

DOI: 10.11985/2023.02.006

四开关 Buck-Boost 变换器研究综述*

任林涛¹ 汪飞¹ 肖杨婷² 丁峰² 徐慧¹ 余琛琛³

1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444;
2. 上海船舶设备研究所 上海 200031;
3. 浙江巨磁智能技术有限公司 嘉兴 314000)

摘要: 直流微电网因其结构复杂、功能多样,对系统中变换器的性能有较高要求。四开关 Buck-Boost 变换器具有宽范围电压变换、输入输出同极性、功率双向传输等优势,近年来得到国内外学者的广泛关注,被应用于直流微电网中的新能源发电、储能等单元。通过分析该变换器的工作原理与典型控制策略,对变换器研究中现存关键问题,模式切换与效率优化进行归纳总结。针对模式切换问题,从模式切换时死区机理出发,基于多模式控制策略,分析了模式平滑切换的典型控制方法。针对效率优化问题,归纳了影响变换器效率的关键因素,并从硬开关与软开关两个方面分析阐述了常见的效率优化方法。最后,对四开关 Buck-Boost 变换器的现有研究工作进行了总结与展望,为该领域的进一步研究和未来发展提供了理论指导。

关键词: 四开关 Buck-Boost 变换器; 多模式控制; 模式切换; 效率优化
中图分类号: TM71

Review Research on the Four-switch Buck-Boost Converter

REN Lintao¹ WANG Fei¹ XIAO Yangting² DING Feng² XU Hui¹ YU Chenchen³

1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444;
2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031;
3. Zhejiang Magtron Intelligent Technology Co., Ltd., Jiaxing 314000)

Abstract: Due to its complex structure and diverse functions, DC microgrid has higher requirements on the performance of converters in the system. The four-switch Buck-Boost converter has many advantages, such as wide range of voltage conversion, input and output polarity, power bidirectional transmission and so on. Thus, it has been widely concerned in recent years, and has been used in new energy power generation and energy storage unit of DC microgrid. The working principle and typical control strategy of the converter are analyzed and described, the key problems, including the mode switching and the efficiency optimization, are summarized. Specifically, focusing on the problem of mode switching, the dead-zone mechanism is studied, and some typical optimization methods for smooth-mode switching are analyzed based on the multimode control strategy. Then, for the problem of efficiency optimization, the key factors affecting the efficiency of the converter are summarized, and the common efficiency optimization methods are summarized from hard switch and soft switch control. Finally, the main research contents of converters are compared and summarized, which can provide references for the further research and development of this field.

Key words: Four-switch Buck-Boost converter; multimode control; mode switching; efficiency optimization

1 引言

国家“十四五”规划明确提出“碳达峰”与“碳

中和”发展目标,并指出发展低碳、清洁、可再生的新能源是实现该目标的关键举措。以新能源为主的分布式发电方式得到快速发展,为提高分布式发电单元接入的可靠性与能量转换效率,微电网结构

* 国家自然科学基金资助项目(51977126)。20220711 收到初稿,20220830 收到修改稿

被提出并应用于实现发、输、配、用电力架构的智能匹配。交流微电网与直流微电网作为两个主要类别，一直都是研究的热点。交流微电网研究相对成熟，但伴随新能源发电、储能、负载等直流形式的装备增多，直流微电网研究与应用具有愈发重要的现实意义，可助力于未来清洁、低碳社会的构建^[1-2]。

直流微电网典型结构如图 1 所示，包含多电压等级直流母线、新能源发电单元、储能单元及负载单元等，主要通过直流变换器连接^[3]。智能高效的直流变换器很大程度上促进了新能源渗透率的增加、多元负荷的接入与能量转换效率的提高^[4-5]。

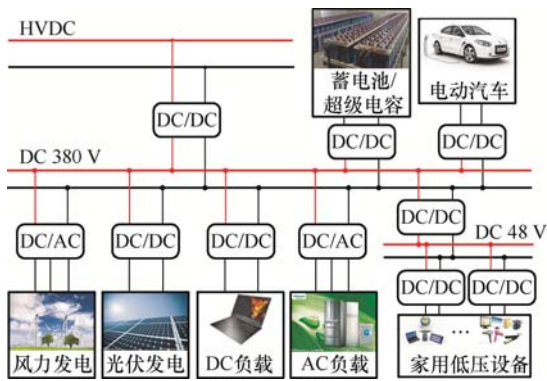


图 1 直流微电网典型结构

需要注意的是，直流微电网中新能源发电单元、储能单元等输出电压具有宽范围，且会随特定工作条件波动的特性。因此，为了保证整个系统的稳定与能量的高效传输，要求与各单元连接的直流变换器具有应对宽范围电压变化的能力^[6]。

四开关 Buck-Boost 变换器是由 Buck 变换器与 Boost 变换器级联简化可得，如图 2 所示，可较好解决上述应用中输出电压存在的问题^[7]。当面对宽范围电压变化，即使输入电压范围和输出电压范围交叠时，四开关 Buck-Boost 变换器也能实现高效率转换，并保持系统的整体性能不受影响。此外，与传统的非隔离直流变换器相比，四开关 Buck-Boost 变

换器具有输入输出极性相同、功率双向传输、开关应力小、无源器件少等优点，同时其类似于“H 桥”型的对称结构有助于变换器功率密度的提高与模块化单元的构建。

为了实现四开关 Buck-Boost 变换器在宽电压范围内进行升降压变换时的高转换效率和系统稳定，学者们对其控制策略展开了大量的研究^[8-13]，主要可分为两种类型。第一种为四边形电感电流控制^[14]，即同时控制四个开关管，构建四边形电感电流，实现预期控制目标。虽然变换器的整体损耗较大，但可实现所有开关管零电压开通，常用于变换器高频软开关技术研究中。第二种为多模式控制^[15]，根据输入电压和输出电压的比较，将变换器的整个电压工作区间划分为不同的模式并设计对应占空比，具体可分为单模式控制、双模式控制、三模式控制等。

单模式控制的四开关变换器仅有一种工作模式，即图 2 中的 S_1 和 S_4 同开同关。双模式控制可根据输入输出电压比调整变换器的工作模式，当输入电压高于输出电压时工作在 Buck 模式，反之则工作在 Boost 模式。三模式控制是在双模式控制的模式切换区间增加了一个过渡模式，即 Buck/Boost 模式。单模式控制实现简单，但效率不高；双模式控制下可大大提升效率，但当输入电压接近输出电压时，模式间切换效果会对系统的稳定性造成影响；三模式控制基于双模式控制，在模式切换处引入过渡模式(Buck/Boost 模式)，以实现平滑模式切换，但过渡模式通常会带来额外的损耗，且增加了控制复杂度。相较而言，多模式控制实现方式简单，能量传输效率高，因此，四开关 Buck-Boost 变换器的控制中大多采用此种方法。

四开关 Buck-Boost 变换器的两个主要优化目标^[16]：一是实现平滑模式切换，二是实现最佳转换效率。模式切换优化控制，往往基于多模式控制分析影响模式切换效果的原因，围绕变换器的整体控制设计展开，改善变换器模式切换时的输出稳态与动态响应^[17-18]。效率优化控制，基于变换器的损耗分析研究变换器损耗的关键控制量，围绕变换器的硬开关控制和软开关控制方式展开，提出降低损耗及提高效率的可行方法^[19-20]。模式切换优化控制和效率优化控制的研究，有助于实现变换器高效、高功率密度及高可靠性的目标。

本文将结合国内外的相关研究，对四开关 Buck-Boost 变换器进行全面阐述，结合模式切换优化控制方法和效率优化控制方法分析，归纳总

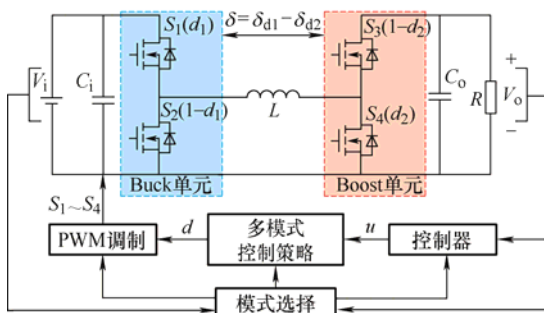


图 2 四开关 Buck-Boost 变换器的系统结构

结改善多模式变换器性能、提高变换器效率的常用方法。

在第2节中,简述变换器的基本工作原理和多模式控制,论述不同模式产生原因。第3节中,对模式切换的死区机理进行分析,比较了各种多模式控制策略的特性,并归纳出改善多模式切换时稳态与动态性能的方法。第4节中,分析变换器的效率制约因素,基于硬开关和软开关控制研究降低损耗、提升效率的优化控制方法。最后,第5节总结本文内容,并对四开关 Buck-Boost 变换器未来的发展趋势进行展望。

2 四开关 Buck-Boost 变换器

2.1 工作原理

变换器的基本拓扑如图2所示,依据结构组成特性,将变换器分为 Buck 单元和 Boost 单元,由中间储能电感 L 连接^[20]。Buck 单元主控管 S_1 , 占空比 d_1 ; Boost 单元主控管 S_4 , 占空比 d_2 , 单元内上下开关管互补导通。

需要说明的是:① 四开关 Buck-Boost 变换器可控制功率双向流动,每一侧既可作为“输入”,也可作为“输出”,为避免歧义,在本文中,定义左侧为输入侧,右侧为输出侧,输入电压为 V_i , 输出电压为 V_o ;② 本文中变换器预期目标为实现输入电压宽范围变化,得到稳定的输出电压。尤其当输入电压范围与输出电压有重叠。

根据电感的伏秒平衡原则,分析变换器输入输出电压关系,可得变换器的电压增益 M 为

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{d_1}{1-d_2} \quad (1)$$

由式(1)可知,变换器可实现的电压变比与 d_1 和 d_2 有关, d_1 和 d_2 可分别独立控制。同时 d_1 和 d_2 之间移相角 δ 的存在,如图2所示,大大增加了控制的灵活性,因此,变换器可以有多种控制策略^[21]。下文将对不同控制策略进行分析与比较。

2.2 控制策略

四开关 Buck-Boost 变换器有三个控制自由度,分别为 d_1 、 d_2 、 δ , 多控制自由度使得变换器控制越发复杂。早期研究围绕“控制自由度简化”原则,提出“单自由度控制”思想,即将变换器的多个控制自由度简化,通过控制单个自由度实现升降压变换。基于此,学者们先后提出区分工作模式的多种控制策略^[22-25]。

2.2.1 单模式控制

单模式控制,即变换器在整个输入电压范围内只有一种工作模式, S_1 和 S_4 同开同关,此时 $d_1=d_2=D$, 工作特性如表1所示。

表1 多模式控制工作特性

控制方法	工作模式	电压关系	d_1	d_2	M
单模式	—	—	D	D	$D/(1-D)$
双模式	Buck 模式	$V_i > V_o$	D_1	0	D_1
	Boost 模式	$V_i \leq V_o$	1	D_2	$1/(1-D_2)$
三模式	Buck 模式	$V_i > V_o$	D_1	0	D_1
	Buck/Boost 模式	$V_i \approx V_o$	D_1	D_2	$D_1/(1-D_2)$
	Boost 模式	$V_i < V_o$	1	D_2	$1/(1-D_2)$

单模式控制下,变换器有两种工作模式,其中能量流通过程如图3所示。

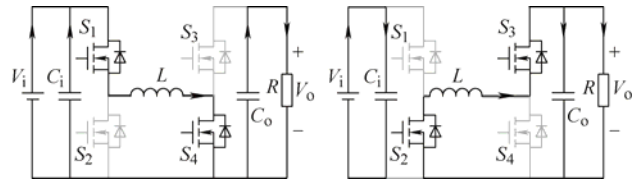


图3 单模式控制

单模式方法控制简单,但在任一开关周期内,四个开关管同时动作,开关损耗较大,当输入电压靠近输出电压时,电感电流纹波大,传输效率低。

2.2.2 双模式控制

双模式控制,即根据输入电压和输出电压的比较结果,将变换器的工作范围分为两个工作模式,工作特性如表1所示。Boost 模式,输入电压不高于输出电压,控制 S_4 , 稳态时 $d_2=D_2$, S_1 常闭; Buck 模式,输入电压高于输出电压,控制 S_1 , 稳态时 $d_1=D_1$, S_4 常开。

双模式控制下, Boost 模式和 Buck 模式各有两种工作模式,其中能量流通过程如图4a与图4b所示。Buck 模式时,等效为 Buck 变换器工作; Boost 模式时,等效为 Boost 变换器工作。 S_4 、 S_1 的控制信号与电感电流波形如图4c和图4d所示。

双模式控制下,任一模式只控制单个自由度变化,在开关周期内只有一个开关管动作,相比于单模式控制而言,其开关损耗降低,同时电感电流纹波明显降低,效率大大提升。但在双模式控制中,当输入电压接近输出电压时易出现“模式切换”问题,影响变换器的输出稳定性。

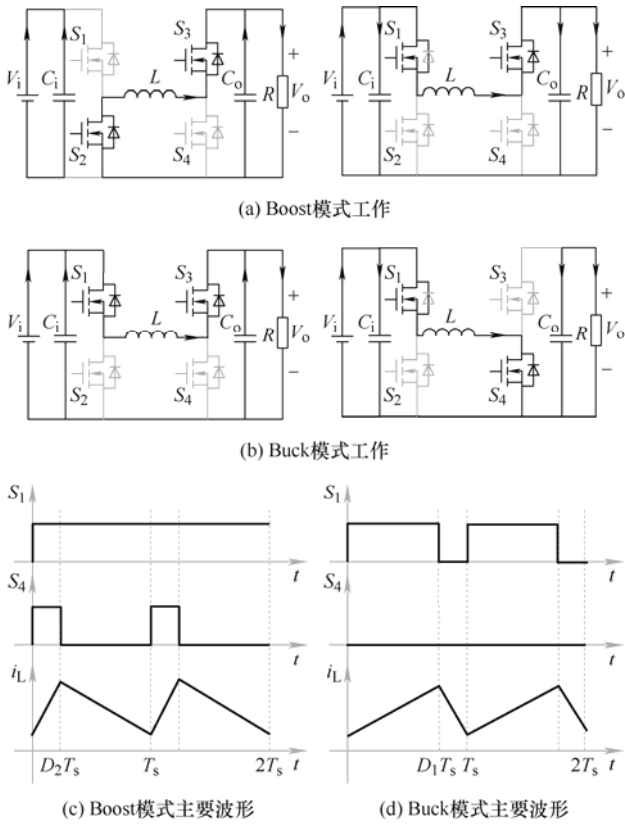


图4 双模式控制

2.2.3 三模式控制

三模式控制，是基于双模式控制对“模式切换”问题的一种经典解决方法，即在模式切换区间，增加一个过渡模式，也可称为 Buck/Boost 模式。

三模式下工作特性如表 1 所示。Buck 模式和 Boost 模式下， d_1 和 d_2 的控制与双模式控制保持一致，Buck/Boost 模式下， d_1 和 d_2 根据新的控制要求，可进行灵活的控制，稳态时 $d_1=D_1$ ， $d_2=D_2$ 。

Buck/Boost 模式的加入，可有效缓解模式切换时带来的不良影响，实际切换效果取决于具体控制策略。Buck/Boost 模式内四个开关管同时动作，开关损耗增加，根据文献[8]中的分析，整个工作范围内，Buck/Boost 工作模式内效率明显下降，削弱了变换器的整体工作效率。

综上所述可见，平滑模式切换控制与最佳效率优化控制，对提高变换器的整体性能具有十分重要的意义。下文将对这两个方面的控制方法展开具体论述。

3 模式切换控制研究

3.1 模式切换的死区机理

由文献[24]中分析可知，功率器件自身特性(开关管的开通与关断延时)、桥臂电路特性(桥臂电路

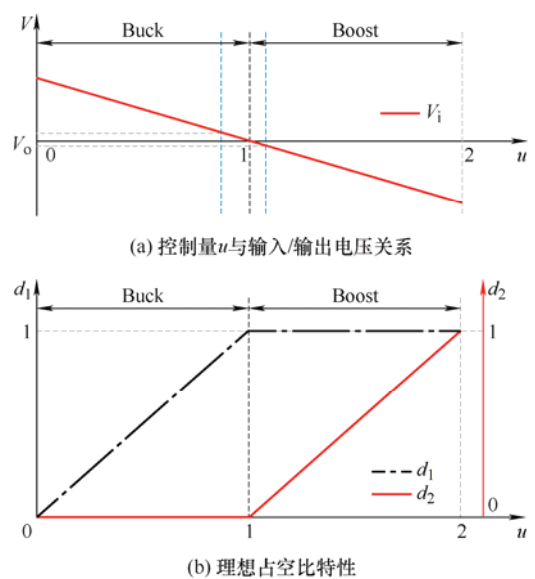
的死区时间)与控制电路特性(传输延时，PWM 比较器的非线性)等多方面因素作用，使得模式切换时出现控制脉冲信号的跳变，单元占空比不能连续控制，导致输出电压振荡，严重时对系统稳定性造成影响[26]。

现以双模式控制为例，分析模式切换对变换器正常工作的影响，引入统一控制变量 $u(0 < u < 2)$ 进行分析[27]。 u 与直流电压增益呈正相关关系，物理意义类似于“理想直流增益参考量”，其与变换器工作模式及相关变量间的联系如表 2 所示。可定义 Buck 模式下， $d_1=u$ ，Boost 模式下， $d_2=u-1$ ，模式切换发生在 $u=1$ 时。若 V_o 恒定，当 V_i 减小时， M 增大， u 增大，变换器由 Buck 模式进入 Boost 模式，如图 5a 所示的线性关系。

表 2 双模式控制工作特性

理想 u	实际 u	电压关系	工作状态	M
$0 < u < 1$	$D_{1min} \leq u < D_{1max}$	$V_i > V_o$	Buck 模式	u
$u=1$	$D_{1max} \leq u \leq 1 + D_{2min}$	$V_i \approx V_o$	模式切换	1
$1 < u < 2$	$1 + D_{2min} < u \leq 1 + D_{2max}$	$V_i < V_o$	Boost 模式	$1/(2-u)$

当从 Buck 模式切换进入 Boost 模式时，根据表 1 中双模式控制分析， d_1 、 d_2 的理想变化特性曲线如图 5b 所示。理想情况下， $0 \leq d_1 \leq 1$ ， $0 \leq d_2 \leq 1$ ，发生模式切换时，可实现占空比的平滑过渡。然而在实际情况下，由于单元占空比受到多方面因素的限制，实际占空比特性曲线如图 5c 所示，其中， d_1 、 d_2 存在最大占空比和最小占空比的限制，即 $D_{1min} \leq d_1 \leq D_{1max}$ ， $D_{2min} \leq d_2 \leq D_{2max}$ 。占空比受限区域，一般称为死区，由文献[27]中分析可知，死区内变换器一般以“直通状态”工作，即 S_1 常闭， S_4 常开。



(b) 理想占空比特性

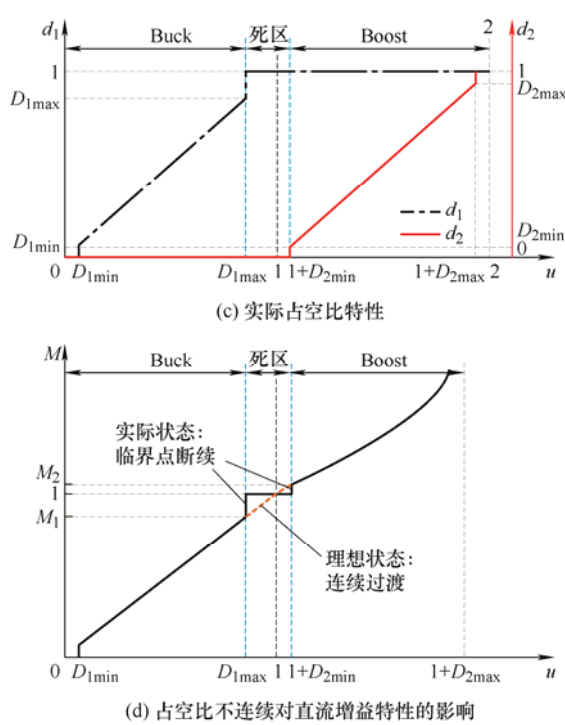


图5 模式切换问题机理分析

模式切换时死区的存在,影响变换器的直流增益特性,结合表2中的变量关系,从图5c和图5d可以看出,当 $u=D_{1\max}$ 时, d_1 直接由 $D_{1\max}$ 突变为1, M 直接由 $M_1=D_{1\max}$ 跃升为1;当 $u=1+D_{2\min}$ 时, d_2 直接由0突变为 $D_{2\min}$, M 直接由1跃升为 $M_2=1/(1-D_{2\min})$ 。

d_1 特性曲线和 d_2 特性曲线发生占空比的突变,使得理想情况下连续过渡的直流增益特性曲线,在实际情况下,出现死区临界点断续,即输出电压发生跃变。同时,“直通状态”下,输出电压随着输入电压波动,谐波含量较高。

综上所述,模式切换时产生死区,直流增益出现断续现象,影响到变换器的输出稳定性,也削弱了变换器的动态性能。

为了解决模式切换问题,针对死区内占空比不连续以及直流增益断续的情况,较为普遍的解决方案是引入新的模式,研究多模式控制策略,实现死区内有效控制,进而消除死区。现有的研究中,实现平滑模式切换,主要集中在输出特性的补偿,兼顾变换器动态性能的提升。

四开关Buck-Boost变换器的整体控制结构如图2所示,主要包含“多模式控制策略”、“模式选择”、“PWM调制”及“控制器”四个环节。“多模式控制策略”是实现平滑模式切换的具体手段,其主要通过双自由度轨迹的合理设计,直接解决“模式切

换问题”带来的不良影响;“模式选择”是实现多模式控制的前提,其通过精准且快速的模式选择大大提高了四开关变换器的控制性能与可靠性;“PWM调制”是实现多模式自动切换的另一种途径,通过重新设置调制信号或载波来实现多模式控制,减少了模式识别环节;“控制器设计”主要通过线性或非线性控制器的设计,满足不同工作模式下的控制性能需求,加快模式切换时的系统动态响应。下文将对各个环节的设计过程进行分析,围绕模式切换优化控制展开论述。

3.2 多模式控制策略研究

多模式控制策略强调对应模式的设计,通过控制 d_1 和 d_2 ,补偿直流增益特性,稳定输出电压,实现模式间平滑过渡^[28]。具体模式设计过程围绕“占空比重叠与钳位”思想展开。

为了实现输入电压范围内输出电压的稳定,文献[15]提出将Boost单元的 d_2 特性曲线向左平移,如图6a所示,控制 d_2 在 $u=u_1$ 时提前变为 $D_{2\min}$,避免死区出现, u_1 根据实际需求选取, d_1 和 d_2 特性曲线出现“重叠”区域,即“占空比重叠”。

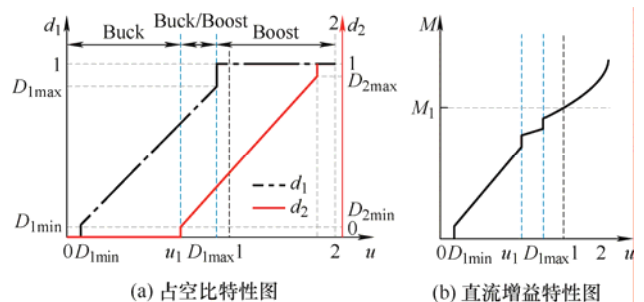


图6 占空比重叠

在此区域内, d_1 和 d_2 独立控制,因该区域内工作模式不满足Buck模式和Boost模式工作特性,相当于新工作模式,即Buck/Boost模式。此方法可消除“直通状态”,但从图6b可看出,直流增益临界点断续依旧存在,输出电压存在跃升。同时分析电路实际工作情况,可发现由于 d_2 特性曲线向左平移,在 $u \in [D_{1\max}, 1]$ 时,变换器已经提前进入Boost模式,与实际电压关系不符合,使得变换器无法正常工作。

基于“占空比重叠”,引入“钳位”控制,如图7a所示,即将占空比钳位在最大/最小值,从图7b可知,改善了直流增益跃升的问题,但使得变换器正常工作区间内转换效率受损,同时Buck/Boost模式工作范围增加,开关损耗明显增大^[29]。

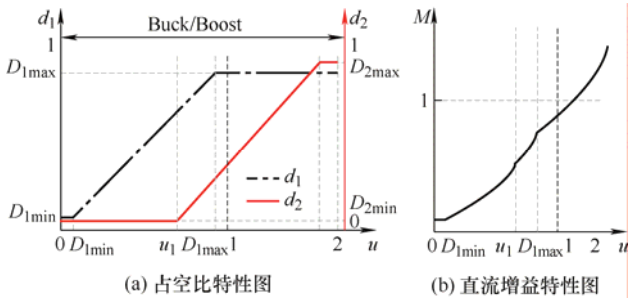


图 7 占空比重叠与钳位

为了不损坏正常工作区间的转换效率，同时消除“死区”，文献[28]结合“占空比重叠与钳位”思想，提出在“重叠”边界处引入滞环，进行滞环控制，边界跃升虽有所改善但依旧存在。

通过 d_2 特性曲线向左平移的方法虽然避免了“死区”，却削弱了双模式工作特性，使得变换器的整体性能无法达到理想效果。因此，基于上述“占空比重叠与钳位”思想，可直接对死区内 d_1 、 d_2 进行控制，从而消除死区^[30-31]。

在文献[32]中，直接将死区内占空比钳位在最大值，避免其进入死区，但这种方法存在着同样的问题，即削弱了变换器的转换效率。

为了降低对变换器转换效率的影响，更为普遍的是使用三模式控制^[33]，在死区内引入 Buck/Boost 模式进行单个自由度控制，如图 8a 所示。即固定 $d_1=D_{1max}$ ，通过控制 d_2 实现电压变换目标，但由图 8b 可见，“死区”边界处的直流增益断续只有一端恢复连续。

为了实现整个工作空间内变换器的平滑“模式切换”，在三模式的基础上，通过进一步将“死区”划分为两个子模式^[34]，学者们提出四模式控制策略。

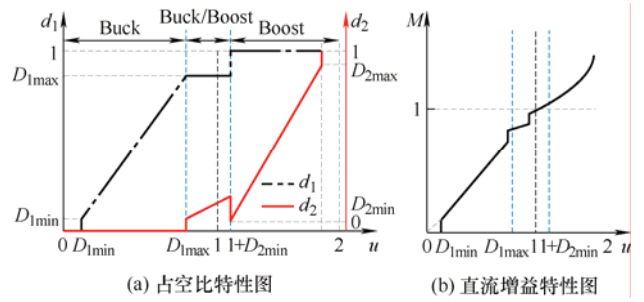


图 8 基于单自由度的三模式控制

四模式控制，如图 9 所示，由于“死区”内输入电压与输出电压有两种比较关系，因此将 Buck/Boost 模式进一步划分为 Buck/Boost-1 模式和 Buck/Boost-2 模式，并进行对应模式设计^[35]。

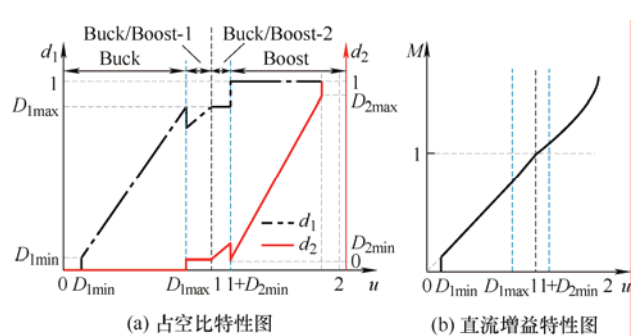


图 9 四模式控制

变换器的模式划分如表 3 所示，将变换器的整个工作区间划分为四个工作模式，分别进行有序控制^[36]。文献[37]对变换器的多模式控制策略进行对比分析，证明四模式控制下，电感电流纹波和平均值最优。由此可见，四模式控制较为有效地改善了“模式切换”问题，可以实现基本稳定的输出电压，但文献中并没有对模式切换的边界情况进行理论分析^[38]。

表 3 四模式控制工作原理

工作模式	实际 u	d_1	d_2	M
Buck 模式	$D_{1min} \leq u < D_{1max}$	D_1	0	D_1
Buck/Boost-1 模式	$D_{1max} \leq u < 1$	D_1	D_{2min}	$D_1/(1-D_{2min})$
Buck/Boost-2 模式	$1 \leq u \leq 1+D_{2min}$	D_{1max}	D_2	$D_{1max}/(1-D_2)$
Boost 模式	$1+D_{2min} < u \leq 1+D_{2max}$	1	D_2	$1/(1-D_2)$

为了实现理想切换效果，在文献[39-40]中展开“模式切换”边界研究。在文献[39]中，提出重新设计模式切换点的参考值，考虑到不同工作模式中通态压降对变换器电压增益的影响，通过理论计算与试验校正的方法，保证 Buck 模式与 Buck/Boost-1 模式切换点两侧，Buck/Boost-2 模式与 Boost 模式切换点两侧，变换器的实际电压增益相等；在文

献[40]中，将 Buck/Boost-1 模式和 Buck/Boost-2 模式间的切换位置，从 $u=1$ 变为 $u = D_{1max} / (1 - D_{2min})$ ，对模式切换点进行了重新界定，进一步消除模式边界对切换效果的影响。

上述的分析论证过程都是建立在图 5 中的双模式工作特性的基础上，在四开关 Buck-Boost 变换器中，相关学者提出了另外一种变换器工作特性分析

方法,即图10中的占空比轨迹分析法^[41-42],其不局限于多模式控制,可体现变换器的灵活工作状态。

根据式(1)中直流增益与占空比的关系,引入一个新的占空比量,开关管 S_3 的控制占空比 d_0 ,设 $d_0=D_0$,此时的电压增益 $M=D_1/D_0$,为图10中有效区域 α 内任一过零点的直线斜率。

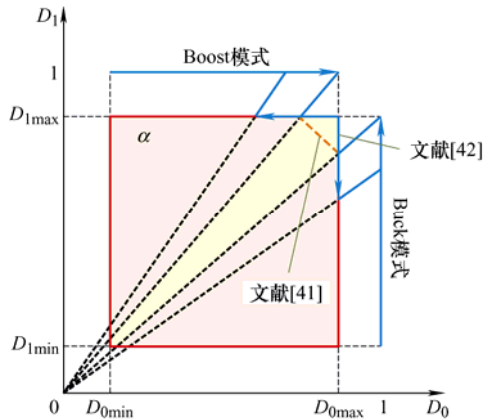


图10 占空比轨迹分析特性图

文献[38]中分析不同模式的运行轨迹,可与多模式控制的工作特性进行对应,文献[42]相比文献[41]选择了直流增益更高的运行轨迹,如图10中所示,分析 d_1 和 d_0 的轨迹,文献[41]对应三模式控制,文献[42]对应四模式控制,试验证明,四模式控制具有更好的切换效果,变换器性能更优。

对比图5的占空比特性图,图10通过统一控制变量 u ,更为直观。多模式控制策略对单元占空比特性和直流增益特性的影响,体现在变换器输出特性,而图10中的占空比特性,则更加注重体现变换器占空比的变化轨迹,适合变换器实际控制特性的分析。

总而言之,多模式控制策略实现变换器整个工作范围内占空比连续控制,补偿“死区”内变换器的直流增益特性,稳定输出电压,实现平滑“模式切换”。值得注意的是,不同模式内运行轨迹以及模式切换边界的选取都应该结合实际,同时在选取具体多模式控制策略时,进行综合考虑。

3.3 模式选择研究

对工作模式进行精确且同步的判断,是变换器高效工作的前提。传统模式判断方法,通过直接比较输入电压与输出电压,选择工作模式,忽略变换器的通态压降 V_p 。当输入电压与输出电压有大的差值时,可忽略 V_p 的影响,但当输入电压与输出电压接近时, V_p 的存在容易造成模式的误切换;同时,模式切换时,输出电压不稳,导致模式频繁切换;为了实现精准“模式切换”控制,对模式识别环节

有以下改进方法。

(1) 重新设计模式判断标准。由于输入电压与输出电压的直接比较,无法精确判断模式,可将电感电流加入模式识别环节^[43]。文献[44]通过检测电感电流,根据预先得到的电感电流与模式的对应关系进行模式选择,虽然理论上可以更加精准地选择模式,但难以构建电感电流与工作模式间准确的对应关系,同时变换器设计复杂程度增加,实际操作难度较大;文献[27]提出基于电压比较的模式识别改进方法,将 V_p 加入模式识别环节,通过比较 (V_i-V_p) 和 V_o 进行模式选择,而实际情况下 V_p 无法准确测量,一般依靠设计者的经验选取。

(2) 加入滞环控制。为解决模式频繁切换问题,可在模式切换边界处引入滞环窗口,进行滞环控制。文献[44]将滞环窗口引入电感电流模式选择中,文献[42]将滞环窗口引入占空比控制中,滞环窗口选择的控制量取决于控制对象与实际控制效果。

(3) 自动切换模式。不需要加入模式识别环节,利用PWM调制实现自动选择模式与切换^[45]。由图2可知,多模式控制环节输出占空比信号给PWM调制环节,实现变换器的控制。可通过对PWM调制过程进行设计实现自动切换模式,具体过程分析将在PWM调制部分进行展开说明。

3.4 PWM调制研究

传统PWM调制,如图11所示,使用单载波-单调制信号控制,即单个载波信号和单个调制信号相交产生开关管脉冲控制信号,因四开关Buck-Boost

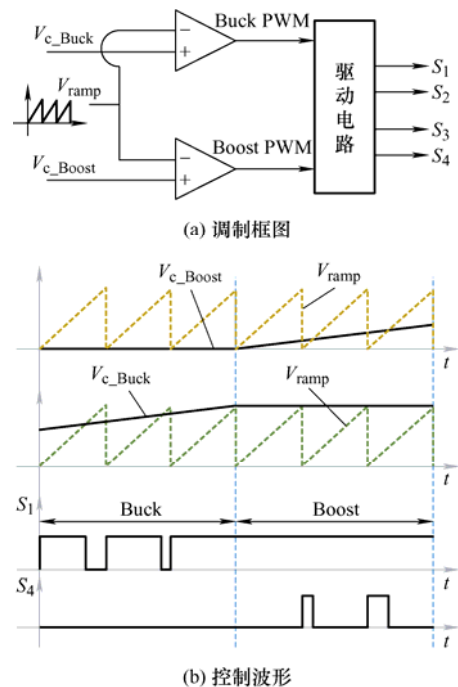


图11 单载波-单调制信号控制

变换器具有两个单元，其脉冲控制信号一般由两路独立调制信号与同个载波相交产生。分析多模式工作原理，可知其关键在于对不同模式内占空比的设计，有研究提出通过重新设置调制信号或载波实现多模式控制^[46]。

常见的改进 PWM 调制方式有两种，分别为单调制信号-双载波控制与双调制信号-单载波控制^[47]。需要说明的是，改进 PWM 调制方法，适用于控制器仅有一个控制信号输出的场景，即多种工作模式由单个控制环路控制。

(1) 单载波-双调制信号控制。在控制信号 V_c 上叠加一个电压偏置值 V_{bias} ，得到调制信号 V_{c_Buck} 和 V_{c_Boost} ，与同一个载波信号 V_{ramp} 进行比较，如图 12a 所示。通过叠加不同的 V_{bias} 实现多模式控制，图 12b 适用于双模式控制，设置 $V_{bias} \geq V_{ramp}$ ，图 12c 适用于三模式控制，设置 $V_{bias} < V_{ramp}$ 。

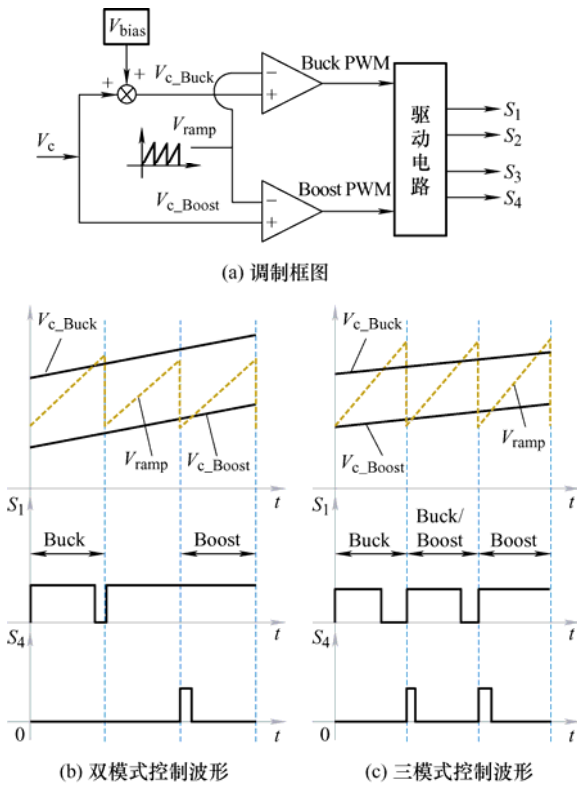


图 12 单载波-双调制信号控制

(2) 双载波-单调制信号控制。在载波 V_{ramp1} 上叠加一个电压偏置值 V_{saw} ，得到载波 V_{ramp2} ，与同一个调制信号 V_c 比较，如图 13a 所示。通过叠加不同的 V_{saw} 实现多模式控制，图 13b 适用于双模式控制，设置 $V_{saw} \geq V_{ramp}$ ，图 13c 适用于三模式控制，设置 $V_{saw} < V_{ramp}$ 。

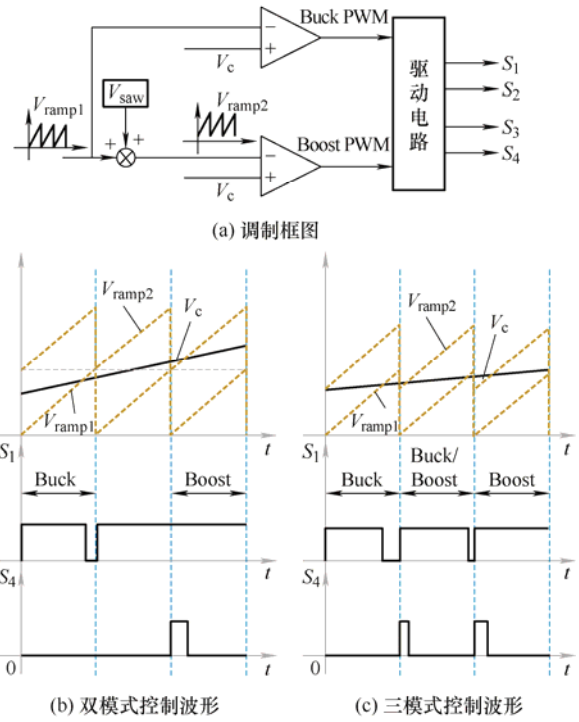


图 13 双载波-单调制信号控制

模式自动切换方法减少了模式识别环节，有利于变换器功率密度的提高。通过重新设置调制信号与载波的电压偏置值，实现模式自动切换。对双模式而言，即保证在任何时刻都只有一个调制信号与载波相交，实现仅有单个控制单元动作，死区仍存在；对三模式而言，基于双模式控制，增加一个 Buck/Boost 模式，即增加一段时间周期内，两个调制信号与同一个载波相交，或同一个调制信号与两个不同载波相交，控制变换器两个单元同时动作，需要注意合理选取电压偏置值，过小会导致模式频繁切换，过大会导致开关损耗增加。

3.5 多模式控制器设计

为了实现模式间平滑切换，提高变换器的整体性能，控制器环节的设计需要进行全面考虑。四开关 Buck-Boost 变换器有多种工作模式，对于此类多模式变换器，常基于线性控制方法，设计多模式控制器，即根据实际需求，建立不同模式的补偿环路，虽然能实现预期的控制目标，但存在控制结构复杂、动态性能不足等问题；近年来，具有良好暂态特性的非线性控制方法，在多模式变换器中逐渐得到了应用。下文将基于线性控制方法和非线性控制方法，对变换器的控制器环节进行阐述分析。

3.5.1 线性控制

四开关 Buck-Boost 变换器的控制器研究中，早期的研究强调输出电压控制，常使用单电压控制器，配合多模式控制策略或改进 PWM 调制，实现变换

器的控制目标,但单电压环控制动态性能不足,同时,由于不同模式的传递函数特性不同,若共用一个控制器,在保证系统充分稳定的前提下将牺牲变换器的动态响应速度。针对单电压环控制存在的种种问题,基于线性控制方法,学者们进行了控制器的改进研究。

(1) 平均电感电流控制。平均电感电流控制^[48]是提高动态性能的常见方法。为了改善单电压环控制动态性能不足的问题,特引入电流内环控制,如图14所示,选择平均电感电流作为控制量,但此方法的性能优劣取决于平均电感电流值检测的准确度。

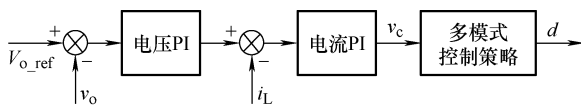


图14 平均电感电流控制机理

(2) 前馈控制。前馈控制可以很好地抑制甚至消除扰动量对控制量的影响,为了提高变换器的输入暂态响应能力,可在变换器的控制环路中加入输入电压前馈控制^[49]。此外,为了补偿模式切换时断续的电感电流,可进行电感电流线性前馈控制。

常见的输入电压前馈控制技术有如下几种。

1) 动态载波生成。在文献[16]中,令载波幅值随输入电压变化,动态调节开关信号,但变化的载波幅值在不同模式下呈现不同特性,实现方式复杂。进一步提高了变换器的动态响应,如图15所示,其中 G_{f1} 、 G_{f2} 为 Buck 模式和 Boost 模式各自设计的输入电压前馈函数。该方法实现简单,但仅根据双模式设计输入电压前馈函数,没有对其余的工作模式进行设计。

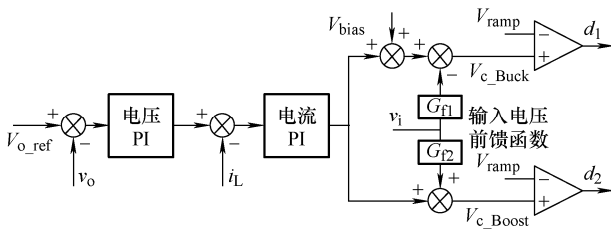


图15 输入电压前馈控制机理

2) 快速占空比计算^[50]。基于输入电压幅值实时计算出变换器的占空比,但变换器的占空比与输入电压间的关系呈非线性,使得实际实现较为困难。

文献[41]中分析,变换器在模式切换时电感电流出现不连续,通过加入电感电流前馈控制可以补偿此状态下的电感电流。电感电流前馈控制技术的具体实现方法,可参照输入电压前馈控制技术的分

析过程进行设计^[51]。

(3) 自适应控制。上述的控制器设计,不同模式采用同一个控制环路。对多模式变换器而言,不同模式的传递函数特性不同,为了提高整个工作空间内变换器的性能,使用自适应控制器,实现对变换器的稳态和动态性能的提高。

文献[47]分别设计 Buck 模式和 Boost 模式的占空比补偿器,如图16所示,将实际的占空比控制信号直接补偿为连续占空比控制信号。但占空比补偿器的设计需要精准测量功率器件的运行参数,难以在实际应用中实现,且转换效率损耗较大。

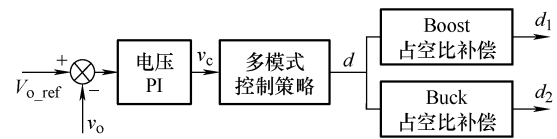


图16 后级补偿控制机理

文献[40]分别为 Boost 操作和 Buck 操作设计补偿环节,如图17所示,试验结果证明动态性能有所改善,模式间的过渡时间缩短。但相较于电流型控制,动态性能仍有提升空间。

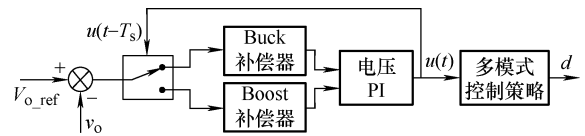


图17 前级补偿控制机理

文献[41]中,如图18所示,设计了一种级联式的多模式控制器。同时,针对模式切换时电感电流不连续的问题,增加了补偿电感电流的前馈控制。但此方案对计算资源有一定的要求。

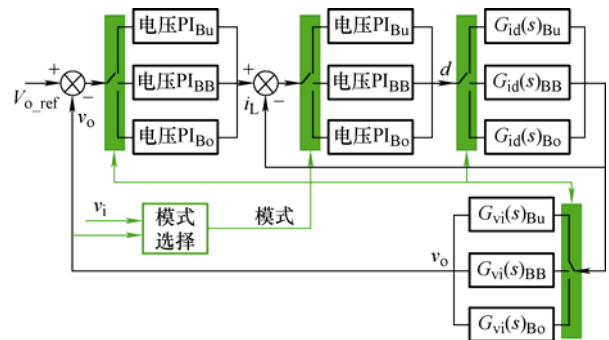


图18 多模式级联控制机理

3.5.2 非线性控制

模式切换时,变换器自身的非线性特性、PWM调制的非线性等因素的共同作用,使得变换器切换性能受影响,为实现变换器整体性能的优化,引入非线性控制思想,进行控制器设计^[52]。多模式变换

器中常见的非线性控制方法有以下几种。

(1) 滑模控制。滑模控制^[53-54]是一种应用广泛的非线性控制器，其主要思想是定义一个滑动曲面，使得系统状态轨迹在滑动曲面上最终收敛到平衡点。其表现出来的稳定性和动态响应通常优于线性控制。

文献[53]将滑模控制应用于光伏的最大功率跟踪控制，文献[54]将其应用于开关磁阻电机快速跟踪参考值，减小转矩脉动，如图 19 所示，按照实际要求设计外环并产生相应参考电压，而内环基于滑模控制与线性补偿器，用预估的电感电流定义所有运行模式的滑动面方程，简化控制环节，实现快速动态响应与高鲁棒性。

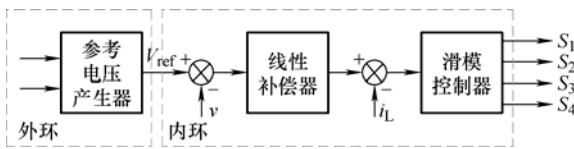


图 19 滑模控制机理

(2) 模型预测控制。模型预测控制^[55-56]应用于多变量、多约束与非线性系统中，其主要思想是使用系统的一个动态模型来预测其未来的响应，并将其与未来的控制输入动作序列联系起来。文献[55]中，将电压调节问题重新定义为变频电流调节问题，用最小成本函数替代调制和模式选择过程，进行最优开关控制，同时通过将过流保护加入成本函数，增加过流保护功能。

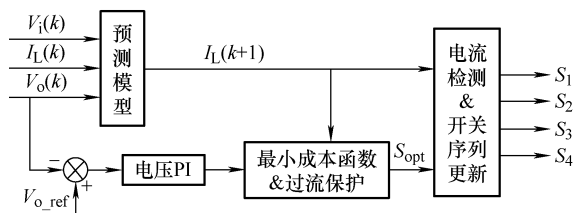


图 20 模型预测控制机理^[55]

上述方法皆能简化控制结构，使变换器具有良好的暂态性能，同时提高系统的可靠性，但计算资源需求较大，滑动面方程与预测模型需要合理设计。

(3) 非线性模型方法。四开关 Buck-Boost 变换器的研究中较为普遍地使用小信号模型设计控制器，但采用小信号建模对多模式变换器控制进行设计存在一定局限性。小信号模型只能反映工作点附近的动态特性，基于选定的工作模式和稳态点，保证控制的稳定性。但在多模式变换器中，由于不同模式的电路工作特性存在差异，针对某个稳态点设计的控制器，不能满足整个工作区域的动态需求。因此，可引入非线性模型方法设计控制环路。

文献[57]使用了基于反馈线性化技术设计的非线性控制器，应用在光伏领域，实现无论光伏模块或负载单元的波动，都能使得变换器快速响应，图 21 为不同模式的控制框图。但在控制器的设计过程中较为依赖对无源器件的精确控制。

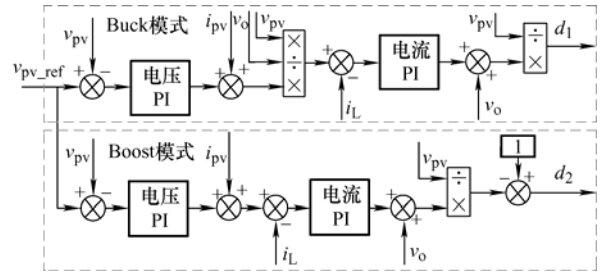


图 21 反馈线性化控制机理

在文献[42]中，根据不同工作模式的微分方程，设计电感电流非线性前馈控制器，解决了采用线性控制器时，变换器 Boost 模式控制易失稳的问题，拓宽了控制器工作点的适用范围；切换电路模式时，补偿控制系统中状态参数的跃变，图 22 为控制框图。但其电感电流控制需要复杂的计算与理论建模。

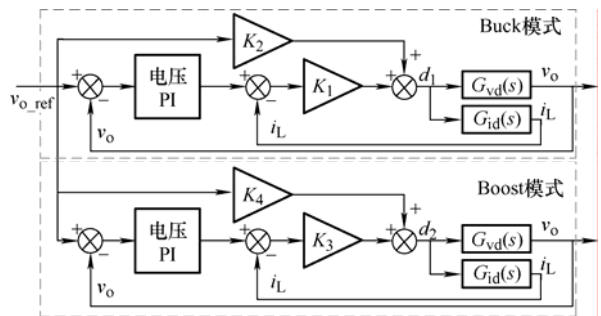


图 22 电感电流非线性前馈控制机理

大信号建模被引入四开关 Buck-Boost 变换器的控制^[58]。文献[59]提出“统一模式控制”概念，如图 23 所示，建立了变换器的大信号线性参数可变 (Linea parameter varying, LPV) 模型^[60]，进行模式的实时选择，使得变换器在遇到负载扰动时能够快速恢复输出特性。

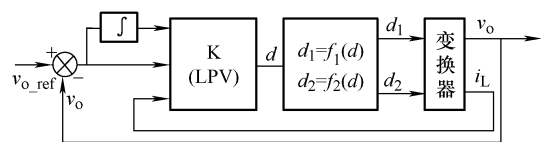


图 23 统一模式控制机理

文献[41]提出“无扰切换”的理论，分析模式切换时的“电压冲击”，把瞬变的电压作为衡量动态性能的指标，设计大信号指标数字评估模型。动态模式选择^[61]，即可以根据需求实时选择工作模式，基于建立的扰动判据，选择大扰动和小扰动下

对应的工作模式。

现有的研究中,大多针对变换器的转换效率或直流增益特性进行研究,把变换器的稳态输出特性作为衡量模式切换效果的指标,但较少对模式切换时的动态性能做出分析。大信号分析方法可以改善这一问题,但其实现需要大量的理论作为支撑。目

前的研究中关于四开关 Buck-Boost 变换器的大信号分析研究较少,相关理论有待进一步完善。各种优化控制器设计方法的优点与不足,在表 4 中进行对比分析,从不同的需求出发,控制方法的选取角度有所不同,需要结合图 2 所示变换器控制的各个具体环节,进行综合考虑。

表 4 模式切换优化控制对比分析

控制方法		优点	不足	参考文献		
线性控制	电压型控制	输出电压单环控制	控制方式简单,操作容易	动态性能不足	[26]	
	电流型控制	平均电感电流双环控制	动态响应速度提高	操作复杂,成本增加	[48]	
	前馈控制	输入电压前馈	动态载波生产	输入暂态响应能力提高	实现方式复杂	[16]
			输入电压前馈函数	实现方式简单	多模式控制理论分析不足	[49]
			快速占空比计算	实时跟踪输入电压变化,提高响应精度	对计算资源有一定要求	[50]
		电感电流前馈	补偿模式切换电感电流,实现平滑过渡	成本增加,建模复杂	[51]	
	自适应控制	模式占空比补偿控制	分模式补偿,控制精度提高	补偿器设计复杂	[47]	
		级联多模式控制	分多种模式设计控制器,控制精度高	环节冗余	[41]	
		滑模控制	系统稳定性和动态响应较优	滑动面方程设计复杂	[53]	
		模型预测控制	简化控制结构,具有良好的暂态响应能力	成本函数需要合理选取	[55]	
非线性控制	非线性模型设计	基于反馈线性化的非线性控制	面对扰动因素,快速响应	建模过程依赖对无源器件的精准控制	[57]	
		电感电流非线性前馈控制	拓宽变换器稳定工作范围,提高变换器工作的稳定性	设计环节计算复杂	[42]	
		统一模式控制			[59]	
	大信号建模	无扰切换控制	进行模式的实时选择,暂态响应能力较优	模型的建立需要理论支撑	[41]	
		动态模式选择			[61]	

4 效率优化研究

在四开关 Buck-Boost 变换器的研究中,效率问题制约着变换器往更高功率密度、更高精度、更高频率的方向发展。相较于其他典型非隔离 DC-DC 变换器,四开关 Buck-Boost 变换器的开关管数量明显增加,具有更大的效率损失。由此,“效率优化”成为变换器的另一个研究重点。

为了提高变换器的能量传输效率,在现有的优化方式中,可总结出两类效率优化方法,即基于硬开关的效率优化方法和基于软开关的效率优化方法。在具体分析优化方法之前,先对四开关 Buck-Boost 变换器的损耗分析进行归纳,从而找到实现效率优化的控制对象。

4.1 损耗分析

制约四开关 Buck-Boost 变换器效率提升的关

键,主要有以下两个方面。

(1) 变换器能量通路。在变换器中,向负载提供能量的方式有两种:一为直接功率传输,由输入直接供能给负载;二为间接功率传输,由储能元件间接供能给负载。

理论上,直接功率传输比重越大,变换器能量传输效率越高。双模式控制相较于单模式控制,效率明显提高的主要原因之一是增加了直接功率传输比重。因此,为了优化效率,需要适当提高直接功率传输比重。

(2) 变换器损耗。分析四开关 Buck-Boost 变换器的主要损耗有导通损耗和开关损耗。前者为电感电流流经开关器件与电感元件造成的能量损耗,与电感电流平均值相关;后者则与电感电流的有效值有关,同时受开关频率的影响。

由损耗分析可知,变换器损耗与电感电流和开关频率直接相关,可通过减小电感电流来降低导通

损耗和开关损耗，通过直接降低开关频率或使用软开关降低开关损耗，实现效率优化目的。

4.2 基于硬开关的效率优化

基于硬开关的效率优化方法，结合多模式控制策略实现。常采用的优化方法围绕三个方面展开：增加直接功率传输比重；减小电感电流；减小开关频率。

文献[25]从 PWM 调制角度出发，提出“双沿调制”，即开关管 S_1 后沿调制，开关管 S_4 前沿调制，如图 24 所示，控制开关管驱动信号的开通和关断时刻，强调增加直接功率传输阶段，开关管电压应力减小，降低电感电流纹波和电感电流平均值，从而提高能量传输效率。

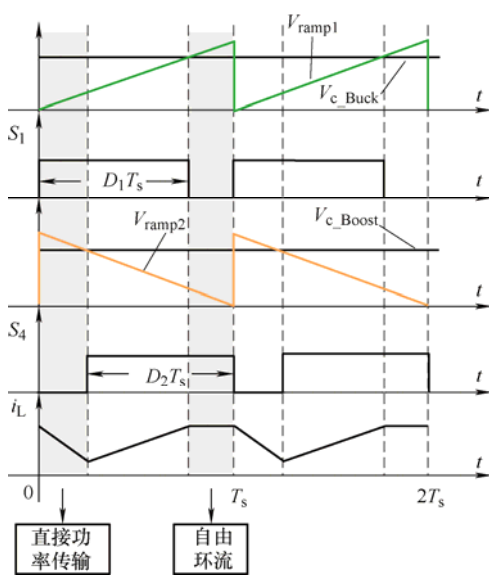


图 24 双沿载波调制控制

“双沿调制”也可用在 Buck/Boost 模式中，作为 PWM 调制方式，减小 Buck/Boost 模式下的电感电流纹波。

文献[62]详细分析输出损耗，在双模式工作的基础上，增加自由环流阶段，降低电感电流纹波，图 24 中对自由环流阶段的电流与开关管状态进行展示。具体实现方法为，根据设计的最大效率控制算法，不断比较输入功率和输出功率，调节占空比，提高变换器效率。

Buck/Boost 模式的加入不可避免带来了效率的损失，在文献[25]中，基于三模式控制，通过减小 Buck/Boost 模式下开关频率，降低开关损耗，实现变换器整体效率的提升。但变换器工作中存在频率的变化，增加了控制的复杂度，同时频率的降低会导致电感电流纹波的增加^[63]。文献[16]在“死区”内进行混合调制，通过交错各一个开关周期 Buck

模式工作和 Boost 模式工作，等效为一个工作周期的 Buck/Boost 模式工作，如图 25 所示，近似于开关频率减半，降低了开关损耗。同时，文献中根据最小电感电流有效值，即使得该区域下电感电流接近负载电流，实现效率的提升。

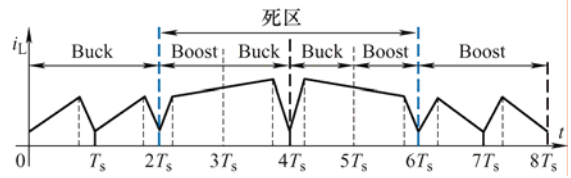


图 25 混合调制控制电感电流波形

综合分析，控制电感电流进行效率优化的方法适用性更强，应用更为广泛。

4.3 基于软开关的效率优化

基于多模式控制的硬开关控制方式，很难适用于功率密度和效率指标要求越来越高的场合应用。为了获得更高的效率和频率，大量学者对四开关 Buck-Boost 变换器的软开关控制进行了研究。

应用在四开关 Buck-Boost 变换器的软开关控制方法主要有两种，一种通过增加耦合电感^[64]，如图 26 所示，或增加附加电路支路^[65]实现，但此类方法增加控制复杂度，同时体积成本增加。

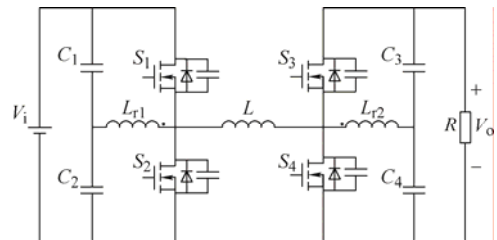


图 26 带耦合电感的四开关 Buck-Boost 变换器

另一种通过四边形电感电流控制实现^[66]，不需要附加支路或耦合元件，因此在变换器研究中更为常见。下文对此类软开关实现方法展开详细论述。

分析变换器的工作原理，当其工作在双模式控制下，当电感电流续流至反向时，可以实现 S_1 和 S_4 零电压导通。为了实现所有开关管的零电压导通，引入统一的四边形电感电流控制，其关键是控制电感电流在每个开关周期的开始和结束阶段为负值。

如图 27 所示，其中图 27a~27d 为变换器进行四边形电感电流控制的基本工作模态，四边形电感电流的建立过程可从图 27e 中根据模态与电流的对应关系得出。

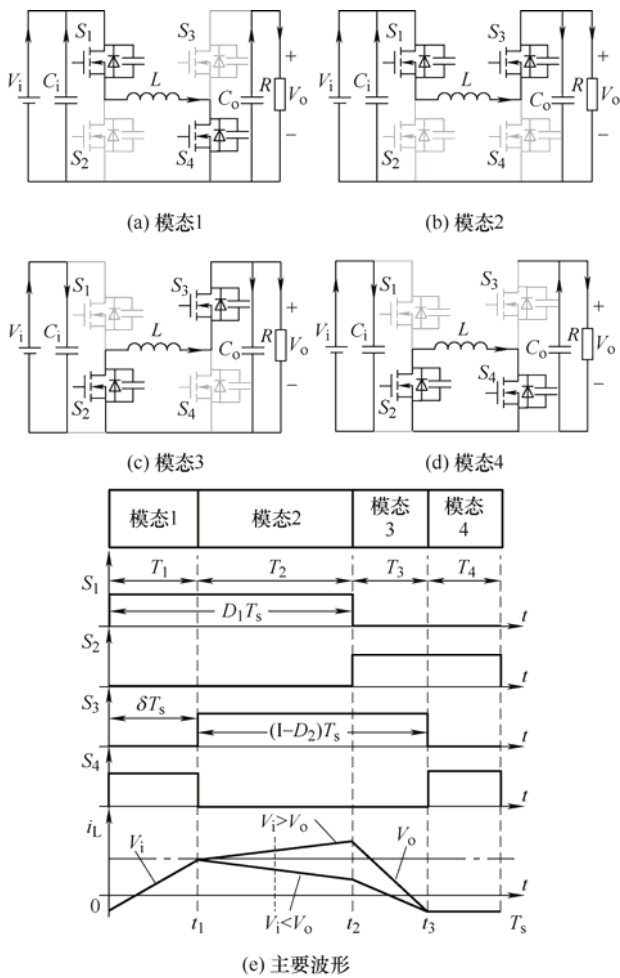


图 27 四边形电感电流控制

四边形电感电流控制，将电感电流波形分成四段，控制其在开关周期的开始和结束阶段产生反向电流，同时通过对电感电流具体形状的构建，可以实现电感电流有效值的优化。依据图 27e 分析电感电流的构建过程，根据选取的不同控制量可有两种实现方法。

(1) d_1 、 d_2 、 δ 组合控制。由第 1 节的分析可知， d_1 、 d_2 、 δ 为变换器的三个控制自由度，对控制自由度的灵活控制，可以实现四边形电感电流的构建，通过固定 d_1 、 d_2 的取值，将控制自由度简化，进行单自由度控制，即只需要设计未来实现四边形电感电流，同时使得电感电流有效值最小，实现效率优化。

(2) 模态时间 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 组合控制。根据电流拐点，计算每个阶段的时间。可根据输入电压和输出电压，确定 t_1 和 t_2 ，将 t_3 尽量向开关周期处延伸，如图 28 中 A 电流所示；或将 t_3 固定，移动 t_1 、 t_2 ，列出一个 t_1 、 t_2 、 t_3 的三维表，根据所采集到的输入电压以及输出电压查找三维表中对应的控制时间，如图 28 中 B 电流所示，实现电感电流

有效值优化的功率调节。

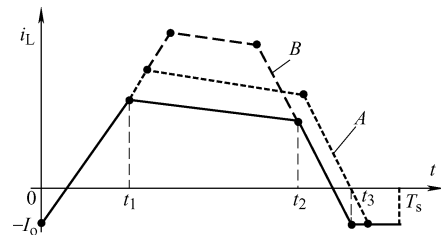


图 28 电感电流波形

建立了最小电感电流有效值的数学公式模型，通过选择四个模态的最佳控制时间，使得电感电流有效值最小^[67]。通过多维查找表的方式实现，需要不断采集输入电压与输出电压的实际值进行计算，计算资源占用过大。

文献[68]强调对图 27d 中模态 4 的自由环流电流进行优化，指出自由环流状态下不进行能量传输，可通过减小模态 4 工作时间与负值电流，减小变换器的导通损耗，从而提升效率。四边形电感电流控制存在的两个问题：电感电流有效值过大；与多个控制变量存在耦合关系，导致控制不稳定。基于文献[68]的方法，文献[69]建立变换器损耗，同时引入解耦补偿控制，减少两回路之间的干扰。

四边形电感电流控制实现软开关的关键是产生负值电感电流，实现所有开关管的零电压导通，降低开关损耗，但负值电感电流出现时电感电流不连续，变换器导通损耗增加。因此，在使用上述方法的过程中，需要综合考量不同损耗的影响。

综上所述，将常见效率优化方法归纳于表 5 中，具体可分为硬开关和软开关控制技术，在高频场合下，软开关控制可以较好地保证功率传输效率，但若使用四边形电感控制法，需要构建复杂的电感电流模型以及选取合适的判据，控制复杂度大大增加，而低频下硬开关效率优化方法对效率的提升效果有限，应根据具体应用场合进行控制方法的选取。

表 5 效率优化主要控制方法分析

控制方法	优点	不足	参考文献	
双沿调制控制	降低电感电流纹波	削弱能量传输效率	[25]	
硬开关	电感电流控制	减小平均电感电流	对电感电流检测精度与实时性要求高	[16]
	变频控制	减小开关损耗	控制复杂性增加	[63]
软开关	增加耦合电感或附加支路	提高效率，减小开关损耗	成本增加，体积增加	[64]
	四边形电感电流控制	效率大大提高	电感电流模型计算复杂，计算资源大	[66]

5 总结与展望

5.1 总结

四开关 Buck-Boost 变换器, 由于其输入与输出同极性、器件电压电流应力小、宽范围升降压变换等优点, 被广泛应用于直流微电网中。本文对四开关 Buck-Boost 变换器的研究现状进行了全面梳理, 分析了其基本工作原理。此外, 基于机理分析对变换器研究中的两个主要问题, 即“模式切换”和“效率优化”, 进行了详细阐述。具体结论如下所述。

(1) 四开关 Buck-Boost 变换器控制。变换器因其结构特性, 具有多个控制自由度, 出于对效率和变换器性能的综合考虑, 其一般研究重点围绕控制自由度的简化展开, 并提出了区分模式的控制方法。从表 6 中对比分析可知, 对模式切换问题和效率问题, 多模式控制策略的选取需要进行综合考虑, 从而确定最为合适的控制策略。

表 6 多种模式控制策略对比

工作模式	优点	不足
单模式	控制简单, 实现方便	效率低, 转换效率受限
双模式	效率高	存在模式切换问题
三模式	模式间平滑切换	效率受限
四模式	模式间平滑切换, 效率提升	控制复杂

(2) 模式切换控制。模式切换时会导致“死区”的产生, 基于“占空比重叠与钳位”的思想, 对“死区”进行补偿, 恢复占空比和直流增益特性的连续性, 同时通过对各个控制环节的设计, 使变换器的整体性提高。

(3) 效率优化控制。变换器的效率优化主要是围绕增加直接功率传输比重、实现电感电流最优控制展开。前者控制的关键在于单元占空比之间的配合, 后者控制的关键在于对电感电流波形的塑造, 并将电感电流作为控制量, 以提高变换器效率。

5.2 展望

为了实现四开关变换器在整个工作范围内的最佳性能, 可对模式切换时的动态性能展开研究, 不局限于将输出特性作为衡量标准, 而是进行新的判据选择; 由于变换器拥有多个控制自由度, 可对其进行灵活控制, 并研究动态模式控制, 进一步提高其自适应性; 多模式控制策略, 容易造成控制环节

的冗余, 可将多种模式或其边界进行柔化研究, 实现柔性模式控制; 同时可对检测手段进行进一步优化, 以便实现变换器更为实时与智能的控制。

参 考 文 献

- [1] 徐海亮, 张禹风, 聂飞, 等. 微电网运行控制技术要点及展望[J]. 电气工程学报, 2020, 15(1): 1-15.
XU Hailiang, ZHANG Yufeng, NIE Fei, et al. Key points and prospect of microgrid operation and control technologies[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(1): 1-15.
- [2] 姚钢, 陈少霞, 王伟峰, 等. 分布式电源接入直流微电网的研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(4): 1-6.
YAO Gang, CHEN Shaoxia, WANG Weifeng, et al. Overview of research on DC micro-grid for distributed power access[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(4): 1-6.
- [3] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [4] DRAGIČEVIĆ T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3528-3549.
- [5] QIU Z X, SUN K. A photovoltaic generation system based on wide voltage-gain DC-DC converter and differential power processors for DC microgrids[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 3(1): 84-95.
- [6] QIN Y X, LI S N, HUI S Y. Topology-transition control for wide-input-voltage-range efficiency improvement and fast current regulation in automotive LED applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5883-5893.
- [7] CARICCHI F, CRESCIMBINI F, NAPOLI A D. 20 kW water-cooled prototype of a buck-boost bidirectional DC-DC converter topology for electrical vehicle motor drives[C]//Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 05-09, 1995, Dallas, TX, USA. IEEE, 1995, 2: 887-892.
- [8] 任小永, 唐钊, 阮新波, 等. 一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 15-19.
REN Xiaoyong, TANG Zhao, RUAN Xinbo, et al. A

- novel four switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 15-19.
- [9] ORELLANA M, PETIBON S, ESTIBALS B, et al. Four switch buck-boost converter for photovoltaic DC-DC power applications[C]// IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, November 07-10, 2010, Glendale, AZ, USA. IEEE, 2010: 469-474.
- [10] KHAN M A, AHMED A, HUSAIN I, et al. Performance analysis of bidirectional DC-DC converters for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3442-3452.
- [11] WANG L Y, WU X B, LOU J N. A multi-mode four-switch buck-boost DC/DC converter[C]// 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 27-31, 2009, Wuhan, China. IEEE, 2009: 1-4.
- [12] LEE H S, YUN J J. High-efficiency bidirectional buck-boost converter for photovoltaic and energy storage systems in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4316-4328.
- [13] 梁永亮, 吴跃斌, 马钊, 等. 新一代低压直流供电系统在“新基建”中的应用技术分析和发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 13-24.
- LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24.
- [14] WAFFLER S, KOLAR J W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bi-directional buck+boost converters[C]// 2007 7th International Conference on Power Electronics, October 22-26, 2007, Daegu, South Korea. IEEE, 2007: 889-894.
- [15] CHEN C W, CHEN K H, CHEN Y M. Modeling and controller design of an autonomous PV module for DMPPT PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4723-4732.
- [16] HUANG P C, WU W Q, HO H H, et al. Hybrid buck-boost feedforward and reduced average inductor current techniques in fast line transient and high-efficiency buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(3): 719-730.
- [17] 张斐, 许建平, 杨平, 等. 两开关伪连续导电模式 Buck-Boost 功率因数校正变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 56-64.
- ZHANG Fei, XU Jianping, YANG Ping, et al. Two-switch pseudo continuous conduction mode Buck-Boost power factor correction converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 56-64.
- [18] CHEN J J, SHEN P N, HWANG Y S. A high-efficiency positive buck-boost converter with mode-select circuit and feed-forward techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(9): 4240-4247.
- [19] REN X Y, RUAN X B, QIAN H, et al. Three-mode dual-frequency two-edge modulation scheme for four-switch buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 24(2): 499-509.
- [20] SAHU B, RINCON-MORA G A. A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck-boost converter for portable applications[J]. Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 443-452.
- [21] 肖华锋, 谢少军. 用于光伏并网的交错型双管 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 7-12.
- XIAO Huafeng, XIE Shaojun. An interleaving double-switch buck-boost converter for PV grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 7-12.
- [22] WEISSBACH R S, TORRES K W. A noninverting buck-boost converter with reduced components using a microcontroller[C]// Proceedings. IEEE SoutheastCon 2001, April 01, 2001, Clemson, SC, USA. IEEE, 2001: 79-84.
- [23] GABORIAULT M, NOTMAN A. A high efficiency, noninverting, buck-boost DC-DC converter[C]// Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC' 04, February 22-26, 2004, Anaheim, CA, USA. IEEE, 2004, 3: 1411-1415.
- [24] RAJARSHI P, MAKSIMOVIC D. Analysis of PWM nonlinearity in non-inverting buck-boost power converters[C]// 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece. IEEE, 2008: 3741-3747.
- [25] 任小永, 阮新波, 李明秋, 等. 双沿调制的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 16-23.
- REN Xiaoyong, RUAN Xinbo, LI Mingqiu, et al. Dual edge modulated four-switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 16-23.
- [26] RAJARSHI P, MAKSIMOVIC D. Smooth transition and ripple reduction in 4-switch non-inverting buck-boost

- power converter for WCDMA RF power amplifier[C]// 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 18-21, 2008, Seattle, WA, USA. IEEE, 2008: 3266-3269.
- [27] 贾磊磊, 孙孝峰, 郑智文, 等. 消除非反向 Buck-Boost 变换器运行死区的充放电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3270-3280.
- JIA Leilei, SUN Xiaofeng, ZHENG Zhiwen, et al. Charge and discharge control strategy for eliminating the operational dead zone of noninverting Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3270-3280.
- [28] RESTREPO C, KONJEDIC T, CALVENTE J, et al. Hysteretic transition method for avoiding the dead-zone effect and subharmonics in a noninverting buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3418-3430.
- [29] WANG Y, LAN J Y, HUANG X, et al. An improved single-mode control strategy based on four-switch buck-boost converter[C]// 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 15-19, 2020, New Orleans, LA, USA. IEEE, 2020: 320-325.
- [30] TSAI C H, TSAI Y S, LIU H C. A stable mode-transition technique for a digitally controlled non-inverting Buck-Boost DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 475-483.
- [31] TSAI Y Y, TSAI Y S, TSAI C W, et al. Digital noninverting-Buck-Boost converter with enhanced duty-cycle-overlap control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(1): 41-45.
- [32] JONES D C, ERICKSON R W. A nonlinear state machine for dead zone avoidance and mitigation in a synchronous noninverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 467-480.
- [33] CHO Y K, LEE K C. Noninverting Buck-Boost DC-DC converter using a duobinary-encoded single-bit a high efficiency modulator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 484-495.
- [34] HUANG P C, WU W Q, HO H H, et al. High efficiency and smooth transition buck-boost converter for extending battery life in portable devices[C]// 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2009, San Jose, CA, USA. IEEE, 2009: 2869-2872.
- [35] MA J J, ZHU M, ZHANG J W, et al. Improved asynchronous voltage regulation strategy of non-inverting Buck-Boost converter for renewable energy integration[C]// 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference, November 01-04, 2015, Taipei, Taiwan, China. IEEE, 2015: 1-5.
- [36] CALLEGARO L, CIOBOTARU M, PAGANO D J, et al. A simple smooth transition technique for the noninverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 4906-4915.
- [37] ZHANG N, BATTERNALLY S, LIM K C, et al. Analysis of the non-inverting buck-boost converter with four-mode control method[C]// 2017 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 01, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017: 876-881.
- [38] ZHANG N, ZHANG G D, SEE K W. Systematic derivation of dead-zone elimination strategies for the noninverting synchronous buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2018, 33(4): 3497-3508.
- [39] JIA L L, SUN X F, ZHENG Z W, et al. Multimode smooth switching strategy for eliminating the operational dead zone in noninverting buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 3106-3113.
- [40] AKHILESH K, LAKSHMINARASAMMA N. Dead-zone free control scheme for H-bridge buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6619-6629.
- [41] MA J J, ZHU M, LI X Y, et al. Bumpless transfer of non-inverting buck boost converter among multiple working modes[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 04-08, 2018, San Antonio, TX, USA. IEEE, 2018: 1909-1914.
- [42] WENG X, ZHAO Z M, CHEN K N, et al. A nonlinear control method for bumpless mode transition in noninverting buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2166-2178.
- [43] KIM K D, LEE H M, HONG S W, et al. A noninverting buck-boost converter with state-based current control for Li-ion battery management in mobile applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9623-9627.
- [44] HONG X E, WU J F, WEI C L. 98.1%-efficiency hysteretic-current-mode noninverting Buck-Boost DC-DC converter with smooth mode transition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3):

- 2008-2017.
- [45] AHARON I, KUPERMAN A, SHMILOVITZ D. Analysis of dual-carrier modulator for bidirectional noninverting Buck-Boost converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 840-848.
- [46] 王菁月, 裴忠晨, 刘闯, 等. 面向低压直流配电网的双降压/升压型柔性互联开关[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 247-253.
- WANG Jingyue, PEI Zhongchen, LIU Chuang, et al. Dual Buck/Boost flexible interconnected switch for low voltage DC distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 247-253.
- [47] LEE Y J, KHALIGH A, EMADI A. A compensation technique for smooth transitions in a noninverting Buck-Boost converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(4): 1002-1015.
- [48] WEI C L, CHEN C H, WU K C, et al. Design of an average-current-mode noninverting Buck-Boost DC-DC converter with reduced switching and conduction losses[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(12): 4934-4943.
- [49] 姚川, 阮新波, 曹伟杰, 等. 双管 Buck-Boost 变换器的输入电压前馈控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 36-44.
- YAO Chuan, RUAN Xinbo, CAO Weijie, et al. An input voltage feedforward control strategy for two-switch Buck-Boost DC-DC converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 36-44.
- [50] LIU P J, CHANG C W. CCM noninverting Buck-Boost converter with fast duty-cycle calculation control for line transient improvement[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6): 5097-5107.
- [51] 杨翔宇, 肖先勇, 马俊鹏, 等. 基于电感电流反馈的双向 DC-DC 变换器下垂控制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2638-2647.
- YANG Xiangyu, XIAO Xianyong, MA Junpeng, et al. Droop control of bi-directional DC-DC converters based on inductive current feedback[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2638-2647.
- [52] XU Q W, VAFAMAND N, CHEN L L, et al. Review on advanced control technologies for bidirectional DC/DC converters in DC microgrids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(2): 1205-1221.
- [53] LEVRON Y, SHMILOVITZ D. Sliding mode control of photovoltaic module integrated buck-boost converters[C]// 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, September 04-06, 2012, Novi Sad, Serbia. IEEE, 2012: LS3a-2.1-1-LS3a-2.1-6.
- [54] ATEŞ E, TEKGÜN B, ABLAY G. Sliding mode control of a switched reluctance motor drive with four-switch bi-directional DC-DC converter for torque ripple minimization[C]// 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, September 07-09, 2020, Istanbul, Turkey. IEEE, 2020: 1-6.
- [55] LI X, LIU Y S, XUE Y S. Four-switch buck-boost converter based on model predictive control with smooth mode transition capability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 9058-9069.
- [56] 吴岩, 王玮, 曾国宏, 等. 四开关 Buck-Boost 变换器的多模式模型预测控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(10): 2572-2583.
- WU Yan, WANG Wei, ZENG Guohong, et al. Multi-mode model predictive control strategy for the four-switch Buck-Boost converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(10): 2572-2583.
- [57] CALLEGARO L, CIOBOTARU M, PAGANO D J, et al. Feedback linearization control in photovoltaic module integrated converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(7): 6876-6889.
- [58] MA J J, ZHU M, LI Y W, et al. Dynamic analysis of multimode buck-boost converter: An LPV system model point of view[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 8539-8551.
- [59] MA J J, ZHU M, LI G H, et al. Concept of unified mode control for non-inverting Buck-Boost converter[C]// 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, June 03-07, 2017, Kaohsiung, Taiwan, China. IEEE, 2017: 1235-1240.
- [60] MA J J, ZHU M, CHEN Y J, et al. LPV-based cascade control for three mode non-inverting buck-boost converter[C]// 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference, November 25-28, 2019, Singapore. IEEE, 2019: 1-6.
- [61] MA J J, ZHU M, HE G Q, et al. Breaking performance limit of asynchronous control for non-inverting buck boost converter[C]// ECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 01, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017: 928-933.
- [62] KIM D H, LEE B K. An enhanced control algorithm for improving the light-load efficiency of noninverting

- synchronous buck-boost converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3395-3399.
- [63] JONES D C, ERICKSON R W. Buck-Boost converter efficiency maximization via a nonlinear digital control mapping for adaptive effective switching frequency[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 153-165.
- [64] ZHANG Y, CHENG X F, YIN C L. A soft-switching non-inverting buck-boost converter with efficiency and performance improvement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11526-11530.
- [65] YUN H, DONG M, JIAN Y, et al. Application of soft-switching technology in four switch Buck-Boost circuit[C]// 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, June 18-20, 2017, Siem Reap, Cambodia. IEEE, 2017: 1675-1679.
- [66] WAFFLER S, KOLAR J W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1589-1599.
- [67] ZHOU Z J, LI H Y, WU X K. A constant frequency ZVS control system for the four-switch buck-boost DC-DC converter with reduced inductor current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 5996-6003.
- [68] LIU Q, QIAN Q S, REN B W, et al. A new modulation strategy for four-switch buck-boost converter with reduced freewheeling current[C]// 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 15-19, 2020, New Orleans, LA, USA. IEEE, 2020: 2104-2108.
- [69] LIU Q, QIAN Q, ZHENG M, et al. An improved quadrangle control method for four-switch buck-boost converter with reduced loss and decoupling strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10827-10841.

作者简介: 任林涛, 男, 1991 年生, 博士。主要研究方向为电能质量治理与功率变换器控制。

E-mail: R11121572@163.com

汪飞(通信作者), 男, 1981 年生, 博士, 教授。主要研究方向为新能源发电与微电网技术。

E-mail: f.wang@shu.edu.cn