用于微电网的储能变流器控制策略综述

陈亚爱，林演康，周京华
（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：微电网的储能变流器采取灵活的控制策略，将各种能源转化后供给有需求的负荷，使微电网既能作为一个可控整体单元进行并网运行，又能独立运行，其控制策略对于微电网安全稳定运行尤为重要，因此，受到业内的广泛关注和研究，并取得大量研究成果。在前人研究的基础上，对储能变流器各工作模式下的控制策略进行分析和归类，并对各控制策略优缺点进行总结，同时列出目前微电网系统及储能变流器应用中有待研究解决的问题，为应用于微电网的储能变流器控制策略的应用和深入研究提供参考。

关键词：微电网；储能变流器；控制策略
中图分类号：TM46　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd21442

Review of Power Conversion System Control Strategies for Microgrid

CHEN Ya'ai，LIN Yankang，ZHOU Jinghua
（*Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing*，*North China University of Technology*，*Beijing* 100144，*China*）

Abstract: The power conversion system in microgrid adopts flexible control strategy to supply the demand load after transforming various energy sources. The power conversion system enables the microgrid to be connected to the grid as a controllable whole unit or to operate independently. Its control strategy is particularly important for the safe and stable operation of the microgrid. Therefore，power conversion system is widely concerned and studied in the industry，and a lot of research results have been obtained. On the basis of previous studies，the control strategies under various working modes were analyzed and classified. The advantages and disadvantages of each control strategy were summarized，and the problems to be solved in the application of microgrid system and power conversion system were listed. This provides a reference for the application and further research of power conversion system control strategy applied to microgrid.

Key words: microgrid；power conversion system（PCS）；control strategy

用于微电网的储能变流器（power conversion system，PCS）是微电网内能量流和信息流交汇的枢纽，与常规PCS不同，它具备提供无功、谐波补偿的能力，在并网、离网和并/离网切换工况下均能向负载提供良好的电能质量。为保证微电网拥有良好的电能质量、实现经济效益，需采取切实可行的控制策略，目前对控制策略的研究越来越受到行业重视。本文在对现有应用于微电网的PCS科研成果进行深入分析的基础上，归纳并总结各种控制策略的特点和适用场景。

1　用于微电网的PCS控制策略分类

根据实际应用场合及功能需求，不同的储能系统采用的PCS结构不尽相同，若根据输出电平数量，一般可分为两电平、三电平和多电平等结构；若根据变换环节数量，可分为单级式、双级式等结构。在低压应用场合，PCS常用的是单级式两电平结构，由于拓扑结构的限制，其直流侧储能介质电压变化范围较窄，该结构适用于一些端

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，Email：cya@ncut.edu.cn

电压随 SOC 状态变化比较小的储能介质,如锂离子电池等;若储能介质为超级电容等,端电压随 SOC 状态变化较大,则需采用在单级式PCS直流侧加一级DC/DC变换器构成的双级式PCS,该结构可拓宽直流侧储能介质的电压变化范围,适用于多种储能介质,应用于各功率场合。本文的分析及归类正是基于双极式两电平PCS开展的,其拓扑如图1所示。

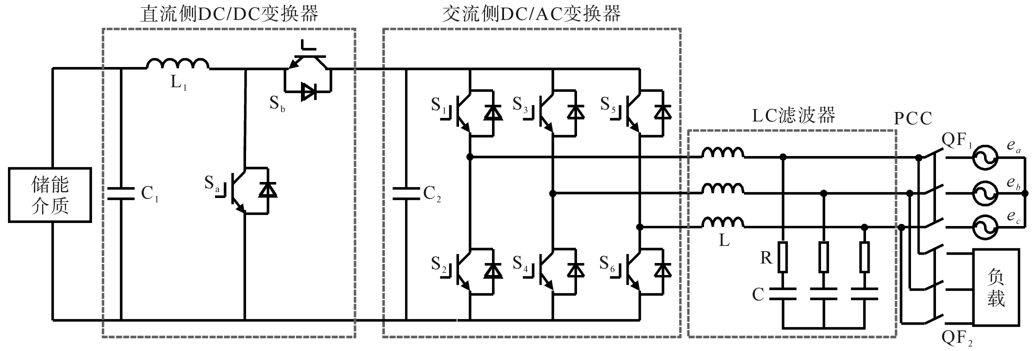

图1 双极式两电平PCS拓扑示意图

Fig.1 Schematic diagram of bipolar two level PCS

为保证在任何工况下PCS都能向负载提供合格的电能质量,每种工作模式下需采取相应控制策略。用于微电网的PCS包含并网、离网和并/离网切换3种工作模式,其控制策略分类如图2所示。

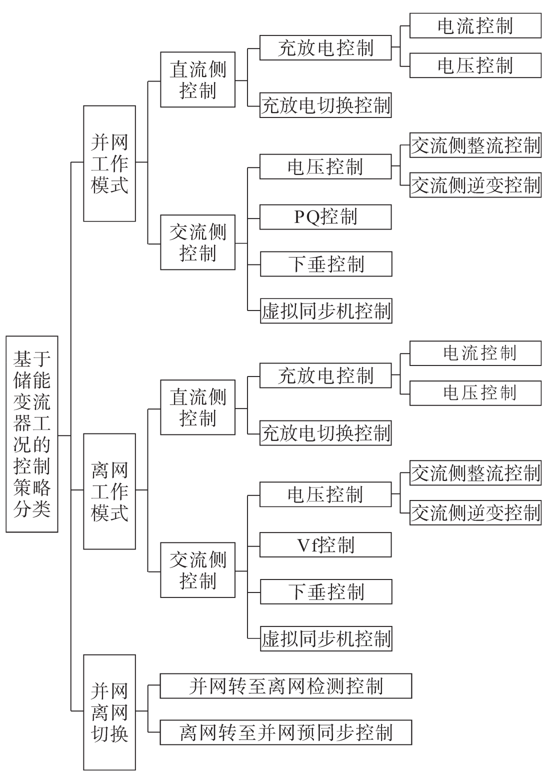

图2 基于PCS功能的控制策略分类图

Fig.2 Schematic diagram of based on PCS functions control strategies classification

图2中,并网、离网工作模式均包含PCS直流侧和交流侧控制。并网工作模式下的直流侧控制又可分为充放电控制和充放电切换控制,充放电控制可分为电流控制、电压控制两种控制策略;离网工作模式下的直流侧控制与并网相同,因此不再赘述。并网工作模式下的交流侧可分为电压控制、PQ控制、下垂控制和虚拟同步机控制(virtual synchronous generator,VSG)控制4种,电压控制又可分为交流侧整流控制和交流侧逆变控制两种。但由于VSG控制离网工作模式下较为常用且与并网时工作原理相同,本文把VSG策略放入离网模式下分析总结。离网工作模式下的交流侧可分为电压控制、Vf控制、下垂控制和VSG控制4种控制策略,此模式下的电压控制和下垂控制与并网时一样,因此不再赘述。并/离网切换模式可分为并网转离网检测控制和离网转并网预同步控制。

2 PCS并网控制策略

2.1 直流侧充放电控制策略

储能系统需要根据外界需求灵活地在充电和放电模式之间切换[1],PCS直流侧DC/DC变换器则要稳定母线高压侧电压,因此需对DC/DC变换器进行控制。

2.1.1 电流控制

电流控制通过检测直流母线电压生成电流环参考值且与电池侧电感电流比较后,直接作用于DC /DC变换器,控制策略如图3所示。

电流控制精度高、动态响应快,但也会产生周期性的电流误差[2],该控制策略适用于动态性能指标高的场合。

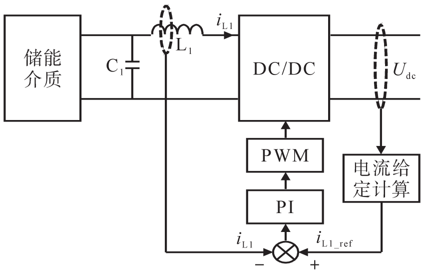

图3　直接电流控制框图

Fig.3　Direct current control block diagram

文献[2]为缓解微电网间歇和波动性对储能系统带来的负面影响，采用小信号分析方法推导系统稳定条件，采用互补型脉宽调制方式控制，并提出多滞环调节的控制方法，有效改善了储能单元的充放电过程，提高了储能的技术经济性。但该控制策略忽略了瞬时充电电流和储能单元*SOC*对控制的影响。文献[3]考虑储能单元*SOC*状态和外部电压状态等约束条件，以DC/DC侧电感电流为内环，外部恒压、涓流控制方式为电流环生成参考电流，保证储能单元不会因过充过放造成不可恢复伤害，但实验运行功率只有5 kW，若将该策略应用于实际，应提高功率继续试验。文献[4]基于电池电流调节原理，在PV分布式电源给储能单元充电算法中增加最大功率点跟踪技术，提高储能单元寿命且降低对电池电流测量精度的依赖性，能更好地利用光伏能量且更快达到100%电池充电状态。

2.1.2　电压控制

电压控制是双向DC/DC变流器根据PCS的输入/输出功率，对电池组进行充电/放电，维持DC/DC和DC/AC间直流电压的恒定，电压控制策略如图4所示。

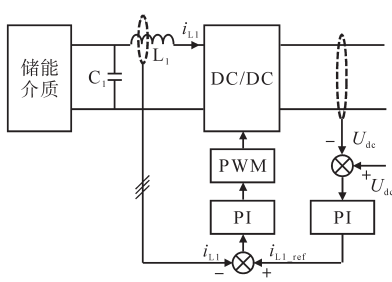

图4　电压控制框图

Fig.4　Voltage control block diagram

文献[5]针对储能单元研究提出一种多DC/DC和DC/AC模块构成的PCS，提出恒流控制和稳压控制，实现多簇储能单元同时充放电，并能保证恒流控制下充电电流很好地跟踪放电电流，恒压控制下中间直流电压很好地稳定在系统要求值，但该策略在两种控制下均不能做到单位功率因数运行。文献[6-7]提出一种基于直流母线电压稳定的储能系统充放电控制策略，该策略通过控制稳定的充放电电流，保证直流母线电压稳定在允许波动的合理范围内；又利用储能单元*SOC*状态判断实现储能单元内部功率平衡。

对以上储能单元充放电控制策略进行总结对比，将其各自特点列于表1中。

表1　充放电控制策略特点比较

Tab.1　Comparison of charging and discharging control strategies

充放电控制策略	优点	缺点
直接电流控制	电流控制精度高，动态响应快，适合于动态性能指标高的场合。	容易产生周期性电流误差。
电压控制	保证直流母线电压稳定，易实现功率平衡。	算法较直接电流控制复杂。

2.2　直流侧充放电控制策略

储能单元通过PCS与电网和负荷进行能量交换，其充放电控制直接影响微电网的供电质量，这便要求储能系统能够稳定快速进行充放电响应，因此其充放电切换控制是研究热点之一。

文献[8]考虑分布式电源间歇性特点，并以供需功率平衡为基础提出一种二次修正储能单元充放电切换控制策略，即先以小波包对分布式电源输出量的分解分量作为储能单元充放电指令，并以功率平衡作为充放电指令的一次修正；其次以储能单元模糊控制输出量作为充放电指令的二次修正。该控制策略采用模糊控制对储能系统*SOC*进行自适应控制，实现充放电指令的自切换，发挥储能系统的容量效益，减小容量配置成本，并且能很好地满足GB/T 34120中对PCS充放电切换的要求。文献[9]以超级电容为储能单元，分析其构成和工作原理，以超级电容*SOC*作为判定依据，设计充放电切换算法，保证系统自动跟踪PCS输出侧能量状态，实时实现充放电自切换控制。但该控制策略仅考虑储能单元的安全高效使用，未考虑输出功率是否平衡且必须有储能单元之间可靠的信息实时共享作为保障。文献[10]为稳定微电网内功率平衡、抑制直流母线电压波动，将直流母线电压分成5个区域，系统依据直流母线电压所处区域判断储能系统工作模式及模式切换。该控制策略能实现储能系统充电、放电和充放电切换模式的自由切换，同时抑制直流母线电压波动，保证储能单元长期安全、高效运行。

但系统功率严重不平衡时,只是建议微电网适当切除负荷,并未对此做深一步研究。

2.3 交流侧控制

2.3.1 整流控制

储能电池充电时,PCS需工作在整流模式,使直、交流侧之间得到稳定的母线电压。储能电池充电时,DC/AC侧控制策略分类如图5所示。

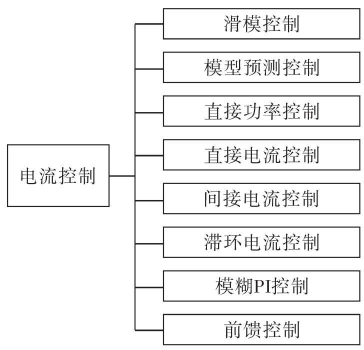

图5 整流控制策略分类图

Fig.5 Schematic diagram of rectifier control strategy classification

滑模控制[11]是电压外环采用滑模控制或双环均采用滑模控制的一种控制策略,以PCS输出直流电压误差为状态变量构造指数衰减率切换面,通过对电流内环控制器进行设计,实现各变量的解耦控制。该控制策略具有良好的参数变化自适应性,改善PI控制的滞后性及对系统参数的敏感性,但各控制环设计较为复杂。

模型预测控制[12]是在每个周期对所有开关状态下的电流、电压、频率或功率进行预测评估,并将矢量平面分为多个扇区,判断参考值所在区域,使得控制器输出量为参考值所在区域最优的电压矢量。模型预测方法无需迭代计算寻优且耗时少,但算法运算量大,对控制器性能要求较高。

直接功率控制有基于电压定向、虚拟磁链和输出调节子空间三种控制策略。基于电压定向策略的交流侧电感选取难度较大且对传感器和采样频率依赖程度较高;基于虚拟磁链策略的物理量计算受参数变化影响较大,增大计算误差;基于输出调节子空间策略将输入空间划分为多个区域,通过开关矢量选择调节系统状态,改善了基于电压定向、虚拟磁链控制策略不足,具有更好的动态性能。

除了以上几种控制策略之外,还有直接、间接、滞环电流控制策略、模糊PI控制策略、前馈控制策略等。限于篇幅,论文不再对这些控制策略进行详细阐述。

2.3.2 PQ控制

PQ控制本质就是控制储能介质的有功功率和无功功率。一般在主从控制时,从控的PCS采取PQ控制,此时储能介质相当于受控电流源[13],PQ控制原理图如图6所示。

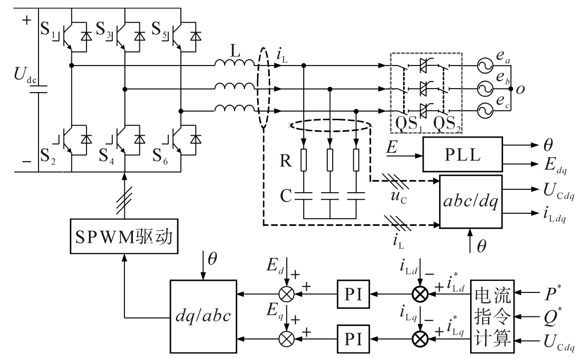

图6 PQ控制框图

Fig.6 PQ control block diagram

PQ控制对应用场合有一定要求,即多适用于直流母线端输出功率随机性较大的电源,该控制下电源的输出功率及微电网内部的负荷波动、电压频率偏移等由电网进行调整[14],从而使PCS按照给定的有功、无功指令值输出;PQ控制不能支撑微电网的电压和频率,如果系统提供的电压幅值和相位参考不稳定,则PQ不能很好地应用于该系统。在微电网内,采取PQ控制的PCS作为从控制器运行时,必须跟随主控制器运行,所以各微源之间要实现信号实时共享且保证通信有较高的可靠度;作为主控制器时可能会存在功率额定限制,所以要对微电网的孤岛运行情况和负载消耗有一定的预估。

文献[15-16]提出了一种前馈解耦的PQ控制策略。利用坐标变换,进行交直流量的变换,以d轴电压进行定向,方便地通过i_d,i_q实现对网侧P和Q的解耦控制。引入前馈解耦的d,q轴独立控制,采用电流PI调节器。前馈解耦控制如图7所示。

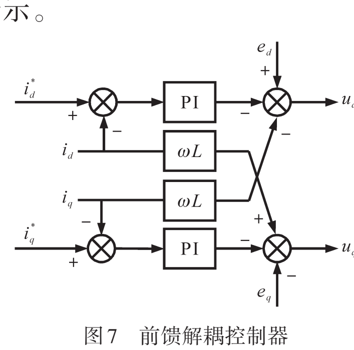

图7 前馈解耦控制器

Fig.7 Controller of feedforward decoupling

基于前馈解耦的PQ控制策略可以展现同步

坐标系的优点,有功电流和无功电流实现了解耦和独立控制。PI调节器具有动态、静态响应较好和频率稳定等优点,实现无差调节。

文献[17]基于下垂电压控制,设计低增益状态反馈器对微电网的有功、无功功率进行控制,通过产生正弦基准电压,由电压环跟踪,该电压环为电流环生成电流基准,并且该控制策略引入前馈状态,保证电能以良好质量入网。但该策略涉及到线性矩阵不等式问题,电压环、电流环设计比较复杂。

2.3.3　下垂控制

下垂控制是模拟与同步发电机相似的下垂特性曲线作为PCS的控制方式。各分布式电源分别检测自身的输出功率,通过下垂特性获得各自的频率和电压指令值,然后各自反向微调其输出电压的相位和幅值,最终达到系统有功平衡和无功合理分布的目标[13]。$P—f/Q—U$下垂控制结构如图8所示。

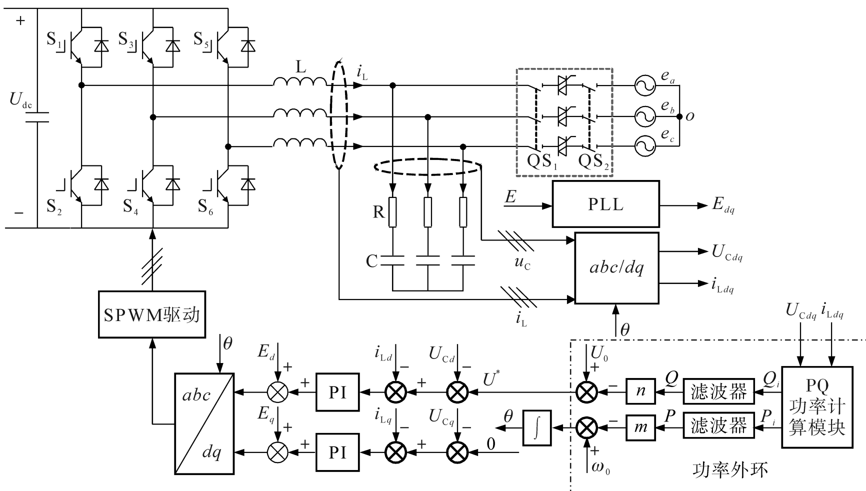

图8　$P—f/Q—U$下垂控制框图

Fig.8　Block diagram of $P—f/Q—U$ droop control

下垂控制的优点:无需实现多台PCS间的信息通讯,便能保证微电网中频率电压的统一,简单可靠且成本低。下垂控制的缺点:基于虚拟阻抗的下垂控制加入虚拟阻抗使得输出电压存在偏差,影响输出电压控制精度;另外,输出电压指令可能会含有输出电流的谐波成分,影响PCS输出的电能质量。

传统下垂控制策略往往根据线路阻抗特性忽略线路电抗的影响,采用频率—无功,电压—有功的控制调节策略,而微电网本身电压等级较低,线路成阻性或阻感性[18];另外微电网容量相对较低,下垂控制中电抗的影响不容忽略。文献[19]基于下垂控制提出输出电流分解的虚拟阻抗回路方法,并分别合成正序和负序虚拟阻抗,保证在三相负载平衡下,利用较大的负序虚拟阻抗使并联变流器负序环流电流最小;在三相负载不平衡下,设计动态调节负序电阻回路,使PCS输出电压的质量和负载分担性能达到良好的平衡。文献[20-22]在PCS并联时,为保证线路阻抗不同情况下实现功率均分和环流抑制,基于下垂控制改进功率计算公式和无功补偿环节,实现功率均分和环流抑制,降低功率损耗并提高微电网系统的动态性能,但论文并未对负载突变时的功率分配不均问题做进一步研究。文献[23]通过引入虚拟阻抗,解决线路阻抗不同的影响,提高负载突变时功率动态调节能力,实现系统功率精确分配。文献[24-25]为解决传统下垂控制具有的调节速度慢、功率分配不均问题,提出了基于下垂控制的分段自适应方法,可以通过分段自适应控制调节下垂系数,使系统获得良好的动态响应速度、功率分配效果,提高系统电能质量。

对以上几种并网下交流侧控制策略进行总结对比,将其各自特点列于表2中。

表2　并网交流侧控制策略特点比较

Tab.2　Comparison of grid-connected AC side control strategies

并网交流侧控制策略	优点	缺点
电压控制	使直交流侧之间获得稳定母线电压,控制结构简单,输出电压精度高。	预测控制等算法复杂度较大。
PQ控制	实现有功、无功功率灵活控制。	作为主控、从控DG时有一定功率额定限制。
下垂控制	易实现微电网内电压频率统一,简单可靠。	电压控制精度低,易出现电流谐波成分,影响微电网电能质量。

3 PCS离网交流侧控制策略

3.1 Vf控制

Vf控制是PCS以输出电压、频率指令值进行控制，能起到支撑微电网内的电压和频率的作用，常作为主控制器运行，此时，有功、无功功率由负载决定。Vf控制常采用电压外环、电流内环的双闭环控制策略，其控制策略如图9所示。

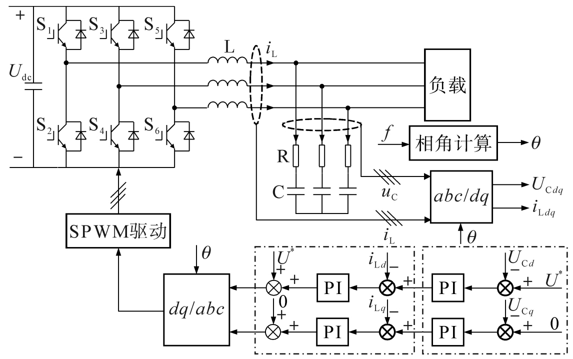

图9　Vf控制框图

Fig.9　Vf control block diagram

Vf控制的优点：电压外环保证输出电压的稳定，电流内环构成随动系统，实现对参考值跟踪，同时兼顾系统稳定性，增大系统相位裕度[26]，对非线性负载扰动的适应能力加强，输出电压的谐波含量减小。双环控制充分利用系统的状态信息，动态性能好，稳态精度高。Vf控制的缺点：多机并联运行困难，不易实现准确均流[27]。

文献[28–29]在电压外环处添加模糊PI控制器、自适应PI控制器，并进行了电流的前馈解耦，既可以稳定并/离网切换时由于电压突变导致的系统不稳定，又可以稳定负载端电压，提供参考信号作为电流内环的输入。但是，模糊论域涉及复杂输入量转化和解模糊，计算过程较为复杂。并且在离网时，可能会由于分布式电源的不稳定引起电压电流的小幅变化导致并/离网切换时间延长几秒钟。

3.2 虚拟同步机控制

同步发电机通过控制输入机械功率（P_m）稳定输出功率和频率，通过改变励磁电流产生的电磁功率（P_e）来控制输出电压[30]。因此，在虚拟同步发电机控制（virtual synchronous generator，VSG）中必须加入电压、频率和功率的闭环控制使其更真实地模拟同步发电机。VSG控制策略如图10所示。基于VSG的微电网PCS拥有与传统同步发电机一样的稳定性，改善系统的惯性，有利于分布式电源入微网。该策略以稳定输出功率为主，当负荷变化时，PCS仍能均分功率，既有利于微电网稳定，又保证平滑并网运行。

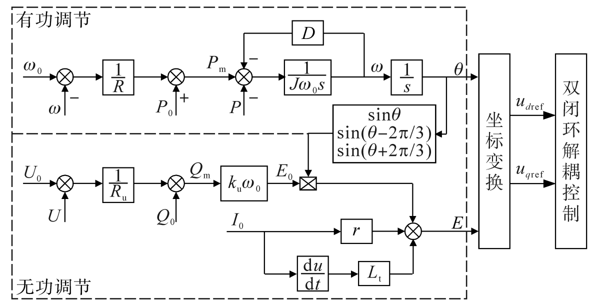

图10　VSG控制框图

Fig.10　Block diagram of VSG control

VSG控制策略中存在固定系统参数不能保证系统的快速响应和稳定性、dω/dt变化快慢影响系统动态性能问题。文献[31–35]针对此问题，依据旋转惯量与阻尼系数对系统的影响，提出了在不同阶段系统根据运行特性动态调节旋转惯量和阻尼系数，能够有效减小系统的超调量、维持系统频率稳定。但该策略主要应用于离网运行模式，并网运行模式有待查验，并且自适应旋转惯量VSG参数整定比较复杂。文献[36]分析控制参数对系统稳定性的响应，利用VSG转子和无功调节的特性设计频率调节器，提高了PCS的动态、稳态性能且能稳定并网，但该方法仅分析VSG并网运行时的运行特性，且只进行了仿真分析，后续应对离网下各种工况分析并进行实验研究。文献[37]针对VSG虚拟惯性存在时，功率调度指令突变会造成PCS输出的频率、功率发生振荡问题，采用矩阵二次型最优控制，控制PCS的功率和频率，优化虚拟惯量，缓解其功率、频率振荡，防止因过流而停止工作。

对以上几种离网下交流侧控制策略进行总结对比，将其各自特点列于表3中。

表3　离网交流侧控制策略特点比较

Tab.3　Comparison of off-grid AC side control strategies

离网交流侧控制策略	优点	缺点
Vf控制	动态性能好，稳态精度高。	多机并联运行困难，不易实现准确均流。
下垂控制	保证微电网中频率电压的统一，简单可靠且成本低。	输出电压控制精度不高，电能质量会受输出电流的谐波成分影响。
VSG控制	均分功率能力强，改善系统惯性，既有利于微电网稳定，又保证平滑并网运行。	系统参数整定较为复杂。

4　并/离网切换控制策略

PCS在并/离网切换时,若不加控制,会出现电压波动和冲击电流等问题。为保证系统内电能质量的稳定和转换过程中不间断供电,不影响用电负荷的稳定运行,并/离网工况应平滑切换,这也是微电网比传统供电系统的优势所在。由于并/离网切换时控制目标不同,其控制策略又分为并网切换至离网控制和离网切换至并网控制。

4.1　并网切换至离网检测控制

PCS在并网时表现为电流源特性,离网时表现为电压源特性,并网转离网控制实质上是PCS的电流型控制转至电压型控制。为实现并/离网模式的切换,并网开关一般为静态开关,通常选择双向晶闸管反并联的开关电路作为静态开关,由于这种晶闸管会在电网故障半个基波周期内脱网,因而学者提出电流过零点检测、间接电流控制和电压型控制等并网切换离网方法。

4.1.1　基于电流过零点检测控制

电流过零点检测是当电网发生故障时,PCS并网点处电压发生跌落,电网电压值低于预设最小值时,检测电路会关闭并/离网开关。因此PCS在电流第一个过零点断开电网,瞬间PCS从电流型控制转为电压型控制。文献[38-39]对切换算法进行了详细介绍,具体的切换流程为:检测到电网故障并向并/离网开关发出关闭信号;检测负载电压和相位;当电网电流过零时,PCS转为电压型控制,其基准电压来自负载电压;最后调整负载电压参考值至额定值。

电流过零点检测控制结构简单,应用广泛,但无法对非计划性孤岛情况作出较好的应对。

4.1.2　间接电流控制

间接电流控制实质上是通过控制电感电压实现调节并网电流的目的。间接电流控制等效电路如图11所示,并网功率因数为1的矢量控制如图12所示。

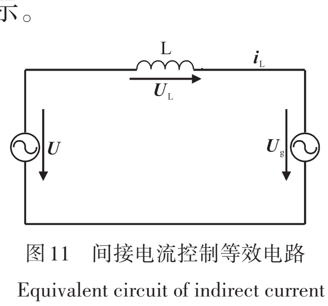

图11　间接电流控制等效电路

Fig.11　Equivalent circuit of indirect current control

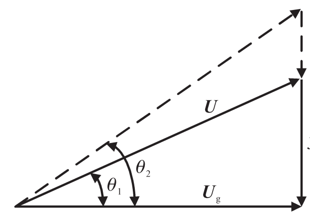

图12　间接电流控制电压矢量图

Fig.12　Diagram of indirect current control voltage vector

图11和图12中,$\boldsymbol{U}$,$\boldsymbol{U}_g$分别为PCS输出电压、电网电压;$\boldsymbol{U}_L$为电感电压。由图11可见,可以通过控制θ实现电感电压的调节,且在功率因数损失较小的情况下,将$\boldsymbol{U}$和θ进行解耦,实现并网有功、无功功率的控制。

文献[40]为避免并/离网切换时电流输出可能不稳定,提出适合并/离网切换的间接电流控制策略,其控制策略如图13所示。该控制外环为并网间接电流环,内环为PCS输出电压环。并网时采用注入电流均方根值控制作为外部控制回路,离网时采用输出电压和输出电容电流的瞬时控制。当电网故障时,由间接电流控制计算的U^*将被进行限值,以保证临界状态负载的安全运行。

并/离网工况下的间接电流控制最终目标均是PCS输出电压,因而可在并网切换至离网时有效降低暂态电压电流冲击,实现平滑切换。

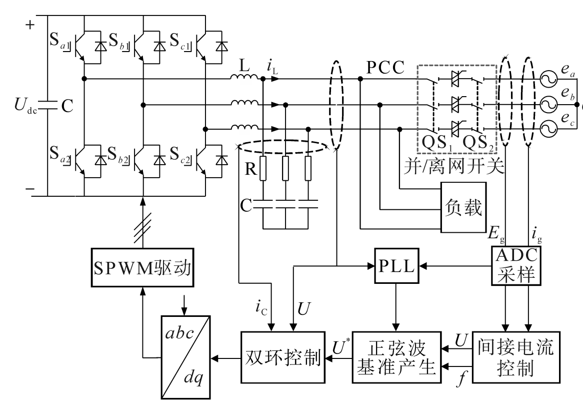

图13　间接电流控制框图

Fig.13　Block diagram of indirect current control

4.1.3　电压型控制

1)下垂控制。基于下垂控制策略的PCS接收到离网信号或被动离网时,先断开并/离网开关QS_1,QS_2,使PCS断开与电网连接,切换的瞬间U/f保持不变,且由负载决定PCS的输出功率,PCS再根据有功、无功功率及下垂特性对PCS输出电压的幅值、频率进行调整,使其支撑微电网内部的电压、频率,最后系统会在几个基波周期内进入新的稳态。下垂控制常适用于多台PCS协调控制,但由于其为有差控制,无法将微电网的电压

恢复至并网的水平。离网模式下垂控制框图如图14所示。

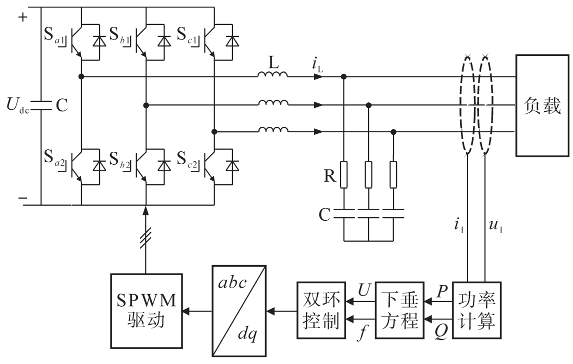

图14　基于下垂控制的离网控制框图

Fig.14　Block diagram of off-grid control diagram based on droop control

2)VSG控制。VSG控制是系统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。

文献[41]阐述基于VSG控制的PCS并/离网切换控制策略,通过有功、无功功率控制功角特性和输出电压特性,VSG控制下PCS调压、增加系统惯量的能力与同步发电机媲美。正因为具备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[42]。其控制框图如图15所示。

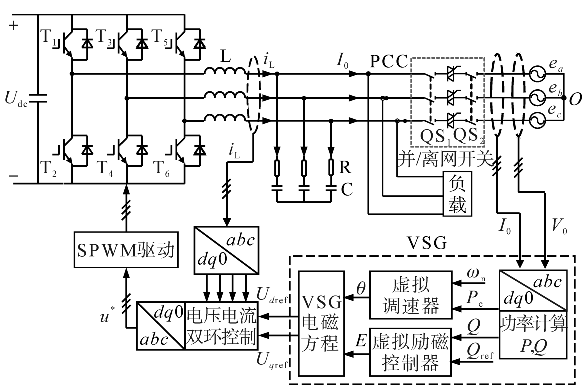

图15　VSG并/离网控制框图

Fig.15　Grid-connected of VSG control block diagram

4.2　离网切换至并网预同步控制

PCS离网切换至并网时,电压和频率又将由电网支撑,故必须保证微电网和大电网连接时电压幅值、相位和频率的一致,才能减小并网电压、电流冲击,实现平滑切换。

文献[43]改进传统相位同步控制,采用新型相位同步方法,如图16所示。图16中,ω为下垂控制中有功频率控制器输出角频率;U_{gq},U_q分别为电网、微电网q轴分量;k_θ为相位同步控制器积分系数。该控制策略可以直接调节微电网电压相位与电网同步,消除频率调节法对P–f下垂控制的影响,同时包含电网电压的相位锁存功能,能有效抑制离网转至并网时负载对微电网电压、频率的扰动。

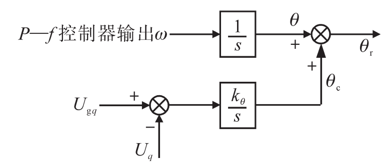

图16　相位同步控制框图

Fig.16　Phase synchronization control block diagram

文献[44–47]为解决并网时暂态冲击问题,提出PQ控制器初始状态跟随Vf控制器输出状态的控制策略,预同步控制策略如图17所示。图17中,Set为并网指令信号;v_{inv}为离网工况输出电压;θ_{inv}为PCS输出电压相位;θ_{ref}为PCS参考相位;v_{d_grid}为电网侧电压有功分量;v_{d_inv}为PCS输出电压有功分量。当Set并网指令下达后,计算网侧、PCS输出相位差,经PI控制器得到参考相位,同时利用网侧、PCS有功分量得到电流内环参考值,当参考值符合要求,实现无电压电流冲击的离网至并网模式切换。

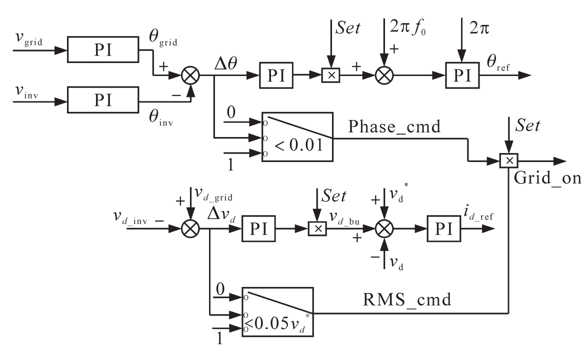

图17　预同步控制框图

Fig.17　Preliminary synchronization control block diagram

VSG控制策略在离网下会调整PCS输出电压的频率和相位,故会产生与电网电压的相位差,为降低模式切换过程中的电流冲击,VSG并网也需有预同步环节。文献[48–49]为消除并网时产生的冲击电流,设计针对VSG离网转并网控制策略,其控制原理为

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \Delta\omega = \omega_0 + (K_p + \dfrac{K_i}{s})(\theta_g - \theta) \\ U = U_n + \Delta U = U_n + (K_p + \dfrac{K_i}{s})(U_g - U) \end{cases} \quad (1)$$

式中:ω为系统角频率;$\Delta\omega$为增加到ω_0上的相位

补偿量；θ_g，θ为锁相环锁出相角、VSG控制输出相角；U_n为VSG空载电势；ΔU为增加到U_n上的幅值补偿量；U_g，U为电网电压、系统端电压；K_p，K_i为PI控制器的比例和积分系数。

该控制策略方法简单、易于实现，能够在并/离网切换时提供电压、频率支撑，实现在离网转至并网时很好地跟踪电网电压，且无明显冲击电流，提高了系统稳定性。

5 PCS整体联系及微电网线路阻抗特点

5.1 DC/DC侧和DC/AC侧控制关系

相较于单级式PCS，双极式PCS增加了DC/DC变换器部分，用以提供DC/AC侧电压支撑，拓宽直流母线端电压等级范围。但由于DC/DC变换器存在，装置散热问题严重，控制复杂度有所提升，整体装置效率下降，同时增加装置成本。

双极式PCS可通过全解耦实现DC/DC侧与DC/AC侧独立控制，降低控制难度[50]。单级式PCS需承担直流母线电压支撑与交流侧输出功率等任务，但双极式PCS可实现功能独立，即DC/DC侧对储能电池进行控制，实现储能电池的恒流、恒压充放电及恒流、恒压、恒功率放电；DC/AC侧整流模式时实现DC/DC侧直流母线电压支撑，逆变模式时实现储能系统恒压、恒流、恒功率放电。值得注意的是，当DC/DC侧控制储能单元进行恒流、恒功率放电时，其间的直流母线电压需由DC/AC侧支撑，此时DC/AC侧的控制与单级式PCS控制类似。表4为单级式、双极式PCS优缺点比较。

表4 单级式、双极式PCS比较

Tab.4 Comparison of single-stage and bipolar system PCS

拓扑结构	优点	缺点
单级式PCS	控制算法简单，效率高，装置整体成本低。	直流侧电压范围较窄，应用场合受到限制。
双极式PCS	实现DC/DC与DC/AC侧独立控制，拓宽直流侧电压等级。	散热问题严重，效率低，控制算法较为复杂，且装置整体成本较高。

相较于单级式PCS，双极式PCS最大的优点是拓宽了直流侧电压等级，其机理为：当储能电池输出电压低于DC/AC侧不控整流值时，导致交流侧输出电压低于电网电压，需在交流输出侧添加隔离变压器后方可实现PCS并网运行。DC/DC变换器的存在可将较低的储能单元电压提高至不控整流值甚至更高，易于PCS直接并网运行。因此，双极式PCS适用于超级电容等端电压变化范围较广的储能介质。

5.2 并/离网工况下控制策略关系

微电网内PCS有并网、离网两种工作模式。灵活地选择工作模式及控制策略是微电网相较于传统电网优势所在，针对不同的微网控制模式，PCS并/离网控制策略组合也略有不同。

5.2.1 基于主从控制的并/离网控制策略关系

主从控制下微电网有集中主控和分散主控两种方式[51]。

1）集中主控。集中主控是并网模式时，微电网的电压频率由电网支撑，故微网内的PCS可采用PQ控制；离网模式时，缺少电网电压、频率支撑，选择一台容量够大的PCS采用Vf控制支撑电压、频率，其余PCS采用PQ控制。该控制下，主控PCS需有并/离网切换功能，并且能精准地进行计划和非计划并/离网切换，否则将导致微电网内电压失控，影响微电网电能质量和供电可靠性。基于集中主控的并/离网控制策略结构如图18所示。

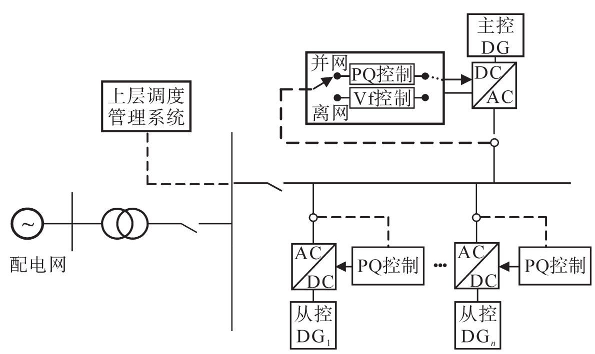

图18 基于集中主控的并/离网控制策略结构

Fig.18 Grid-connected and off-grid control strategy structure based on centralized master control

2）分散主控。分散主控是并网时，PCS均采用PQ控制；离网时，将多个容量够大的PCS切换为下垂控制为微电网提供电压、频率支撑，其余PCS依然采用PQ控制输出功率。该控制下容量够大的PCS均需具备控制策略无缝切换能力。基于分散主控的并/离网控制策略结构如图19所示。

5.2.2 基于对等控制的并/离网控制策略关系

对等控制[51]是无论PCS工作于哪种工况，均采用下垂或VSG控制，此控制下无需进行控制模式的转换，可以实现母线电压控制的连续性。需要注意的是在离网转并网时，需进行电网电压幅值、相位的预同步控制。基于对等控制的并/离网控制策略结构如图20所示。

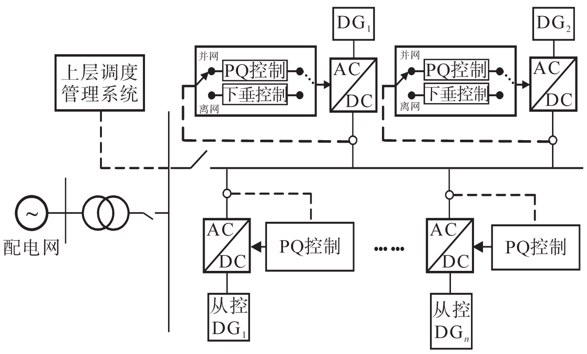

图19　基于分散主控的并/离网控制策略结构

Fig.19　Grid-connected and off-grid control strategy structure based on decentralized master control

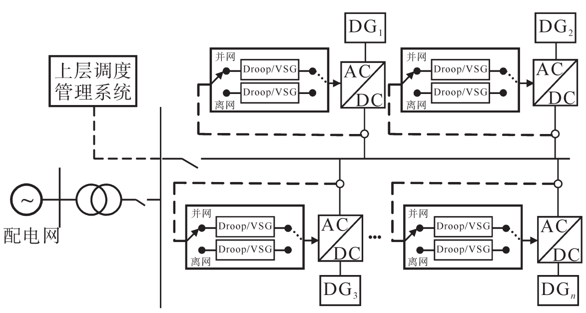

图20　基于对等控制的并/离网控制策略结构

Fig.20　Grid-connected and off-grid control strategy structures based on peer control

5.3　低压微电网线路阻抗特点

低压微电网线路阻抗呈阻性，若忽略线路阻抗特性，则不能对微电网系统输出的有功、无功功率进行准确控制。多台PCS并联使用时，储能系统到负载端距离差异性导致彼此间线路阻抗不同，使得有功功率无法均分，容易致使某些储能系统出现过载现象，影响微电网稳定运行。

文献[52]为解决PCS输出阻抗与线路阻抗匹配问题，引入阻性虚拟阻抗，在下垂控制基础上加入PI调节器，对其电压和频率基准进行微调，实现PCS对有功功率的无静差跟踪。文献[53]针对线路阻抗不匹配导致并联PCS环流问题，提出虚拟阻抗功率解耦控制策略，该控制策略通过阻抗环对PCS等效输出阻感进行调节，解决PCS输出功率不能均分问题。文献[54]为提高离网时无功功率均分精度，提出自适应虚拟阻抗控制策略，该控制依靠通讯实现无功功率参考值的获取，在离网工况下，能解决馈线间电压不匹配问题，实现无功功率均分。

但以上控制策略均有一定缺陷，即或工作在理想电网、或增加功率耦合或过度依赖上层通讯。目前，学者针对以上控制策略的不足，对其进行优化，解决功率耦合和过度依赖通讯等问题[55-56]。

6　结论

微电网是国网建设的重要组成部分，是实现经济绿色可靠供电的有效途径，其内部的储能系统可平抑新能源发电功率波动，促进新能源就地消纳，保证微电网内部电能质量和供电可靠性。但微电网应用中，PCS作为储能介质与电网和负荷间的接口设备仍存在较多问题，主要体现多设备并联的非线性特性、下垂控制的固有矛盾等。因此，应用于微电网的PCS运行控制有待深入展开的工作有：1)研究解决低压微电网PCS多机并联应用场合下，线路阻性成分占比较高造成的有功、无功功率耦合严重问题；2)研究解决多台PCS并联带来的环流抑制、谐振抑制、谐波功率均分等问题；3)研究解决下垂控制的固有矛盾：功率均分与电压控制精度的选择控制问题。

参考文献

[1]　孙凯，陈欢，吴红飞．面向储能系统应用的隔离型双向DC-DC变换器分析方法与控制技术综述[J]. 电工电能新技术，2019，38(8)：1-9.

[2]　张国驹，唐西胜，齐智平．超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用 [J]. 电力系统自动化，2010，34(12)：85-89.

[3]　郑光磊，刘彦呈，张勤进．船舶微网蓄电池储能系统安全充放电控制策略[J]. 大连海事大学学报，2015，41(1)：109-114.

[4]　Koutroulis E，Kalaitzakis K. Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications[J]. IEE Proc. Electr. Power Appl.，2004，151(2)：192-197.

[5]　袁泉，曾国宏，金新民．电池储能双向变流系统控制方法的研究 [J]. 机电工程技术，2018，47(8)：169-172，198.

[6]　潘丰，程凡华，骆聪，等．微电网混合储能系统充放电控制策略研究[J]. 东北电力技术，2018，39(3)：17-22.

[7]　熊京．多能互补微网系统的优化设计及控制技术[D].北京：华北电力大学(北京)，2016.

[8]　熊雄，王江波，杨仁刚，等．微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术，2015，39(3)：677-681.

[9]　祁乐，张红娟，靳宝全，等．基于SOC的储能系统控制策略研究[J]. 煤炭技术，2018，37(6)：247-249.

[10]　秦文萍，柳雪松，韩肖清，等．直流微电网储能系统自动充放电改进控制策略[J]. 电网技术，2014，38(7)：1827-1834.

[11]　Fan W，Bao G. PWM rectifier research based on sliding mode variable structure control[C]//2011 Chinese Control and Decision Conference（CCDC），Mianyang，2011：675-679.

[12]　Jiang Y，Zhao H，Guo D. Direct power control of three phase

PWM rectifier using model predictive control[C]//2015 3rd International Conference on Computer and Computing Science (COMCOMS), Hanoi, 2015:45-48.

[13] 李军，许嘉宁，孙志强，等. 微电网主从控制建模仿真[J]. 南京工程学院学报(自然科学板)，2012，10(3)：16-22.

[14] 袁雪珺. 微电网的PQ控制研究[J]. 电气开关，2016,54(6)：1-4,22.

[15] 张兴. PWM整流器及其控制策略的研究[M]. 北京：机械工业出版社，2003.

[16] Yang M J, Zhuo F, Wang X W, *et al*. Research of seamless transfer control strategy of micro grid System [C]//8th International Conference on Power Electronics—ECCE Asia, 2011: 2059-2066.

[17] Sampaio LP, Brito MAGD, Alves MG, *et al*. Robust control applied to power flow control in single-phase inverter with LCL filter, using droop control and D-stability [C]//2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2013.

[18] 刘赟甲，刘伟，闫涛，等. 离网储能变流器的控制策略[J]. 电器与能效管理技术，2014(23)：51-54.

[19] 张弛，黄培专，裴星宇. 网侧功率波动条件下储能变流器控制策略[J]. 广东电力，2017，30(8)：47-52.

[20] 谢永流，程志江，李永东，等. 引入虚拟阻抗的并联逆变器新型下垂控制策略[J]. 电工电能新技术，2016，35(3)：22-25,61.

[21] 高坤，郑帅峰，辛宁怡，等. 基于改进下垂控制的微电网无功控制技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2018，39(5)：155-160.

[22] 周奇勋，张红，曹世宏，等. 基于改进下垂法的微电网逆变并联控制技术[J]. 电力系统及其自动化学报，2018，30(8)：25-31.

[23] 薛婵，霍煜，袁德成. 微电网孤岛模式下改进下垂控制策略研究[A]. 第37届中国控制会议论文集，2018：7.

[24] 杨海柱，岳刚伟，康乐. 微网分段动态自适应下垂控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制，2019，47(8)：80-87.

[25] 陶泉霖，曹以龙，江友华. 微网逆变器并联自适应下垂控制技术[J]. 山东工业技术，2019(9)：143-145.

[26] 李建林，徐少华，惠东. 一种适合于储能PCS的PI与准PR控制策略研究[J]. 电工电能新技术，2016，35(2)：54-61.

[27] 陈杰，李耀华，刁利军，等. 变流器参数不一致下的无互联线并联方法研究[J]. 铁道学报，2016,38(1)：12-17.

[28] 袁凯，胡平，张志涛. 基于模糊PI控制的双向变流器的设计与实现[J]. 电气自动化，2018,40(2)：1-3.

[29] Fatama-Tuz-Zahura, Khan MZR. Advanced control scheme for bidirectional grid-connected inverter[C]//International Conference on Electrical and Computer Engineering(ICECE), 2018.

[30] 黎金英，邓玉辉，艾欣. 基于VSG的微电网逆变器控制策略研究[J]. 宁夏电力，2016(5)：1-5.

[31] 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.

[32] 章伟明，赵巧娥，刘毓梅，等. 孤岛模式自适应转动惯量VSG逆变电源控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(2)：99-104.

[33] 殷桂梁，董浩，代亚超，等. 光伏微网中VSG参数自适应控制策略[J]. 电网技术，2019,8(3)：1-8.

[34] 孙宇新，陈诚，施凯，等. 基于孤岛运行的虚拟同步机转动惯量自适应控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2019,8(3)：1-6.

[35] 温春雪，陈丹，胡长斌，等. 微网逆变器的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化，2018,42(17)：120-129,183.

[36] 张鑫，陈优阔，郭英海. 基于VSG的微网逆变器控制策略研究 [J]. 控制工程，2017(s1)：69-74.

[37] 毛福斌，章雪萌，李玉良，等. 基于VSG控制的微网逆变器最优虚拟惯性研究[J]. 电气工程学报，2018,13(3)：9-16.

[38] 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.

[39] Gu H, Yang Z, Wang D, *et al*. Research on control method of double-mode inverter with grid-connection and stand-alone[C]//2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, 2006: 1-5.

[40] Guo Liang, Xu aiguo, Xie shaojun. Research on indirect current control strategy for grid-connected inverter [C]//2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore ,2008:1762-1765.

[41] 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.

[42] 石荣亮. 多能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.

[43] 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，2018,33(16)：3855-3867.

[44] 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.

[45] 李鑫卓. 基于主从控制的微电网平滑切换控制 [J]. 电气自动化，2019，41(4)：27-29.

[46] 杨超，宋增禄，蒋亮. 微电网运行模式平滑切换控制策略研究 [J]. 企业技术开发，2018,37(11)：37-39,49.

[47] 张玉鹏，王云亮. 一种微网并网与孤岛运行无缝切换的优化控制方法[J]. 自动化技术与应用，2019，38(1)：86-90.

[48] 万晓凤，詹子录，廖志鹏，等. 虚拟同步发电机并离网无缝切换策略研究[J]. 电子测量与仪器学报，2018,32(5)：33-40.

[49] 刘京，易宗澳，何元. 基于虚拟同步发电机的无缝切换控制技术研究[J]. 机电信息，2019(18)：18-19.

[50] 赵彪，于庆广，王立雯，等. 用于电池储能系统并网的双向可拓展变流器及其分布式控制策略[J]. 中国电机工程学报，2011,31(zl)：244-251.

[51] 张兴. 新能源发电变流技术[M]. 北京：机械工业出版社，2018.

[52] 吴云亚，阚加荣，谢少军. 适用于低压微电网的逆变器控制策略设计[J]. 电力系统自动化，2012,36(6)：39-44.

[53] 邢作霞，芦彦东，董焕宝. 基于虚拟阻抗的变阻感比低压微电

(下转第21页)

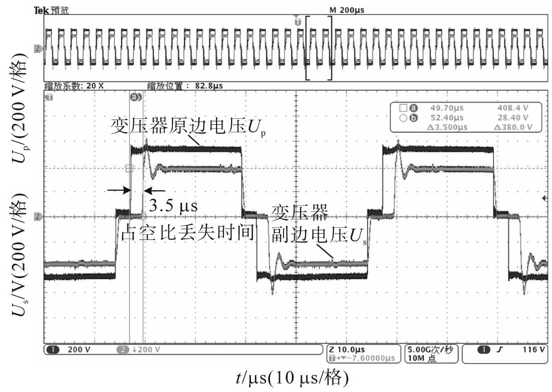

图15　输入电压为500 V、输出功率为40 kW工况下的变压器原副边电压实验波形图

Fig.15　Test waveforms of primary and secondary voltage of transformer under the conditions of U_{in}=500 V and P=40 kW

由图14和图15可知,在输入电压为DC 500 V、输出功率为40 kW工况下,输出电压可以达到DC 600 V;同时占空比丢失时间为3.5 μs,占空比丢失为0.14。

综上分析,实验结果与理论分析基本保持一致,验证了理论分析的正确性。

4　结论

本文针对移相全桥ZVS电路复杂的参数设计问题,提出了一种基于ZVS负载范围的移相全桥变换器的参数优化设计方法。实验结果表明,该方法可以根据系统所希望实现的软开关负载范围,确定谐振电感、IGBT死区等关键参数的最优解,这将为实际工程应用中移相全桥的参数设计提供十分重要的指导与帮助。

参考文献

[1] 苏威,杨向宇,赵世伟.移相全桥变换器无源性控制研究[J].电气传动,2018,48(8):37-40.

[2] 郝振宇,王洪庆.基于DSP的移相全桥变换器的研究[J].电气传动,2007,37(1):26-29.

[3] Chen Z,Liu S S,Shi L C. A soft switching full bridge converter with reduced parasitic oscillation in a wide load range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(2):801-811.

[4] 陈乾宏,殷兰兰,王健,等.二极管加电流互感器箝位的移相全桥DC/DC变换器[J].中国电机工程学报,2008,28(15):23-31.

[5] 沙德尚,李斌,袁文琦,等.基于负载自适应的辅助LC网络宽范围零电压开通的输入串联输出并联移相全桥DC-DC变换器[J].中国电机工程学报,2016,36(13):3558-3564.

[6] 陈仲,汪洋,李梦南.一种低环流损耗的宽范围ZVS移相全桥变换器[J].电工技术学报,2015,30(22):71-79.

[7] 袁进行,马瑞卿,樊平.带辅助谐振的移相全桥ZVS DC/DC变换器研究[J].电力电子技术,2008,42(5):23-25.

[8] 张沛然,李敏远.一种加辅助网络的移相全桥ZVS PWM变换器[J].电力电子技术,2013,47(2):67-69,100.

[9] 张强,林维明,徐玉珍.一种用耦合电感实现零电压零电流开关的移相全桥变换器[J].电工技术学报,2016,31(21):142-149.

[10] Zhao L,Li H Y,Wu X,*et al*. An improved phase-shifted full-bridge converter with wide-range ZVS and reduced filter requirement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(3):2167-2176.

[11] 张欣,陈武,阮新波.一种辅助电流可控的移相全桥零电压开关PWM变换器[J].电工技术学报,2010,25(3):81-88.

[12] Tran D D,Vu H N,Yu S H,*et al*. A novel soft-switching full-bridge converter with a combination of a secondary switch and a nondissipative snubber[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(2):1440-1452.

[13] 姬军鹏,胡雪利,华志广,等.基于可控谐振电感技术的移相全桥变换器[J].电气传动,2015,45(7):31-37.

[14] 陈桂涛,郭辉,孙强.一种宽范围零电压开关移相全桥变换器的研究[J].电气传动,2017,47(12):44-47.

[15] 史永胜,刘言新,王喜锋,等.移相全桥ZVS变换器的优化及参数设计[J].电子器件,2016,39(3):650-654.

收稿日期:2020-04-24
修改稿日期:2020-05-25

(上接第13页)

网功率控制策略研究[J].电气工程学报,2018,13(5):14-20.

[54] 叶佳卓,杨力,伍诗雨,等.孤岛微电网自适应虚拟阻抗控制策略[J].电工电能新技术,2019,38(12):1-9.

[55] An R,Liu Z,Liu J. Modified adaptive virtual impedance method to compensate mismatched line impedances in microgrids[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC),Anaheim,CA,USA,2019:1109-1114.

[56] An R,Liu Z,Liu J. *et al*. A communication-independent reactive power sharing scheme with adaptive virtual impedance for parallel connected inverters [C]//2018 International Power Electronics Conference(IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia),Niigata,2018:3692-3697.

收稿日期:2020-02-05
修改稿日期:2020-03-12