单相并网/离网双模式逆变器控制策略综述

陈亚爱,赵军伟,周京华,石永帅,王赛
(北方工业大学 北京市变频技术工程技术研究中心,北京 100144)

摘要:单相并网/离网双模式逆变器是分布式发电系统的重要组成部分,它既可工作于并网模式,将分布式发电装置产生的电能送入大电网;又可工作于离网模式,在大电网供电中断时将分布式电能提供给本地负载。基于广大学者对单相并网/离网双模式逆变器的研究成果,主要对其控制策略进行分类和归纳,总结其控制特点和适用场合,为进一步深入研究单相并网/离网双模式逆变器提供参考。

关键词:户用微电网;单相;双模式;逆变器;控制策略

中图分类号:TM46　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd19938

Overview of Control Strategies for Single-phase Grid-connected/Off-grid Dual-mode Inverters

CHEN Yaai,ZHAO Junwei,ZHOU Jinghua,SHI Yongshuai,WANG Sai
(*Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing*,*North China University of Technology*,*Beijing* 100144,*China*)

Abstract: The single-phase grid-connected/off-grid dual-mode inverter is an important part of the distributed generation system. It can work in the grid-connected mode to send the power generated by the distributed power generation unit to the large power grid. Mode that provides distributed power to the local load when the mains supply is interrupted. Based on the research results of single-phase grid-connected/off-grid dual-mode inverters, its control strategies was classified and generalized, its control characteristics and applicable occasions was summarized. It providesd a reference for further studies of single-phase grid-connected/off-grid dual mode inverters.

Key words: household microgrid;single-phase;double-mode;inverter;control strategy

数字控制在电力电子领域的应用和进步,使全球能源管理技术得到迅速发展,从而使智能电网的实现成为可能[1]。微电网作为智能电网的主要发展方向之一,进一步提高了电力系统运行的可控性和灵活性。随着各国政府对分布式发电系统的支持,基于储能的户用微电网得到了国内外众多科研机构、电力企业等越来越多的关注,在此背景下,亟需研究户用微电网的核心设备、关键技术等,以推动户用微电网的发展[2]。

分布式电源大部分需经电力电子变换装置(单相并网/离网双模式逆变器)接入户用微电网,因此实际应用中需要解决的关键问题之一就是逆变器的控制。由于各国学者对单相双模式逆变器的研究已取得一定的研究成果,为此本文将对现有的单相并网/离网双模式逆变器控制策略进行分类、归纳和总结。

1 单相并网/离网双模式逆变器控制策略分类

实际运行中,微电网既要在外部电网异常或无外部电网时离网运行,又要在外部电网正常时能够并网运行[3]。因此,可将单相双模式逆变器的工作模式分为并网模式、离网模式、并网转离网模式和离网转并网模式,其中并网模式和离网模式又可归为单一模式,而并网转离网模式和离网转并网模式可归为切换模式,不同的工作模式就有不同的逆变器控制策略,故单相并网/离网双模式逆变器控制策略分类如图1所示。

单相双模式逆变器工作在并网模式时,由大电网向负载提供稳定的电压和频率支撑;当大电

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51777002);北京市高水平创新团队建设计划资助项目(IDHT20180502)

作者简介:陈亚爱(1961-),女,硕士,教授,cya@ncut.edu.cn

网电压或频率出现异常时，单相双模式逆变器转入离网运行模式，此时负责调节微电网内负载电压和频率。在单相双模式逆变器并网模式和离网模式切换过程中，需满足平滑性和快速性，以避免电压或电流突变造成大电网安全性、稳定性的降低以及用户设备的损坏等不利因素[4]。

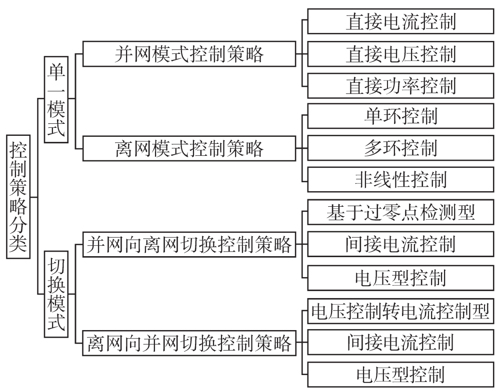

图1　单相并网/离网双模式逆变器控制策略分类示意图

Fig.1　Diagram of control strategy classification for single-phase grid-connected/off-grid double-mode inverter

2　单一模式控制策略

单相并网/离网双模式逆变器的单一模式是指并网模式或离网模式。

2.1　并网模式控制策略

并网逆变器的并网控制有3类策略，即控制并网逆变器的输出电流、输出电压或输出功率三者中的任意一个量。图2为并网逆变器电压、电流相量之间的关系图，系统采用LC滤波网络，$\boldsymbol{Z}_f$为输出阻抗，u_o为滤波器前端电压，u为逆变器输出电压。当逆变器输出电压u被大电网箝位后，逆变器只需控制虚线框中二端口网络的电压、电流、功率和阻抗4个变量中任一变量，便可实现其他3个变量的控制[5]。因此，并网模式下的控制可分为直接电流控制、直接电压控制和直接功率控制[6]。

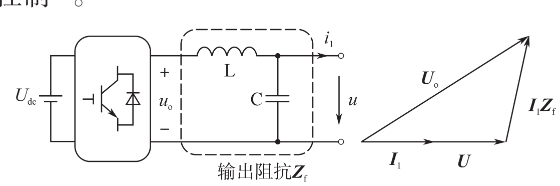

图2　并网逆变器电压、电流相量关系图

Fig.2　Diagram of voltage and current vector relation of grid connected inverter

2.1.1　直接电流控制策略

直接电流控制策略是通过检测大电网侧电流，并对其进行闭环控制的一种控制策略。图3为单相并网逆变器直接电流控制简化框图，I_{ref}为并网电流给定值，与锁相环(phase locked loop，PLL)生成的电网电压信息相乘，得到瞬时电流参考值i_{ref}，H_{filter}为低通滤波器的滤波系数，其作用是滤除电感电流的高频分量，电感电流i_L与参考值i_{ref}比较经电流调节器，产生PWM调制信号，作用于开关管。由于直接电流控制具有快速的电流响应和鲁棒性，因此受到了学术界的关注，所研究出的调节器控制方案主要包括比例积分(proportional integral，PI)控制[7]、比例谐振(proportional resonant，PR)控制[8]、滞环电流控制[9]、无差拍电流控制[10]、预测电流控制等[11-12]。

由于直接电流控制策略具有电网电流闭环控制环节，因而具有较高动态性能和稳态性能。该控制策略在并网控制中占据主导地位，应用较为广泛。

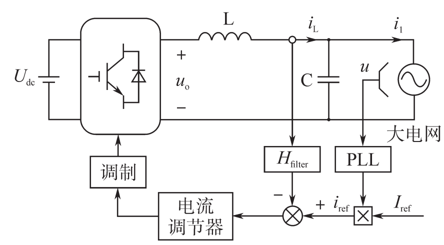

图3　直接电流控制简化框图

Fig.3　Simplified block diagram of direct current control

2.1.2　直接电压控制策略

直接电压控制策略实质上是通过控制逆变器桥路交流侧电压来控制并网电流。根据图2所示的并网逆变器电压、电流相量关系，可以通过并网逆变器的输出电压$\boldsymbol{U}_o$来控制并网电流$\boldsymbol{I}_1$，即通过控制电压向量$\boldsymbol{U}_o$的幅值和相位，使之与大电网电压相量$\boldsymbol{U}$之间存在差异，进而在$\boldsymbol{Z}_f$支路上产生所需要的并网电流$\boldsymbol{I}_1$。由于通过控制输出电压来控制并网电流，因此这种控制策略也称为间接电流控制[13]。一方面，这种控制策略由于对并网电流进行非直接控制，无法保证并网电流的电能质量；另一方面，该策略也容易受到输出阻抗$\boldsymbol{Z}_f$的影响，从而导致实际的并网电流与指令值之间存在较大偏差。但是直接电压控制结构简单，逆变器呈现电压源特性，因此得到了一定程度的应用[6]。

单相逆变器的下垂控制[14]和基于虚拟同步发电机的控制[15]均可视为直接电压控制，通过控制逆变器的输出电压，使其具有类似同步发电机

的运行特性,从而控制并网电流。

2.1.3　直接功率控制策略

与电流控制策略相比,直接功率控制(direct power control,DPC)是一种以功率为控制对象的逆变器控制策略[16],其控制思想借鉴于电机控制领域的直接转矩控制思想。直接功率控制已广泛应用于三相逆变器中[17],而对于单相逆变器直接功率控制策略的研究相对较少,单相直接功率控制是在三相直接功率控制基础上延伸而来。单相逆变器的直接功率控制框图如图4所示,该控制策略采用滞环控制器调节系统的输出功率,瞬时功率计算环节通常采用大电网侧电压、电流滞后90°构建一个旋转电压、电流矢量,估算出系统的瞬时功率,通过与功率给定作比较,经滞环控制器,生成开关矢量表,控制系统的并网功率。根据系统的控制要求,功率内环控制器除了可采用滞环控制外,还可采用恒频滞环、PI控制等方式[18-19]。

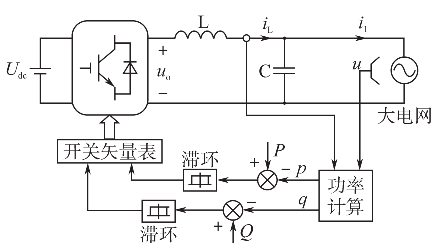

图4　直接功率控制简化框图

Fig.4　Simplified block diagram of direct power control

直接功率控制具有控制系统简单、功率跟踪速度快等优点,但是由于在单相系统中,功率计算复杂,传统开关表控制存在开关频率不固定、大电网侧电流谐波频谱宽等缺点,因此,直接功率控制在单相逆变器系统中应用较少[20]。

单相并网/离网双模式逆变器在并网模式下,主要控制并网电流对正弦基波信号的稳态无误差跟踪,较之直接电压控制策略和直接功率控制策略,直接电流控制策略为最有效的控制方式。直接电压控制策略可使逆变器呈现电压源特性,在多台逆变器协调运行中的研究较为广泛。由于直接功率控制在单相系统中存在功率计算复杂等局限性,因此仍需进一步研究。

2.2　离网模式控制策略

当大电网电压、频率出现大的波动或故障时,微电网的电压和频率由具有并网/离网功能的双模式逆变器来负责调节。单相双模式逆变器在离网模式下相当于单相UPS,可分为3类控制策略:单环控制、多环控制和非线性控制。除电压参考值形成原理不同以外,3种控制策略本质都是控制逆变器输出电压,实现离网模式下的恒压恒频输出。

2.2.1　单环控制

单环控制即采用单电压环控制逆变器输出电压,通过选择合适的调节器,补偿逆变器实际输出电压与参考电压的误差,实现电压稳定输出的目的[21]。该控制方法设计较为简单,但在非线性或不平衡负载下的控制性能较差。

2.2.2　多环控制

为了得到更好的控制性能,通常采用多环控制策略。相对于单环控制,多环控制具有较强的鲁棒性和灵活性[22]。传统的双闭环控制策略框图如图5所示,外环采用交流输出电压环反馈,内环采用电感电流反馈,也可采用电容电流反馈。在多环控制系统中,基于PR控制[23]和下垂控制[24-25]得到了广泛应用,此处不再赘述。

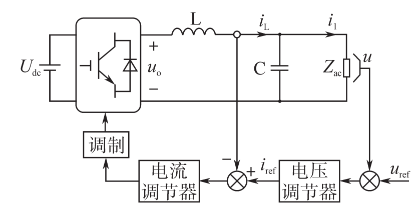

图5　双闭环控制策略简化框图

Fig.5　Simplified block diagram of double closed-loop control strategy

此外,预测控制、重复控制等均可作为多环系统的电压或电流控制器,具体如下所述。

1)预测控制

预测控制通过使用系统模型不仅可预测控制器将来的参数变量,还可根据预先设定的最优化准则作出响应。预测控制又可分为无差拍控制[26]和模型预测控制(model predictive control,MPC)[27]。无差拍控制可根据每一个控制周期的采样值和被控对象的数学模型,计算调节器在下一个控制周期的输出,使被控对象在一拍内实现对参考信号的跟踪。MPC与无差拍控制的主要差别在于其模型可包含系统的非线性特性,无需对该控制进行单独的线性化处理,并且控制器中可包含变量和输出的限定条件。预测控制方法动态性能较好,跟踪指令信号无过冲,并且易于数字实现,但其对被控对象参数的要求比较高,模数转换器的采样延时、滤波参数不准确以及计

算延时等因素都会影响调节器的输出精度[28]。

2)重复控制

重复控制(repetitive control，RC)基于内膜原理，在单相逆变器的应用较多，具有较好的稳态性能，可有效跟踪周期性指令信号，尤其对谐波抑制具有较好的控制效果。但该控制策略具有1个基波周期的延时，暂态特性较弱，数据存储量大，并且对非周期性的扰动响应较慢，通常配合其它鲁棒性较强的控制器同时使用[29]。

该控制方案控制结构简单，输出电压精度高，具有良好的动态与静态性能，目前广泛应用于离网系统中。

2.2.3 非线性控制

与线性控制策略相比，非线性控制策略具有鲁棒性好、稳态性能优等特点，但非线性控制系统的实现比较复杂，应用于单相逆变器的常用非线性控制策略有滑模控制、自适应控制和神经网络控制3种[30]。

1) 滑模控制

由于滑模控制(slide mode control，SMC)策略对于非线性负载具有有效的控制性能，因此该控制策略在电源逆变器中得到了广泛的应用[31]。SMC的主要特点是鲁棒性强、动态响应快、实现简单，并且在非线性负载下控制效果较好，但SMC存在不期望地固定幅频振荡，影响逆变器控制系统的精度和热损，需要采取额外的振荡抑制策略[32]。

2)自适应控制

自适应控制是另一种鲁棒性控制策略，可针对逆变器结构和外部参数的不确定性自动对系统进行校正。自适应控制所依据的关于逆变器模型和外部扰动信号的先验知识比较少，需要在逆变器的运行过程中去不断提取有关模型的信息，使模型逐步完善[33]。自适应控制对于不平衡或非线性负载具有较好的电压输出特性，并且暂态响应迅速，稳态误差较小，输出电压THD较低，但存在计算复杂性高的缺点。

3)神经网络控制

文献[34]提出了应用于单相逆变器的神经网络(neural network，NN)控制策略，该控制策略具有较好的输出电压波形质量，但计算复杂性较高，不利于数字实现，因此NN控制策略在单相逆变器中的应用较少。

单相并网/离网双模式逆变器在离网模式下，主要控制逆变器的恒压恒频输出。单环控制策略存在控制精度差的缺点，很难满足逆变器带非线性负载的控制要求；非线性控制策略较为复杂，对其进一步优化仍需进一步研究；由于多环控制策略可满足基本的逆变器控制要求，因此目前广泛应用于单相逆变器的离网模式中。

3 切换模式控制策略

单相并网/离网双模式逆变器与大电网连接示意图如图6所示[35]，逆变器输出采用LC滤波器，负载连在PCC端，逆变器与大电网通过静态切换开关(static transfer switch，STS)连接，STS可以控制并网/离网模式的切换。论文中的并网/离网切换策略均基于此类拓扑。

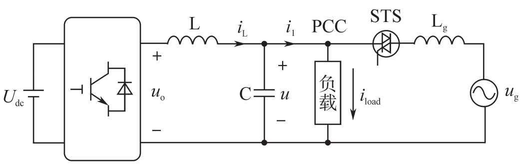

图6 单相逆变器与电网连接示意图

Fig.6 Diagram of a single-phase converter connected to the grid

3.1 并网向离网切换控制策略

并网向离网切换实质是将电流控制型向电压控制型转换。

3.1.1 基于过零点检测控制策略

为了避免并网向离网切换可能造成的电流冲击问题，文献[35]首先提出了基于过零点检测的并网向离网切换控制策略，在并网运行时采用电流控制方式，在离网运行时采用电压控制方式，2种控制方式相互独立，具体的并网向离网切换流程为：当逆变器检测到大电网电压故障时，向STS发出关断信号，同时采集负载电压u的幅值和相位，当STS电流过零点时，将逆变器运行模式由电流控制设置为电压控制，电压控制的给定参考值由检测到的当前负载电压获得，最后将参考电压的幅值从初始值逐步增加到额定值，完成并网模式向离网模式的切换。

基于过零点检测控制策略结构简单，应用较为广泛。在此控制策略基础上，学者们先后研究出了不同的控制策略[36-37]，均取得较好的控制效果，但是该策略无法应对非计划孤岛的情况[38]。

3.1.2 间接电流控制策略

间接电流控制又称幅相控制，本质上是通过控制电感两端电压实现输出并网电流的目的。

逆变器拓扑等效电路如图7a所示，其中u，u_g分别为逆变器输出电压和电网侧电压；u_L为电感端电压。图7b为并网功率因数为1时的间接电流控制电压矢量图，从图中可看出，通过调整θ的角度可调节电感两端电压的大小，进而可以控制并网功率[39]。

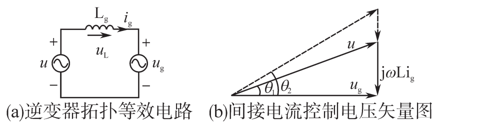

图7　逆变器等效电路及间接电流控制电压矢量图

Fig.7　Diagram of Inverter equivalent circuit and indirect current control voltage vector

文献[40]提出了应用于单相并网/离网双模式逆变器的间接电流控制策略，其控制框图如图8所示。该控制策略的电流外环采用并网电流峰值I_{peak}反馈，电压内环控制电容电压u，$G_I(s)$，$G_u(s)$分别代表峰值电流调节器和输出电压调节器。在大电网正常时，控制系统通过调节角度增量α控制电容电压的相位参考值，间接调节正弦并网电流[41]。当大电网发生故障时，系统首先断开并/离网开关，将并网电流外环切除，同时打开电容电压内环，通过正弦表给定电容电压参考值，以维持本地负载供电，完成并网向离网的切换。

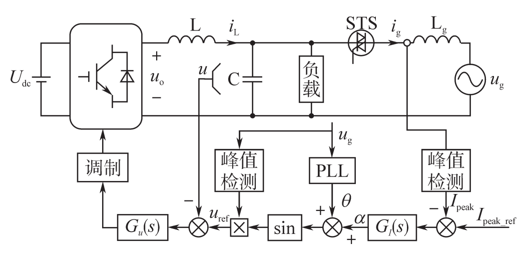

图8　间接电流控制策略控制框图

Fig.8　Block diagram of indirect current control strategy

由于间接电流控制在并网或离网运行时，最终作用于逆变器输出电压，因此在并网向离网切换过程中可有效降低电压或电流冲击，实现无缝切换。

3.1.3　电压型控制策略

电压型控制策略可分为如下2种。

1）下垂控制。下垂控制策略实质是根据系统有功功率和无功功率，通过下垂方程，重新合理调整输出电压的幅值和频率，能使逆变器通过检测自身信息便可使带载功率自动进行合理分配[42]。传统下垂控制策略假设线路阻抗为感性，从而推导出P–f和Q–U的下垂方程为

$$\begin{cases} f=f_0-k_p(p-P) \\ U=U_0-k_q(q-Q) \end{cases} \tag{1}$$

式中：f和U分别为逆变器输出频率和电压；p和q分别为实时有功功率和无功功率；f_0和U_0分别为额定频率和额定电压；k_p和k_q分别为有功功率和无功功率下垂系数；P和Q分别为额定有功功率和额定无功功率。

传统下垂控制策略就是根据式(1)实现控制的。

为了解决在调节器切换过程中可能造成的冲击问题，文献[43]研究了单相逆变器在模式切换时的下垂控制策略，该控制策略以下垂控制策略为核心，基于下垂特性的功率外环获取逆变器的输出参考电压和频率，完成并网向离网的切换控制，控制框图如图9所示。

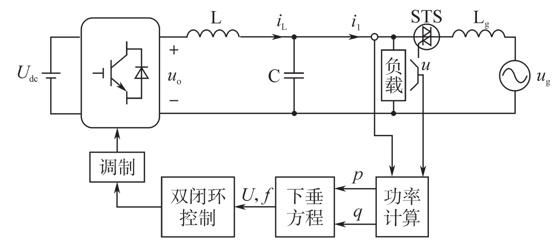

图9　基于下垂控制的并网/离网控制策略框图

Fig.9　Block diagram of grid-connected/off-grid control strategy based on droop control

基于下垂控制策略在并网模式下，可向大电网输送指定的有功功率与无功功率，当满足并网向离网切换条件时，首先断开并网/离网开关STS，保证逆变器与大电网无连接，切换的瞬间U/f保持不变，逆变器的输出功率由负载决定，逆变器会根据输出的有功功率p、无功功率q及下垂曲线，对输出电压的幅值和频率进行微调，从而支撑本地电网的电压和频率，最后系统会在几个基波周期内进入新的稳态。下垂控制在微电网的对等控制上应用较为广泛，可实现多个分布式电源的协调控制，但下垂控制是一种有差控制，无法将微电网的电压恢复至并网的水平。

2）虚拟同步电机控制。采用下垂控制策略的单相逆变器虽然具有较快的动态响应，但其频率易受负载扰动的影响。基于上述问题，通过控制算法的改进可使逆变器按照同步发电机运行，使其对配电网具备天然的友好性，有利于微电网的可靠运行。文献[44]采用基于单相VSG控制策略，系统阐述了单相逆变器的并网向离网切换控制策略，其控制框图如图10所示，系统的有功功率决定功角特性，无功功率决定输出电压特

性,功角和电压通过同步发电机模型生成调制波,无需传统的锁相环技术。

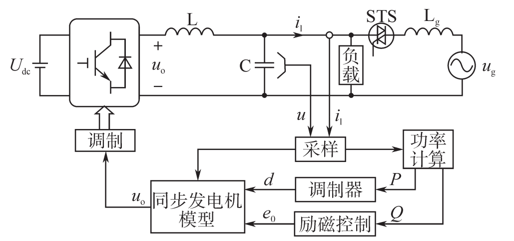

图10　单相逆变器与电网连接示意图

Fig.10　Diagram of a single-phase converter connected to the grid

由于基于VSG控制策略具有与同步发电机相媲美的调压、调频与虚拟惯性等良好输出外特性,具备了同步发电机所具有的运行功能,故该控制策略能自动完成并网模式向离网模式的平滑切换[45]。

3.2　离网向并网切换控制策略

3.2.1　电压控制转电流控制型控制策略

电压控制转电流控制型控制策略的具体流程为[35]:逆变器首先检测大电网电压正常,然后进行预同步控制,即调整负载电压以匹配大电网电压的幅值和相位,一旦负载电压完全等同于大电网电压,接通STS开关,并将电压控制模式转为电流控制模式,此时电流的参考值等同于负载电流值,最后改变电流参考的幅值和相位到期望值,完成离网向并网的切换。

在电压控制转电流控制型策略中,并网电流控制器和输出电压控制器必须能够相互切换,在切换过程中,2个控制器的输出是不等同的,因此有可能导致电压或电流的冲击。此外,由于该控制策略控制方式简单,单模式运行均能获得较好的控制效果,应用较为广泛。

电压控制转电流控制型策略一般结合基于过零点检测型的并网向离网切换策略同时使用,在此种控制方式基础上,衍生出了多种控制方式[36-37,47-49]。文献[46]提出了基于滞环控制和自适应模糊控制相结合的双模式逆变器控制策略,该策略在单模式运行下能取得较好的控制效果,切换控制原则上与上述控制策略类似;文献[36]为了解决切换过程中的冲击问题,在原控制策略基础上提出了基于电压电流加权控制的无缝切换策略,在切换过程中取得了较好改善效果;文献[47]提出了基于反演控制的并网/离网无缝切换控制策略,该策略基于非线性控制,对系统稳定性要求较高;文献[48]提出了基于MPC的双模式逆变器控制策略,在切换过程中通过改变权重系数即可实现模式之间的平滑切换,以上控制策略均是基于文献[35]的改进和优化,目前此类控制策略取得了广泛的研究[37,50]。

3.2.2　间接电流控制策略

由图8可看出,基于间接电流控制的单相双模式逆变器在离网向并网切换时,应首先检测大电网正常,其次通过调节离网时输出电压与电网电压同步,防止切换过程中的冲击,最后闭合并/离网开关,同时打开并网电流峰值外环,将$\theta+\alpha$缓慢调整为逆变器输出额定状态。

文献[50]提出了采用并网电流有效值反馈的间接电流控制策略,可实现简单可靠的并网/离网双模式无缝切换。间接电流控制结构简单,易于实现,在稳态运行条件下具有较好的控制效果,但应用于单相双模式逆变器的间接电流控制由于没有采用瞬时电流反馈,动态响应较慢,并网电流波形较差,并且有效地检测并网电流峰值或有效值较为复杂[51]。

3.2.3　电压型控制策略

电压型控制策略可分为如下2种。

1)下垂控制。由于在离网模式下,逆变器输出的电压和频率由本地负荷和下垂方程决定,必然与大电网的电压和频率存在差异。为了避免切换时的电压、电流冲击,预同步必不可少[52]。在预同步状态,一般通过动态平移下垂曲线,即P–f曲线、Q–U曲线,实现离网输出电压的频率和幅值与大电网电压完全同步状态。为了确保相位一致,需通过调节器调节相位差逐步趋向于0,作用于输出频率的调整量,实现频率和相位完全同步[42]。在切换瞬间,负载工作状态稳定,此时逆变器输出功率发生波动,需经过暂态调整后稳定输出,然后系统按照需求重新给定有功功率参考值,逆变器将按新的下垂控制参数输出,最终逆变器向大电网输送稳定有功与无功功率,系统进入新的稳态,完成离网向并网的切换[53]。

下垂控制策略属于电压型控制,能够支撑负载供电电压的稳定,同样避免了并网与离网运行时控制策略的切换,满足了并网/离网运行的动稳态性能,实现了离网向并网、并网向离网的平滑切换。

2)虚拟同步电机控制。基于VSG控制策略的逆变器在离网运行时,当满足并网运行条件时,逆变器输出电压幅值、相位与大电网之间可

能出现差异。若将逆变器直接并网，将可能会引起电压或电流冲击过大，最终导致离网向并网切换失败。因此为了降低动态切换过程可能出现的冲击电流，基于VSG控制策略同样需要并网预同步环节，通过实时跟踪大电网电压幅值和相位，以完成逆变器2种运行模式的平滑切换。

国内外对于三相系统的VSG控制策略研究较多[54]，而对于单相系统的VSG控制策略研究仍然具有挑战性。与三相系统VSG控制策略相比，主要不同是单相系统下的功率呈现2倍频波动，无法使用三相系统下基于Clark变换和Park变换的瞬时功率理论，因此，限制了VSG技术在单相系统中的发展。但由于其控制性能良好，自平衡能力较强，因此将会获得较多的关注。

单相并网/离网双模式逆变器在切换模式下，基于过零点检测型的并网向离网切换策略结合电压控制转电流控制型的离网向并网切换控制策略控制方式简单，可实现模式间的无缝切换，得到了广泛研究。由于间接电流控制和电压型控制策略均可取得较好的切换效果，在某些场合仍会得到一定程度的应用。

4 结论

单相并网/离网双模式逆变器作为分布式电源与大电网相连的关键设备，其控制策略的优劣将影响分布式发电系统的可靠性和效率。目前，国内外对于单相并网/离网双模式逆变器的研究尚处于起步阶段，在系统级控制、逆变器并联、智能控制等方面有待进一步研究，主要表现在：

1）对于单相并网/离网双模式逆变器的已有研究主要集中在基本的功能实现上，无法满足户用微电网网络化供电和管理的需求，而系统级控制有利于微电网的总体控制及管理，可兼顾微电网运行的网络化、智能化运行要求，因此需要对逆变器的系统级控制进行进一步研究，包括能量管理、通讯、保护等。

2）随着分布式电源容量的增大，由于多台逆变器并联可有效增加控制的灵活性和可靠性，因此多台逆变器并联已成为发展趋势。但对于多台逆变器并联的已有控制主要集中在线性负载下的均流和功率分配上，由于非线性负载与线性负载相比，特性较为复杂，是电力系统中各种谐波电流的主要来源，而线性负载下的控制策略又难以满足非线性负载条件下的并联逆变器，因此，对于非线性负载下的控制策略，有待进一步研究。

3）逆变器作为能源互联网的路由器，已在能源利用中发挥重大的作用，随着微处理器和高速半导体器件（SiC、GaN等）的发展，研究暂态特性更强、效率更高、损耗更低的控制策略已成为当前的发展趋势。

研究控制性能优越的控制策略，是提升电力系统消纳可再生能源的能力和综合效益、提高能源系统综合效率和居民生活水平的重要措施；也是构建节约型社会，实现能源利用可持续发展的必由之路。对于建设清洁低碳、安全高效现代能源体系、推动智能微电网的发展具有重要的现实意义和深远的战略意义。

参考文献

[1] Eren S，Pahlevani M，Bakhshai A，*et al*. A Digital Current Control Technique for Grid-connected AC/DC Converters Used for Energy Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2017，32(5)：3970-3988.

[2] 孙钦斐. 模块化户用微网变换器关键技术研究[D]. 北京：中国农业大学，2016.

[3] Wang C，Liang B，He J. An Enhanced Power Regulation and Seamless Operation Mode Transfer Control through Cooperative Dual- interfacing Converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2017，PP(99)：1.

[4] 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.

[5] 曾正. 多功能并网逆变器及其微电网应用[D]. 杭州：浙江大学，2014.

[6] 曾正，李辉，冉立. 交流微电网逆变器控制策略述评[J]. 电力系统自动化，2016，40(9)：142-151.

[7] Brenna M，Foiadelli F，Zaninelli D. New Stability Analysis for Tuning PI Controller of Power Converters in Railway Application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58(2)：533-543.

[8] Song H S，Keil R，Mutschler P，*et al*. Advanced Control Scheme for a Single-phase PWM Rectifier in Traction Applications[C]// Industry Applications Conference，2003. Ias Meeting. Conference Record of the IEEE，2003：1558-1565.

[9] Dahono P A. New Hysteresis Current Controller for Single-phase Full-bridge Inverters[J]. Iet Power Electronics，2001，2(5)：585-594.

[10] 吴凤江，孙秀冬，孙力，等. 单相电压空间矢量无差拍控制Z源并网发电系统[J]. 中国电机工程学报，2010，30(31)：22-27.

[11] 吴振兴，邹云屏，张哲宇，等. 单相PWM整流器的输入电流自适应预测控制器[J]. 电工技术学报，2010，25(2)：73-79.

[12] 杨立永，杨烁，张卫平，等. 单相PWM整流器改进无差拍电

流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5842-5850.

[13] 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.

[14] Dong L, Tian H, Xiao F. A Universal Droop-based Control Strategy for Single-phase Two-stage PV Inverters[C]//IECON 2017-, Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE,2017:6369-6374.

[15] Zeng Z,Zhao R,Yang H,*et al*. Single-phase Virtual Synchronous Generator for Distributed Energy Sources[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE,2014:190-195.

[16] Akagi H,Kanazawa Y,Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,IA-20(3):625-630.

[17] 王久和,李华德. 一种新的电压型PWM整流器直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):47-52.

[18] Liu B,Song W,Feng X. Constant-frequency-hysteresis Direct Power Control Strategy for Single Phase PWM Rectifiers[C]// Future Energy Electronics Conference. IEEE,2015:1-6.

[19] 马庆安,李群湛,邱大强,等. 基于直接功率控制的单相AC-DC变流器控制器设计[J]. 电工技术学报,2012(7):251-256.

[20] 马俊鹏,宋文胜,冯晓云. 单相三电平脉冲整流器无锁相环直接功率控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1723-1731.

[21] Karshenas H R,Niroomand M. Design and Implementation of a Single Phase Inverter with Sine Wave Tracking Method for Emergency Power Supply with High Performance Reference [C]//Eighth International Conference on Electrical Machines & Systems. IEEE,2006.

[22] Aamir M,Kalwar K A,Mekhilef S,*et al*. Review:Uninterruptible Power Supply(UPS) System[J]. Renewable&Sustainable Energy Reviews,2016,58:1395-1410.

[23] 黄如海,谢少军. 基于比例谐振调节器的逆变器双环控制策略研究[J]. 电工技术学报,2014,27(2):77-81.

[24] 王逸超,罗安,金国彬. 微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J]. 电工技术学报,2015,30(22):116-123.

[25] Zhao Y,Chai J,Wang S,*et al*. Instantaneous Power Calculation Based on Intrinsic Frequency of Single-phase Virtual Synchronous Generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2017,5(6):970-978.

[26] Buso S,Caldognetto T,Brandao D. Dead-beat Current Controller for Voltage Source Converters with Improved Large Signal Response[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2016,52(2):1588-1596.

[27] Cortes P,Ortiz G,Yuz J I,*et al*. Model Predictive Control of an Inverter with Output Filter for UPS Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(6):1875-1883.

[28] 杨立永,杨烁,张卫平,等. 单相PWM整流器改进无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5842-5850.

[29] Lidozzi A,Ji C,Solero L,*et al*. Resonant-repetitive Combined Control for Stand-alone Power Supply Units[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(6):1.

[30] Deng H,Oruganti R,Srinivasan D. Modeling and Control of Single-Phase UPS Inverters:A Survey[C]// International Conference on Power Electronics & Drives Systems. IEEE,2006.

[31] Abrishamifar A,Ahmad A A,Mohamadian M. Fixed Switching Frequency Sliding Mode Control for Single-phase Unipolar Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(5):2507-2514.

[32] Fadil H E,Giri F. Reducing Chattering Phenomenon in Sliding mode Control of Buck-Boost Power Converters[C]//Industrial Electronics,2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on. IEEE,2008.

[33] Xavier L S,Cupertino A F,José T Resende,*et al*. Adaptive Current Control Strategy for Harmonic Compensation in Single-phase Solar Inverters[J]. Electric Power Systems Research,2017,142:84-95.

[34] Deng H,Oruganti R,Srinivasan D. A Multi-layer Neural Network Controller for Single-phase Inverters[C]//International Conference on Power Electronics & Drive Systems. IEEE,2003.

[35] Tirumala R,Mohan N,Henze C. Seamless Transfer of Grid-connected PWM Inverters Between Utility-interactive and Stand-alone Modes[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition,2002. Apec 2002. Seventeenth IEEE. IEEE,2002:1081-1086.

[36] Yao Z,Xiao L,Yan Y. Seamless Transfer of Single-phase Grid-interactive Inverters Between Grid-connected and Stand-alone Modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(6):1597-1603.

[37] Dong D,Thacker T,Cvetkovic I,*et al*. Modes of Operation and System-level Control of Single-phase Bidirectional PWM Converter for Microgrid Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):93-104.

[38] 栗向鑫,韩俊飞,梁倍华,等. 面向单相微电网的双模式并联逆变器协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2017(16):136-142.

[39] Kwon,Junbum,Sunjae Yoon,Sewan Choi. Indirect Current Control for Seamless Transfer of Three-phase Utility Interactive Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(2),773-781.

[40] Yu T,Choi S,Kim H. Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters for Seamless Transfer[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2006.

[41] Kim H,Yu T,Choi S . Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters in Distributed Generation Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1342-1347.

[42] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, *et al*. Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-interactive UPS Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):726-736.
[43] 佟云剑,沈健,刘鸿鹏,等. 光伏发电系统运行模式无缝切换控制策略[J]. 电网技术,2014,38(10):2794-2801.
[44] Zhang S, Zhao J, Chen Y, *et al*. Grid-friendly Characteristics Analysis and Implementation of a Single-phase Voltage-controlled Inverter[J]. Journal of Power Electronics, 2017, 17(5): 1278-1287.
[45] 石荣亮. 互补微电网中的虚拟同步发电机(VSG)控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
[46] Gu H, Yang Z, Wang D, *et al*. Research on Control Method of Double-mode Inverter with Grid-connection and Stand-alone [C]//Conference CES/IEEE International Power Electronics & Motion Control Conference. 2006.
[47] Wai R J, Lin C Y, Wu W C, *et al*. Design of Backstepping Control for High-performance Inverter with Stand-alone and Grid-connected Power-supply Modes[J]. Iet Power Electronics, 2013, 6(4):752-762.
[48] Li X, Zhang H, Balog R S. Control Strategy for Seamless Transfer Between Island and Grid-connected Operation for a Dual-Mode Photovoltaic Inverter[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition(ECCE). IEEE, 2015.
[49] Arafat M N, Palle S, Sozer Y, *et al*. Transition Control Strategy Between Standalone and Grid-Connected Operations of Voltage-source Inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5):1516-1525.
[50] 过亮,许爱国,谢少军. 间接电流控制独立/并网双模式逆变器研究[J]. 电力电子技术,2008,42(4):36-38.
[51] Liu Z, Liu J. Indirect Current Control Based Seamless Transfer of Three-phase Inverter in Distributed Generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7):3368-3383.
[52] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.
[53] 焦迪,李睿,蔡旭. 一种单相逆变器并离网切换的统一控制策略[J]. 电力电子技术,2017,51(5): 78-80.
[54] 石荣亮,张兴,徐海珍,等. 基于自适应模式切换的虚拟同步发电机功率控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(12): 127-137.

收稿日期:2019-02-11
修改稿日期:2019-07-10