

基于无死区特点的低谐波失真双降压类 功率变换器研究综述

韦坚,陈靖欣,张馨月,仇广娟,张佳薇

(东北林业大学 计算机与控制工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:高精度功率变换器是超精密电机运动控制系统的核心部件,其输出电流谐波失真会引起超精密电机不必要的定位波动,对精密控制系统造成严重影响,总谐波失真是应用在高性能精密控制领域的重要指标。具有无死区特点的双降压类拓扑能够消除传统桥式拓扑中死区导致的电流畸变,输出高质量的平稳波形。为了进一步改善双降压类拓扑输出电流谐波失真,首先阐明了双降压类拓扑谐波失真的来源。针对双降压类拓扑功率变换级和控制系统引入的谐波失真问题,归纳了低谐波失真拓扑特性,揭示了不同控制方法抑制谐波失真的机理,研究了各种调制策略与谐波失真的关系。最后,总结了不同低失真双降压类功率变换器的特定应用场合,并给出了其发展的参考方向。

关键词:低谐波失真;功率变换器;高精度双降压类拓扑;低失真控制方法;混合调制策略

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26418

A Review of Low Harmonic Distortion Based on a Class of Dual-buck Converters without Dead-time Characteristic

WEI Jian, CHEN Jingxin, ZHANG Xinyue, QIU Guangjuan, ZHANG Jiawei

(School of Information and Control Engineering, Northeast Forestry University,
Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: High-precision power converters are core components of ultra-precision motor motion control systems. Their output current harmonic distortion can cause unnecessary positioning fluctuations in ultra-precision motors, severely impacting the precision control system. Total harmonic distortion is an important index in high-performance precision control fields. A class of dual-buck topologies with no dead-time characteristics can eliminate the current distortion caused by dead-time in traditional bridge topologies and output high-quality, stable waveforms. To further improve the output current harmonic distortion of a class of dual-buck topologies, the sources of harmonic distortion in a class of dual-buck topologies were first clarified. For the harmonic distortion issues introduced by the power conversion stage and control system of a class of dual-buck topologies, the characteristics of low harmonic distortion a class of dual-buck topologies were summarized. The mechanisms of suppressing harmonic distortion by different control methods were revealed, and the relationship between various modulation strategies and harmonic distortion was studied. Finally, specific application scenarios for low-distortion a class of dual-buck converters were summarized, and reference directions for their future development were provided.

Key words: low harmonic distortion; power converter; high-precision a class of dual-buck topologies; low distortion control methods; hybrid modulation strategies

电流的精确控制是转矩精确控制的基础,电机转矩控制的精度决定了超精密电机运动系统的定位精度,因此高精度功率变换器输出电流谐

波失真会对精密控制系统造成严重影响^[1]。功率变换器的谐波失真主要分布在功率变换级、控制系统、电磁干扰以及功率源层面^[2],如图1所示。

基金项目:国家自然科学基金(52307042);黑龙江省博士后基金(LBH-Z22056)

作者简介:韦坚(1989—),男,博士,副教授,主要研究方向为超精密电机驱动技术,Email:18weijian@163.com

电磁干扰和功率源端的波动是功率变换器都面临的共性问题,谐波失真主要存在于功率变换级和控制系统,其引入的主要谐波失真会通过导线传播,并进入连接的负载或源端。而输出特性将会映射在输出级的电流和电压上,通过输出总谐波失真(total harmonic distortion, THD)指标衡量输出波形谐波畸变程度^[3]。因此,应用在高性能精密控制领域的功率变换器必须具有可靠的低THD电流产生能力^[4-7]。添加死区时间可以缓解电路存在的直通问题,但同时会造成PWM输出级的非线性电压误差^[8-10]。无死区特点的双降压类拓扑如图2所示,从根本上去除了死区,电路具有更大的交错灵活性,使低谐波失真功率变换器应用于超精密控制系统成为可能^[11]。

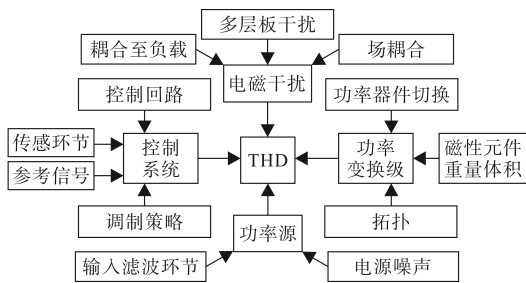


图1 功率变换系统的总谐波失真构成

Fig.1 THD composition of power conversion systems

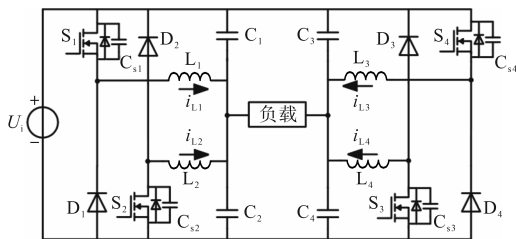


图2 经典双降压类全桥拓扑

Fig.2 Classic dual-buck full-bridge topology

良好的拓扑除了改善拓扑本身导致的谐波畸变外,还可以解决电磁干扰、功率器件切换和磁性元件等引入的谐波失真问题。控制回路和调制策略直接决定着电路的输出质量^[12-15]。为了使无死区的双降压类拓扑输出高质量、低谐波失真的平稳波形,针对功率变换级和控制系统引入的谐波畸变问题,提出了许多抑制其输出谐波失真的改进拓扑、低失真控制方法以及混合调制策略。

1 双降压类功率变换器低谐波失真拓扑

最常用的半桥拓扑需要带中点的直流输入电压,直流电压利用率低,输出谐波含量高。全

桥拓扑输入电压利用率是半桥拓扑的2倍,可以输出相对较低的谐波失真。相比于全桥两电平拓扑,多电平拓扑可以使用多个电压级别来逼近正弦波形。软开关拓扑能够优化开关波形,减少功率器件暂态过程所引入的谐波失真。目前双降压类功率变换器低谐波失真拓扑的改善方向主要分为多电平拓扑和软开关拓扑。

1.1 基于多电平技术的双降压类低失真拓扑

文献[16]提出了一种交错双降压全桥三电平变换器,结合交错并联技术和多电平技术,解决了传统交错技术引入的零序环流问题,降低了输出纹波电流和输出电流的总谐波畸变。文献[17]提出了 n 电平飞跨电容型双降压拓扑,如图3所示。当 $n>3$ 时,该拓扑开关数量较传统 n 电平飞跨电容型开关数量明显减少,且电平数越高,该优势越为明显,输出电压谱也越平滑。然而,器件数量的增加也影响着多电平拓扑的可靠性。在此基础上,提出了一种高可靠性 n 电平双降压全桥拓扑生成规则,即将传统的 n 电平桥式拓扑用双降压类拓扑替换^[18]。该规则复杂了电路控制方法,但减少了功率器件的使用。实验结果证明,该系列拓扑与传统的五电平H桥拓扑相比,都具有更低的THD。其中,由串联开关三电平双降压全桥和两电平双降压半桥结合而成的串联开关五电平双降压全桥拓扑THD极低,如图4所示。

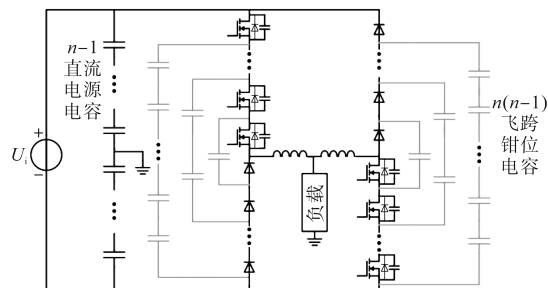


图3 n 电平双降压全桥飞跨电容型拓扑

Fig.3 n -level dual-buck full-bridge flying capacitor topology

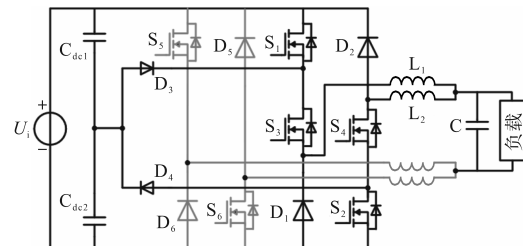


图4 串联开关五电平双降压全桥拓扑

Fig.4 Series-switch five-level dual-buck full-bridge topology

1.2 基于软开关技术的双降压类低失真拓扑

在硬开关条件下,双降压类拓扑功率器件的

电压降高达 10 V,会引入电磁干扰和开关切换产生的 THD^[19]。软开关技术可以降低开关瞬态的电流和电压变化率,减少器件暂态造成的复杂寄生参数和使器件误导通的共模电流;还可以大幅提高开关频率,减小输出纹波^[20]。文献[6]提出了一种拓扑对称的、带耦合电感的双降压谐振极型软开关功率变换器,如图 5 所示。

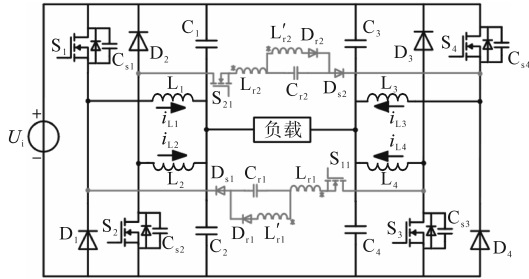


图5 谐振极型双降压软开关拓扑

Fig.5 Resonant pole-based dual-buck soft-switching topology

对称结构可以降低非理想器件的电阻和热特性不同,导致桥臂中点出现与电流相关的不同

压降所造成的谐波失真^[21]。双降压谐振极型软开关功率变换器中的额外缓冲单元实现了开关的零电压/零电流导通,有效抑制了高频下开关的高 dv/dt 和高 di/dt ,在偏置电流解耦控制下的 THD 仅 0.078 73%。文献[7]减少了该软开关功率变换器额外缓冲单元中的耦合电感,通过更少的工作模式实现了软开关操作,减小了谐振引起的开关暂态渐变电压误差。并减小了注入滤波电感的偏置电流分量,降低了电感中的循环电流。

软开关技术提供谐振回路来优化开关波形,从而降低输出谐波失真,但同时会引入与谐振相关的非线性电压误差。多电平技术则是通过增加器件数量从而增加电平数量,直接提高输出精度,但随着电平数量的增多,非理想功率器件引入的非线性误差也会成倍增加。因此软开关技术更适用于高频、低电磁干扰的应用场合。双降压类功率变换器低谐波失真拓扑特性如表 1 所示^[21-23]。

表1 双降压类的低谐波失真拓扑

Tab.1 Low harmonic distortion topologies for a class of dual-buck topologies

低失真双降压类拓扑	拓扑特性	开关数量	二极管数量	电容数量	电源数量	主要谐波来源	优势	
经典双降压桥式拓扑	两个 Buck 变换器输入串联/输出并联	2	2	2	2	1)开关器件暂态过程 2)滤波电感断续所带来的过零失真	控制系统引入的 THD 较小	
多电平拓扑	结构化多电平	在输出电容的负端增加开关环节	$n+1 \uparrow$	2	2	1 \uparrow	输出电压的多电平不是阶梯状的	
	二极管钳位型	在桥臂与直流侧电容之间增加钳位环节	6 \uparrow	n^2-3n+4	$n-1$	1	1)开关器件暂态过程 2)输出电压在中点电压偏移处发生偏移	电平数越多,输出电压谱越平滑,输出电流谐波越小
	飞跨电容型	在二极管和开关之间飞跨均压电容	$n+3$	$n+3$	n^2-n	1	1)复杂的电容均压控制 2)变换器低可靠性	
软开关拓扑	级联型	以交错方式并联组成	6 \uparrow	4 \uparrow	$n-2$	$(n-1)/2$	1)开关器件暂态过程 2)多个直流输入电源在电源端引入谐波失真	
	谐振极型	谐振电路在直流电源和变换器之间,使直流母线电压电流谐振	3 \uparrow	2 \uparrow	1 \uparrow	2	1)电路桥臂间存在控制耦合 2)特定的离散脉冲调制会引入更多频率的谐波	降低了开关瞬态过程振荡引入的谐波失真,且可以实现高频下的低失真输出
双输入拓扑	谐振极型	对辅助电路操作或对控制方式的改变,使电路桥臂谐振	2 \uparrow	2 \uparrow	1 \uparrow	2	1)谐振引起的开关暂态渐变电压误差 2)谐振支路在开关节点处引入零电压相关误差	
	双输入拓扑	电源输入为高电压和低电压双直流输入	6	4 \uparrow	0	2	需要自适应电压调节和复杂的算法	有效减少系统电源的总谐波失真;实现多电平输出

2 双降压类功率变换器低谐波失真控制方法

功率变换器作为电流环执行单元,其控制方

法主要用于实现电流环的精确调节。功率变换器不同控制方法特性如表 2 所示^[13-15],针对经典控制中存在的频率不固定、谐波频谱较宽、控制算法复杂等问题,目前控制方法发展趋势主要

分为基于拓扑模型的控制方法以及基于数学模型的控制方法。

表2 不同控制方法的核心公式及其谐波来源

Tab.2 Core formulation of different control methods and their harmonic sources

控制方法	电流/电压控制的核心公式	主要谐波来源
状态反馈控制	内环开环传递函数: $G(z) = \frac{T_s}{L} \cdot \frac{1}{z-1} \cdot \frac{mz + (1-m)}{z}$ 电容电流状态观测器补偿时间滞后: $\hat{i}_c(z) = \frac{(1-m) \cdot T_s K_b z^{-1} V_r(z)}{z-1+K}$	1) 有些状态变量难以精确测量 2) 控制有一个延迟时间 m
迭代学习控制	P型迭代学习控制学习律: $u_{k+1}(t) = u_k(t) + \phi_1 e_k(t) + \phi_2 e_{k+1}(t)$	达到控制效果需要一定的迭代次数 k , 因此前期的THD较大
状态空间平均模型偏置电流解耦控制	理想解耦变换: $u_{out} = \frac{1}{2}(u_1 + u_2)$; $u_{bias} = u_1 - u_2$ 实际非线性节点电压: $u_{1p} = \frac{(U_D - R_{ons} < i_{lfl} >) \cdot (u_{cfp} + R_{onl} < i_{lfl} >) + (u_{cfp} + < i_{lfl} > R_{onl}) \cdot U_D}{U_i}$	非理想的电路参量导致非线性的节点电压 u_p , 电路发生不完全解耦, 产生交叉耦合
模型预测电流控制	预测电流: $i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L} [u_{in} \cdot (k+1) - su_o \cdot (k+1)]$	容易受到建模误差影响和参数扰动
自适应电流控制	滞环宽度: $h = \frac{1}{4LfU_d} [U_d^2 - (U_m^2 + \omega^2 L^2 I_m^2) \cdot \sin^2(\omega t + \theta)]$	1) 滞环宽度 h 根据频率 f 变换, 需要复杂的在线计算和递推估计 2) 存在系统收敛速度快、响应快的问题
重复控制	扰动对跟踪误差的传递函数: $H(z) = \frac{E(z)}{D(z)} = \frac{-1}{1 + \frac{z^{-N}}{1-Q(z)} \alpha^t \cdot S(z) \cdot P(z)}$	存在延时环节 z^{-N} , 控制系统动态响应速度慢

2.1 基于拓扑模型的控制方法

文献[11]利用双降压类拓扑输出和偏置电流的线性解耦,提出了一种基于状态空间平均模型的偏置电流解耦控制,如图6所示。通过对滤波电感注入偏置电流,使双降压类拓扑避免了断续工作导致的电流过零失真,其在恒定偏置电流和调制偏置电流下输出电流THD分别为0.37%和0.38%。然而,电流解耦控制由于电路开关、电阻受温度、电压等变化,存在非理想条件,开关节点电压会引入非线性误差,导致解耦控制发生不完全解耦的情况,产生交叉耦合^[3]。文献[4]分析了非理想条件下解耦控制引入的交叉耦合对电流谐波的影响规律,建立了电流精度与开关频率之间的直接关系,并采用高频方法来抑制交叉耦合对电流解耦控制的影响。当开关频率为100 kHz和30 kHz时,输出电流的THD分别为0.037 611%

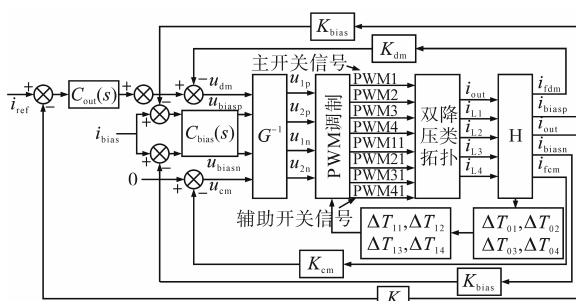


图6 状态空间平均模型偏置电流解耦控制

Fig.6 State-space average model bias current decoupling control

和0.120 699%,可知高频方法显著抑制了交叉耦合引入的电流谐波。

模型预测电流控制利用系统离散模型,设置评价函数和滚动优化驱动电路开关,实现参考变量的直接跟踪,具有动态响应迅速、易于数字化等优点。文献[23]使用模型预测电流代替电容电压,降低了控制系统的阶数。文献[24]针对双降压功率变换器的特点,分析了预测电流控制引起的大电流纹波原因,提出了一种电流内环模型预测控制、电压外环PI控制的双闭环控制策略。在单个采样周期内根据最小电流误差原则对不同开关状态的作用时间进行分配,有效减小了电感电流纹波,相同条件下的电压THD从0.802%降低到0.114%,控制框图如图7所示。当预测电流模型中存在参数扰动和延迟时,将影响计算得到

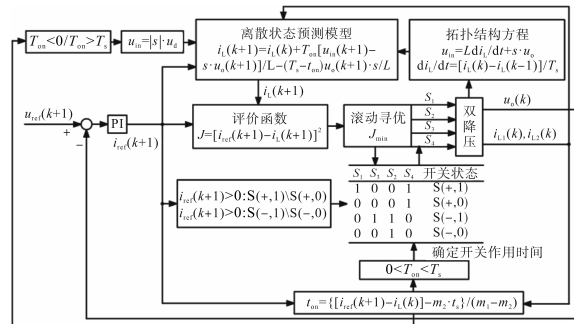


图7 模型预测电流控制

Fig.7 Model predictive current control

的预测值,影响输出精度。特别是在高开关频率下,系统中的延迟对输出的影响更加严重^[25]。

2.2 基于数学模型的控制方法

自适应控制能修正自己的特性以适应对象和扰动的动态特性变化,解决实际应用中的电路模型参数不准确的问题。但由于其存在系统收敛速度和快速响应的问题,常与其它控制方法结合使用,如图8所示。文献[26]提出的自适应滞环电流控制策略能够使滞环宽度根据电气参数实时调整,从而使开关频率基本保持恒定。文献[27]提出的自适应反馈控制策略,提高了参考信号的跟踪能力,消除了由输入电压变化引起的开关频率变化,最大限度减少了输出电压调节的差异,使宽输出功率范围内的输出电压THD降低了50%。文献[28]基于最陡梯度法提出了自适应PI控制,PI控制参数能随外部环境变化而改变,具有较快的收敛速度和较高的跟踪速率,但当系统工作在稳态时,仍存在正弦波固有的稳态误差。

重复控制是对输出波形中出现的重复畸变进行控制,其控制核心环节是一个有延迟效应的正反馈环节,但同时会导致动态性能差和时滞问题,如图8所示。文献[29]应用重复控制消除了非线性PWM调制所带来的谐波畸变,使输出电流THD降至1.8%。文献[30]将PI控制与重复控制结合,改善了PI控制对低次谐波的抑制能力。文献[31]使用快速重复控制器补偿了以奇次谐波为主的周期性干扰,输出总谐波失真减少为原来的50%。文献[13]使用重复控制器纠正了半周期调制造成的过零失真这种周期性误差,避免了解耦控制注入偏置电流使系统效率降低的问题。

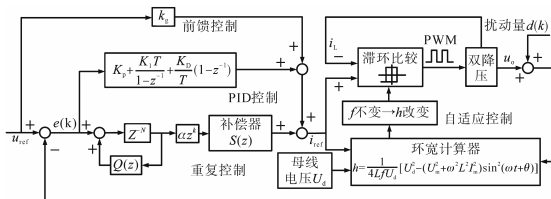


图8 自适应电流控制和重复控制结合的复合控制

Fig.8 Composite control combining adaptive current control and repetitive control

状态空间平均模型偏置电流解耦控制避免了开关频率变化和延迟控制环节,不受参数扰动的影响,也不具有复杂的控制算法。虽然偏置环牺牲了一定的系统效率,但输出具有极低THD,是发展低失真双降压类拓扑的优势控制方法。

3 双降压类功率变换器低谐波失真调制策略

调制策略主要关注如何在控制方法框架下产生具体的控制信号来驱动功率器件,因此调制策略直接决定着功率器件的开关模式,对功率变换器输出特性具有直接影响。

3.1 低谐波失真PWM调制策略

目前应用于双降压类功率变换器的PWM调制策略主要有基于三角载波调制的正弦脉宽调制策略(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)、基于空间矢量的脉宽调制策略(space vector pulse width modulation, SVPWM)、随机脉宽调制(random pulse width modulation, RPWM)以及特定谐波调制策略(selective harmonic elimination, SHE)等。单极性SPWM可以减小传统双极性调制存在的回流问题,降低谐波含量^[32]。载波移相SPWM^[33]能够在不增加开关频率的情况下使等效开关频率提高2倍,降低输出电流纹波,且在电感电流半个周期内只有2个开关工作,减小了开关损耗,如图9所示。双降压类拓扑的驱动信号可以同时存在,基于载波移相SPWM,研究了5个有代表性的开关交错策略^[34],其中交错实现的三级PWM具有双重有效开关频率和恒定的共模电压,具有较低THD。文献[11]研究了同相位调制和交叉相位调制两种调制模式下输出电流的THD,实验证明交叉相位调制模式的偶次谐波含量都低于不同基准的同相位调制。SPWM会在负载侧开关频率周围或开关频率的整数倍处引入电流谐波,而RPWM可以将该处集中分布的谐波比较均匀地分布在选定频率范围内,选择性地消除特定频率及其整数倍频率下的谐波,但其主要针对低开关频率^[35]。

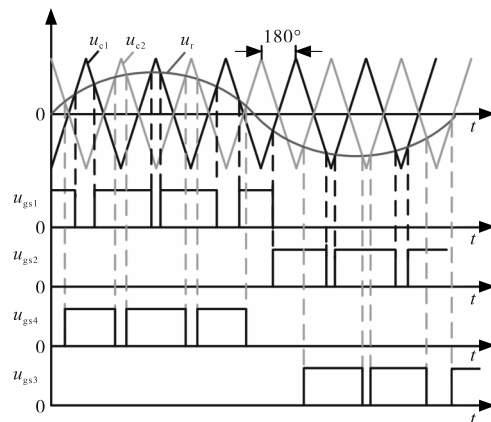


图9 载波移相SPWM调制策略

Fig.9 Carrier phase shifting SPWM strategy

SVPWM通过不同的开关矢量组合去逼近指令电压/电流空间矢量,具有更高的电压利用率和更低的开关损耗,能获得更好的谐波抑制效果,如图10所示^[5]。文献[10]采用的半周期SVPWM,其电流谐波分量的负反馈会改变空间矢量在过零周期的参考值,从而减小半周期调制的过零畸变。SHE可以通过非线性方程计算开关角度,进而优化开关状态消除某些低次谐波,但计算求解过程复杂^[36-37]。

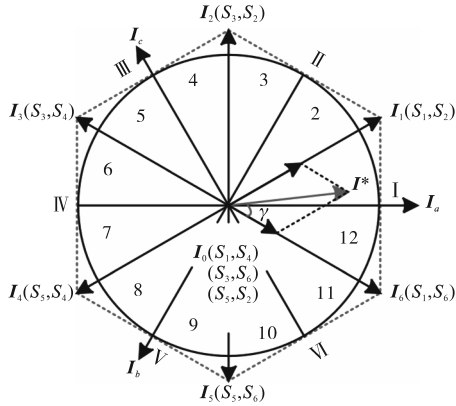


图10 12扇区SVPWM调制策略
Fig.10 12-sector SVPWM strategy

3.2 抑制输出过零畸变调制策略

不同的调制方式可使双降压类功率变换器工作于有偏置电流的全周期模式和无偏置电流的半周期模式两种模式下。全周期调制的偏置电流造成滤波电感中始终有环流通过,且在相同频率下电流纹波是半周期模式电流纹波的2倍。半周期调制使电感在一个周期内只工作50%的时间,不需要偏置电流,避免了额外的开关损耗,但存在电流过零畸变。占空比调制通过计算电感电流断续区域对占空比进行补偿,但调制波与占空比呈非线性关系,对占空比进行精确补偿难度较大^[38-39]。文献[40]提出半周期与全周期结合的混合调制,在电网电压过零点前后采用全周期调制,使电感电流在过零处连续,但其没有定量分析转换为全周期调制的区间大小,且违背了双降压功率变换器最佳工作特性,在切换处电流产生明显畸变。文献[8]根据输出电压超前电网电流的角度定量分析了由半周期转换为全周期的判断条件,通过理论计算给出全周期调制最小区间,如图11所示,电流THD可由13.35%降至3.22%。文献[9]提出了一种通过调节共导区偏置电流实现非线性电压抑制,从而改善过零失真的调制策略。该调制策略在驱动信号重叠的共导

区,调节对电感电流偏置分量的注入,使滤波电感处于连续工作模式,从而消除过零失真。当母线电压为500V、开关频率为100kHz时,采用同相调制输出电流的THD可达0.134%。

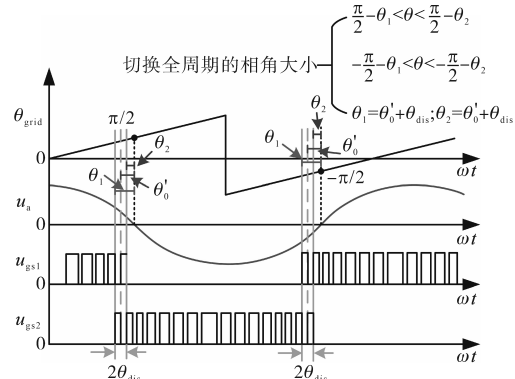


图11 全周期与半周期混合调制策略

Fig.11 Hybrid full-cycle and half-cycle modulation strategy

采用全周期与半周期的混合调制策略,确定合适的全周期调制区域和偏置电流分量,能够在保证输出电流质量的同时,最大限度地减小全周期调制带来的额外损耗,实现输出低谐波畸变。

4 结论

基于多电平技术的双降压类功率变换器适合高功率应用,如高功率通信系统和音响放大器,但在高频下面临较大的硬开关损耗。基于软开关技术的双降压类功率变换器则更适合高频、大功率、对效率和电磁干扰有严格要求的系统,如光刻机超精密定位系统。模型预测电流控制适用于需要快速动态响应和负载变化较快的系统,增强系统鲁棒性。重复控制适合具有周期性扰动的系统,而自适应控制则能应对参数变化大的系统,如机器人控制,能够确保系统在动态环境下保持最佳性能。在对效率要求不高但对精度要求严格的场合,交叉相位的全周期调制优于半周期调制。不同类型的低失真双降压类功率变换器适用于不同的应用场合,应根据应用的频率、功率、精度、响应速度和鲁棒性等因素综合考虑。对于超精密系统中的高精度双降压类功率变换器,低谐波失真是衡量其输出标准的关键指标,其未来发展应从以下几方面考虑:

1) 添加辅助电路使双降压类功率器件拓扑处于软开关环境,并保持电路结构对称,可以优化开关波形并减小电磁干扰,实现低谐波失真。高频时,多电平技术虽然可以提高输出波形质量,但其功率器件引入的非线性误差增大。

2) 状态空间平均模型偏置电流解耦控制能够实现极低的总谐波失真,但降低非理想因素对系统交叉耦合的影响是该控制方法面临的主要挑战。

3) 选择适当的控制方法应基于功率变换器的具体应用需求。对于复杂应用场合,可结合多种控制方法形成复合控制策略,从而弥补单一控制方式的局限性。

4) 混合调制策略通过减少全周期调制的额外损耗和半周期调制的过零失真,综合发挥两者的优势。混合调制策略目前的发展重点在于实现全周期调制区域及偏置电流分量的精确控制。

参考文献

- [1] XIE L X, RUAN X B, ZHU H N, et al. Common-mode voltage cancellation for reducing the common-mode noise in DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5):3887-3897.
- [2] MAUERER M, TUYSUZ A, KOLAR J W. Noise minimization for ultra-high SNR class-D power amplifiers[J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2018, 3(4):339-351.
- [3] WEI J, KOU B, ZHANG L, et al. Decoupling control optimization based on analysis and compensation of back EMF disturbance in high precision current converter[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:97483-97494.
- [4] WEI J, KOU B, ZHANG L, et al. Modeling, analysis, and development of a current decoupling control high-precision converter under nonideal conditions[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(1):1061-1074.
- [5] WANG Y S, GE H J, YIN H, et al. Improved SVPWM modulation method for three-phase dual-input dual-buck inverters[J]. *Journal of Power Electronics*, 2023, 23:736-745.
- [6] KOU B, WEI J, ZHANG L. Switching and conduction loss reduction of dual-buck full-bridge inverter through ZVT soft-switching under full-cycle modulation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5):5031-5046.
- [7] WEI J, KOU B, ZHANG L. Dual-buck full-bridge converter with soft-switching characteristics for high-precision applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(3):3296-3306.
- [8] LU Y R, WU Q F, WANG Q, et al. Analysis of a novel zero-voltage-switching bidirectional DC/DC converter for energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(4):3169-3179.
- [9] WEI J. A modulation strategy for eliminating zero-crossing distortion of dual buck high-precision resonant converter[J]. *Energy Reports*, 2023, 9:475-488.
- [10] ZHENG X X, XIAO L, WANG Z, et al. Zero-crossing distortion inhibition method of three-phase dual-buck inverter[C]//2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications, 2015:1161-1165.
- [11] 韦坚. 谐振极型双降压软开关功率放大器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WEI Jian. Research on resonant-pole dual-buck soft-switching power amplifier[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [12] CHEN J, WANG Z, SONG W, et al. Mechanism analysis and oscillation suppression of the false triggering oscillation for parallel-connected GaN devices[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024.
- [13] WEN P H, XU Ping, YUAN Z, et al. High-reliability dual-buck inverter controller design based on repetitive control[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference, 2022:3310-3313.
- [14] 王华汉, 赵世伟. 基于双积分滑模控制的DAB电压控制研究[J]. *电气传动*, 2024, 54(4):52-56.
WANG Huahan, ZHAO Shiwei. Research on DAB voltage control based on double integral sliding mode control[J]. *Electric Drive*, 2024, 54(4):52-56.
- [15] QIAO Y, LI L, GUO B, et al. Stable convergence control of the buck converter based on iterative learning method[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3):994-998.
- [16] HONG F, LIU J, JI B, et al. Interleaved dual buck full-bridge three-level inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(2):964-974.
- [17] 刘苗, 洪峰, 王成华. 飞跨电容型双降压五电平逆变器[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(12):14-21.
LIU Miao, HONG Feng, WANG Chenghua. Flying capacitor-based dual-buck five-level inverter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(12):14-21.
- [18] ZHANG L, SUN K, XING Y, et al. A family of five-level dual-buck full-bridge inverters for grid-tied applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10):7029-7042.
- [19] LEMMEN E, SCHELLEKENS J M, WIJNANDS C G E, et al. Advances in high-precision amplifiers—the extra L opposed current converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(10):5691-5700.
- [20] MENG W, ZHANG F, FU Z, et al. High dv/dt noise modeling and reduction on control circuits of GaN-based full bridge inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(12):12246-12261.
- [21] 胡翔宇, 洪峰, 邵栋伟. 弱励磁电感对全桥DC-DC变换器的影响及其自主软开关[J]. *电气传动*, 2024, 54(12):40-46.
HU Xiangyu, HONG Feng, SHAO Dongwei. Impact of weak excitation inductance on full-bridge DC-DC converter and its autonomous soft switching[J]. *Electric Drive*, 2024, 54(12):40-46.
- [22] 蒋婧文, 周洁敏, 洪峰, 等. 一种新型软开关三电平级联DC/

- DC变换器[J]. 电气传动, 2023, 53(9): 3-8.
- JIANG Jingwen, ZHOU Jiemin, HONG Feng, et al. A novel soft-switching three-level cascaded DC/DC converter[J]. Electric Drive, 2023, 53(9): 3-8.
- [23] LIU R, LI D, YAO L. Deadbeat predictive control strategy based on UDE for dual-buck grid-connected inverter[C]//2021 40th Chinese Control Conference, Shanghai, China, 2021: 5857-5862.
- [24] XIAO S, LI X, ZHANG H, et al. Active power decoupling method based on dual buck circuit with model predictive control[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, San Antonio, TX, USA, 2018: 3089-3094.
- [25] HUANG L, WANG W, CHEN S, et al. Improved model predictive current control of a dual buck full-bridge inverter[C]//2018 3rd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, Yilan, Taiwan, 2018: 1-4.
- [26] KIM Kwang-Ho, KONG Baisun, JUN Young-Hyun. Adaptive frequency-controlled ultra-fast hysteretic buck converter for portable devices[C]//2012 International SoC Design Conference, Jeju Island, 2012: 5-8.
- [27] FAROOQ M, AFRIDI K K. Improved adaptive feedback control for a high-power-density transformer-less online UPS[C]//2023 IEEE 24th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, 2023: 1-6.
- [28] CHEN W, CAI F, LIN Q, et al. Improved PI and repetitive controller for dual-buck inverter[C]//2020 39th Chinese Control Conference, Shenyang, China, 2020: 6157-6161.
- [29] CHEN B, GU B, LAI J S, et al. Current distortion correction in dual buck photovoltaic inverter with a novel PWM modulation and control method[C]//2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, CA, USA, 2013: 727-731.
- [30] HAN B, BAI C, LEE J S, et al. Repetitive controller of capacitor-less current-fed dual-half-bridge converter for grid-connected fuel cell system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 7841-7855.
- [31] LI Donghui, KONG X, LIU L. Deadbeat and fast repetitive control for single-phase dual-buck inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3671-3677.
- [32] 孙路成, 刘春喜, 程福临, 等. 双有源全桥直流变换器脉宽调制移相调制优化策略[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(8): 20-32.
- SUN Lucheng, LIU Chunxi, CHENG Fulin, et al. Optimization strategy of pulse width plus phase shift modulation for dual active full bridge DC converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(8): 20-32.
- [33] YANG S, WU C, YANG L, et al. An improved dual-buck with common-mode leakage current suppression[C]//2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering, Chongqing, China, 2022: 390-394.
- [34] SCHELLEKENS J M, DUARTE J L, HUISMAN H, et al. Harmonics in opposed current converters[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, Canada, 2012: 440-446.
- [35] PEYGHAMBARI A, DASTFAN A, AHMADYFARD A. Selective voltage noise cancellation in three-phase inverter using random SVPWM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4604-4610.
- [36] SIDDIQUE M D, MEKHILEF S, PADMANABAN S, et al. Single-phase step-up switched-capacitor-based multilevel inverter topology with SHEPWM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3107-3119.
- [37] 邓娜. 基于SHEPWM的三电平ANPC逆变器多目标控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 54-58.
- DENG Na. Multi-objective control strategy of three-level ANPC inverter based on SHEPWM[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 54-58.
- [38] ZHENG X, ZHANG L, LIU X, et al. Half-cycle control method of the bidirectional three-phase dual-buck inverter without zero-crossing distortion[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 2088-2097.
- [39] REN R, ZHANG F, LIU B, et al. A closed-loop modulation scheme for duty cycle compensation of PWM voltage distortion at high switching frequency inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1475-1486.
- [40] CHEN B, SUN P, LIU C, et al. High efficiency transformerless photovoltaic inverter with wide-range power factor capability[C]//2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Orlando, FL, USA, 2012: 575-582.

收稿日期: 2025-01-14

修改稿日期: 2025-02-10