$$\dot{e}_{id} = -\gamma_1 e_{id}^{\frac{m_1}{n_1}} - \beta_1 e_{id}^{\frac{p_1}{q_1}} \quad (22)$$

根据引理 1 可得滑模运动阶段的时间满足:

$$T_2 < T_{\max 2} := \frac{1}{\gamma_1} \frac{n_1}{m_1 - n_1} + \frac{1}{\beta_1} \frac{q_1}{q_1 - p_1} \quad (23)$$

综上, 可得 $V_d \geq 0, \dot{V}_d \leq 0$, 类似地 $V_q \geq 0, \dot{V}_q \leq 0$, 因此系统为全局稳定且其收敛时间 T_b 满足:

$$\begin{aligned} T_b < T_{\max 1} + T_{\max 2} = & \frac{1}{\gamma_2} \frac{n_2}{m_2 - n_2} + \frac{1}{\beta_2} \frac{q_2}{q_2 - p_2} + \\ & \frac{1}{\gamma_1} \frac{n_1}{m_1 - n_1} + \frac{1}{\beta_1} \frac{q_1}{q_1 - p_1} \end{aligned} \quad (24)$$

2.4 基于 PI 的功率外环控制回路

为了追踪 VSG 控制回路计算得到有功功率和无功功率参考指令, 设计了如图 3 所示的控制框图。图 3 中 P_3 、 Q_3 分别为 IC 实时输送的有功、无功功率, 其分别与计算得到的 P_{ref} 、 Q_{ref} 作差, 再经过 PI 控制器得到内环电流参考值 $i_{d,\text{ref}}$ 和 $i_{q,\text{ref}}$, 实现功率跟踪^[28]。

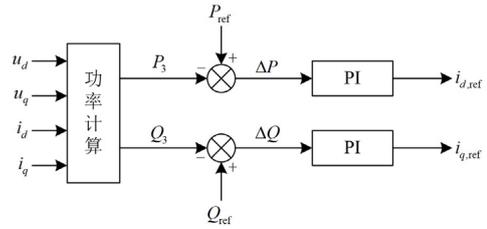


图 3 恒功率控制

Fig. 3 Constant power control

3 实验结果分析

为了验证本文所提交直流混合微电网中 IC 控制策略的有效性, 搭建了图 4 所示的孤岛模式下的交直流混合微电网测试系统, 对于交直流微电网子系统, 其中直流微电网额定电压为 1200 V, 额定容量为 100 kW, 直流负载为 15 kW, 其电压控制包括有功-电压下垂控制环和二次电压恢复控制环; 交流微电网额定线电压为 725 V, 额定频率为 60 Hz, 额定容量为 100 kW, 交流负载为 15 kW, 其频率控制包括有功-频率下垂控制环和二次频率恢复控制环; IC 额定容量为 100 kW, IC 采用 L 滤波器, 传输线路电阻和电感分别为 R_{line} 和 L_{line} , BRK 为模拟交流微电网子系统和直流微电网子系统是否独立运行的开关。实验平台如图 5 所示。本文将主电路部分经上位机的 StarSim HIL 软件导入 MT 6020 实时仿真器中, 将控制部分经上位机的 StarSim RCP 软件导入至 MT 1070 控制器中, 二者通过接线板进行传递。其他系统参数如表 1 所示。IC 的控制器参数如表 2 所示。

本文对两种典型的场景进行验证, 即交流侧向直流微电网提供功率支持和直流侧向交流微电网提供功率支持。同时为了将所提控制策略与传统控制策略进行全面比较, 针对 IC 设计了 3 种不同的控制策略。1) 采用 VSG 和固定时间 SMC 的电流内环的控制策略(称为 SMCVSG); 2) 采用 VSG 和基于 PI 的电流内环控制^[29]策略(称为 PIVSG); 3) 采用下垂控制和固定时间 SMC 的电流内环的控制策略(称为 SMC 下垂)。

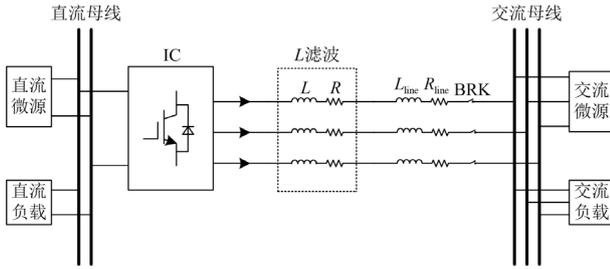


图 4 孤岛模式下交直流混合微电网简化结构

Fig. 4 Simplified structure of AC/DC hybrid microgrid in the islanded mode

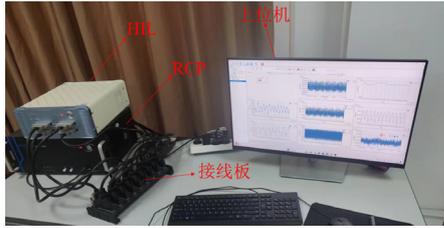


图 5 基于 HIL 和 RCP 的半实物仿真平台

Fig. 5 Semi-physical simulation platform based on HIL and RCP

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

类别	参数	值
直流微电网 分布式电源	额定功率 P_{dc}^*/kW	15
	最大功率 P_{max}^{dc}/kW	100
	下垂系数 $m_{dc}/(V/kW)$	0.6
	二次控制比例系数 k_{dc}^p	0.4
	二次控制积分系数 k_{dc}^i	10
	V_{dc} 允许范围/V	[1140,1260]
交流微电网 分布式电源	额定功率 P_{ac}^*/kW	15
	最大功率 P_{max}^{ac}/kW	100
	下垂系数 $m_{ac}/(Hz/kW)$	0.005
	二次控制比例系数 k_{ac}^p	0.2
	二次控制积分系数 k_{ac}^i	20
	f_{ac} 允许范围/Hz	[59.5,60.5]
IC	滤波器电阻 R/Ω	0.012
	滤波器电感 L/mH	5
	传输线电阻 R_{line}/Ω	0.065
	传输线电感 L_{line}/mH	0.0387

表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters

控制器	参数和值
VSG 控制器	$k_{ac} = 13\ 000, k_{dc} = 450$
	$C_v = 0.01, J = 1200$
	$K = 1$
基于 PI 的功率外环控制器	$k_p^p = 2, k_p^i = 350$
	$k_q^p = 2, k_q^i = 350$
基于固定时间 SMC 的 电流内环控制器	$\gamma_1 = 850, \beta_1 = 7000$
	$m_1 = 101, n_1 = 99$
	$p_1 = 29, q_1 = 57$
	$\gamma_2 = 50, \beta_2 = 4000$
	$m_2 = 31, n_2 = 29$
	$p_2 = 19, q_2 = 57$

3.1 直流侧向交流侧提供功率支持

仿真开始时, 即 0 s , 假定 $P_1 = 8\text{ kW}$, 在没有负载突然增加的情况下, 实时动态调整项 $\Delta P = 0$, 因此此时 IC 传输功率 $P = 8\text{ kW}$; $t = 1.5\text{ s}$, 交流侧负载增加 30 kW , 通过 VSG 控制策略计算 ΔP ; $t = 2.5\text{ s}$, 交流侧负载减少 30 kW 。图 6 为采用 SMCVSG 控制策略时的直流侧电压、交流侧频率以及 IC 传输有功功率和无功功率; 图 7 为采用 SMCVSG 控制策略的交流侧电压, 由于 IC 传输的无功功率始终在 0 附近, 因此交流侧电压始终能保持稳定; 图 8 为接入 IC 的 SMCVSG 控制策略与不接入 IC 的交流侧频率的性能比较, 由于接入 IC 时, 直流侧向交流侧提供功率支持, 而不接入 IC 时仅依靠交流微电网的二次控制调节, 故接入 IC 相较于不接入 IC 有着更小的频率偏移量, 因此实现了 IC 关于交直流混合微电网功率互济的功能; 图 9 为 3 种不同控制策略响应交流负载变化的关于交流侧频率动态特性的对比结果, 如图 9 所示, 所提出的 SMCVSG 控

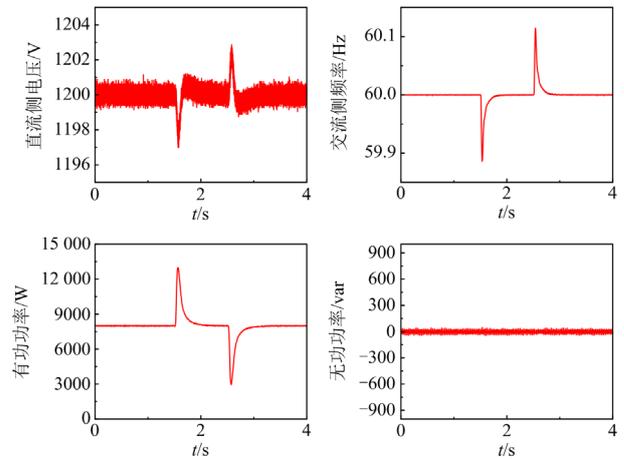


图 6 直流侧向交流侧提供功率支持时波形图

Fig. 6 Waveform when DC MG provides power support for AC MG

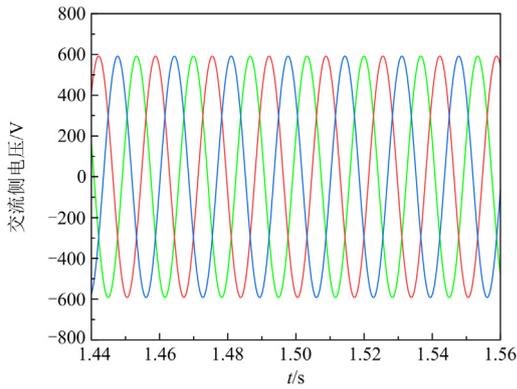


图7 直流侧向交流侧提供功率支持时交流电压波形图
Fig. 7 AC voltage waveform when DC MG provides power support for AC MG

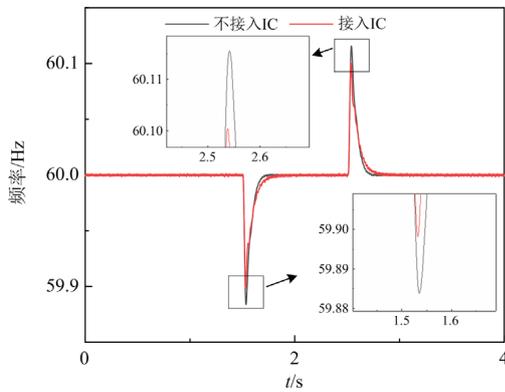


图8 交流负载变化时接入IC与不接入IC时性能比较
Fig. 8 Performance comparison between connecting IC and not connecting IC when AC load varies

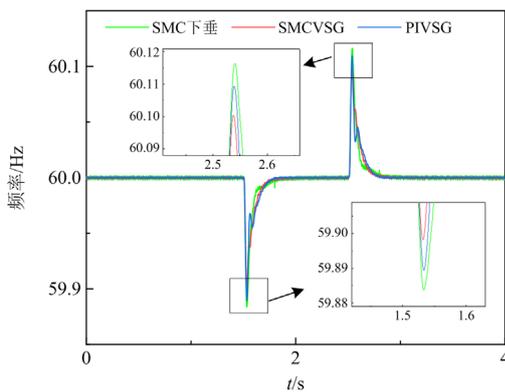
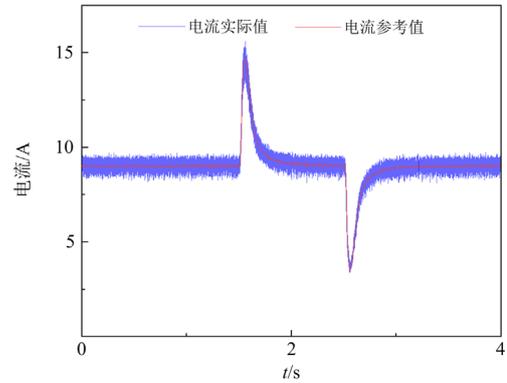


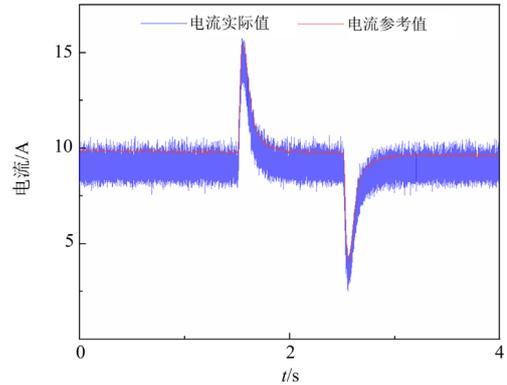
图9 孤岛模式下交流负载变化时的频率响应
Fig. 9 Frequency response to AC load variation in the islanded mode

制策略相较于另外两种控制策略频率偏移量更小, 这说明 SMCVSG 的动态性能更好; 图 10 为采用

SMCVSG 和 PIVSG 的电流环 d 轴分量追踪效果比较, 可以看到相较于 PI, SMC 有着更小的纹波, 因此 SMCVSG 优于 PIVSG。在本节仿真场景中, 由于交流负载的突然增加, 直流侧可以向交流侧提供功率支持。



(a) 采用SMCVSG控制策略的电流环追踪效果



(b) 采用PIVSG控制策略的电流环追踪效果

图10 SMCVSG和PIVSG电流环追踪效果对比图
Fig. 10 Tracking performance comparison of the current loop between SMCVSG and PIVSG

3.2 交流侧向直流侧提供功率支持

仿真开始时, 即 0 s , 假定 $P_1 = -8\text{ kW}$, 在没有负载突然增加的情况下, 实时动态调整项 $\Delta P = 0$, 因此此时 IC 传输功率 $P = -8\text{ kW}$; $t = 1.5\text{ s}$ 时, 负载增加 30 kW , 通过 VSG 控制策略计算 ΔP ; $t = 2.5\text{ s}$ 时, 直流侧负载减少 30 kW 。图 11 为采用 SMCVSG 控制策略时直流侧电压、交流侧频率以及 IC 传输有功功率和无功功率; 图 12 为采用 SMCVSG 控制策略的交流侧电压, 由于 IC 传输的无功功率始终在 0 附近, 因此交流侧电压始终能保持稳定; 图 13 为接入 IC 的 SMCVSG 控制策略与不接入 IC 的直流侧电压的比较, 由于接入 IC 时, 交流侧向直流侧提供功率支持, 而不接入 IC 时仅依靠直流微电网的二次控制调节, 故如图 13 所示, 接入 IC 相较于不接入

IC 有着更小的电压偏移量, 因此实现了 IC 关于交直流混合微电网功率互济的功能; 图 14 为 3 种不同控制策略响应直流负载变化时的直流侧电压动态特

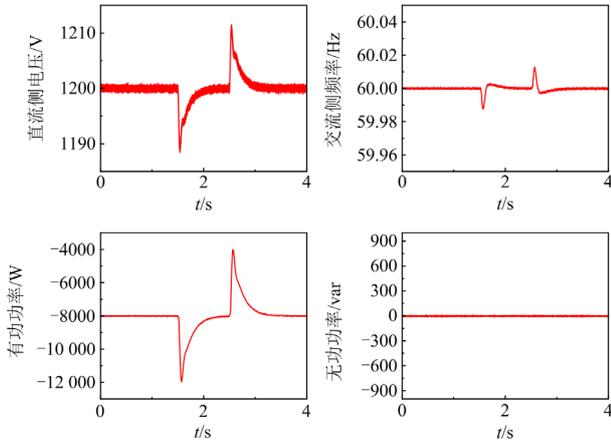


图 11 交流侧向直流侧提供功率支持时波形图

Fig. 11 Waveform when AC MG provides power support for DC MG

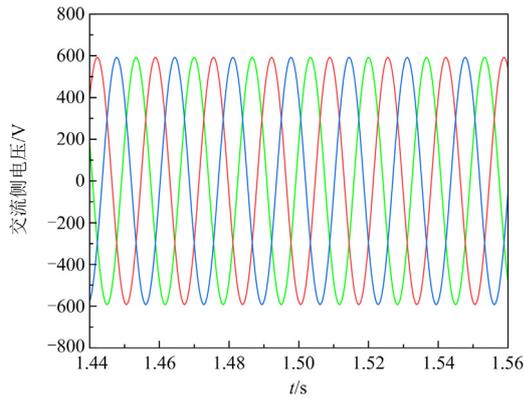


图 12 交流侧向直流侧提供功率支持时交流电压波形图

Fig. 12 AC voltage waveform when AC MG provides power support for DC MG

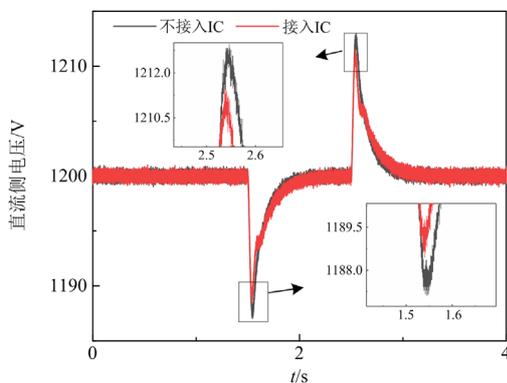


图 13 直流负载变化时接入 IC 与不接入 IC 时性能比较

Fig. 13 Performance comparison between connecting IC and not connecting IC when DC load varies

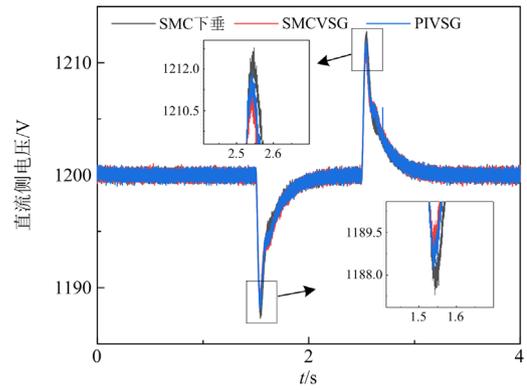
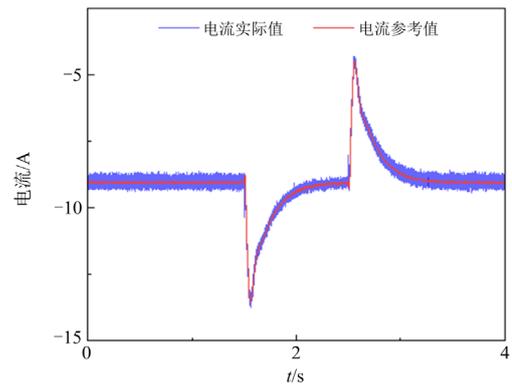


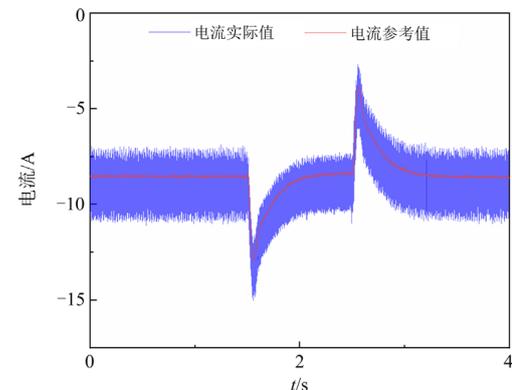
图 14 孤岛模式下直流负载变化时的电压响应

Fig. 14 Voltage response to DC load variation in the islanded mode

性对比结果。由图 14 可知, 所提出的 SMCVSG 控制策略相较于另外两种控制策略电压偏移量更小, 这说明 SMCVSG 的动态性能更好; 图 15 为采用 SMCVSG 和 PIVSG 的电流环 d 轴分量追踪效果比较, 可以看到 SMCVSG 相较于 PIVSG 有着更小的



(a) 采用 SMCVSG 控制策略的电流环追踪效果



(b) 采用 PIVSG 控制策略的电流环追踪效果

图 15 SMCVSG 和 PIVSG 电流环追踪效果对比图

Fig. 15 Tracking performance comparison of the current loop between SMCVSG and PIVSG

纹波, 因此 SMCVSG 优于 PIVSG。在本节仿真场景中, 由于直流负载的突然增加, 交流侧可以向直流侧提供功率支持。

4 结语

本文针对孤岛模式下交直流混合微电网提出了一种新型的 IC 控制策略, 首先在交直流微电网子系统中引入二次控制, 更加贴合实际情况; 接着针对传统下垂控制惯性小, 可能导致电压偏移率和频率偏移率过大的问题, 引入电压和频率的微分量, 提出了改进 VSG 控制策略; 同时考虑到 SMC 鲁棒性和快速响应的优点, 采用了基于固定时间 SMC 的电流控制回路。在远宽 StarSim 硬件在环实时仿真平台进行仿真分析, 仿真结果表明, 本文所提 IC 新型控制策略在交流负载增加时直流微电网可以提供功率支持, 以及直流负载增加时交流微电网可以提供功率支持, 实现了交直流微电网子系统间的功率互济, 同时所提出的 SMCVSG 相较于传统的下垂和 PI 有着更好的动态性能。

参考文献

- [1] 张祥宇, 王玉珂, 付媛. 直流微电网的多端虚拟储能协调控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 109-119.
ZHANG Xiangyu, WANG Yuke, FU Yuan. Multi-terminal virtual energy storage coordinated control technology for DC microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 109-119.
- [2] 崔俊昊, 田桂珍, 刘广忱, 等. 独立运行直流微电网混合储能系统功率分配控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 129-136.
CUI Junhao, TIAN Guizhen, LIU Guangchen, et al. A study on the power distribution control strategy of hybrid energy storage system in the isolated DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 129-136.
- [3] KESAVAN P K, SUBRAMANIAM U, ALMAKHLES D J, et al. Modelling and coordinated control of grid connected photovoltaic, wind turbine driven PMSG, and energy storage device for a hybrid DC/AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 154-167.
- [4] 符杨, 王晓旭, 米阳, 等. 基于本地自适应调节的交直流混合微电网全局协调控制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 152-162.
FU Yang, WANG Xiaoxu, MI Yang, et al. Global coordination control for AC/DC hybrid micro-grid based on local adaptive regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 152-162.
- [5] 郭国栋, 徐倩雯, 龚雁峰. 考虑需求响应的互联交直流混合微电网的分布式经济调度模型[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 116-125.
GUO Guodong, XU Qianwen, GONG Yanfeng. A distributed economic dispatching model for networked hybrid AC/DC microgrids considering demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 116-125.
- [6] 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.
- [7] 黄鑫, 汪可友, 李国杰, 等. 含多并联组网 DG 的微电网分层控制体系及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3766-3776.
HUANG Xin, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Hierarchical architecture and control strategy for micro-grid with multi-parallel grid-forming DGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3766-3776.
- [8] 刘云, 荆平, 李庚银, 等. 直流电网功率控制体系构建及实现方式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3803-3814.
LIU Yun, JING Ping, LI Gengyin, et al. Research on the structure and implementations of the DC grid power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3803-3814.
- [9] 贾利虎, 朱永强, 杜少飞, 等. 交直流微电网互联变流器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 98-104.
JIA Lihu, ZHU Yongqiang, DU Shaofei, et al. Control strategy of interlinked converter for AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 98-104.
- [10] 王灿, 邓灿, 潘学伟, 等. 基于线路阻抗补偿的互联变流器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 141-150.
WANG Can, DENG Can, PAN Xuewei, et al. Control strategy for interlinking converter based on line impedance compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 141-150.
- [11] 朱永强, 张泉, 刘康, 等. 交直流混合微电网分段协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 52-58.
ZHU Yongqiang, ZHANG Quan, LIU Kang, et al. Segmented coordination control strategy for hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 52-58.
- [12] LI X, GUO L, LI Y, et al. A unified control for the DC-AC interlinking converters in hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6540-6553.
- [13] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
ZHANG Zixing, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF[J]. Power System Protection

- and Control, 2024, 52(2): 155-164.
- [14] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 59-71.
- [15] 丁晓通. 交直流混合微电网中互联变流器的控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
DING Xiaotong. Research on control strategy of interlinking converters in AC/DC hybrid microgrid[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [16] 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): 3776-3788.
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): 3776-3788.
- [17] 刘子文. 复杂运行状态下交直流微电网运行特性分析及控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
LIU Ziwen. Studies of operation characteristics analysis and control methods of hybrid AC/DC microgrid under complicated operation conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [18] QI G, CHEN A, CHEN J. Improved control strategy of interlinking converters with synchronous generator characteristics in islanded hybrid AC/DC microgrid[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(2): 149-158.
- [19] 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, 48(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, 48(14): 50-58.
- [20] CHENG Z, LI Z, LI S, et al. A novel cascaded control to improve stability and inertia of parallel buck-boost converters in DC microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119.
- [21] LI Z, CHENG Z, LI S, et al. Virtual synchronous generator and SMC-based cascaded control for voltage-source grid-supporting inverters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2722-2736.
- [22] 刘宜成, 熊宇航, 杨海鑫. 基于 RBF 神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2790-2798.
LIU Yicheng, XIONG Yuhang, YANG Haixin. Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network[J]. Control and Decision, 2022, 37(11): 2790-2798.
- [23] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 94-103.
WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 94-103.
- [24] 杜燕, 言明明, 王鑫, 等. 交直流子网双边惯量约束下互联变流器动态功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 172-179.
DU Yan, YAN Mingming, WANG Xin, et al. Dynamic power control strategy for interlinking converter under bilateral inertia constraints in AC/DC subgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 172-179.
- [25] HE L, LI Y, GUERRERO J M, et al. A comprehensive inertial control strategy for hybrid AC/DC microgrid with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1737-1747.
- [26] SAHOO S K, SINHA A K, KISHORE N K. Control techniques in AC, DC, and hybrid AC-DC microgrid: a review[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 738-759.
- [27] 熊维富. 交直流混合微电网互联变流器的控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
XIONG Weifu. Control strategy of inter-connected converter for AC/DC hybrid microgrid[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [28] 王福源. 混合微电网中互联变流器功率控制策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
WANG Fuyuan. Power control strategy of inter-linking converter in hybrid microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [29] ARCO S D, SUUL J A, FOSSO O B. Automatic tuning of cascaded controllers for power converters using eigenvalue parametric sensitivities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1743-1753.

收稿日期: 2024-04-04; 修回日期: 2024-05-24

作者简介:

李忠文(1989—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型电力系统控制与优化、电力电子; E-mail: lzw@zzu.edu.cn

李沛阳(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电、微电网运行与控制; E-mail: lpy123@gs.zzu.edu.cn

程志平(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电、微电网协调控制。E-mail: zpcheng@zzu.edu.cn

(编辑 许威)