DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191124

交直流微电网 AC/DC 双向功率变换器控制策略

焦 皎，孟润泉，任春光，杜 毅

（太原理工大学电力系统运行与控制山西重点实验室，山西 太原 030024）

摘要：为了实现交直流混合微电网的可靠并网，基于微电网中 AC/DC 双向功率变换器下垂控制策略和预同步工作原理，提出一种适用于混合微电网中连接交直流子网的 AC/DC 双向功率变换器的控制策略。孤岛/并网模式时采用双向下垂控制实现双向功率流动。在由孤岛模式转为并网模式时，利用消除 *dq* 轴电压偏差实现幅值与相位同步，无需通过锁相环获取相位信息，实现平滑并网。同时，针对微电网中由于不平衡负载导致的三相不平衡工况，采用正负序分别控制的方法实现了非理想工况下微电网的同步互联。仿真结果验证了该方案的可行性。

关键词：交直流混合微电网；AC/DC 双向功率变换器；下垂控制；同步互联；不平衡工况

Bidirectional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid

JIAO Jiao, MENG Runquan, REN Chunguang, DU Yi

(Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to realize the reliable grid connection of an AC/DC hybrid microgrid, a control strategy for a bidirectional AC/DC interlinking converter connected to an AC-DC subnet in a hybrid microgrid is proposed based on a droop control strategy in the microgrid and a pre-synchronization working principle. In the island/grid-connected mode, the bidirectional droop control is used to achieve bidirectional power flow. When the island mode is changed to the grid-connected mode, the amplitude and phase synchronization can be realized by eliminating the voltage deviation of the dq axis without obtaining phase information through phase-locked loop to realize smooth grid-connection. At the same time, for the three-phase unbalanced conditions caused by an unbalanced load in the microgrid, the method of positive and negative sequence control is adopted to realize the synchronous interconnection of the microgrid under non-ideal conditions. Simulation results verify the feasibility of the proposed scheme.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 201701D121134), National Natural Science Foundation of China (No. U1610121) and Science and Technology Grant Program of Shanxi Province (No. 20181102028).

Key words: AC/DC hybrid microgrid; bidirectional AC/DC interlinking converter; droop control; synchronous interconnection; unbalanced condition

0 引言

随着新能源比重的增加，分布式电源迅速发展。微电网能够集成风电、光伏等分布式电源与储能系统共同调度，有效解决新能源消纳问题[1-3]。

对于包含交流微电网和直流微电网的混合微电网，连接交流母线和直流母线的 AC/DC 双向功率变换器(Bidirectional AC/DC Interlinking Converter, BIC)负责交直流子网之间的功率流动，对系统的电压稳定及电能质量的提高具有重要作用[4-6]。当微电网孤岛运行时，微电网内部分布式电源协调控制维持微网稳定运行[7-9]。当微电网由孤岛模式转到并网模式运行时，由于并网开关两侧可能存在电压差，直接并网易产生冲击电流，造成微电网不稳定甚至互联失败，故需微电网进行预同步控制使得静态开关两侧的电压幅值、相位和频率同步后并网[10-12]。

实现平滑并网需要考虑微电网孤岛模式与预同步的协调控制，一些文献运用双模式控制策略，

基金项目：山西省自然科学基金项目资助(201701D121134)；国家自然科学基金项目资助(U1610121)；山西省科技重大专项资助(20181102028)

但控制策略的切换容易产生瞬态冲击[13-16]。为了避免模式切换造成冲击，文献[17-18]采用下垂控制与预同步控制共同进行调节的策略，但两种控制同时对电压进行调节，容易相互干扰影响同步效果。文献[19]将VSG控制与预同步控制结合，相比下垂控制电压电流的波动小，但对相角测量和通信速度的要求非常高。文献[20]基于逐步追踪思想实现电压幅值和相位的同步，当差值在允许并网范围时进行并网动作，但步长设置不合理容易引起波动。

三相负载不平衡使得实际电网中交流母线电压不平衡的情况普遍存在[21-22]。故需要考虑到非理想工况下的预同步策略。目前的文献研究均针对理想电网进行同步并网控制，对非理想工况的并网研究还较少。文献[23]针对电网相角不平衡工况，通过对冲击电流的计算选择并网的操作相，但只能保证冲击电流最小，并未实现无冲击并网；文献[24]在传统预同步基础上针对弱电网工况引入负序幅值与负序角度调节，但对角度测量的要求精度高。

本文以交直流混合微电网中的 BIC 为研究对象，提出一种并/离网切换控制策略，在孤岛和并网模式下均采用改进的双向下垂控制策略，避免了因控制策略切换带来的冲击问题，同时简化了预同步控制方法，无需通过锁相环获取相位信息，实现平滑并网。针对实际工况存在的三相电压不平衡问题，在预同步控制策略中加入负序控制，提出了一种适用于不平衡电压下的微电网并网预同步控制方法。

1　交直流混合微电网拓扑

图 1 为典型交直流混合微电网拓扑，交流子网中包括风力发电机、燃气轮机及交流负载，直流子网中包括储能电池、光伏发电单元、风力发电机等分布式电源和直流负载。微电网可通过静态开关 STS 与配电网互联。

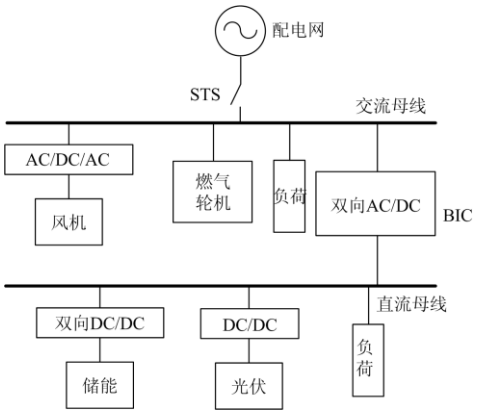


图 1　交直流混合微电网拓扑

Fig. 1 Topology of AC/DC hybrid microgrid

在交直流混合微电网中，交流子网中微源逆变器采用恒功率控制，孤岛运行时交流母线电压由连接交、直流子网的 BIC 进行稳压控制。直流子网中变流器采用下垂控制，直流母线电压由微源输出功率决定。储能装置为微电网系统的备用电源，可通过双向 DC/DC 变换器实现功率双向流动。

2　交直流混合微电网中 BIC 运行模式

微电网的运行模式可分为孤岛运行模式、并网模式和孤岛转并网时的预同步模式。在微电网不同运行模式中，根据交直流子网的负载情况不同，BIC 的控制策略不同。

2.1　孤岛模式控制

孤岛模式下BIC采用下垂控制，在低压微电网中，由于线路等效阻抗呈阻性，更宜采用P-U、Q-δ下垂特性[25]，如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{abc}} = -k_{\mathrm{p}}P_{\mathrm{BIC}} + U^{*}_{\mathrm{abc}} \\ \delta_{\mathrm{abc}} = -k_{\mathrm{q}}Q_{\mathrm{BIC}} + \delta^{*}_{\mathrm{abc}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：U_{abc}、δ_{abc} 分别为交流子网母线电压幅值和相角值；P_{BIC}、Q_{BIC} 分别为 BIC 传输有功功率和无功功率值；U^{*}_{abc}、$\delta^{*}_{\mathrm{abc}}$ 分别为交流子网母线电压额定值和相角基准值；k_{p}、k_{q} 分别为有功功率、无功功率的下垂系数。

规定BIC的传输功率方向由直流侧向交流侧流动为正，孤岛模式下BIC的下垂特性U_{abc}-P_{BIC}如图2所示。

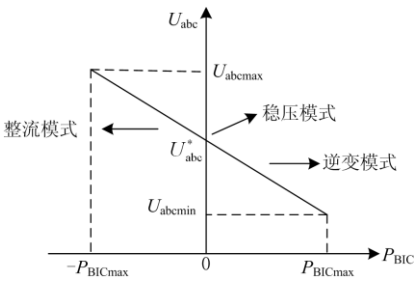


图 2　孤岛模式下 BIC 下垂特性

Fig. 2 BIC droop characteristics in island mode

在孤岛模式下，BIC根据交流子网与直流子网的负载情况，采用双向下垂控制策略调整BIC工作于稳压模式、逆变模式和整流模式。

稳压模式：当各子网内部电源输出的功率能够满足负荷需要，交直流子网独立运行，不进行功率交换，交流侧电压稳定于U^{*}_{abc}，BIC传输功率P_{BIC}=0。

逆变模式：当交流子网负荷功率大于额定功率时，BIC工作于逆变模式，将功率从直流子网传输到交流子网，BIC传输功率P_{BIC}>0。

整流模式：当直流子网负荷功率大于额定功率时，BIC 工作在整流模式，将功率从交流子网传输到直流子网，BIC 传输功率 P_{BIC}<0。

根据式(1)设计孤岛模式下的下垂控制器如图3所示。u_{dc}为直流母线电压；C_{dc}为直流侧电容；S_1~S_6为逆变桥；L为滤波电感；C为滤波电容；$\boldsymbol{i}_L$为滤波电感电流；$\boldsymbol{i}_{abc}$为BIC输出端电流；$\boldsymbol{u}_{abc}$为交流子网母线电压；$\boldsymbol{u}_{gabc}$为网侧交流母线电压；STS为并离网切换静态开关。

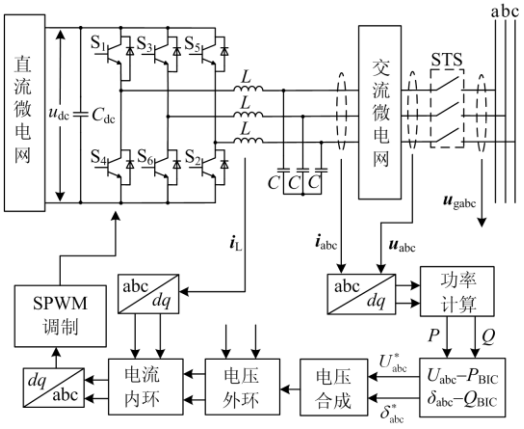


图 3 BIC 拓扑结构及孤岛模式下的控制策略

Fig. 3 Topology of BIC and control strategy in island mode

2.2 预同步模式控制

2.2.1 预同步控制原理

微电网并网互联时，开关两侧电压需满足幅值、频率和相位相同，才能实现孤岛到并网模式的平滑过渡。由于相位的实时同步意味着频率也已经同步，电压预同步部分包括幅值同步与相位同步[26-27]。

传统相位预同步控制方法[17]如图4所示。通过锁相环(PLL)采集并网开关两侧电压的相位信息获取相位差$\Delta\delta$，经过PI控制器得到相位补偿量δ_c，当$\Delta\delta$=0时，实现相位的同步。由于锁相环中含有PI控制器，其中积分控制器部分虽然能有效消除静差，但存在延时，会影响角度采集的实时性。

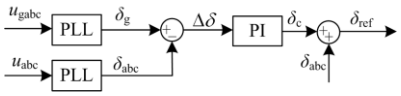


图 4 传统相位同步控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of traditional phase synchronization control strategy

根据锁相环的原理，锁相环通过同步 q 轴信息使 u_q=0 来实现相位锁定[28]。图 5 为两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系和同步 dq 坐标系中的实际电压矢量 $\boldsymbol{u}_o$ 与锁相环输出电压矢量 $\boldsymbol{u}_{pll}$ 的位置关系图。根据锁相环工作的性能要求，必须使矢量 $\boldsymbol{u}_o$、$\boldsymbol{u}_{pll}$ 完全重合才能实现相位锁定。假设 dq 坐标系中以 d 轴为定向，三相对称电压 $\boldsymbol{u}_o$ 的 dq 轴分量表达式如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\delta-\delta_{pll}) \\ \sin(\delta-\delta_{pll}) \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos[(\omega-\omega_{pll})t+\varphi_{error}] \\ \sin[(\omega-\omega_{pll})t+\varphi_{error}] \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：u_{od}、u_{oq} 分别为三相电压 $\boldsymbol{u}_o$ 在 dq 坐标系中的 d、q 轴分量；U 为三相电压 $\boldsymbol{u}_o$ 有效值；δ、δ_{pll} 分别为三相电压瞬时相位值和锁相环输出相位值；ω、ω_{pll} 分别为三相电压角频率和锁相环输出角频率；φ_{error} 为电网电压矢量实际相角与锁相环输出相角的初始相位差。

故当矢量 $\boldsymbol{u}_o$、$\boldsymbol{u}_{pll}$ 完全重合时，其在 d 轴和 q 轴的分量相同。当频率、相位完全锁定，δ=δ_{pll}、ω=ω_{pll}、φ_{error}=0，此时 u_d=U 且 u_q=0。

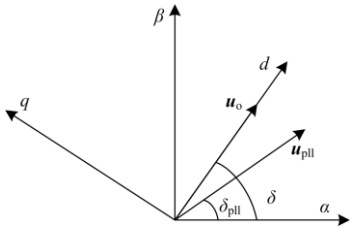


图 5 电压矢量位置关系图

Fig. 5 Voltage vector position diagram

类比于锁相环原理，当 BIC 出口侧电压 $\boldsymbol{u}_{abc}$ 和网侧电压 $\boldsymbol{u}_{gabc}$ 完全重合时，其在 d 轴和 q 轴的分量相同，故可通过闭环控制实时同步 dq 轴的电压信息进行预同步，省去了锁相环部分，其实质减少了一个 PI 控制器，使得同步时间缩短。

2.2.2 平衡工况下的预同步模式控制

本文采用的预同步控制框图如图 6 所示。采用电压电流双闭环控制策略。其中电压外环采用 PI 控制，分别实现 d 轴和 q 轴电压的跟踪，电流内环也采用 PI 控制，以提高系统的动态响应性能。

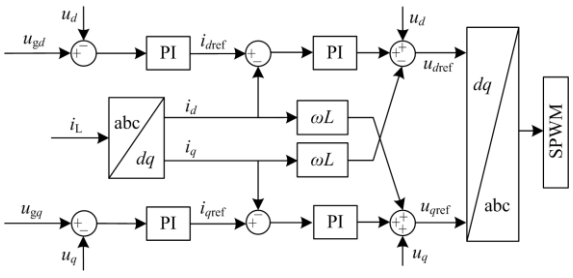


图 6 平衡工况下的预同步控制方法

Fig. 6 Pre-synchronization control method under balanced conditions

平衡工况下，电压只存在正序分量，分别采集并网开关两侧的电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 和 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{gabc}}$ 进行坐标变换得到其 d、q 轴分量 u_d、u_q 和 u_{gd}、u_{gq}，d、q 轴电压差值经过 PI 控制后输出电流指令值进入电流内环。当 $u_d=u_{\mathrm{gd}}$ 且 $u_q=u_{\mathrm{gq}}$ 时，电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 与 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{gabc}}$ 完全重合，实现幅值与相位的同步。当电网电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{gabc}}$ 与 d 轴同轴时，$u_d=u_{\mathrm{gd}}$ 时实现幅值同步，$u_q=u_{\mathrm{gq}}$ 时实现相位同步。由于该同步控制策略已经包含了电压锁相功能，故无需通过锁相环获取相位信息。

2.2.3 不平衡工况下的预同步模式控制

在实际工况中，考虑到所并电网交流母线电压不平衡问题，要求 BIC 输出与网侧相同的非理想电压，保证可靠并网。假设由于不平衡负载导致 A 相电压跌落，其三相表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} u_{\mathrm{a}}=(1-k)U_{\mathrm{m}}\sin\delta \\ u_{\mathrm{b}}=U_{\mathrm{m}}\sin(\delta-\dfrac{2\pi}{3}) \\ u_{\mathrm{c}}=U_{\mathrm{m}}\sin(\delta+\dfrac{2\pi}{3}) \end{cases} \tag{3}$$

式中：k 为常数，表示电压不平衡程度；U_{m} 为三相电压幅值；将三相电压变换到两相同步旋转 dq 坐标系中，得

$$\begin{cases} u_d=U_{\mathrm{m}}(1-\dfrac{2}{3}k\sin^2\delta) \\ u_q=-\dfrac{k}{3}U_{\mathrm{m}}\sin 2\delta \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可知，在不平衡工况下电压的 dq 轴分量均为交流量，若采用图 6 预同步控制方法，运用 PI 控制器会导致同步结果出现静差，影响并网精度。故需要将不平衡分量进行正负序分离。

根据对称分量理论，由于三相三线制变换器没有中性线，在不考虑零序分量的情况下，并网开关两侧的电压可表示为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{abc}}=u^{+}_{\mathrm{abc}}+u^{-}_{\mathrm{abc}} \\ u_{\mathrm{gabc}}=u^{+}_{\mathrm{gabc}}+u^{-}_{\mathrm{gabc}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：u^{+}_{abc}、u^{+}_{gabc} 为正序电压分量；u^{-}_{abc}、u^{-}_{gabc} 为负序电压分量。

本文采用改进的二阶广义积分器(SOGI-QSG)实现对正负序分量的提取[29]，通过对电压向量产生 90º 的相移实现正、负序分量的分解。由于分离后的正负序分量均为三相对称正弦波，在两相同步旋转 dq 坐标系中为直流量，故通过同步正负序下的 dq 轴分量可实现不平衡工况下的正序同步和负序同步。当预同步成功时有

$$\begin{cases} u^{+}_{\mathrm{abc}}=u^{+}_{\mathrm{gabc}} \\ u^{-}_{\mathrm{abc}}=u^{-}_{\mathrm{gabc}} \end{cases} \tag{6}$$

不平衡工况下的预同步控制方法如图 7 所示，通过分别消除正序与负序分量在 d、q 轴上的电压偏差，实现正、负序分量幅值与相位的同步。电压差值经过电压外环和电流内环控制分别得到正序参考电压指令值 u^{+}_{ref} 和负序参考电压指令值 u^{-}_{ref}，通过叠加作用合成不平衡电压指令值 u_{ref} 作为输出电压调制信号。

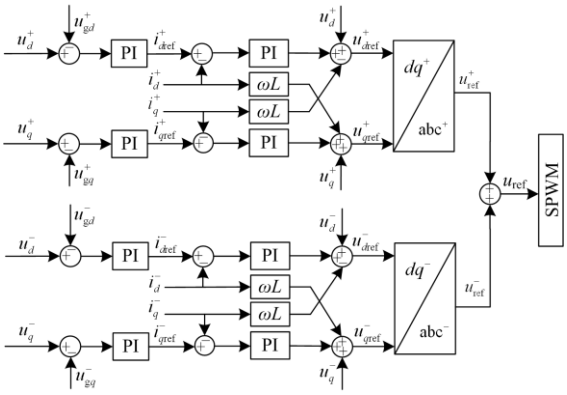


图 7 不平衡工况下的预同步控制方法

Fig. 7 Pre-synchronization control method under unbalanced conditions

2.3 并网模式控制

并网模式下，交流子网的电压和频率由配电网支撑，BIC根据直流子网负载情况决定功率流向，可分为逆变模式和整流模式。

并网模式下BIC的下垂特性如式(7)所示。

$$U_{\mathrm{dc}}=k_{\mathrm{dc}}P_{\mathrm{BIC}}+U^{*}_{\mathrm{dc}} \tag{7}$$

式中：U_{dc}为直流母线电压实际值；U^{*}_{dc} 为直流母线电压额定值；k_{dc}为有功功率下垂系数。

BIC 在并网模式下的下垂特性 U_{dc}-P_{BIC} 如图 8 所示，根据式(7)设计并网模式下的下垂控制器如图 9 所示。

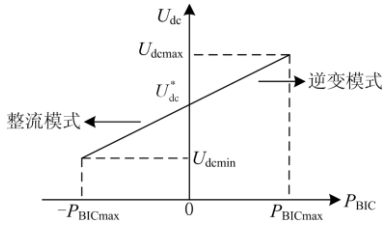


图 8 并网模式下 BIC 下垂特性

Fig. 8 BIC droop characteristics in grid-connected mode

当直流子网内部供需平衡时，直流母线电压为额定值，此时 BIC 不传输功率。

逆变模式：当直流子网负荷功率小于额定功率时，直流母线电压上升，BIC 工作于逆变模式，将电源输出的多余功率传输给交流侧，BIC 传输功率 $P_{BIC}>0$。

整流模式：当直流子网负荷功率大于额定功率时，直流母线电压下降，BIC 工作于整流模式，由交流侧通过 BIC 传输直流子网所需功率，BIC 传输功率 $P_{BIC}<0$。

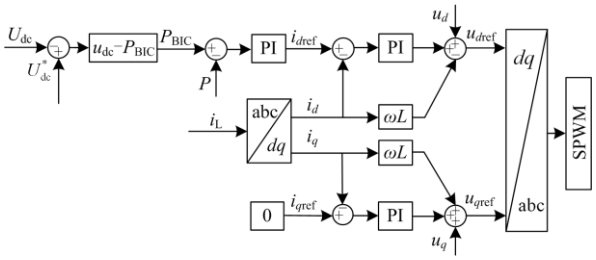


图 9 并网模式下 BIC 控制策略

Fig. 9 Control strategy of BIC in grid-connected mode

3 仿真结果分析

为验证本文所提 BIC 三个运行模式下控制策略的有效性，基于 Matlab/Simulink 仿真软件进行验证。仿真模型搭建参见图 3，系统参数设置见表 1。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值
直流子网额定电压 U_{dc}/V	800
交流子网额定电压幅值 U_{abc}/V	311
交流子网频率 f/Hz	50
直流侧电容 C_{dc}/μF	1 400
滤波电感 L/mH	5
滤波电容 C/μF	40
孤岛模式有功下垂系数 k_p	0.002 5
并网模式有功下垂系数 k_{dc}	0.001 1

3.1 孤岛模式控制

3.1.1 孤岛模式下 BIC 工作于稳压模式

设置直流子网额定功率为 20 kW，最大可输出功率为 28 kW，交流子网最大可输出功率为 30 kW。当交、直流子网负荷功率均小于额定功率时，直流母线电压升高，BIC 工作于稳压模式，P_{BIC}=0。仿真波形如图 10 所示。

3.1.2 孤岛模式下 BIC 工作于逆变模式

初始时刻直流子网负载为 10 kW，交流子网负载为 28 kW，BIC 工作于稳压模式。0.1 s 时交流子网负载增加 10 kW， BIC 工作于逆变模式，由直流子网补充交流子网所需功率，仿真波形如图 11 所示。由于下垂特性，直流母线电压幅值下降为 810 V，交流母线电压幅值下降为 304 V，BIC 传输功率 P_{BIC}=6.5 kW。

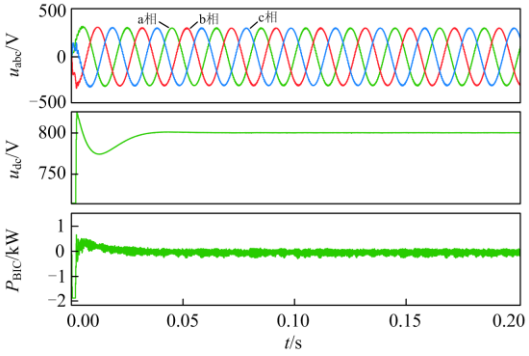


图 10 孤岛模式下稳压控制仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of voltage regulator control in island mode

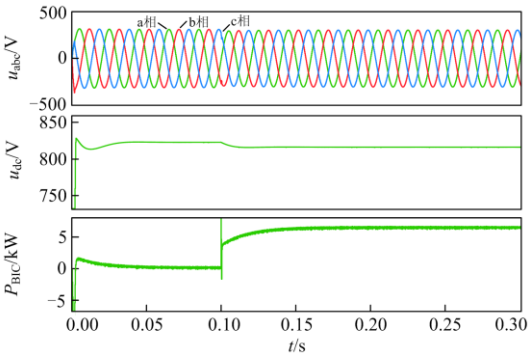


图 11 孤岛模式下逆变控制的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of inverter control in island mode

3.1.3 孤岛模式下 BIC 工作于整流模式

初始时刻直流子网负载为 20 kW，交流子网负载为 20 kW，BIC 工作于稳压模式。0.1 s 时直流子网负载增加 15 kW，超出直流子网容量。此时 BIC 工作于整流模式，仿真波形如图 12 所示，直流电压下降为 780 V，交流电压幅值上升为 316 V，BIC 传输功率 P_{BIC}=−4.3 kW。

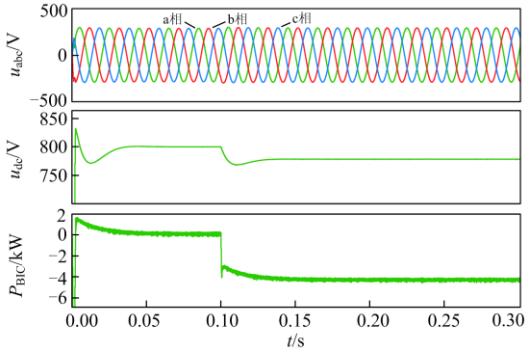


图 12 孤岛模式下整流控制的仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of rectification control in island mode

3.2 预同步模式控制

3.2.1 平衡工况下的预同步控制

图 13 为 BIC 未采用预同步控制的仿真波形，在 0.2 s 时刻进行并网，由于开关两侧有幅值差和相位差，并网电流 i_{gabc} 在并网时刻产生约 50 A 的冲击。图 14 为 BIC 在 0.2 s 时刻采用图 6 预同步控制方法的仿真波形。

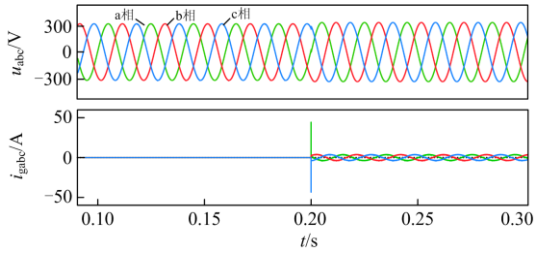


图 13 未采用预同步控制的仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform without pre-synchronization control

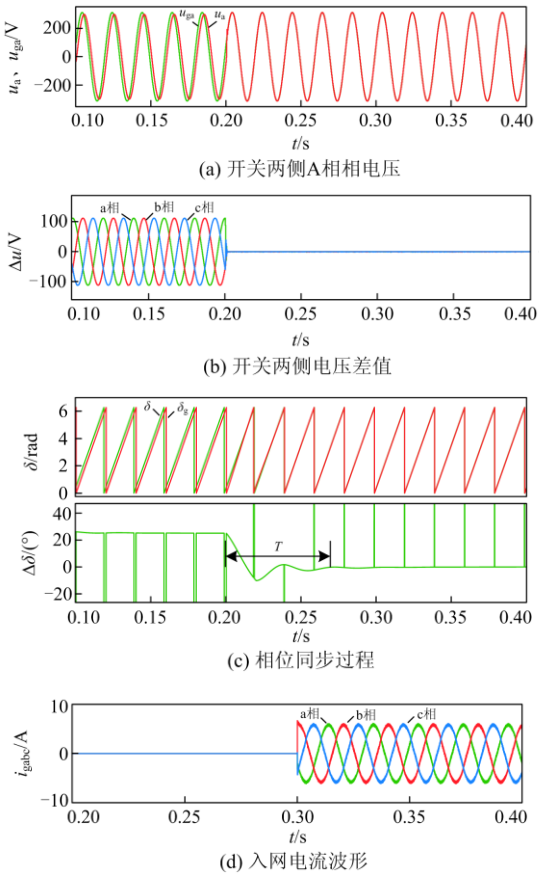


图 14 平衡工况下预同步过程仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of pre-synchronization process under balanced conditions

从图 14 可以看出，利用本文所提的预同步控制策略，大约经过 T=0.07 s 的预同步时间，能够实现电压幅值和相位的同步。设置在 0.3 s 时闭合静态开关，并网电流如图 14(d)所示，与图 13 相比，并网时刻的冲击明显减小。而传统锁相环预同步控制由于积分控制器的延时性，预同步时间大约需要 0.13 s[17]，对比可得本文所提预同步控制方法能够减少延时，缩短预同步时间。

3.2.2 不平衡工况下的预同步控制

当电网中存在单相负载或不平衡负载时，交流母线三相电压不平衡。图 15 为不平衡工况下 BIC 采用图 6 预同步方法时开关两侧电压差的变化波形，可以看出，在 0.2 s 时采用平衡工况下的预同步控制方法虽然能减小电压差，但仍存在静差。

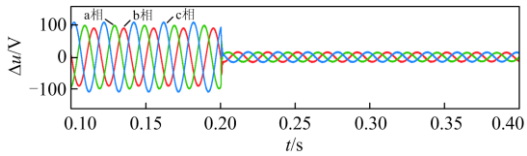
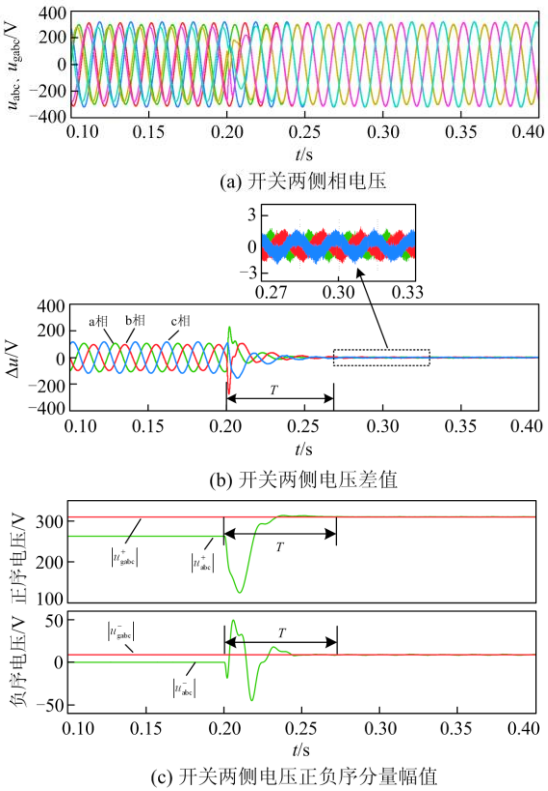
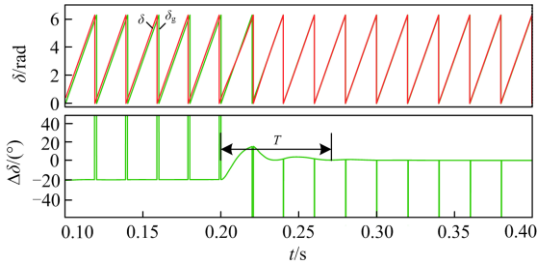


图 15 不平衡工况下采用图 6 预同步方法开关两侧电压差

Fig. 15 Voltage difference with pre-synchronization method in Fig. 6 under unbalance condition

图 16 为 BIC 采用图 7 所示的预同步方法进行不平衡工况下电压同步的仿真结果。0.2 s 开始预同步，经过 T=0.07 s 的预同步时间，开关两侧电压差值在 2 V 左右，电压幅值与相位均实现同步，验证了图 7 预同步方法的有效性。



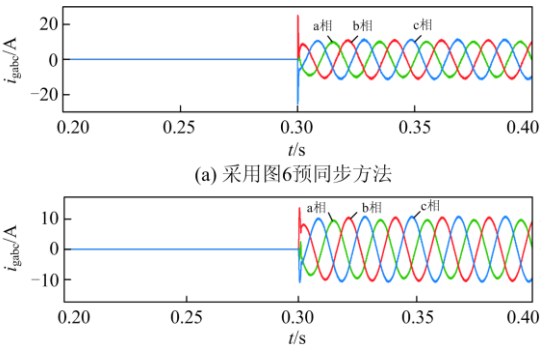


(d) 相位同步过程

图 16 不平衡工况下采用图 7 预同步方法仿真波形

Fig. 16 Simulation waveforms with pre-synchronization method in Fig. 7 under unbalance condition

图 17 为不平衡工况下采用两种预同步控制方法后在 0.3 s 时刻并网的入网电流，通过对比可看出存在静差时进行并网仍会有电流冲击，而采用图 7 的正负序分离预同步控制方法可以有效减少并网电流冲击。



(a) 采用图6预同步方法

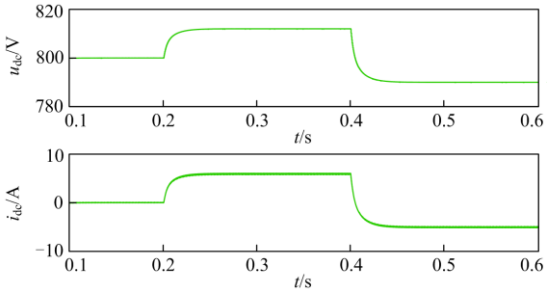
(b) 采用图7预同步方法

图 17 不平衡工况下采用两种预同步方法的并网电流波形

Fig. 17 Grid-connected current waveforms using two pre-synchronization methods under unbalanced conditions

3.3 并网模式控制

当微电网预同步并网后，BIC 根据直流母线电压情况进行双向功率传输。初始时刻直流子网稳定运行于额定值 800 V，直流子网功率平衡。0.2 s 时直流子网轻载，直流母线电压升高，BIC 工作于逆变模式，将多余功率传输给交流子网，0.4 s 时直流子网重载，直流母线电压降低，BIC 工作于整流模式，由交流子网补充所需功率。仿真波形如图 18 所示。



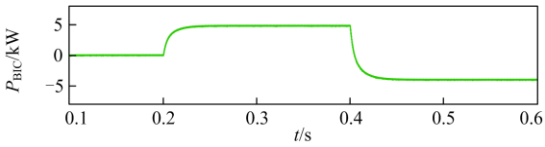


图 18 并网模式仿真波形

Fig. 18 Simulation waveform in grid-connected mode

4 结论

本文针对交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变换器，研究其孤岛运行、并网运行以及并网时的预同步过程，由理论分析和仿真结果可得以下结论：

(1) 孤岛模式和并网模式下，通过采用双向下垂控制策略实现功率双向流动。在孤岛模式转并网模式的预同步过程中，根据锁相环原理利用 *dq* 轴电压同步实现幅值与相位同步，避免由相角测量精度不准带来的同步误差，同时省去锁相环，简化了控制，实现简单。

(2) 考虑到三相电压不平衡的实际工况，将不平衡电压分解为三相对称正弦波，在平衡工况下预同步策略基础上，采用正负序分离控制的方法将控制量由交流量变为直流量，实现非理想工况下微电网的同步并网。

参考文献

[1] 王成山，武震，李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 59-68.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 59-68.

[2] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/ s41601-018-0093-1.

[3] 程启明，程尹曼，黄山，等. 微电网经济优化运行综述[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 1-9.
CHENG Qiming, CHENG Yinman, HUANG Shan, et al. Summary on economic optimal operation of micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 1-9.

[4] 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.

[5] 李瑞生，马凯琪，于芃，等. 交直流混合微电网系统建

模及协调控制研究[J]. 电测与仪表，2017，54(20): 92-99.
LI Ruisheng, MA Kaiqi, YU Peng, et al. Research of system modeling and coordination control of hybrid AC/DC micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(20): 92-99.

[6] 程启明，孙伟莎，谭冯忍，等. 基于变功率与直流电压组合控制的混合微电网协调控制[J]. 广东电力，2018，31(4): 16-20.
CHENG Qiming, SUN Weisha, TAN Fengren, et al. Coordinated control of hybrid micro-grid based on variable power control and dc voltage control[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 16-20.

[7] 颜湘武，王月茹，王星海. 微网孤岛运行模式下新型频率控制方法[J]. 电力科学与技术学报，2018，33(1): 11-15.
YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai. A novel frequency control method for micro-grid in islanding operating mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 11-15.

[8] 刘佳易. 交直流混合微电网中双向 AC/DC 功率变换器控制策略研究[D]. 太原：太原理工大学, 2014.
LIU Jiayi. Research on the control method of interlinking-converter in hybrid microgrid[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.

[9] 李昊，王杰. 基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 11-19.
LI Hao, WANG Jie. Modified droop control based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 11-19.

[10] 袁昊哲，杨苹. 串联结构多微网并离网模式切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 94-100.
YUAN Haozhe, YANG Ping. Grid-connected and off-grid mode switching control strategies of multi-microgrid with series structure[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 94-100.

[11] 杨亮，王聪，吕志鹏，等. 基于同步逆变器的预同步并网方式[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3103-3108.
YANG Liang, WANG Cong, LÜ Zhipeng, et al. The method of pre-synchronized grid-connection of synchronverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3103-3108.

[12] 徐晓宁，周雪松. 微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2754-2760.
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for micro grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2754-2760.

[13] 刘正英，徐昊亮，杨昌海，等. 含串联组合型微源的微网模式平滑切换控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 151-155.
LIU Zhengying, XU Haoliang, YANG Changhai, et al. Research on the smooth switching control method of micro-grid with series combination of micro-source[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 151-155.

[14] 王明玥，罗安，陈燕东，等. 三相逆变器的双模式及其平滑切换控制方法[J]. 电工技术学报，2016，31(16): 124-134.
WANG Mingyue, LUO An, CHEN Yandong, et al. The dual-mode control and seamless transfer control method of three-phase inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 124-134.

[15] 田梁玉，唐忠，田晨，等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1285-1290.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, TIAN Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290.

[16] 毕大强，周稳，戴瑜兴，等. 交直流混合微电网中储能变流器无缝切换策略[J]. 电力系统自动化，2016，40(10): 84-89.
BI Daqiang, ZHOU Wen, DAI Yuxing, et a1. Control strategies of seamless switching for energy storage converter in hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 84-89.

[17] 许胜，曹武，赵剑锋. 微网稳定运行与模式平滑切换综合控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 1-13.
XU Sheng, CAO Wu, ZHAO Jianfeng. Integrated control strategy of mierogrid steady operation and mode smooth switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): l-13.

[18] TALAPUR G G, SURYAWANSHI H, XU L, et al. A reliable micro-grid with seamless transition between grid connected and islanded mode for residential community with enhanced power quality[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, PP(99): 1-1.

[19] 胡实，袁旭峰，朱余林，等. 微网运行模式无缝切换控制技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 56-67.
HU Shi, YUAN Xufeng, ZHU Yulin, et al. Research on seamless switching control technology of micro-grid operation mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 56-67.

[20] 翟登辉，王鹏，辛军，等. 具备 VSG 特征并网变流器的预同步及主动孤岛判别方法研究[J]. 电测与仪表，2018, 55(15): 58-64.
ZHAI Denghui, WANG Peng, XIN Jun, et al. Research

on pre-synchronization and islanding identification method of converter with VSG characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(15): 58-64.

[21] 郭文娇, 任春光, 王 磊, 等. 电压不平衡时交直流双向功率变换器的控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 925-930.
GUO Wenjiao, REN Chunguang, WANG Lei, et al. Control method of bidirectional AC/DC converter with unbalanced voltage in hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 925-930.

[22] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 电网电压不平衡和谐波畸变下新型并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 108-115.
WANG Jiahao, PAN Huan, NA Chunning. A new grid-connected phase-locked loop design under grid voltage imbalance and harmonic distortion conditions[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 108-115.

[23] 海涛, 闭耀宾, 骆武宁, 等. 准同期并网中三相不平衡问题的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 70-73.
HAI Tao, BI Yaobin, LUO Wuning, et al. Optimized strategy of three-phase unbalance in synchronized grid-connected[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 70-73.

[24] 梁建钢, 金新民, 荆龙, 等. 微电网系统准同期并网改进控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3071-3078.
LIANG Jiangang, JIN Xinmin, JING Long, et al. An improved control strategy for quasi-synchronous grid-connection of microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3071-3078.

[25] 阚加荣, 谢少军, 姚志垒, 等. 低压微电网中并网逆变器主动移频式孤岛检测技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 33-37.
KAN Jiarong, XIE Shaojun, YAO Zhilei, et al. An islanding detection method on active frequency drifting for grid-connected inverters in low voltage microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 33-37.

[26] 郑文迪, 刘丽军, 曾静岚. 采用改进相位控制方法的微网并网/孤岛平滑切换策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1155-1162.
ZHENG Wendi, LIU Lijun, ZENG Jinglan. Smooth switching strategy between grid-connected and islanded microgrid using improved phase control method[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1155-1162.

[27] 赵晋斌, 张帅涛, 王金龙, 等. 入网电压控制型逆变器预同步研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3278-3286.
ZHAO Jinbin, ZHANG Shuaitao, WANG Jinlong, et al. Research on pre-synchronizing control of voltage-controlled inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3278-3286.

[28] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 308-312.

[29] 郭凯, 程启明, 程尹曼, 等. 基于改进型软件锁相环的正负序分量分离新方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(2): 12-17.
GUO Kai, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. Study on new separation method of positive and negative sequence components based on improved software phase-locked loop[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(2): 12-17.

收稿日期：2019-09-16；　　修回日期：2019-12-17

作者简介：

焦　皎(1994—)，女，硕士，研究方向为电力电子控制技术；E-mail: jiaojiao9406@163.com

孟润泉(1968—)，男，通信作者，博士，副教授，研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用研究。E-mail: mengrunquan@126.com

(编辑　魏小丽)