

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191013

# 交直流混合微电网互联变流器改进控制策略

张国荣, 丁晓通, 彭勃, 解润生, 毕康军

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 互联变流器是交直流混合微电网的重要组成部分, 需要承担交流微电网与直流微电网间的功率分配任务, 需要具有良好的动态性能。针对孤岛模式下传统下垂控制的互联变流器存在惯性小、系统瞬态性能差的问题, 提出了基于自适应下垂控制的互联变流器控制策略。在下垂系数中引入交流微电网频率的倍数与直流微电网电压差值的微分量, 动态增加系统惯性, 提高系统瞬态性能。在此基础上, 为了避免互联变流器整流与逆变模式的频繁切换, 提出滞回控制方法, 提高了系统的稳定性。最后, Matlab/Simulink 仿真结果表明, 孤岛模式下自适应下垂控制方法能够有效增加系统的惯性, 提高系统动态过程的稳定性。滞回控制方法可以有效减小死区加入导致的交直流两侧功率分配偏差。

**关键词:** 混合微网; 孤岛模式; 互联变流器; 自适应下垂控制; 滞回控制

## Improved control strategy for an AC/DC hybrid microgrid interlinking converter

ZHANG Guorong, DING Xiaotong, PENG Bo, XIE Runsheng, BI Kangjun

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** As an important part of a hybrid AC/DC microgrid, the interlinking converter not only needs to allocate the power between the AC microgrid and the DC microgrid, but also needs good dynamic performance. In order to solve the problem that the interlinking converter based on the traditional droop control has small inertia and poor transient performance in the islanded mode, the interlinking converter control strategy based on adaptive droop control is proposed. By introducing the difference between the frequency of the AC microgrid and the voltage of the DC microgrid in the droop coefficient, the system inertia is dynamically increased and the system transient performance is improved. In order to avoid frequent switching of the interlinking converter rectification and the inverter mode, a hysteresis control method is proposed to improve system stability. Finally, the simulation results of Matlab/Simulink show that the adaptive droop control method in the islanded mode can effectively increase the inertia of the system and improve the stability of the dynamic process. The hysteresis control method can effectively reduce the power difference between the AC and DC sides caused by the dead zone addition.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521104170043).

**Key words:** hybrid microgrid; islanded mode; interlinking converter; adaptive droop control; hysteresis control

## 0 引言

随着分布式发电技术的不断发展, 越来越多的分布式电源以集成互联的形式组成微电网<sup>[1]</sup>。其中, 直流微电网拥有电能转化率高、控制简单、可靠性高的优点, 成为未来微电网发展的趋势<sup>[2]</sup>。但是,

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长期共存。这时, 交直流混合微电网应运而生, 它通过互联变流器(Interlinking Converter, ILC)将交流微电网和直流微电网联系起来, 融合了交流微电网和直流微电网各自的优点, 减少了电力电子变换器的使用, 提高了新能源的利用效率, 因此成为近年来研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

混合微电网在并网模式下, 交直流混合微电网中微源通常采用恒功率控制以实现能源的最大利

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903100); 国家电网公司科技项目资助(521104170043)

用, ILC 采用恒压控制或电压-频率控制; 孤岛模式下, 混合微电网微源采用下垂控制以实现功率的自主分配, ILC 作为协调交流微电网和直流微电网功率的重要装置, 需要将适用于交流子微网和直流子微网<sup>[5-7]</sup>的基本下垂控制器结合起来, 共同决定 ILC 的有功功率参考值。为了实现混合微电网功率的自主分配, Poh Chiang Loh 教授提出了一种归一化下垂控制策略<sup>[8]</sup>。针对归一化下垂控制运算量较大的问题, 文献[9-10]根据直流电容能量波动与交流两侧电压之间的函数关系, 推导出交流网侧与直流网侧的下垂关系, 实现对 ILC 的自主控制。为了保证在较低频率偏差时功率共享性能, 文献[11-12]提出基于角度下垂控制的 ILC 控制策略。考虑多机并联的情况下, 文献[13-14]提出多个 ILC 协调控制策略。

以上文献主要针对 ILC 稳态功率分配问题, 少有提出对 ILC 动态性能改善的方法, 文献[15-16]引入虚拟同步机的控制方法来提高互联变流器的动态性能, 提出 ILC 的改进控制策略。

另外, 在交流子微网和直流子微网的负载条件差异非常小的情况下, 会引起 ILC 整流与逆变模式的频繁切换, 严重影响系统的电能质量和效率。文献[17-18]通过加入功率死区, 可以有效避免混合微电网微小负载波动时 ILC 能量流动, 减少混合微电网的功率损耗。但是, 加入死区将不利于混合微电网额定工况恢复。

本文提出了 ILC 的一种自适应下垂控制策略, 通过引入交流微电网频率倍数与直流微电网电压差值的微分量, 动态增加系统的惯性, 降低系统超调, 提高系统动态过程的稳定性。同时为了避免 ILC 死区的加入而导致电网难以恢复额定运行的问题, 采用了滞回控制方法。所提出的控制策略在无通信的条件下实现, 保证 ILC 在稳态条件下按额定容量自主分配功率, 提高了系统在瞬态过程中的动态性能, 使交流网侧频率与直流网侧电压变化控制在允许的范围内, 提高了系统鲁棒性。

## 1 系统结构与子微网控制

### 1.1 系统结构

图 1 是交直流混合微电网的一种典型拓扑, 主要由交流子微网、直流子微网以及互联变流器组成, 其中, 交流母线可以通过静态开关(Static Transfer Switch, STS)实现并网与离网。子微网都有各自的微源、储能和负载, 以便最大限度地减少转换过程中的电能损耗<sup>[19-20]</sup>。交流子微网的交流微源通过 AC/AC 变换器、直流微源通过 DC/AC 变换器分别连接到交流母线; 直流子微网的交流微源通过

AC/DC 变换器、直流微源通过 DC/DC 变换器分别连接到直流母线。ILC 作为连接交流子微网与直流子微网必不可少的电力电子器件, 起到协调交直流混合微电网间功率平衡、增强系统的稳定性的作用。

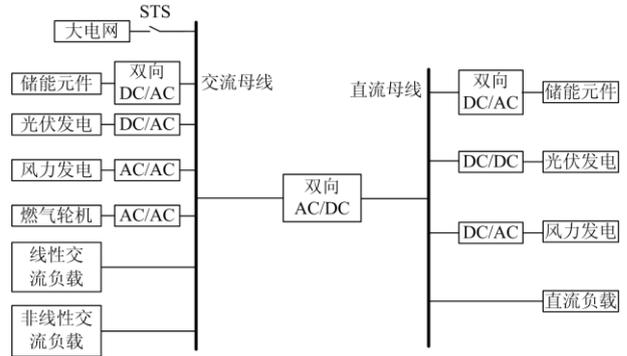


图 1 交直流混合微电网典型拓扑

Fig. 1 A typical topology of AC/DC hybrid microgrid

在并网模式下, 交流母线电压和频率由电网支撑, ILC 采用恒压控制以支撑直流侧电压稳定, 混合微电网电压和频率受负荷波动影响较小, 稳定性强。在孤岛模式下, 缺乏大电网的支撑, 需要依靠微源协调控制来维持系统频率和电压稳定<sup>[21]</sup>。因此, 保证孤岛模式下系统的稳定运行是发挥混合微电网优势的关键<sup>[22]</sup>。

### 1.2 交流微电网下垂控制

本文中交流子微网的分布式电源采用传统下垂控制, 通过测量本地的电网信息, 在无通信的条件下, 实现功率按所给下垂系数成比例分配, 实现自主控制, 由于其控制简单有效, 被广泛用于交流微电网的微源控制当中。本文忽略线路阻抗的影响, 在滤波电感的作用下, 线路阻抗成感性, 因此, 可以根据频率  $f$  控制有功功率  $P$ , 根据电压幅值  $V$  控制无功功率  $Q$ , 如图 2 所示。

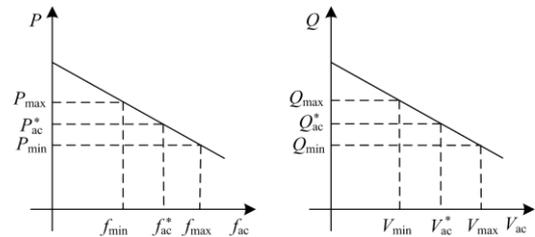


图 2 交流微电网频率和电压下垂特性

Fig. 2 Frequency and voltage droop characteristic for an AC subgrid

下垂特性表达式如式(1)和式(2)所示。

$$P_{ac} = P_{ac}^* + \frac{1}{k_{p,ac}}(f_{ac}^* - f_{ac}) \quad (1)$$

$$Q_{ac} = Q_{ac}^* + \frac{1}{k_{q,ac}} (V_{ac}^* - V_{ac}) \quad (2)$$

式中： $P_{ac}$ 为微源输出有功功率的参考值； $f_{ac}^*$ 为电网额定频率； $P_{ac}^*$ 为电网处于额定频率 $f_{ac}^*$ 时微源输出有功功率； $f_{ac}$ 为测量的本地电网频率； $Q_{ac}$ 为微源输出无功功率的参考值； $V_{ac}^*$ 为电网电压额定值； $Q_{ac}^*$ 为电网处于额定电压 $V_{ac}^*$ 时微源输出无功功率； $V_{ac}$ 为测量的本地电网电压； $k_{p,ac}$ 、 $k_{q,ac}$ 为下垂系数，可以用式(3)、式(4)表示。

$$k_{p,ac} = \frac{f_{max} - f_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (3)$$

$$k_{q,ac} = \frac{V_{max} - V_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4)$$

### 1.3 直流微电网下垂控制

直流子微网由于只有电压变化<sup>[23]</sup>，因此，只需要测量本地电网电压，采用直流电压下垂控制输出功率，就能实现在无通信条件下，直流微源按照下垂系数成比例分配功率。下垂特性如图3所示，用数学关系式表示为式(5)。

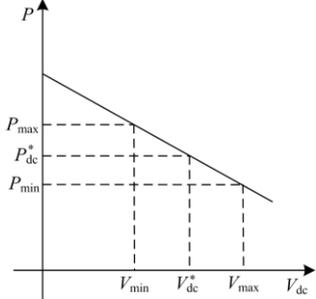


图3 直流微电网电压下垂特性曲线

Fig. 3 Voltage droop characteristic for a DC subgrid

$$P_{dc} = P_{dc}^* + \frac{1}{k_{dc}} (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (5)$$

式中： $P_{dc}$ 为微源输出有功功率的参考值； $V_{dc}^*$ 为电网额定电压； $P_{dc}^*$ 为电网处于额定功率； $V_{dc}$ 为微源输出有功功率； $V_{dc}$ 为测量的本地电网电压； $k_{dc}$ 为直流下垂系数，用式(6)表示。

$$k_{dc} = \frac{V_{max} - V_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (6)$$

## 2 ILC 改进控制策略

### 2.1 ILC 自适应下垂控制

ILC 作为连接交流子微网与直流子微网的关键装置，其同时具有交流微源与直流微源两种工作特

性，ILC 在子微网的下垂控制和相应的其他微源的控制方法相同，要兼顾 ILC 两侧不同的微电网特性，可以采用归一化下垂控制。文献[24]中有名值控制方法与归一化控制方法没有本质的区别，即将交流微电网和直流微电网的下垂特性放在同一坐标系中，由于有名值的控制方法物理意义更加明确、直观，因此本文采用有名值的控制方法。

由于交流频率允许范围与直流电压运行范围并不同，例如，频率变化的允许范围是-1%~1%，而直流电压变化的允许范围为-7%~7%。如果令电压运行范围是频率允许范围的 $K$ 倍，为避免单侧电网超出允许范围，控制的目标为

$$K \cdot \frac{\Delta f_{ac}}{f_{ac}^*} = \frac{\Delta V_{dc}}{V_{dc}^*} \quad (7)$$

式中：

$$\begin{cases} \Delta f_{ac} = f_{ac} - f_{ac}^* \\ \Delta V_{dc} = V_{dc} - V_{dc}^* \end{cases} \quad (8)$$

将式(1)、式(5)代入式(7)中，

$$K \frac{k_{ac,ILC} \Delta P_{ac}}{f_{ac}^*} = \frac{k_{dc,ILC} \Delta P_{dc}}{V_{dc}^*} \quad (9)$$

如果令流向交流侧的功率为正方向，则

$$\Delta P = \Delta P_{dc} - \Delta P_{ac} \quad (10)$$

$\Delta P$  经过功率限幅得到功率  $P_{ref}$ ，即 ILC 输出功率给定参考值。

ILC 也可以通过  $Q$ - $V$  下垂控制来调节交流侧无功功率，但是 ILC 的主要功能是传输有功功率，因此，为了保证有功功率的正常传输，无功功率的最大值设定为

$$Q_{ILC,max} = \sqrt{S_{ILC,max}^2 - P_{ILC}^2} \quad (11)$$

式中： $Q_{ILC,max}$  和  $S_{ILC,max}$  分别为 ILC 允许的最大无功功率和最大视在功率； $P_{ILC}$  为 ILC 传输的有功功率。因此，ILC 传输的无功功率参考值可用式(12)表示。

$$Q_{ref} = \begin{cases} 0, & P_{ILC} < 0 \\ Q_{ac}^* + \frac{(V_{ac}^* - V_{ac})}{k_{q,ac}}, & P_{ILC} \geq 0 \& Q_{ILC} \leq Q_{ILC,max} \\ Q_{ILC,max}, & P_{ILC} \geq 0 \& Q_{ILC} > Q_{ILC,max} \end{cases} \quad (12)$$

式中， $Q_{ILC}$  为 ILC 传输的无功功率。

在交流微网中，文献[25-26]提出了一种自适应分散下垂控制，它结合了静态和自适应瞬态下垂以提高微电网在低频下的稳定性，通过在传统的下垂控制器中引入功率导数项，改善了逆变器的瞬态响应，在直流微网中，文献[27]提出一种变系数下垂控制来提高直流微网的惯性。本文将这种思想应用

到 ILC 控制中, 考虑到互联变流器的主要功能是实现两侧功率共享, 目标是实现交流微电网频率的  $K$  倍与直流微电网电压有名值相等, 因此, 改进的下垂控制在下垂系数中引入交流微电网频率的  $K$  倍与直流微电网电压有名值差值的微分量  $\Delta e$ , 由式(13)表示。

$$\Delta e = K \frac{\Delta f_{ac}}{f_{ac}^*} - \frac{\Delta V_{dc}}{V_{dc}^*} \quad (13)$$

改进后的下垂控制如式(14)和式(15)所示。

$$P_{ac,ILC} = P_{ILC}^* + \left( \frac{1}{k_{ac,ILC}} \pm k_1 \frac{d\Delta e}{dt} \right) (f_{ac}^* - f_{ac}) \quad (14)$$

$$P_{dc,ILC} = P_{ILC}^* + \left( \frac{1}{k_{dc,ILC}} \pm k_2 \frac{d\Delta e}{dt} \right) (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (15)$$

式中:  $P_{ILC}^*$  为两侧微电网都处于额定工作状态时, ILC 传输的功率(一般为 0);  $k_1$  和  $k_2$  为微分系数; 当 ILC 处于逆变模式时微分系数前符号为正, 整流模式时微分系数前符号为负。

由式(9)、式(10)、式(14)和式(15), 可以得到  $\Delta P$  的表达式, 如式(16)所示。

$$\begin{aligned} \Delta P = & \frac{KV_{dc}^* \Delta f_{ac}}{k_{dc,ILC} f_{ac}^*} - \frac{f_{ac}^* \Delta V_{dc}}{k_{ac,ILC} KV_{dc}^*} \pm \\ & \left( \frac{k_2 V_{dc}^* K^2}{(f_{ac}^*)^2} \frac{d\Delta f_{ac}}{dt} \Delta f_{ac} + \frac{k_1 f_{ac}^*}{K(V_{dc}^*)^2} \frac{d\Delta V_{dc}}{dt} \Delta V_{dc} \right) m \quad (16) \\ & \left( \frac{k_2 K}{f_{ac}^*} \frac{d\Delta V_{dc}}{dt} \Delta f_{ac} + \frac{k_1}{V_{dc}^*} \frac{d\Delta f_{ac}}{dt} \Delta V_{dc} \right) \end{aligned}$$

为了构建  $\Delta e$  的微分量,  $k_1$  和  $k_2$  需要选取合适的比例, 设计  $k_1$ 、 $k_2$  满足式(17)。

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{KV_{dc}^*}{f_{ac}^*} \quad (17)$$

将式(15)、式(17)代入式(16)中, 可以得到式(18)。

$$\Delta P = \frac{KV_{dc}^* \Delta f_{ac}}{k_{dc,ILC} f_{ac}^*} - \frac{f_{ac}^* \Delta V_{dc}}{k_{ac,ILC} KV_{dc}^*} \pm k_2 V_{dc}^* \Delta e \frac{d\Delta e}{dt} \quad (18)$$

对比传统下垂控制, 从式(18)可以看出所提控制方法增加了虚拟惯量  $J$ , 如(19)所示。

$$J = \pm k_2 V_{dc}^* \Delta e \quad (19)$$

$J$  的函数特性曲线如图 4 所示。  $\Delta e$  的绝对值越大的  $J$  也越大, ILC 控制系统惯性变大, 从而实现在电网出现较大波动时, 抑制 ILC 功率超调; 在  $\Delta e$  的绝对值较小时,  $J$  很小, 即使  $\Delta e$  的微分量很大, 对 ILC 传输功率增加量小, 可以很好地抑制系统干扰。实现 ILC 瞬态过程中的自适应控制, 提高系统动态性能, 有效增强系统的稳定性。

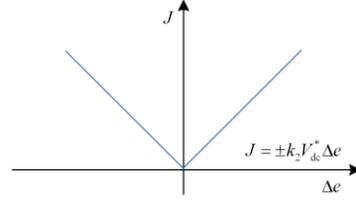

 图 4  $J$  函数曲线

 Fig. 4  $J$  function curve

## 2.2 滞回控制

两侧子微网都工作于额定值附近, 微网中的分布式电源、负载的随机波动将导致 ILC 模式的频繁切换。现有的解决方法是在额定值附近设置 ILC 启动阈值<sup>[17-18]</sup>, 以交流频率下垂特性为例, 其原理如图 5(a)所示, 在  $f_g \sim f_g$  区间内功率始终为零。虽然这样可以有效避免 ILC 的频繁切换, 但与原有的下垂特性相比, 平移了下垂特性曲线, 扩大了交直流微电网之间的功率差, 本文运用滞回控制的方法, 能够很好地解决上述问题。

图 5(b)为加入滞回的  $f-P$  下垂控制, 保持原有的下垂特性曲线不变, 当频率  $f_{ac}$  超出阈值时 ILC 输出有功功率从零变换为按下垂特性曲线计算, 当恢复到阈值范围内时也按下垂特性曲线计算。这样有利于电网恢复到额定值时减小两侧电网的功率偏差。同理, 直流电压下垂特性也可以采用相同的滞回控制方法。

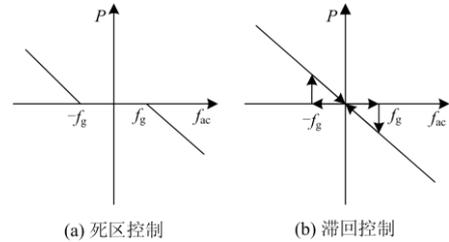


图 5 ILC 模式切换控制策略

Fig. 5 Strategy for suppressing frequent switching of interlinking converter mode

## 2.3 ILC 控制框图

本文采用功率外环、电流内环的双环控制策略, 如图 6 所示。

交流母线频率  $f_{ac}$  经过频率滞回控制, 并根据式(14)、式(9)得到所需直流侧传输功率  $\Delta P_{dc}$ ; 同理, 由直流母线电压  $V_{dc}$  得到所需交流侧传输功率  $\Delta P_{ac}$ , 两者差值  $\Delta P$  经过功率限幅得到参考有功功率  $P_{ref}$ 。另外, 交流母线电压  $V_{ac}$  由式(12)计算得到参考无功功率  $Q_{ref}$ 。参考功率与检测值进行比较, 经过 PI 调节器得到参考电流, 并经电流内环产生 SVPWM 开关信号, 从而实现 ILC 控制。

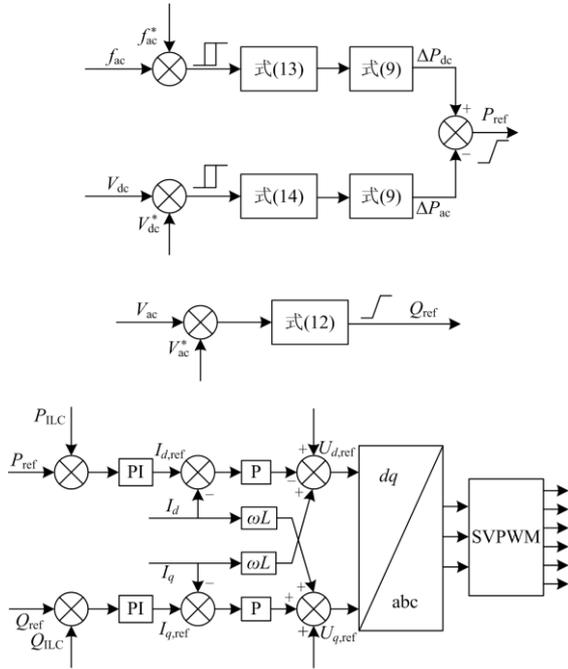


图 6 ILC 控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of interlinking converter control

### 3 仿真

为验证本文提出的控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 中搭建了孤岛模式下交直流混合微电网控制模型，如图 7 所示，为了分析方便，将两子微网的微源各用一个下垂控制的微源进行简化，ILC 采用 LCL 滤波器，并用阻尼电阻来抑制谐振。仿真实验中电网、直流微源、交流微源、ILC 的参数由表 1 给出。其中  $k_1$ 、 $k_2$  满足式(17)，实现构建  $\Delta e$  的微分量的目的。通过仿真选取  $k_1$  的参数，如图 8 所示， $k_1 : 1/k_{ac,ILC}$  的不同比值影响系统的动态性能，当选取为  $k_1 : 1/k_{ac,ILC}$  为 10%，既可以保证系统稳定性，也能避免系统功率振荡。

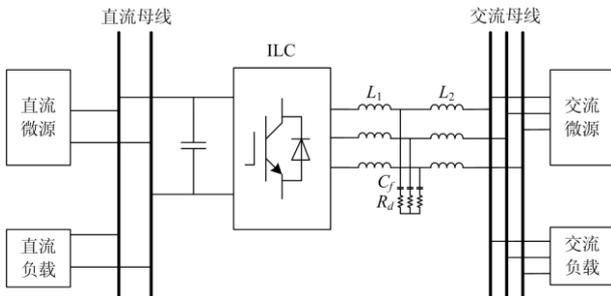


图 7 孤岛模式下交直流混合微电网简化结构

Fig. 7 Simplified structure of AC/DC hybrid microgrid in island mode

表 1 交直流混合微电网及控制器参数

Table 1 AC/DC hybrid microgrid and controller parameters

类别	符号	值
电网	交流额定电压 $V_{ac}^*$	380 V
	交流额定频率 $f_{ac}^*$	50 Hz
	直流额定电压 $V_{dc}^*$	700 V
直流微源	额定功率 $P_{dc}^*$	250 kW
	下垂系数 $k_{dc}$	0.000 98 V/W
	$V_{dc}$ 允许范围	$651 \text{ V} \leq V_{dc} \leq 749 \text{ V}$
交流微源	额定功率 $P_{ac}^*$	250 kW
	下垂系数 $k_{p,ac}$	0.000 01 Hz/W
	下垂系数 $k_{q,ac}$	0.000 435 4 V/VA
	$f_{ac}$ 允许范围	$49.5 \text{ V} \leq f_{ac} \leq 50.5 \text{ V}$
	$V_{ac}$ 允许范围	$353.4 \text{ V} \leq V_{ac} \leq 406.6 \text{ V}$
ILC	额定容量 $S_{ILC}$	100 kVA
	下垂系数 $k_{ac,ILC}$	0.000 01 Hz/W
	下垂系数 $k_{dc,ILC}$	0.000 98 V/W
	下垂系数 $K_{q,ILC}$	0.000 435 4 V/VA
	下垂微分系数 $k_1$	10.7 kW/Hz
	下垂微分系数 $k_2$	0.109 kW/V
	直流电压死区 $V_g$	9.8 V
交流频率死区 $f_g$	0.1 Hz	

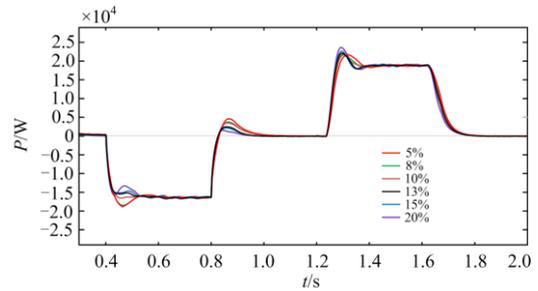


图 8  $k_1$  参数对 ILC 传输功率动态性能的影响波形

Fig. 8 Influence waveform of parameters  $k_1$  on dynamic performance of ILC transmission power

#### 3.1 单侧功率波动仿真

如图 9、图 10 所示，在 0.4 s 之前交直流混合微电网已处于额定工况。为了验证额定工况下，滞回控制方法抑制干扰的有效性，在 0.4~0.5 s 期间，直流母线上加微小的直流负载干扰，如图 9 所示，从图 9(a)中可以看出直流负载功率  $P_{dc,l}$ 、ILC 传输有功功率  $P_{ILC}$  都有明显波动，而对应图 9(b)中，直流负载功率  $P_{dc,l}$  虽有明显波动，但 ILC 传输功率为 0，即滞回控制策略可以有效抑制电网负载波动。

在额定工况下，为了验证单侧微电网突然加入较大负载时，系统瞬态过程中的稳定性，在 0.6~1 s

期间, 在直流母线上加入直流负荷; 在 1.4~1.8 s 期间, 在交流母线上加入纯阻性负载。仿真波形结果如图 9、图 10 所示。对比图 9(a)和图 9(b), 突加直流负荷, 传统的下垂控制策略系统功率振荡最大峰值为-23.2 kW、0.8 s 达到稳态功率-16.4 kW, 而所提控制方法的功率振荡最大峰值为-17.7 kW、0.7 s 达到稳态功率-16.4 kW; 在 1.4 s 时, 突加交流负载, 传统的下垂控制策略系统功率振荡最大峰值为 23.0 kW、1.7 s 达到稳态功率 18.9 kW, 而所提控制方法的功率振荡最大峰值为 22.0 kW、1.6 s 达到稳态功率 18.9 kW。对比图 10(a)和图 10(b), 也可以看到在  $t=0.65$  s 左右所提改进控制方法的直流母线电压、交流母线频率具有更小的超调量。综上, 可以

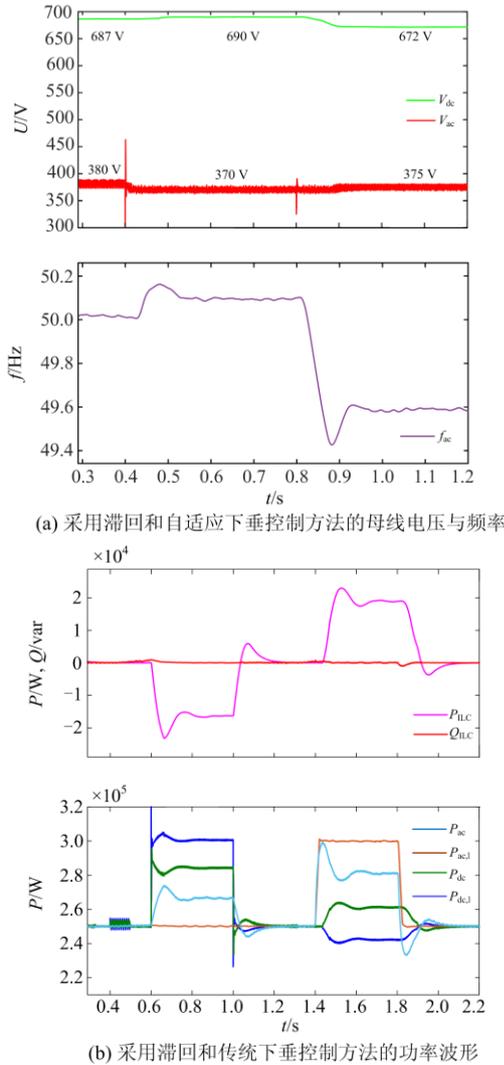
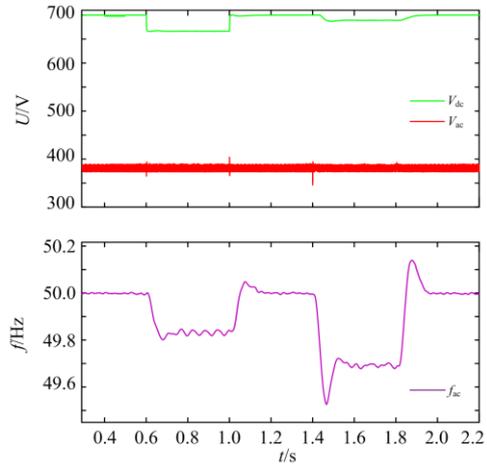
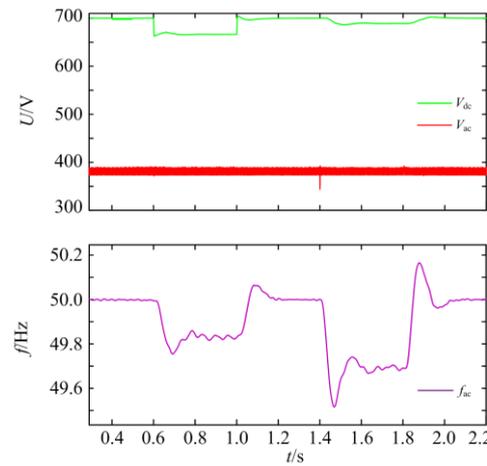


图 9 单侧负载波动时功率波形 ( $P_{ac,l}$  为交流侧负载的有功功率,  $P_{dc,l}$  为直流侧负载的有功功率, 下同)

Fig. 9 Power waveform when single-sided load fluctuation ( $P_{ac,l}$  is the active power of the AC side load,  $P_{dc,l}$  is the active power of the DC side load, the same below)



(a) 采用滞回和自适应下垂控制方法的母线电压与频率



(b) 采用滞回和传统下垂控制方法的母线电压与频率

图 10 单侧负载波动时母线电压与频率波形

Fig. 10 Bus voltage and frequency waveform when load fluctuations on single sides

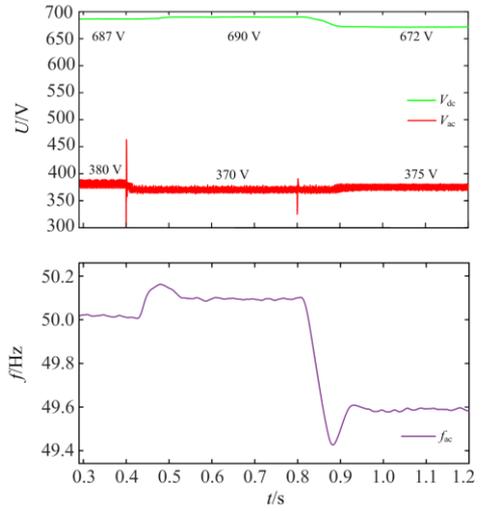
看出在额定工作情况下, 所提方法的超调量更小, 达到稳态时间更短, 即所提出的控制策略有效抑制动态过程中系统的超调, 并且加快了系统到达稳定的时间。

### 3.2 两侧功率波动仿真

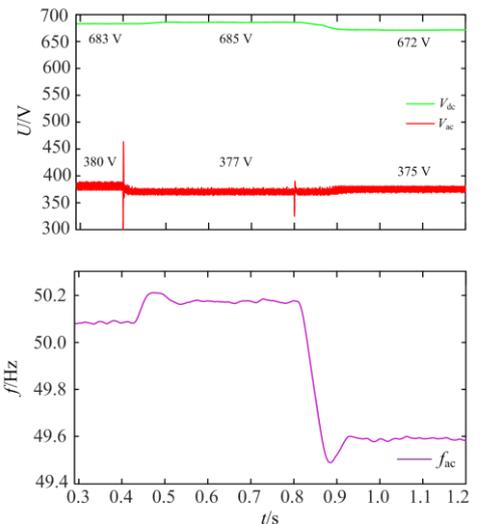
为了验证滞回控制对于混合微电网恢复到额定工况的有效性, 在直流母线加入大于额定值的负载, 使  $V_{dc}$  处于死区之外; 在交流母线加入小于额定值的负载, 使  $f_{ac}$  处于死区之外; 并且使交直流两侧偏移额定负载的偏移量相近。如图 11 和图 12 所示, ILC 参与功率传输, 并在 0.3~0.4 s 期间系统到达新的稳定状态。从图 11、图 12 中可以看到, 采用滞回和自适应下垂控制方法的 ILC 传输功率为-13.6 kW、 $V_{dc}$  为 687 V、 $f_{ac}$  为 50.02 Hz; 采用死区和自适应下垂控制方法的 ILC 传输功率为-7.3 kW、 $V_{dc}$  为

683 V、 $f_{ac}$  为 50.09 Hz。造成差异的原因是在稳态时，交流侧频率  $f_{ac}$  处于死区内，使得采用死区控制方法计算的  $\Delta P_{dc}$  为零，而用滞回控制的方法是按照下垂曲线进行恢复的，即  $\Delta P_{dc}$  不为零。

为了验证 ILC 无功功率的补偿功能，同时，验证 ILC 由逆变状态突然转变到整流状态这一极端情况的有效性，在 0.4 s 时在交流母线接入容性负载，在 0.8 s 时在交流母线增加纯阻性负载。从图 11 可以看出，加入容性负载造成交流侧电压降低，交流母线有功功率下降、频率上升，从而导致 0.4~0.8 s 期间 ILC 功率增大，由于 ILC 工作于逆变模式，可以从图 12 中看到，此时无功功率为 0。在约 0.9 s 之后，ILC 转变到整流模式时，ILC 也开始补偿无功功率，交流母线电压有所升高。



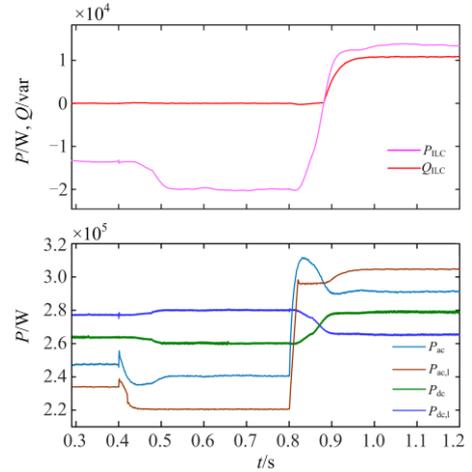
(a) 采用滞回和自适应下垂控制方法母线电压与频率



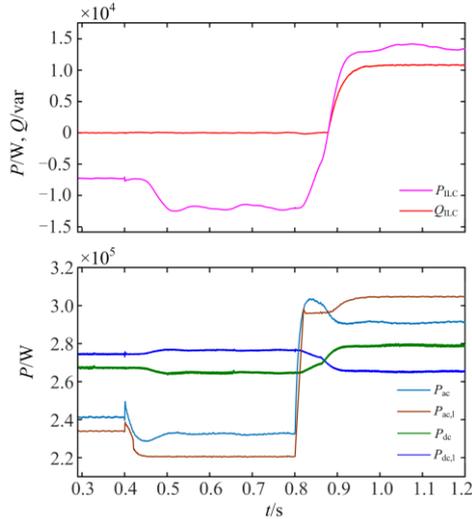
(b) 采用死区和自适应下垂控制方法的母线电压与频率

图 11 两侧负载波动时母线电压与频率波形

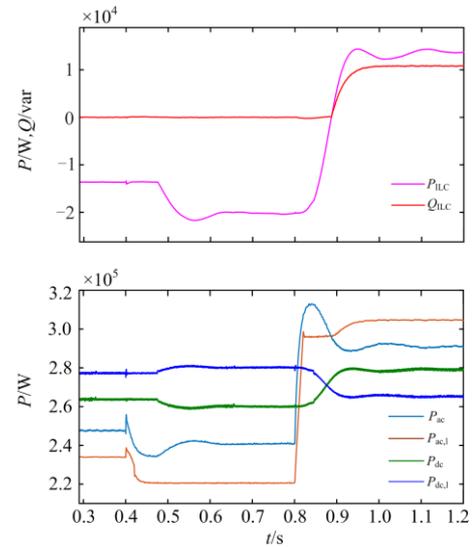
Fig. 11 Bus voltage and frequency waveform when load fluctuations on both sides



(a) 采用滞回和自适应下垂控制方法的功率波形



(b) 采用死区和自适应下垂控制方法的功率波形



(c) 采用滞回和传统下垂控制方法的功率波形

图 12 两侧负载波动时功率波形

Fig. 12 Power waveforms when the load is fluctuating on both sides

对比图12(a)和图 12(c), ILC 由逆变状态突然转到整流状态, 传统的下垂控制策略系统功率振荡最大峰值为 14.4 kW、1.15 s 达到稳态功率 13.7 kW, 而所提控制方法的超调很小、1 s 达到稳态功率 13.7 kW。对比可以看出所提滞回控制方法有利于额定工况恢复, 自适应下垂控制在模式变化时也能有效地抑制系统振荡, 使得系统快速到达稳定状态。

#### 4 总结

为了提高系统的稳定性, 本文从动态与静态两个方面对 ILC 进行改进。针对基于传统下垂控制的 ILC 控制策略动态性能差的问题, 本文提出了基于自适应下垂控制的 ILC, 通过动态调整下垂系数, 实现系统惯性自适应调节, 提高系统的鲁棒性。在此基础上, 为了避免电网波动导致 ILC 模式的频繁切换, 本文提出了一种滞回控制方法, 抑制 ILC 频繁切换的同时, 避免死区加入对额定工况恢复的影响。最后通过 Matlab/Simulink 仿真验证了改进控制的方法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 杨刚, 杨奇逊, 张涛, 等. 微网中双向 DC-AC 变流器的性能优化控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 81-91. YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. Performance optimization control of bidirectional DC-AC converter in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 81-91.
- [2] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 40-46. DENG Shilei, WANG Mingyu. DC power grid power flow controller and distributed energy storage cooperative control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 40-46.
- [3] GUPTA A, DOOLLA S, CHATTERJEE K. Hybrid AC-DC microgrid: systematic evaluation of control strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3830-3843.
- [4] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微电网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 17-25. DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Research on optimal configuration of AC/DC hybrid microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 17-25.
- [5] HAN H, HOU X, YANG J, et al. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 200-215.
- [6] DRAGIČEVIĆ T, LU X, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids—part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.
- [7] TORREGLOSA J P, GARCÍA-TRIVIÑO P, FERNÁNDEZ-RAMIREZ L M, et al. Control strategies for DC networks: a systematic literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 319-330.
- [8] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [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 AC/DC microgrid interconnect converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 98-104.
- [10] EGHTEGARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [11] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Operation and control of hybrid microgrid with angle droop controller[C] // TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference, November 21-24, 2010, Fukuoka, Japan: 509-515.
- [12] FARROKHABADI M, CÁNIZARES C A, BHATTACHARYA K. Evaluation of droop-based controls in an islanded microgrid with electronically interfaced distributed energy resources[C] // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29-July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands: 1-6.
- [13] XIA Y, PENG Y, YANG P, et al. Distributed coordination control for multiple bidirectional power converters in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(6): 4949-4959.
- [14] XIAO H, LUO A, SHUAI Z, et al. An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 340-347.
- [15] 林子杰, 卫志农, 孙国强, 等. 基于虚拟同步电机的交直流混合微电网控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 424-433. LIN Zijie, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Control strategy of AC/DC hybrid microgrid based on virtual synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 424-433.
- [16] XING P, LI M, LI H, et al. Control strategy of an AC-DC

- hybrid microgrid based on virtual synchronous generator[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China.
- [17] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1533-1543.
- [18] 刘佳易, 秦文萍, 韩肖清, 等. 交直流双向功率变换器的改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 304-310.  
LIU Jiayi, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Improved droop control strategy for AC-DC bidirectional power converters[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 304-310.
- [19] 丁明, 楚明娟, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行优化建模与不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 1-7, 45.  
DING Ming, CHU Mingjuan, PAN Hao, et al. Operation optimization modeling and uncertainty analysis of AC/DC hybrid microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 1-7, 45.
- [20] 王晗, 徐潇源, 严正. 基于改进信赖域算法的孤岛交直流混合微电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 38-46.  
WANG Han, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. Power flow calculation of island AC/DC hybrid microgrid based on improved trust region algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 38-46.
- [21] 郭蕾, 苏建徽, 施永. 微网孤岛运行模式下的调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 110-115.  
GUO Lei, SU Jianhui, SHI Yongwei. Frequency regulation control strategy for microgrid in islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 110-115.
- [22] 蔡杰, 刘子文, 苗世洪, 等. 基于扰动观测器的孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器电压波动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 96-102.  
CAI Jie, LIU Ziwen, MIAO Shihong, et al. Research on voltage fluctuation control strategy of two-way AC/DC converter based on disturbance observer[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 96-102.
- [23] CHEN D, XU L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897-1905.
- [24] HU W, CHEN H, YANG X, et al. Control strategy of the bi-directional converter for hybrid AC/DC microgrid[C] // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), November 15-18, 2015, Brisbane, QLD, Australia: 1-5.
- [25] MOHAMED A R I, EL-SAADANY E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [26] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分项下垂控制的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 46-53, 116.  
CHEN Xin, ZHANG Changhua, HUANG Qi. Study on small signal stability of microgrid with power differential term droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 46-53, 116.
- [27] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.  
WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertial control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.

收稿日期: 2019-08-22; 修回日期: 2019-09-27

作者简介:

张国荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量控制技术, 储能系统中的电力变换技术, 光伏发电技术; E-mail: zhanggrcao@163.com

丁晓通(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合微电网。E-mail: 1032521834@qq.com

(编辑 周金梅)