

# 考虑非计划孤岛的分布式电源 无缝切换控制策略

钟 诚 魏 来 严干贵 贾 祺

(东北电力大学电气工程学院 吉林 132012)

**摘要** 为提高本地负载的供电安全,分布式发电(DG)并网逆变器需要工作在并网和离网两种状态,且能无缝切换。提出一种综合的 DG 无缝控制策略。针对非计划孤岛 DG 从并网切换离网状态存在失控区域,易引起本地负载电压和频率越限问题,提出采用  $P-\sigma$ 、 $Q-v$  解耦的非线性控制,实现失控期间的直接电压限幅;提出结合锁频环和去除积分前向通道的锁相环,在不影响锁相环动态特性基础上,实现失控区域的频率限幅。另外,在该控制结构基础上提出一种虚拟并网的预同步方法,避免并网开关闭合时内外环失配,改善并网过渡过程。基于 RT-LAB 的硬件在环仿真验证了该策略的有效性。

**关键词:** 无缝切换 非计划孤岛 解耦控制 锁相环 预同步

**中图分类号:** TM464

## A Seamless Transfer Control Strategy of Distributed Generation with Considering Unintentional Islands

Zhong Cheng Wei Lai Yan Gangui Jia Qi

(School of Electrical Engineering Northeast Electric Power University Jilin 132012 China)

**Abstract** In order to improve the power supply security of local load, grid-tied inverter of DG system need to work in both grid-tied and off-grid state, and need seamless switching between two states. This paper proposes a comprehensive seamless transfer control strategy. When unintentional island occur and DG need switch from grid-tied to off-grid state, it is easy to exist out of control area and cause the local load voltage and frequency out-limit. A decoupling  $P-\sigma$ ,  $Q-v$  control strategy is adopted to realize direct limit voltage during out of control area. And an improved phase-locked loop (PLL) algorithm is proposed to avoid frequency out of limited by combining the frequency lock loop (FLL) and improved phase locked loop (PLL). Also, an improved pre-synchronization method based on virtual grid-connected is proposed to reduce transient process time when DG transfer form island to grid-connected mode. Hardware-in-the-loop (HIL) simulation based on the RT-LAB is carried out to verify the effectiveness of the proposed strategy.

**Keywords:** Seamless transfer, unintentional islands, decoupled control, phase locked loop, pre-synchronization

## 0 引言

为应对一次能源短缺和环境污染问题,分布式发电(Distributed Generation, DG)逐渐兴起并得到广泛关

注<sup>[1]</sup>。近年来,为提高 DG 对电网的适应性和本地重要负荷的供电安全,“双模式逆变器”和“无缝切换”概念<sup>[2-4]</sup>被提出,即要求 DG 能够同时工作在并网模式和孤岛(离网)状态,且能在两种状态之间平滑过渡。

目前,大部分的无缝切换控制策略是基于模式切换思想。在并网状态时 DG 工作在恒功率控制模式,

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB228201)和国家自然科学基金(51277024)资助项目。

收稿日期 2016-09-23 改稿日期 2016-12-27

而离网时工作在恒电压控制模式,并/离网状态切换时需转换控制模式。文献[2,3]中提出状态切换时,将并网状态下的电流控制器输出值传递给离网电压控制器作为积分初值,避免控制量突变而产生畸变;文献[4,5]通过修改锁相环来平滑模式切换过程;文献[6]采用无锁相环结构,改善微电网从孤岛切换到并网的同步过程;文献[7]采用虚拟同步机控制(Virtual Synchronous Generator, VSC)和PQ控制环并行运行方式,在状态切换时刻选择相对应控制器的输出量来控制逆变器;文献[8]提出基于电压、电流加权的平滑控制方法,来抑制切换时的控制量突变;文献[9]在模式切换过程中插入abc坐标系控制模式,改善电网电压不对称故障时的切换过程。上述方法都需要准确的孤岛时刻来进行控制模式转换或引入过渡控制。但当电网发生非计划孤岛时,受孤岛检测时间、开关动作时间等影响,很难确切地获取孤岛发生时刻<sup>[10,11]</sup>。

一些学者致力于提出控制模式自动切换的无缝切换控制策略。文献[10,11]提出dq坐标系下的电容电压间接控制策略,通过控制电容电压来间接控制并网电流,当发生非计划孤岛时,通过限幅器来避免电压越限;文献[12]也采用间接控制,不同之处是该文献直接控制负载电压,且增加电容电流内环来改善控制稳定;文献[13]提出一种统一控制策略,并网时,电压外环自动饱和和失效, DG 工作在电流控制模式,而孤岛发生电压外环退出饱和, DG 工作在电压控制模式。

另外,一些学者提出 DG 的单模式控制策略,在并网/离网状态采用相同的控制策略。文献[14,15]采用非线性下垂控制,减小切换过程中电压/频率波动;文献[7,16-18]采用基于虚拟同步机思想的控制策略。但是,该类方法的并网功率外环通常是开环控制,对单个 DG 系统而言,较难保证其并网功率和离网电压恒定,更适合多个 DG 微电网场景。

综上所述,为改善单个 DG 在非计划孤岛下时的切换过程,本文提出基于  $P-\sigma$ 、 $Q-v$  解耦的间接电流控制策略及相应的改进锁相环方法。相比于文献[9,10]中的间接控制方法,本文方法可直接限制非计划孤岛切换过程中的电压幅值和频率。另外,在该控制策略基础上提出一种虚拟并网的预同步方法,简化了控制结构和改善了 DG 并网过渡过程。

## 1 系统及其工作状态

本文研究的系统如图1所示。

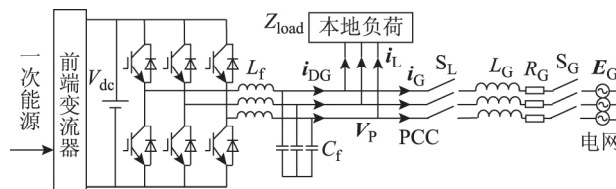


图1 分布式发电系统

Fig. 1 The block diagram of DG system

图1中:一次能源(光伏,风电)等通过前端变换器变换为恒定直流电压 $V_{dc}$ ;并网逆变器采用LC滤波器的三相三桥臂结构; $Z_{load}$ 为本地负荷; $S_L$ 为本地开关,受DG系统控制; $L_G$ 、 $R_G$ 表示并网阻抗,复矢量形式为 $z_G = R_G + j\omega L_G$ ;  $S_G$ 为电网侧保护开关,不受本地控制器控制,由电网故障触发; $V_P$ 、 $E_G$ 分别为PCC节点电压和电网电压矢量。 $i_{DG}$ 、 $i_L$ 、 $i_G$ 分别为DG输出电流、本地负载电流和DG并网电流矢量。

对应图1中开关 $S_L$ 和开关 $S_G$ 状态不同,该系统存在4种工作状态,如图2所示。

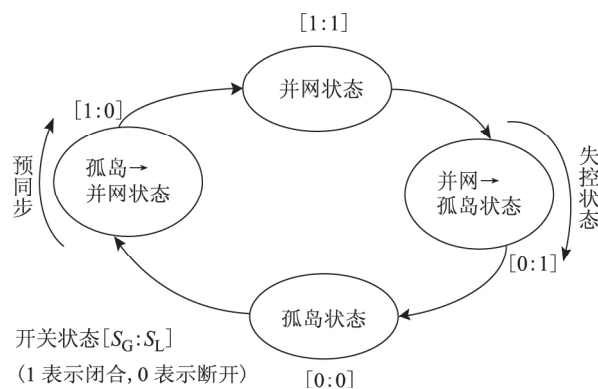


图2 DG系统工作状态示意图

Fig. 2 The block diagram of work-state of the DG system

当 $[S_G: S_L]$ 为 $[1:1]$ 时,系统工作在并网状态,逆变器需要工作在恒功率模式,向电网输送恒定的有功和无功功率;当 $[S_G: S_L]$ 为 $[0:0]$ 时,系统工作在离网状态,逆变器工作在电压控制模式,维持本地负载电压的幅值和频率恒定(备注:要求DG容量大于本地负载容量)。当开关 $[S_G: S_L]$ 为 $[1:0]$ 表示电网恢复供电,逆变器工作在预同步状态,调整逆变器输出电压与电网电压同步。当开关 $[S_G: S_L]$ 为 $[0:1]$ 时,本文将其称为失控状态。这意味着电网发生故障导致 $S_G$ 断开,出现非计划孤岛。受孤岛检测延迟的影响,逆变器无法感知发生孤岛,依然采用在并网状态下的功率控制模式,而PCC节点电压失去电网电压的钳制,易导致PCC节点电压幅值和频率越限,威胁本地负载供电安全。如何安全渡过失控状态,是实现无缝切换的难点。

## 2 控制策略

### 2.1 整体控制框图

本文提出控制策略的整体框图如图3所示。该策略主要包含4个部分：①改进锁相环，主要用于测量电网电压相位；②电网阻抗估算，主要功能是估算电

网线路阻抗；③ $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $v$ 解耦外环控制，主要作用是实现并网状态时DG恒功率控制；④电容电压和电感电流的双环内环控制，主要功能是在孤岛状态时维持PCC节点电压，在并网状态时协同PQ外环实现控制目标。

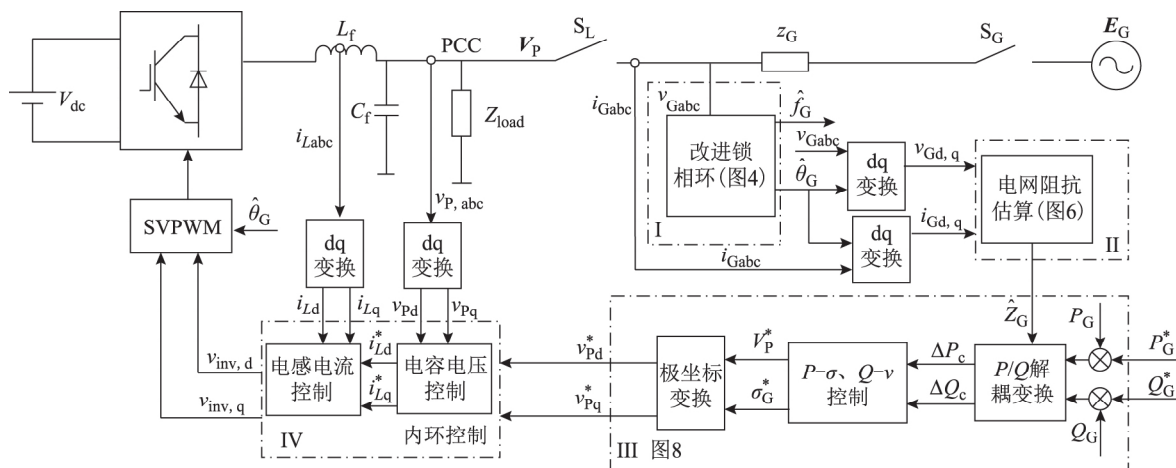


图3 DG的无缝切换控制策略整体框图

Fig. 3 Proposed overall control block diagram for DG seamless transfer

本文主要阐述前三部分的控制实现。而对于第④部分，电容电压和电感电流的双环控制是逆变器较为常用控制方法，可参见文献[5]，故不做进一步阐述。

### 2.2 改进锁相环方法

锁相环测量的电网电压相位 $\hat{\theta}_G$ 是dq变换的基础，是保证并网电流质量和控制稳定的关键环节。锁相环的重要性能是相位跟踪速度和测量精度。但在DG“无缝切换”中，还需考虑一个因素，即避免DG从并网切换到孤岛时的电压频率越限<sup>[10-13]</sup>。文献[10]指出当并网转孤岛时，受输出有功、无功功率变化的影响，PCC节点电压易出现相位突变。而常规dq坐标系下的锁相环通过改变电压频率跟踪相位变化，当相

位突变容易出现过大的频率偏差，威胁本地负载安全。文献[3]的处理方法是在传统的PLL中增加频率限幅环节，但是频率限幅会降低电网相位的跟踪速度，甚至导致系统失稳。文献[10]提出假定电网频率不变，采用相位跟踪的改进锁相环方法，但其缺点是无法对电网频率进行跟踪，当电网频率发生变化时，易导致锁相环中的积分器饱和而无法跟踪相位。

基于以上考虑，本文提出结合文献[19]中的DSOGI-FLL和文献[20]中基于相位跟踪的锁相环的改进锁相环方法，更适合于DG无缝切换的应用场景，如图4所示。

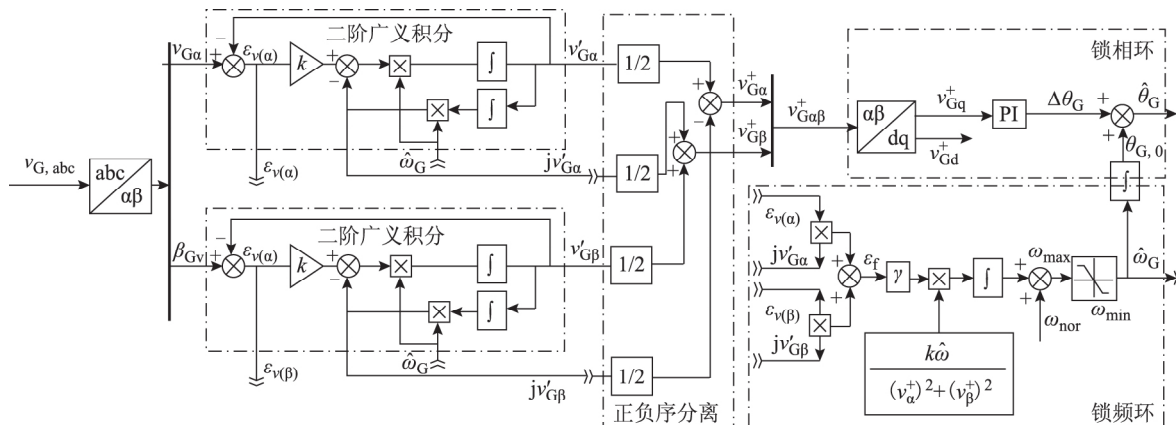


图4 锁相环方法

Fig. 4 Proposed phase-locked loop

图4中,  $v_{G,abc}$  为电网三相电压, 经过 Clarke 变换后得到  $\alpha\beta$  坐标系下的分量  $v_{G\alpha}$  和  $v_{G\beta}$ 。  $v_{G\alpha}$ 、 $v_{G\beta}$  经过二阶广义积分 (Second Order Generalized Integral, SOGI) 滤波后, 得到与输入同相位的分量  $v'_{G\alpha}$  和  $v'_{G\beta}$ , 及与其正交的分量  $jv'_{G\alpha}$ 、 $jv'_{G\beta}$ 。  $k$  为 SOGI 调节系数, 本文取  $\sqrt{2} \cdot \varepsilon_{i(\alpha)} \setminus \varepsilon_{i(\beta)}$  分别为  $v_{G\alpha}$ 、 $v_{G\beta}$  经过 SOGI 滤波后在  $\alpha$ 、 $\beta$  坐标轴的电压偏差。  $v'_{G\alpha}$ 、 $v'_{G\beta}$  和  $jv'_{G\alpha}$ 、 $jv'_{G\beta}$  经过正负序分离环节后得到正序分量  $v_{G\alpha}^+$  和  $v_{G\beta}^+$ 。  $v_{G\alpha}^+$  和  $v_{G\beta}^+$  经过 dq 变换得到  $v_{Gq}^+$ 、 $v_{Gd}^+$ 。  $v_{Gq}^+$  作为锁相环的输入, 当 PLL 估算相位  $\hat{\theta}_G$  与电网相位相等,  $v_{Gq}^+$  为零。  $\Delta\theta_G$  为 PI 控制器输出的调整相位,  $\hat{\omega}_G$  为估算电网角频率。  $\varepsilon_f$  为频率偏差, 当锁频环 (Frequency-Locked Loop, FLL) 估算频率  $\hat{\omega}_G$  与电网实际频率相等时,  $\varepsilon_f$  为零。  $\gamma$  为 FLL 调节系数, 本文取 50。  $\hat{\omega}_G$  反馈给 SOGI 来调整谐振频率, 改善滤波效果。

FLL 中, 采用限幅器用来限制频率的波动范围。依据《电能质量供电电压允许偏差》(GB 12325—90) 规定, 电压正常频率应保持在  $(50 \pm 0.2)$  Hz。但是, 限制频率变化范围会降低 FLL 的跟踪速度。为此, 本文后续采用基于直接相位跟踪的锁相环 PLL<sup>[24]</sup> 来改善这一个缺陷。

图4的 PLL 环节中, PI 控制器输出直接为  $\Delta\theta_G$ , 与常规的 dq-PLL 相比, 减少了一个前向支路的积分环节, 提高了相位的跟踪速度<sup>[24]</sup>,  $\Delta\theta_G$  叠加到  $\hat{\omega}_G$  积分得到的初始相位  $\theta_{G,0}$  上, 获得估算相位  $\hat{\theta}_G$ 。

减少前向积分环节的锁相环的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p s + k_i}{(K_p + 1)s + k_i} \quad (1)$$

式中,  $k_p$  为比例系数;  $k_i$  为积分系数。

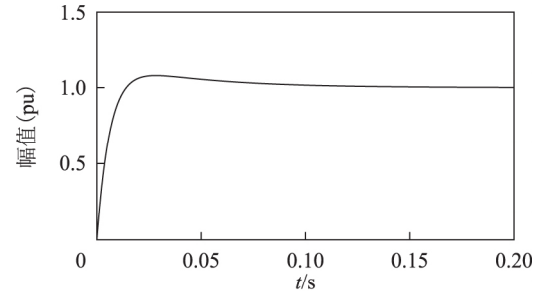
传统锁相环的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p s + k_i}{s^2 + K_p s + k_i} \quad (2)$$

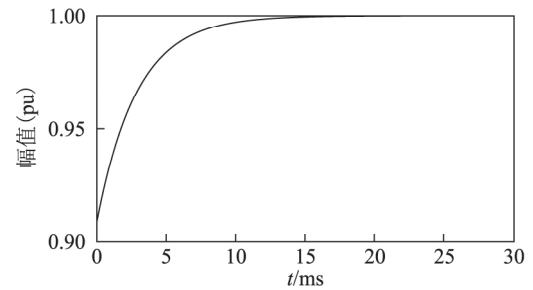
对于式(1), 选择  $k_p = 10$ ,  $k_i = 3\ 200$ , 对于式(2), 选择  $k_p = 180$ ,  $k_i = 3\ 200$ , 阶跃响应曲线如图5所示。

由图5可知, 去除积分前向通道后, 依然能够实现阶跃信号的无差跟踪, 并且相比传统的 PLL 方法, 具有更快的跟踪速度。但是, 代价是 PLL 由二阶降为一阶, 降低对(扰动)谐波的抑制能力。本文改进的锁相策略中, 前级增加二级广义积分滤波环节, 一定程度上弱化了负面影响。

该改进锁相环中同时考虑电压畸变和相位跟踪速度, 最重要的是通过分离相位跟踪和频率跟踪, 在保证锁相性能的同时, 对频率波动范围进行限制。



(a) 传统锁相环



(b) 去除前向通道锁相环

图5 锁相环阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves of PLL

## 2.3 电网阻抗估算

估算电网阻抗  $\hat{z}_G$  的作用有两个: ①提供给外环功率控制环, 实现有功、无功的功率解耦; ②可以依据  $\hat{z}_G$  的变化进行孤岛判别<sup>[24]</sup>。

假定电网为理想电压源  $E_G$  和阻抗  $z_G$  组成模型, 则 PCC 节点的电压关系为

$$E_G = V_p + I_G z_G \quad (3)$$

式中,  $I_G$  为 PCC 节点电流的复数矢量。

式(3)中,  $V_p$ 、 $I_G$  可以通过测量获得,  $E_G$ 、 $z_G$  为未知量。为估算电网阻抗, 可以取两个不同的测量点  $V_p(1)$ 、 $I_G(1)$  和  $V_p(2)$ 、 $I_G(2)$ , 则依照式(3),  $z_G$  可以通过式(4)进行计算。

$$z_G = \frac{V_p(1) - V_p(2)}{I_G(1) - I_G(2)} \quad (4)$$

基于式(4)的电网阻抗估算的实现框图如图6所示。

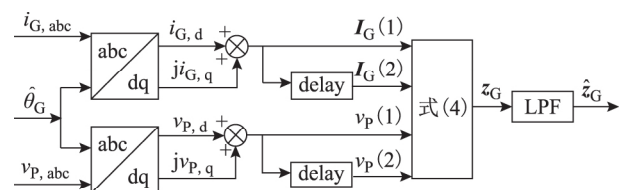


图6 电网阻抗估算框图

Fig. 6 The diagram of power grid impedance estimation

图6中, 为了避免电压、电流动态变化和测量噪声对阻抗估算的影响, 增加截止频率为 100 Hz 的低通

滤波器,对计算阻抗进行滤波。

## 2.4 基于功率解耦的 $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$ 外环功率控制

将图3中PCC节点左侧部分等效为受控电压源,则在并网状态,DG系统可简化为图7。

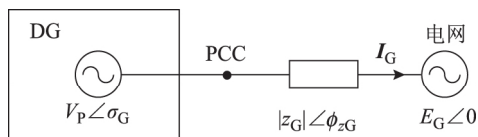


图7 DG并网简化框图

Fig. 7 The simplified diagram of DG grid-tied

图7中, $V_p$ 、 $E_G$ 分别为PCC节点和电网电压的幅值, $\sigma_G$ 是PCC节点电压与电网电压 $E_G$ 之间的相角差, $|z_G|$ 、 $\phi_{zG}$ 分别为线路阻抗 $z_G$ 的模值和角度。

图7与同步机并网模型近似,类比可得PCC节点向电网输送的有功功率和无功功率为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} P_G = \frac{E_G V_p \cos \sigma_G - E_G^2 \cos \phi_{zG}}{|z_G|} + \frac{E_G V_p \sin \sigma_G \sin \phi_{zG}}{|z_G|} \\ Q_G = \frac{E_G V_p \cos \sigma_G - E_G^2 \sin \phi_{zG}}{|z_G|} - \frac{E_G V_p \sin \sigma_G \cos \phi_{zG}}{|z_G|} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)易知,当 $\phi_{zG}$ 不接近 $90^\circ$ 时,即 $L_G$ 不远大于 $R_G$ 时, $P_G$ 、 $Q_G$ 存在强耦合,不宜直接采用 $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$ 控制。故定义新的控制变量 $P_c$ 、 $Q_c$ 为

$$\begin{cases} P_c = P_G \sin \phi_{zG} - Q_G \cos \phi_{zG} \\ Q_c = P_G \cos \phi_{zG} + Q_G \sin \phi_{zG} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),则

$$\begin{cases} P_c = \frac{E_G V_p \sin \sigma_G}{|z_G|} \\ Q_c = \frac{E_G V_p \cos \sigma_G - E_G^2}{|z_G|} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, $P_c$ 主要取决于功角 $\sigma_G$ ,而 $Q_c$ 主要取决于 $V_p - E_G$ ,通过解耦矩阵式(6)可实现PQ解耦。据以上分析,本文提出功率解耦的 $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$ 外环控制框图如图8所示。

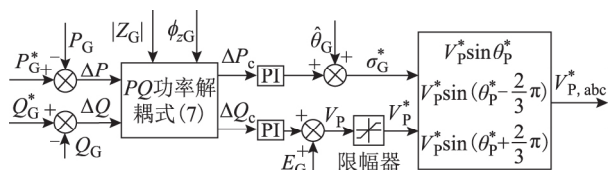


图8  $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$  外环控制框图

Fig. 8 Control diagram of  $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$  outer loop

图8中, $P_G$ 、 $Q_G$ 为实际并网功率,功率误差 $\Delta P$ ,

$\Delta Q$ 经过式(7)解耦后得到 $\Delta P_c$ 、 $\Delta Q_c$ ,两个PI控制器来实现给定功率的无差跟踪,控制器输出为PCC节点电压幅值参考值 $V_p$ 和 $\sigma_G^*$ ,将其变化为三相电压 $V_{p,abc}^*$ ,作为后级内环控制器的参考值。 $V_p^*$ 通过限幅器来限制其幅值,避免越限。限幅器的幅值上、下限可分别选取1.1倍和0.9倍额定电压。

## 2.5 $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$ 外环小信号分析

$P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $\nu$ 为非线性控制,为了分析系统的稳定性和指导PI控制器参数设计,对外环进行小信号分析。对式(7)进行小信号近似,得

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= \frac{\partial P_c}{\partial \sigma_G} \Delta \sigma_G + \frac{\partial P_c}{\partial V_p} \Delta v_p \\ &= \left| \frac{1}{z_G} \right| (E_G \Delta v_p \sin \bar{\sigma}_G + E_G \bar{V}_p \cos \bar{\sigma}_G \cdot \Delta \sigma_G) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_c &= \frac{\partial Q_c}{\partial \sigma_G} \Delta \sigma_G + \frac{\partial Q_c}{\partial V_p} \Delta v_p \\ &= \frac{1}{|z_G|} (E_G \Delta v_p \cos \bar{\sigma}_G - E_G \bar{V}_p \sin \bar{\sigma}_G \cdot \Delta \sigma_G) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\bar{\sigma}_G$ 、 $\bar{V}_p$ 代表相应稳态值; $\Delta v_p$ 、 $\Delta \sigma_G$ 为小信号值。

假设PI外环控制器分别为

$$\Delta \sigma_G = - \left( \frac{m_i}{s} + m_p \right) \Delta P_c \quad (10)$$

$$\Delta v_p = - \left( \frac{n_i}{s} + n_p \right) \Delta Q_c \quad (11)$$

联立式(8)~式(11)可得二阶特征方程为

$$a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (12)$$

其中

$$a_2 = \frac{E_G \cos \bar{\sigma}_G}{|z_G|} (n_p + V_p m_p) + \frac{E_G^2 \bar{V}_p \sin^2 \bar{\sigma}_G n_p m_p}{|z_G|^2} + 1$$

$$a_1 = \frac{E_G \cos \bar{\sigma}_G}{|z_G|} (n_i + m_i E) + \frac{E_G^2 \bar{V}_p \sin^2 \bar{\sigma}_G}{|z_G|^2} (m_i n_p + m_p n_i)$$

$$a_0 = n_i m_i \bar{V}_p E_G^2 \sin^2 \bar{\sigma}_G / |z_G|^2$$

稳态时,有功功率和无功功率 $P = P^*$ 、 $Q = Q^*$ ,

依据式(5),可推导稳态时 $\bar{\sigma}_G$ 和 $\bar{V}_p$ 为

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_G &= \arctan \left( \frac{P^* \sin \phi_{zG} - Q^* \cos \phi_{zG}}{P^* \cos \phi_{zG} + Q^* \sin \phi_{zG} + (E_G^2 / |z_G|)} \right) \\ \bar{V}_p &= \frac{E_G^2 2 \cos \phi_{zG} + P^* |z_G|}{E_G^2 (\cos \phi_{zG} \cos \bar{\sigma}_G + \sin \phi_{zG} \sin \bar{\sigma}_G)} \end{aligned} \quad (13)$$

采用表1的参数,依据式(12)分析 $m_i$ 、 $m_p$ 变化时根轨迹,如图9所示。由图9可知,当采用解耦



$$\begin{cases} P_v = \frac{E_G V_p \cos(\theta_p - \theta_G) - E_G^2}{|z_v|} \cos\phi_{zv} + \\ \quad \frac{E_G V_p \sin(\theta_p - \theta_G)}{|z_v|} \sin\phi_{zv} \\ Q_v = \frac{E_G V_p \cos(\theta_p - \theta_G) - E_G^2}{|z_v|} \sin\phi_{zv} + \\ \quad \frac{E_G V_p \sin(\theta_p - \theta_G)}{|z_v|} \cos\phi_{zv} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\theta_p$  为 PCC 节点电压相角;  $\theta_G$  为电网电压相角, 可通过 PLL 测量获得;  $|z_v|$  和  $\phi_{zv}$  分别为  $Z_v$  的模值和相角。

系统预同步时刻, PQ 外环控制器和锁相环提前工作, 设置并网功率参考值  $P_G^* = 0$ 、 $Q_G^* = 0$ 。通过式(14)计算出的虚拟并网功率替代实际并网功率进行外环控制。由式(14)可知, 当  $P_v$ 、 $Q_v$  为零时, PCC 节点电压和电网电压的相位和幅值一致。锁相环提前工作, 保证电压频率同步。

#### 4 HIL 仿真分析

为验证本文方法的有效性, 本文依照图3、图4、图6和图7, 在 RT-LAB 中建立 HIL 仿真模型, 参数见表1。

设计三种场景来验证本文控制策略: ① DG 并网状态时线路阻抗突变; ② 非计划孤岛时并网→孤岛切换; ③ 离→并网预同步。

##### 4.1 并网状态时线路阻抗突变场景

设计场景①: DG 工作在并网状态, 0.4 s 时刻, 电网电阻从 0.1  $\Omega$  变化到 1  $\Omega$ , 电感维持 2 mH 不变。对比含有 PQ 解耦控制和不含 PQ 解耦控制, 并网电流波形如图 13 所示。

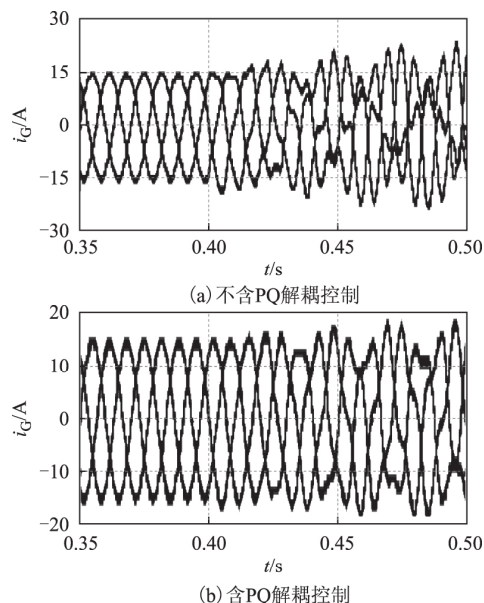


图 13 阻抗突变并网电流仿真波形

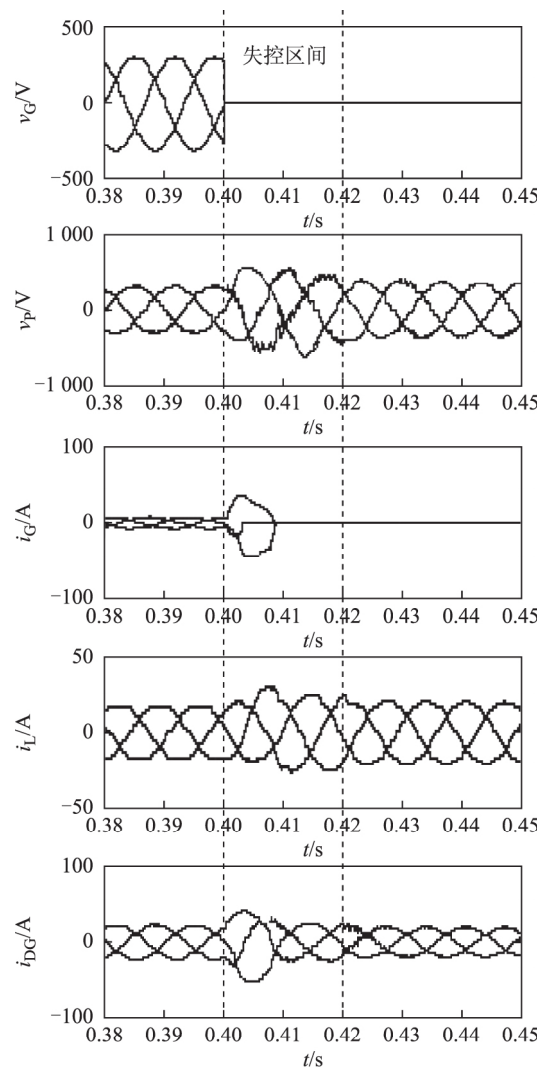
Fig. 13 Grid current simulation waveforms when impedance step changes

当电网阻抗发生突变后, 电网由感性网络变化为阻感性网络时。由图 13a 可知, 未采用 PQ 解耦控制时, 由于 PQ 之间的强耦合, 导致并网电流出现较大畸变, 控制器无法跟踪给定值。而图 13b 中, 得益于本文的 PQ 解耦, 网电流经过短暂的调整后重新恢复正弦, 稳态时达到给定值。

##### 4.2 非计划孤岛并网转离网切换场景

设计场景②: 本地负载有功功率 8 kW、无功功率 2 var, DG 初始工作在并网模式, 并网有功功率为 4 kW, 无功功率为 2 var(流入电网功率为正), DG 发出功率大于本地负载功率, 向电网输送有功和无功功率; 0.4 s 时刻开关  $S_G$  断开, 模拟非计划孤岛发生; 0.42 s 时刻孤岛检测成功, 断开开关  $S_L$ , 故 0.4 ~ 0.42 s 之间, 系统处于失控状态; 0.42 s 后系统切换至本地电压控制模式, DG 进入孤岛状态。

采用本文控制策略和文献 [2] 模式切换控制策略进行对比仿真, 仿真关键波形如图 14 所示。



(a) 传统模式切换控制策略

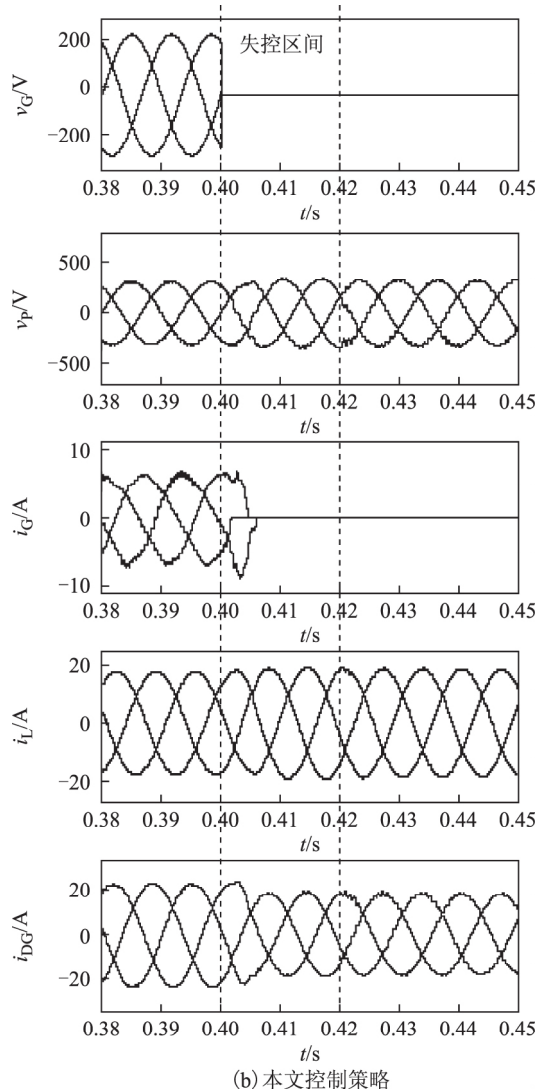


图 14 非计划孤岛并网转离网仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms when DG transfers from grid-tied to unintentional island

0.4 s 时, 电网电压  $v_G$  突变为零。图 14a 中, 受孤岛检测延迟的影响, 在 0.4 ~ 0.42 s 期间并没有进行模式转换, 系统依然处于并网电流控制状态, 失去对 PCC 节点电压的控制。故  $v_P$  出现明显增大和畸变现象 (由于失去电网电压钳制)。并网电流  $i_G$  也增大关断电流。相似的, 负载电流  $i_L$  和 DG 输出电流  $i_{DG}$  也在失控期间出现增大和畸变现象。0.42 s 时刻, 系统检测到孤岛后进行模式切换, 重新恢复 PCC 节点电压控制。

而图 14b, 虽然在失控状态期间,  $P$ - $\sigma$ 、 $Q$ - $v$  外环控制由于失去测量值, 会出现超调。但得益于直接电压限幅,  $V_P^*$  最大值被限制为 1.1 (pu), 外环控制器饱和失效, DG 自动退化为本地电压控制模式, 保障了失控过程中本地负载电压安全。整个 DG 系统在并网转

孤岛状态切换期间, 不存在电压或电流越限现象。

在上述非计划孤岛场景下, 对比本文提出改进 PLL 方法和常规 dq-PLL 的锁相环, 如图 15 所示。

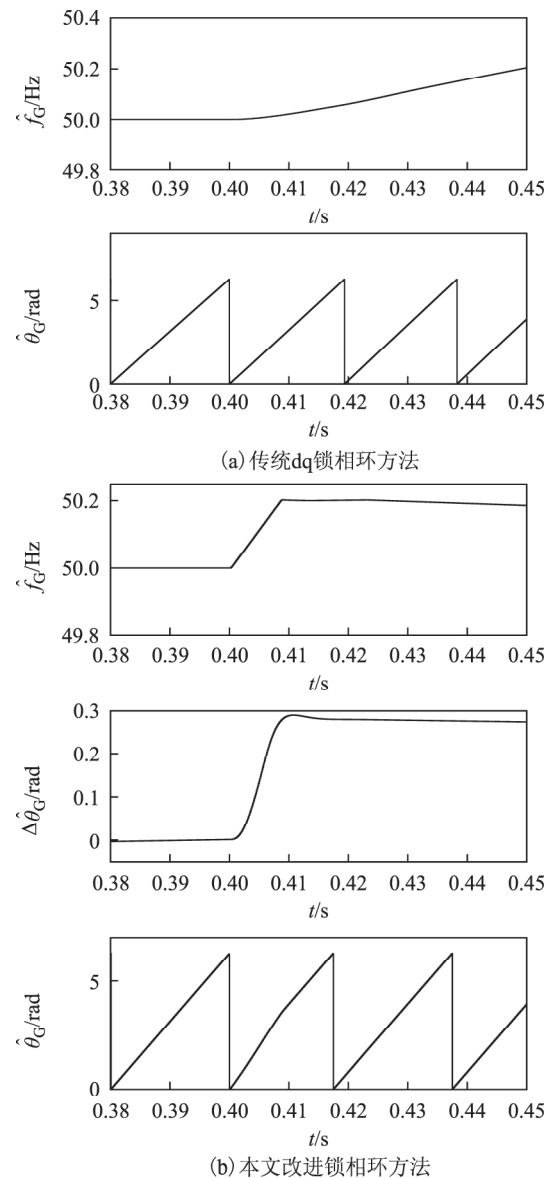


图 15 非计划孤岛切换时时锁相环仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms of PLL when DG transfers from grid-tied to unintentional island

从图 15 可知, 当并网转孤岛时, 由于功率不匹配导致输出电压发生相位突变时, 常规 dq-PLL 的频率  $\hat{f}_G$  持续升高, 超过电网安全频率上限 (50.2 Hz)。而本文锁相方法中, 得益于频率和相位的独立跟踪, 估算频率  $\hat{f}_G$  被限制在 50.2 Hz, 通过相位变化来快速锁相, 相位突变角度约 0.27 rad (约为 15.4°), 相比于常规 dq-PLL 方法, 本文改进 PLL 更适合 DG 无缝切换。

### 4.3 离转并网预同步场景

设计场景③: 0.2 s 时电网恢复电压, DG 开始虚拟预同步控制, 外环功率给定值为  $P_{\text{ref}} = 0 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{ref}} = 0 \text{ kW}$ ; 0.3 s 时闭合本地开关  $S_L$ , 系统进入并网状态, 调整外环功率给定值为  $P_{\text{ref}} = 8 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{ref}} = 2 \text{ kW}$ 。关键波形如图 16 所示。

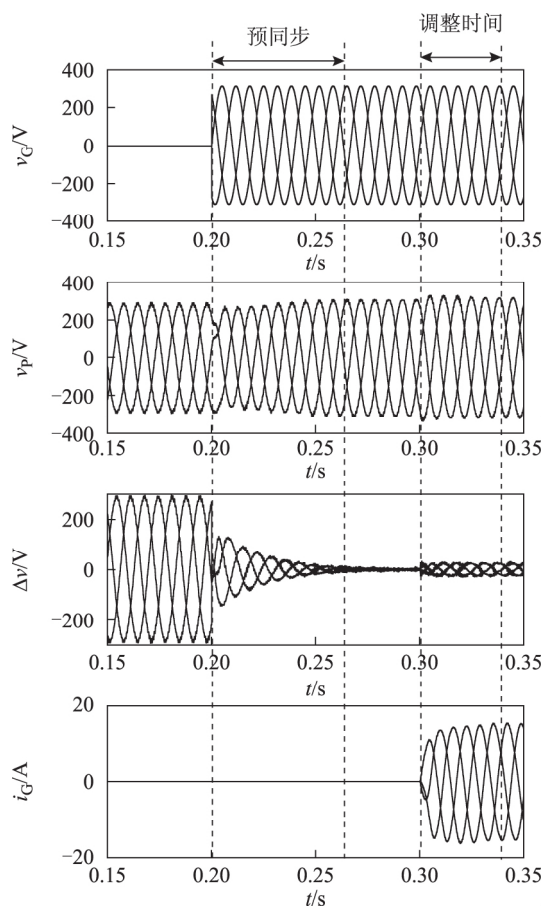
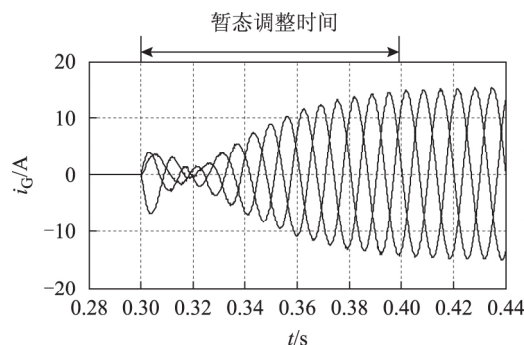


图 16 基于虚拟并网的 DG 预同步仿真波形

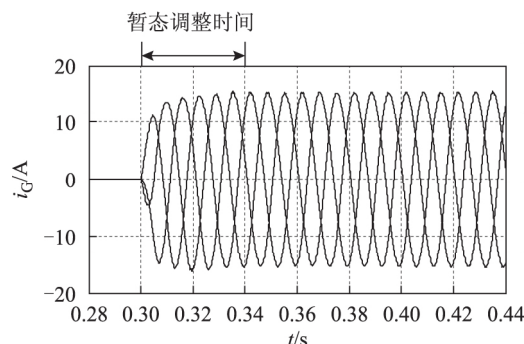
Fig. 16 Simulation waveforms of DG pre-synchronous based virtual connect grid

从图 16 可知, 0.2 s 时, 系统在虚拟 PQ 外环控制的作用下, PCC 节点电压  $v_p$  逐渐逼近电网电压, 经过约 0.065 s 时间,  $v_p$  基本与电网电压同步。0.3 s 时  $S_L$  闭合, 系统进入并网模式, 并网电流在实际 PQ 外环控制下, 并网电流  $i_g$  逐渐增大, 约经过 0.04 s 时间达到稳态值。

对比图 11 的预同步方法和本文虚拟并网的预同步方法, 并网电流  $i_g$  波形如图 17 所示。由图 17 可知, 与常规方法相比, 本文方法的电流暂态时间明显减少。这是得益于 PQ 外环在预同步期间就提前工作, 在  $S_L$  闭合瞬间, 内环控制器输入给定值不存在突变, 改善了 DG 并网暂态过程。



(a) 传统预同步方法



(b) 本文预同步方法

图 17 开关  $S_L$  闭合后 DG 并网电流暂态过程

Fig. 17 Simulation waveforms of current transient process after  $S_L$  closed

## 5 结论

本文围绕单 DG 系统的无缝切换进行研究, 主要贡献为

1) 受孤岛检测延时影响, DG 系统在并网切换离网状态存在失控区域而导致 PCC 节点电压越限。本文提出采用  $Pf$ - $Q-v$  控制结构, 直接限制失控期间的电压变化幅值; 提出结合去除积分前向通道的 PLL 和锁频环, 在不影响 PLL 动态特性前提下, 限制失控期间的频率变化幅值。

2) 为改善 DG 离网切换并网过程的并网电流暂态调整过程, 本文在  $Pf$ - $Q-v$  控制结构基础上的提出虚拟并网的预同步方法, 避免并网瞬间的内外环失配现象, 且无需增加额外的预同步控制器。

## 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): 1-12.  
Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] Tirumala R, Mohan N, Henze C. Seamless transfer of

- grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes [J]. //Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002: 1081-1086.
- [6] 郭立东, 伍春生, 王一波, 等. 一种基于前馈控制的双模式逆变器无缝切换控制方法 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1596-1601.
- Guo Lidong, Wu Chunsheng, Wang Yibo, et al. A new method based on feed forward control for seamless switching of dual-mode inverter [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(7): 1596-1601.
- [7] Tran T V, Chun T W, Lee H H, et al. PLL-based seamless transfer control between grid-connected and islanding modes in grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5218-5228.
- [8] 刘红, 林明潮. 基于新型正序提取器的并网与独立双模式无缝切换策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 53-60.
- Liu Hong, Lin Mingchao. A seamless transition strategy between grid-tied and stand-alone modes for inverters based on a new positive component detector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 53-60.
- [9] 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.
- [10] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
- Shi Rongliang, Zhang Xing, Xu Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-23.
- [11] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
- Wang Xiaohuan, Zhang Chunjiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [12] 蒋冀, 段善旭, 陈仲伟. 三相并网/独立双模式逆变器控制策略研究 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 52-58.
- Jiang Ji, Duan Shanxu, Chen Zhongwei. Research on control strategy for three-phase double mode inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 52-58.
- [13] Yoon S, Oh H, Choi C. Controller design and implementation of indirect current control based utility-interactive inverter system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 26-30.
- [14] Kwon J, Yoon S, Choi S. Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 773-781.
- [15] Liu Zeng, Liu Jinjun. Indirect current control based seamless transfer of three-phase inverter in distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3368-3383.
- [16] 刘增, 刘进军. 一种可实现分布式发电系统平滑切换的三相逆变器控制方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 52-61.
- Liu Zeng, Liu Jinjun. A control method for 3-phase inverters enabling smooth transferring of the operation modes of distributed generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 52-61.
- [17] Vandoorn T L, Meersman B, De Kooning J D M, et al. Transition from islanded to grid-connected mode of microgrids with voltage-based droop control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2545-2553.
- [18] 聂志强, 梁晖, 罗浩, 等. 基于非线性下垂控制的单模式微网并/离网无缝切换技术 [J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1371-1378.
- Nie Zhiqiang, Liang Hui, Luo Hao, et al. Single mode grid-connected/islanded micro-grid seamless transition based on nonlinear droop control technology [J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1371-1378.
- [19] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- Ding Ming, Yang Xiangzhen, Su Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.
- [20] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.

- Meng Jianhui, Wang Yi, Shi Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [8] 张玉治, 张辉, 贺大为, 等. 具有同步发电机特性的微电网逆变器控制 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 261-268.
- Zhang Yuzhi, Zhang Hui, He Dawei, et al. Control strategy of micro grid converters with synchronous generator characteristic [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268.
- [9] Rodriguez P, Luna A, Candela I, et al. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127-138.
- [10] 袁志昌, 宋强, 刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 31-35.
- Yuan Zhichang, Song Qiang, Liu Wenhua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 31-35.
- [11] Ciobotaru M, Teodorescu R, Rodriguez P, et al. Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations [C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, 2007: 2306-2312.
- [12] Bergen A R. Power systems analysis [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.

#### 作者简介

钟 诚 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源柔性并网、电力电子化电网的稳定分析与优化控制等。

E-mail: zhongcheng@mail.nedu.edu.cn(通信作者)

魏 来 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为新能源柔性并网控制等。

E-mail: WeiLaiBDDL@163.com

(编辑 赫蕾)