**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.53 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

# 基于图形化方法的四开关 Buck-Boost 变换器模式平滑切换策略研究

王红斌[1]，陈奥博[1]，薛云涛[1]，欧阳有鹏[2]，贺宇航[3]，
陈 武[4](中国电源学会高级会员)
(1.广东电网有限责任公司广州供电局，广州 510620；2.南京南瑞继保电气有限公司，南京 211102；3.杭州茂力半导体技术有限公司，杭州 310012；4.东南大学先进电能变换技术与装备研究所，南京 210096)

**摘要**：应用于燃料电池系统的四开关 Buck-Boost 变换器在传统的两模式控制下理论上可以获得更高效率，但是实际上，在 2 个模式切换的过程中，受电压增益盲区影响，系统的动态性能较差，大大降低了变换器工作的稳定性。在电流较大的大功率场合，为了减小电感电流纹波，提高变换器的功率密度，通常会在变换器中使用并联技术。基于此，以四相交错并联的四开关 Buck-Boost 变换器的模式平滑切换为控制目标，首先介绍变换器的拓扑结构，得到变换器的基本数学关系；接着使用 1 种图形化方法分析了变换器的电压增益盲区产生的原因，并在传统三模式控制策略的基础上提出 1 种消除盲区、实现模式之间平滑切换的控制策略，在动态过程中实现了占空比变化量的最小化，电感电流性能也得到了优化，变换器的效率及稳定性得以提高；最后通过实验验证了该控制策略的有效性。

**关键词**：四开关 Buck-Boost 变换器；模式平滑切换；图形化方法；多模式控制

# Research on Smooth Mode Transition Strategy for Four-switch Buck-Boost Converter Based on Graphical Method

WANG Hongbin[1], CHEN Aobo[1], XUE Yuntao[1], OUYANG Youpeng[2], HE Yuhang[3],
CHEN Wu[4], *Senior Member*, *CPSS*
(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Nanjing Nari Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Monolithic Power Systems, Inc., Hangzhou 310012, China; 4. Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The four-switch Buck-Boost converter applied to a fuel cell system can theoretically achieve a higher efficiency under the traditional two-mode control. However, in fact, the dynamic performance of the system is poor due to the influence of a voltage gain blind zone in the process of transition between the two modes, which greatly reduces the operation stability of the converter. In high-power applications with large current, the interleaving technology is usually used to reduce the inductor current ripple and increase the power density of the converter. Therefore, the smooth mode transition of a four-phase interleaved four-switch Buck-Boost converter is taken as a control objective. First, the topology of the converter is introduced, and its basic mathematical relationship is obtained. Then, the reason for the voltage gain blind zone of the converter is analyzed using a graphical method, and a control strategy is proposed to eliminate the blind zone and realize the smooth mode transition based on the traditional three-mode control strategy. In the dynamic process, the changes in duty cycle are minimized and the inductor ripple current is also optimized, which improves the efficiency and stability of the converter. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy was verified by experimental results.

**收稿日期**：2022-10-11；**修回日期**：2022-12-12；**录用日期**：2023-01-19；**网络首发日期**：2023-03-09

**Keywords:** Four-switch Buck-Boost converter; smooth mode transition; graphical method; multi-mode control

氢能作为 1 种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源，是优化能源结构和推动能源转型发展的重要载体之一[1]，近年来得到了越来越多的关注。以燃料电池为代表的氢能开发利用技术加速发展，为实现零排放的能源利用及推进我国能源清洁低碳转型提供了重要的解决方案。然而，燃料电池的输出电压随负载变化较大且输出电压波动频繁，需要在燃料电池和后级系统中加入 DC-DC 变换器以稳定输出电压[2]。四开关 Buck-Boost 即 FSBB (four-switch Buck-Boost)变换器相较于 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk、Zeta 和 Sepic 这 6 种基本非隔离型 DC-DC 变换器而言，不但具有升降压功能，而且输入和输出电压极性相同、开关器件的电压应力更低、所需要的无源器件更少，可大大减小功率变换器的体积，更有利于变换器的高功率密度化，适用于输入电压范围较宽和能量双向流动的场合，因此非常适合应用于燃料电池系统。

针对 FSBB 变换器，诸多学者提出了多种控制策略以改善其动态性能。根据 FSBB 变换器工作模式的数量可以将其控制方式大致分为 3 类，即单模式控制、两模式控制和多模式控制。最简单的单模式控制策略是对管同开同关控制，该控制策略下电感电流脉动较大，2 个同步管均可以实现零电压开关 ZVS(zero voltage switch)，但 2 个主控管无法实现 ZVS[3-6]。两模式控制指的是根据输入和输出电压关系分别工作在 Buck 和 Boost 这 2 种控制模式，仅有 2 个开关管工作在高频开关状态，可以有效减少开关损耗[7-8]，但当输入电压与输出电压接近时，该控制策略存在电压增益的盲区问题[9-12]，使得输出电压大幅波动。

多模式控制指的是控制模式大于或等于 3 的控制方式，目前比较常见的是三模式控制，文献[13-15]对三模式控制进行了大量研究。三模式控制是在两模式控制的基础上，在输入和输出电压接近时增加第 3 个控制模式：Buck-Boost 模式，以解决电压增益盲区对变换器稳定性和效率的影响。为了进一步提高变换器的动态性能，文献[10-12]提出了四模式控制策略，但控制模式增加会给控制策略的实现和变换器的稳定性带来挑战。为了优化多模式控制中的模式切换问题，文献[16]对 FSBB 变换器的模式平滑切换控制策略进行了研究。

本文以燃料电池系统为应用背景，提出了 1 种基于图形化方法的FSBB变换器三模式平滑切换控制策略。通过分析 FSBB 变换器的工作原理、电压增益盲区产生的原因及图形化方法下变换器两桥臂占空比组合对变换器性能的影响，以模式切换过程中占空比变化量最小为优化目标得到 1 种模式平滑切换的控制策略。通过求解不同模式切换控制策略下电感电流的性能来验证本文所提三模式平滑切换控制策略的优越性。最后，设计了 1 台输入为 28~96 V，输出为 48 V，最大输出功率为 3 300 W 的实验样机，对本文所提控制策略进行了实验验证。

## 1 FSBB 变换器的图形化方法

FSBB 变换器的电路拓扑如图 1 所示。FSBB 变换器由 4 个开关器件 $Q_1$~$Q_4$、电感 $L$ 及输出电容 $C_o$ 组成，$V_{in}$ 为输入电压，$V_o$ 为输出电压，$V_a$ 为 Buck 桥臂中点电压，$V_b$ 为 Boost 桥臂中点电压，$i_L$ 为电感电流，$R_L$ 为输出负载。其控制方式较为灵活，各种控制方式的共同之处在于 $Q_1$ 和 $Q_2$ 组成 Buck 桥臂，互补导通，主开关器件 $Q_1$ 的占空比记为 $d_1$；$Q_3$ 和 $Q_4$ 组成 Boost 桥臂，互补导通，主开关器件 $Q_3$ 的占空比记为 $d_2$，两桥臂之间的移相角记为 $\varphi$。

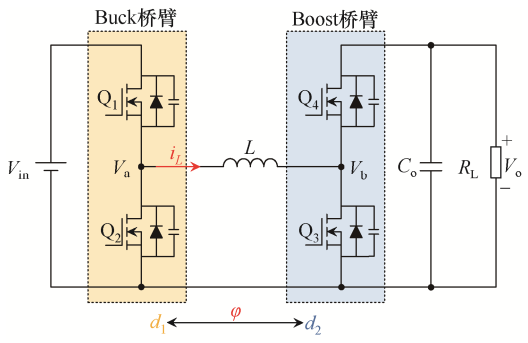



**图 1 FSBB 变换器拓扑**

**Fig. 1 Topology of FSBB converter**

忽略功率损耗和电路寄生参数等非理想参数，根据电感的伏秒平衡关系可得FSBB变换器的电压

增益 $M$ 为

$$M=\frac{V_{\mathrm{o}}}{V_{\mathrm{in}}}=\frac{d_1}{1-d_2} \tag{1}$$

由式(1)可以看出，FSBB 变换器的电压增益 $M$ 仅与 Buck 桥臂和 Boost 桥臂的占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 有关，与开关器件的开关频率 $f_{\mathrm{s}}$ 及两桥臂之间的移相角 $\varphi$ 均无关。

### 1.1 理想情况下的工作区域

为进一步得到变换器的电压增益 $M$ 与 $d_1$、$d_2$ 的关系，可将式(1)变换为

$$d_2=-\frac{1}{M}d_1+1 \tag{2}$$

由式(2)可以看出，$d_1$ 和 $d_2$ 之间存在线性关系。设 $k$ 为对于同一电压增益 $M$，占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 需要满足的函数关系所在直线的斜率，则 $k$ 与 $M$ 之间的关系为

$$\begin{cases}k=-\dfrac{1}{M}\\ |k|=\dfrac{1}{|M|}\end{cases} \tag{3}$$

以 $d_1$ 为横坐标，$d_2$ 为纵坐标，理想情况下两模式控制策略的工作区域示意如图 2 所示。可见，$d_1$ 和 $d_2$ 所有可能的取值组合均在 $OMAB$ 所围成的正方形区域内，即

$$\begin{cases}d_2=-\dfrac{1}{M}d_1+1\\ 0\leqslant d_1\leqslant 1\ ,\ 0\leqslant d_2\leqslant 1\end{cases} \tag{4}$$

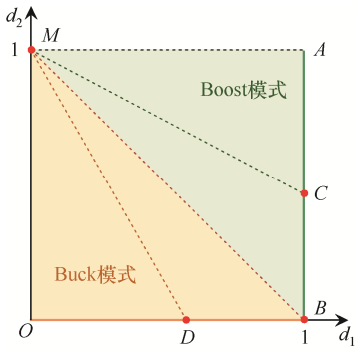



**图 2　理想情况下两模式控制策略的工作区域示意**

**Fig. 2 Schematic of working area under two-mode control strategy and ideal conditions**

由式(3)和式(4)可以看出，对于同一斜率 $k$(即同一电压增益 $M$)，$d_1$ 和 $d_2$ 所有可能的取值组合所在的直线均经过图 2 中的点 $M(0,\ 1)$。正方形区域内的任意一点(如点 $C$、$D$)均对应 1 个 $d_1$ 和 $d_2$ 的取值组合，而每个 $d_1$ 和 $d_2$ 的取值组合均代表 FSBB 变换器的 1 个工作点，且该点与点 $M$ 的连线所在直线的斜率对应该取值组合的电压增益。图 2 中，线段 $MB$ 所在的直线斜率的绝对值为 1，即电压增益为 1，该线段将正方形区域 $OMAB$ 分为 Boost 模式和 Buck 模式 2 个部分。

对于传统的两模式控制：当变换器处于 Boost 模式时，$d_1$ 恒为 1，$d_2$ 不断变化用于调节输出电压，对应图 2 中的线段 $AB$，且从点 $A$ 到点 $B$ 的变化过程中，$|k|$不断增大至 1，对应的电压增益 $M$ 不断减小至 1；当变换器处于 Buck 模式时，$d_2$ 恒为 0，$d_1$ 不断变化用于调节输出电压，对应图 2 中的线段 $BO$，且从点 $B$ 到点 $O$ 的变化过程中，$|k|$不断由 1 开始增大，对应的电压增益 $M$ 不断由 1 开始减小。

### 1.2 非理想情况下的有效工作区域和盲区

在实际的电源设计中，由于死区时间、栅极驱动延迟、开关寄生电容和自举电路的要求，通常会有最小、最大占空比的限制，实际占空比无法达到 1。这意味着图 2 给出的工作区域中，并非所有 $d_1$ 和 $d_2$ 的取值组合均是有效的，$d_1$ 和 $d_2$ 有各自的上下限，即

$$\begin{cases}d_2=-\dfrac{1}{M}d_1+1\\ d_{1\min}\leqslant d_1\leqslant d_{1\max}\ ,\ d_{2\min}\leqslant d_2\leqslant d_{2\max}\end{cases} \tag{5}$$

式中，$d_{1\min}$、$d_{1\max}$ 和 $d_{2\min}$、$d_{2\max}$ 分别为 $d_1$ 和 $d_2$ 在实际工作中占空比的最小值、最大值。

在两模式控制下，由于占空比的限制，变换器的有效工作区域变窄，使得变换器的增益 $M$ 不连续，如图 3 所示。

在 Buck 模式中，增益 $M$ 的取值范围为[$M_{\mathrm{Buck,min}}$, $M_{\mathrm{Buck,max}}$]，如图 3 中 $GMH$ 区域所示；在 Boost 模式中，增益 $M$ 的取值范围为[$M_{\mathrm{Boost,min}}$, $M_{\mathrm{Boost,max}}$]，如图 3 中 $DMC$ 区域所示。在输入、输出电压接近，即电压增益在 1 附近时，传统的两模式控制中 $DB$

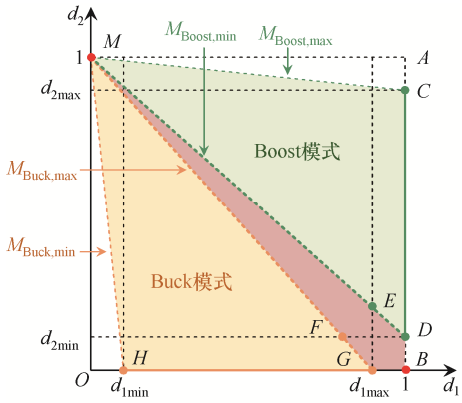



**图 3 非理想情况下的电压增益盲区示意**

**Fig. 3 Schematic of voltage gain blind zone under non-ideal conditions**

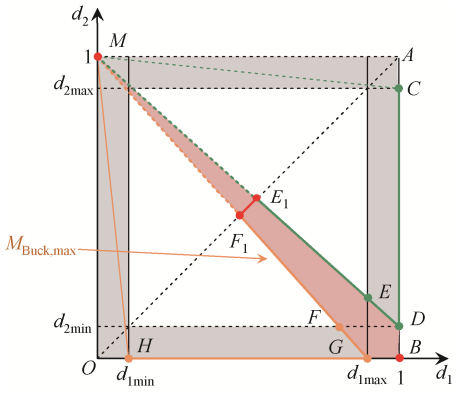



**图 4 对管同开同关三模式控制策略示意**

**Fig. 4 Schematic of three-mode control strategy**

和 *BG* 这 2 段线段上 $d_1$ 和 $d_2$ 的组合无法取到，这也意味着当输入、输出电压接近时，实际工作中，两模式控制策略下的输出电压将变得不稳定，工作点将会在点 *D* 和点 *G* 之间来回切换，电压增益也将变得不连续，并对变换器性能产生一些负面影响，如输出电压纹波增加、输出电压中出现次谐波及变换器的不可控等，即电压增益盲区，如图 3 中 *GMDB* 区域所示。

## 2 图形化方法下的多模式控制策略

### 2.1 三模式控制的图形化方法

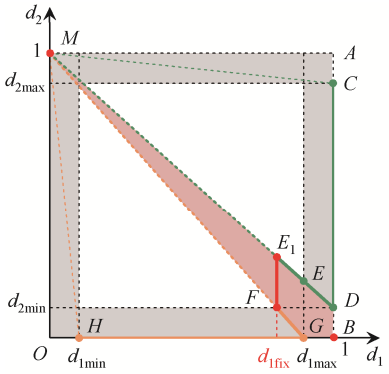
通过在电压增益盲区中插入 1 条直线作为占空比的变化轨迹，可以得到三模式控制策略。由于盲区中直线的插入方式较多，因此可以得到多种不同的三模式控制策略，对 3 种典型的三模式控制策略进行介绍。

最简单的三模式控制就是在盲区内采用对管同开同关控制，同时调节 $d_1$ 和 $d_2$，对管同开同关三模式控制策略示意如图 4 所示。当输入电压高于输出电压一定值时，变换器工作在 Buck 模式(对应于 *GMH* 区域)；当输入电压低于输出电压一定值时，变换器工作在 Boost 模式(对应于 *DMC* 区域)；当输入电压与输出电压接近时，变换器工作在 Buck-Boost 模式(对应于 *GMDB* 区域)，此模式下变换器的工作特点与单模式控制策略中的对管同开同关控制完全相同。

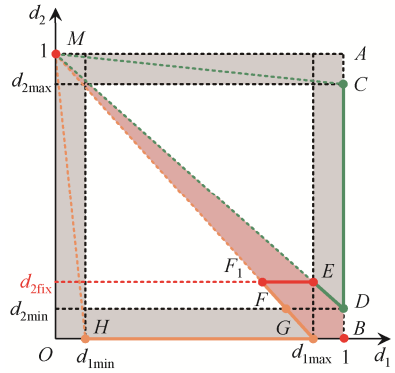
虽然对管同开同关三模式控制比较简单且容易实现，但其存在模式切换过程中工作点跳变幅度过大的问题。以变换器从 Buck 模式向 Buck-Boost 模式的切换过程为例，图 4 中，当变换器的增益 *M* 越过 $M_{\mathrm{Buck,max}}$ 时，工作点将会从 Buck 模式的临界工作点 *G* 直接切换到 Buck-Boost 模式中的临界工作点 $F_1$，工作点切换带来的占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 剧烈变化势必会降低模式切换过程中变换器的稳定性。因此，在 Buck 模式向 Buck-Boost 模式切换的过程中，希望 Buck-Boost 模式中的临界工作点离 Buck 模式中的临界工作点 *G* 越近越好。

在 Buck-Boost 模式中，可以将某一桥臂的占空比设置为某一恒定值来降低控制的复杂性，同时为了提高变换器的动态性能，变换器在模式切换的过程中 Buck-Boost 模式的 2 个临界工作点离 Boost 模式和 Buck 模式的临界工作点越近越好。基于以上考虑，图 5 给出了定占空比三模式控制策略示意。

定降压占空比三模式控制策略如图 5(a)所示，通过在 Buck-Boost 模式中插入 1 条竖线 $E_1F$ 来解决电压增益的盲区问题。在该控制策略下，当输入电压与输出电压接近时，占空比 $d_1$ 被固定在 1 个恒定值 $d_{1\mathrm{fix}}$，该恒定值略低于 $d_{1\max}$，此时调节占空比 $d_2$ 以控制输出电压。由于该工作模式类似于 Boost 模式，即占空比 $d_1$ 固定为 1，调节占空比 $d_2$ 以获得所需的输出电压，因此该模式也被称为扩展 Boost 模式。




(a) 定降压占空比




(b) 定升压占空比

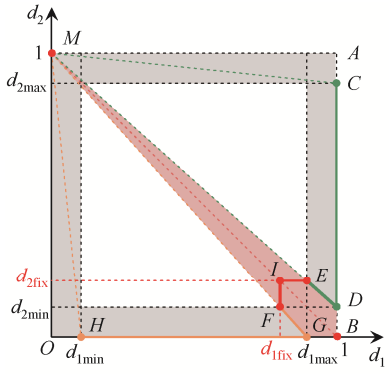
**图 5　定占空比三模式控制策略示意**

**Fig. 5 Schematic of three-mode control strategy at fixed duty cycle**

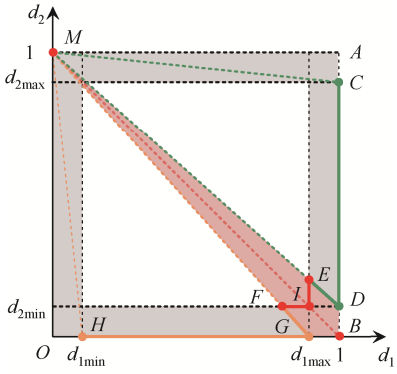
定升压占空比三模式控制策略如图 5(b)所示，通过在 Buck-Boost 模式中插入 1 条水平的直线 $EF_1$ 来解决电压增益的盲区问题。在该控制策略下，当输入电压与输出电压接近时，占空比 $d_2$ 被固定在一个恒定值 $d_{2fix}$，该恒定值略高于 $d_{2min}$，此时调节占空比 $d_1$ 以控制输出电压。由于该工作模式类似于 Buck 模式，即占空比 $d_2$ 恒为 0，调节占空比 $d_1$ 以获得所需的输出电压，因此该模式也被称为扩展 Buck 模式。

## 2.2　四模式控制的图形化方法

定占空比三模式控制策略中，在盲区内得到了扩展 Buck 模式和扩展 Boost 模式 2 种控制方式，由图 5 可见，在模式切换过程中，点 $E$ 与 $E_1$、点 $F$ 与 $F_1$ 的变化仍然较大，控制策略依然有优化的空间。如果在盲区内将扩展 Buck 模式和扩展 Boost 模式相结合，便得到了四模式控制策略，图 6 给出了 2 种典型的四模式控制策略示意。




(a) 定占空比




(b) 定边界占空比

**图 6　2 种典型的四模式控制策略示意**

**Fig. 6 Schematic of two typical types of four-mode control strategy**

定占空比四模式控制策略如图 6(a)所示，通过在 Buck-Boost 模式中插入 1 条折线 *E-I-F* 来解决电压增益的盲区问题。在该控制策略下，当输入电压与输出电压接近时，在直线 *EI* 阶段，占空比 $d_2$ 被固定在 1 个恒定值 $d_{2fix}$，该恒定值略高于 $d_{2min}$，此时调节占空比 $d_1$ 以控制输出电压，变换器工作在扩展 Buck 模式；在直线 *IF* 阶段，占空比 $d_1$ 被固定在 1 个恒定值 $d_{1fix}$，该恒定值略低于 $d_{1max}$，此时调节占空比 $d_2$ 以控制输出电压，变换器工作在扩展 Boost 模式。

定边界占空比四模式控制策略如图 6(b)所示，通过在 Buck-Boost 模式中插入 1 条与图 6(a)中不同的折线 *E-I-F* 来解决电压增益盲区问题。在该控制策略下，当输入电压与输出电压接近时，在直线 *EI* 阶段，占空比 $d_1$ 被固定在最大值 $d_{1max}$，此时调节占空比 $d_2$ 以控制输出电压，变换器工作在扩展 Boost 模式；在直线 *IF* 阶段，占空比 $d_2$ 被固定在

最小值 $d_{2\min}$，此时调节占空比 $d_1$ 以控制输出电压，变换器工作在扩展 Buck 模式。

## 3 三模式平滑切换控制策略

在变换器的工作过程中，模式切换次数越少越好，模式切换过程中系统的稳定性和效率越高越好。基于此，提了 1 种更具优势的三模式平滑切换控制策略。

### 3.1 模式平滑切换策略

为了使 Buck 模式和 Boost 模式之间的切换更为平滑，2 个桥臂的占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 的变化要尽可能小。因此，仅在盲区中添加 1 种控制模式时，可以选择将图 3 中电压增益盲区的 2 个边界点 $E$ 和 $F$ 直接直线连接作为占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 变化的轨迹，以实现模式切换过程中占空比变化的最小化，如图 7 所示。

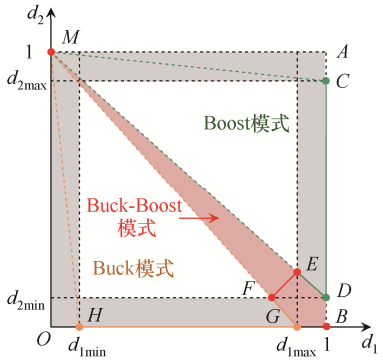



**图 7 三模式平滑切换控制策略示意**

**Fig. 7 Schematic of three-mode control strategy with smooth mode transition**

若 $d_{1\max}$ 和 $d_{2\min}$ 已知，则在盲区中，$d_1$ 和 $d_2$ 的关系应满足

$$d_2=\left(\frac{d_1-d_{1\max}}{d_{1\max}d_{2\min}}+1\right)\cdot (d_{1\max}d_{2\min}-d_{1\max}-d_{2\min}+1)+d_{2\min} \tag{6}$$

此时 $d_1$ 和 $d_2$ 的范围被限定在

$$\begin{cases} d_{1\max}(1-d_{2\min})\leqslant d_1\leqslant d_{1\max} \\ d_{2\min}\leqslant d_2\leqslant d_{1\max}(d_{2\min}-1)+1 \end{cases} \tag{7}$$

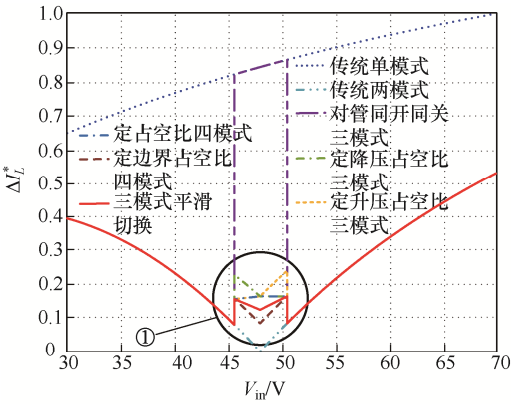
则式(6)可以变换为

$$\begin{cases} d_2=Ad_1+B \\ A=1-\dfrac{d_{1\max}+d_{2\min}-1}{d_{1\max}d_{2\min}} \\ B=d_{1\max}d_{2\min}+(d_{1\max}-1)\left(\dfrac{1}{d_{2\min}}-2\right) \end{cases} \tag{8}$$

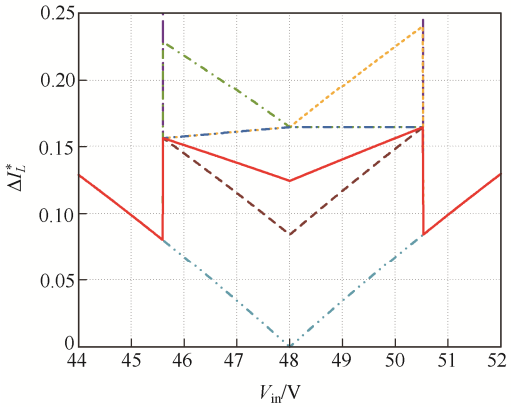
### 3.2 不同模式平滑切换策略下电感电流纹波的对比

变换器的效率与电感电流有着密不可分的关系。为进一步验证本节所提三模式平滑切换控制策略的优越性，将所提三模式平滑切换控制策略与传统单模式控制策略、两模式控制策略及前文介绍的 5 种多模式控制策略的电感电流纹波 $\Delta I_L$ 进行对比。

图 8 为 $V_o$=48 V、30 V≤$V_{in}$≤70 V、$P_o$= 3 300 W、$f_s$=100 kHz、$L$=12 μH、$d_{1\max}$=0.95、$d_{2\min}$=0.05 时各控制策略下归一化电感电流纹波 $\Delta I_L^*$的对比。为了更直观地比较在不同控制策略下 FSBB 变换器的电感电流纹波，以传统单模式控制下电感电流纹波的




(a) 归一化电感电流纹波$\Delta I_L^*$




(b) 图(a)中①局部放大

**图 8 不同控制策略下的电感电流纹波对比**

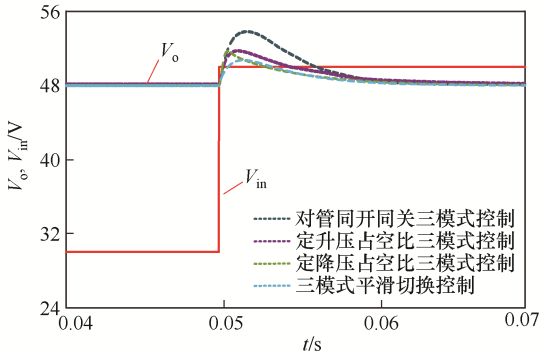
**Fig. 8 Comparison of inductor current ripple under different control strategies**

最大值 $\Delta I_{L,\max}$ 作为电感电流纹波的基准值对所有控制策略下的电感电流纹波进行标幺化，得到图 8 所示的归一化电感电流纹波 $\Delta I_L^*$ 与输入电压 $V_{\text{in}}$ 之间的关系。

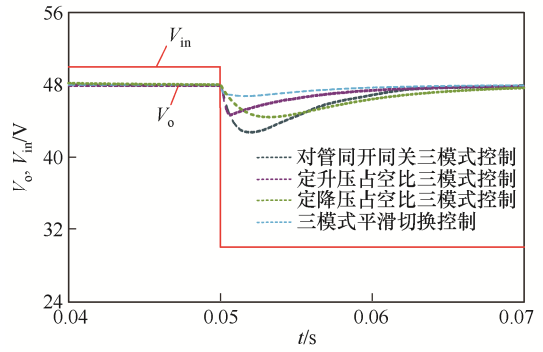
通过对不同控制策略下电感电流纹波的对比可以发现，在全输入电压范围内，本节所提三模式平滑切换控制策略为所有三模式控制策略中电感电流纹波最小的控制方法，同时也优于一些四模式控制策略，在控制模式的数量和电感电流纹波的大小之间达到了较好的平衡。

### 3.3 仿真验证

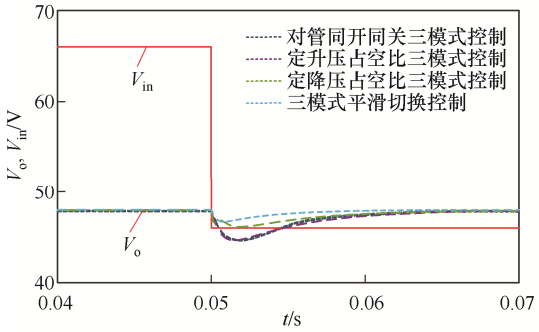
为验证本文所提三模式平滑切换控制策略相较于其他控制策略具有更好的动态性能，在 Simulink 中搭建了不同控制策略的仿真模型，并对不同控制模式切换过程中各控制策略的动态性能进行了对比。图 9 为 $V_{\text{o}}=48$ V、$P_{\text{o}}=3\ 300$ W、$f_{\text{s}}=100$ kHz、$L=12$ μH、$d_{1\max}=0.95$、$d_{2\min}=0.05$ 时各控制策略下，FSBB 变换器在 Boost、Buck-Boost 和 Buck 模式之间切换过程中的关键波形。可以看出，本文所提三模式平滑切换控制策略具有较好的动态性能。



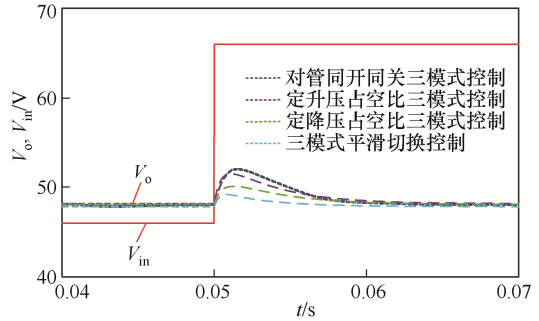

(a) Boost模式向Buck-Boost模式切换




(b) Buck-Boost模式向Boost模式切换




(c) Buck模式向Buck-Boost模式切换




(d) Buck-Boost模式向Buck模式切换

**图 9　$V_{\text{o}}=48$ V 时不同控制策略下变换器工作模式切换的动态波形**

**Fig. 9 Dynamic waveforms of converter during transition of working modes under different control strategies when $V_{\text{o}}$ is equal to 48 V**

## 4　实验验证

为验证本文所提三模式平滑切换控制策略的可行性，制作了 1 台四相交错并联 FSBB 变换器模块电源样机，变换器主要参数为 $V_{\text{in}}=28$~$96$ V、$V_{\text{o}}=48$ V、$P_{\text{o}}=3\ 300$ W、$f_{\text{s}}=100$ kHz、$L=12$ μH。所制作的电源样机尺寸为 114 mm×83 mm×18 mm，功率密度高达 19.4 W/cm$^3$。四相交错并联 FSBB 变换器的结构框图如图 10 所示。

图 11 为输出电压 $V_{\text{o}}=48$ V 时，FSBB 变换器分别工作在 Boost、Buck-Boost 和 Buck 模式下的主要工作波形，图中：$V_{\text{gs,Q}_1}$ 为 $\text{Q}_1$ 的栅极电压，$V_{\text{gs,Q}_3}$ 为 $\text{Q}_3$ 的栅极电压，$V_{\text{ab}}$ 为电感电压，$i_L$ 为电感电流。可以看出，在不同控制模式下，制作的四相交错并联 FSBB 变换器模块电源样机均能稳定工作。

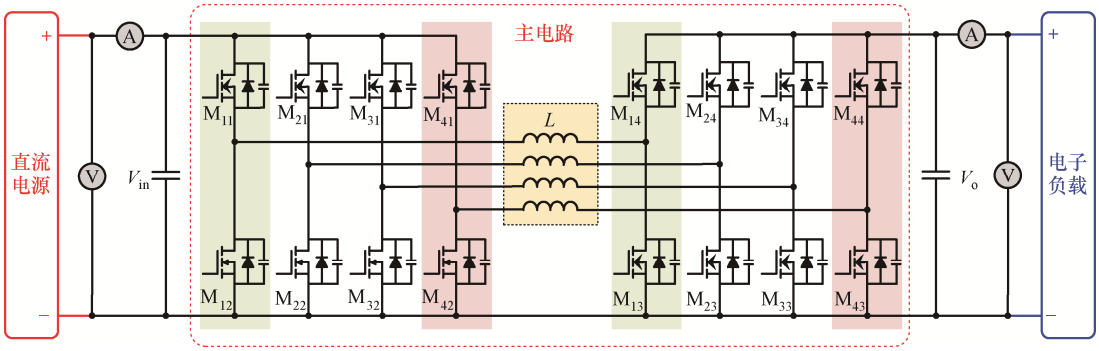
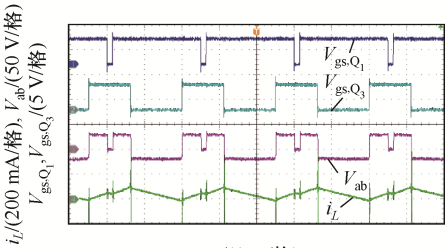
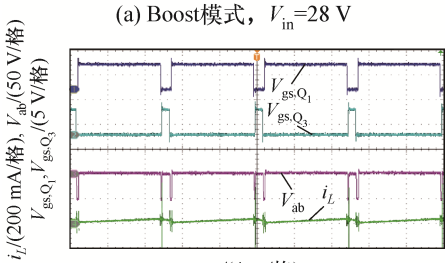



**图 10 四相交错并联 FSBB 变换器的结构框图**

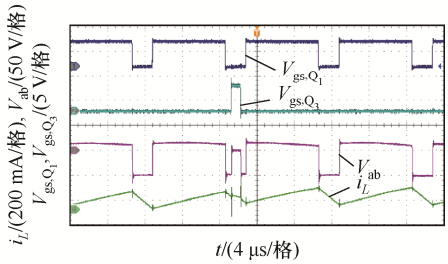
**Fig. 10 Block diagram of four-phase interleaved FSBB converter**




(a) Boost模式，$V_{in}$=28 V




(b) Buck-Boost模式，$V_{in}$=50 V

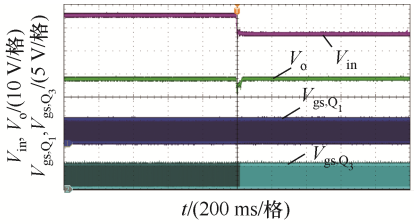



(c) Buck模式，$V_{in}$=62 V

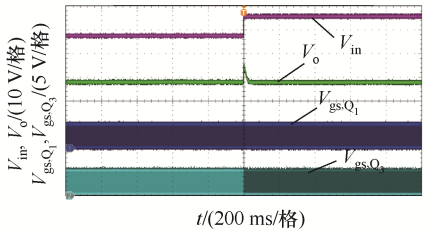
**图 11 $V_o$ = 48 V，不同工作模式下的变换器主要工作波形**

**Fig. 11 Main working waveforms of converter in different working modes when $V_o$ is equal to 48 V**

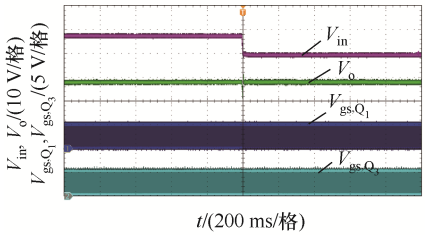
图 12 为输出电压 $V_o$ = 48 V 时，FSBB 变换器在 Boost、Buck-Boost 和 Buck 模式之间切换过程中的关键波形。可以看出，在所提三模式平滑切换控制策略下，FSBB 变换器在模式切换的动态过程中输出电压的变化量较小，且 2 个桥臂占空比 $d_1$ 和 $d_2$ 的变化量也较小，可以较平稳地实现模式之间的平滑切换，系统具有较好的动态性能。



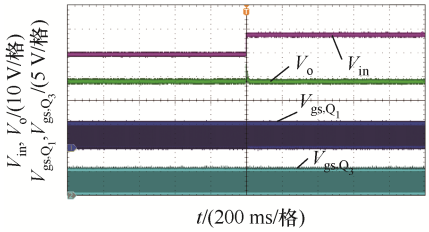

(a) Buck模式向Buck-Boost模式切换




(b) Buck-Boost模式向Buck模式切换




(c) Buck-Boost模式向Boost模式切换




(d) Boost模式向Buck-Boost模式切换

**图 12 $V_o$=48 V，变换器工作模式切换的动态波形**

**Fig. 12 Dynamic waveforms of converter during transition of working modes when $V_o$ is equal to 48 V**

为验证四相交错并联FSBB变换器在所提三模式平滑切换控制策略下具有较高的效率，对电源样

机进行效率测试实验。图 13 为 $V_o$ = 48 V 时所制作的变换器样机在不同输出功率下的效率曲线，$V_{in}$ = 36 V 时变换器工作在 Boost 模式，$V_{in}$ = 48 V 时变换器工作在 Buck-Boost 模式，$V_{in}$ = 60 V 时变换器工作在 Buck 模式。

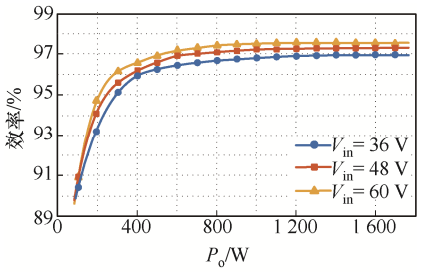



**图 13　效率曲线**

**Fig. 13 Efficiency curves**

由图 13 可见，在不同的输入电压下，所制作的变换器样机的效率随输出功率的变化趋势相近，并且在相同负载条件下，变换器在不同工作模式下的效率也较接近。需要指出的是，在不同输出功率下，Buck 模式的样机效率略高于 Buck-Boost 模式，这是由于变换器工作在 Buck-Boost 模式时，所有开关器件均在高频开关动作，开关损耗的增加限制了变换器效率的进一步提升，且由图 8 可以看出，Buck 模式下变换器的电感电流纹波低于 Buck-Boost 模式，因此更容易获得较高效率。

## 5　结语

本文以燃料电池系统为应用背景，采用四开关 Buck-Boost 拓扑，设计了 1 款应用于燃料电池系统的非隔离型 DC-DC 变换器。根据输入和输出电压的关系将 FSBB 变换器的工作模式分为 Buck、Buck-Boost 和 Boost 这 3 种模式，并制作了 1 台 3 300 W、100 kHz、28~96 V 输入、48 V 输出的四相交错并联 FSBB 变换器样机，满载时效率典型值为 97.5%。为了解决 FSBB 变换器两模式控制中存在的电压增益盲区问题，通过 1 种图形化的方法来分析多模式控制中不同的模式切换控制策略及本文所提改进的三模式平滑切换控制策略，并对各种控制策略中电感电流纹波和平均值进行了计算与对比。理论分析和实验结果表明，所提三模式平滑切换控制策略能够有效解决两模式控制中的电压增益盲区问题并使 FSBB 变换器在不同工作模式切换时可以获得良好的动态性能，实现模式之间的平滑切换。

**参考文献：**

[1] 王贵荣. 阴极循环对氢燃料电池系统电压钳位及自增湿效应的研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 130-137.
Wang Guirong. Research on voltage clamping and self-humidification effects of cathode circulation in hydrogen fuel cell system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 130-137. (in Chinese)

[2] 高清振，时培成，潘道远. 考虑元件温-湿关联影响的氢燃料电池系统动态可靠性分析[J]. 电源学报，2022, 20(3): 152-160.
Gao Qingzhen, Shi Peicheng, Pan Daoyuan. Dynamic reliability analysis of hydrogen fuel cell system considering influence of element temperature-humidity correlation [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 152-160. (in Chinese)

[3] Wang Yuan, Lan Jianyu, Huang Xin, et al. An improved single-mode control strategy based on four-switch Buck-Boost converter [C]// 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, LA, USA, 2020: 320-325.

[4] 周国华，邱森林，张小兵. 宽增益高效率级联式四开关 Buck-Boost LLC 变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1103-1115.
Zhou Guohua, Qiu Senlin, Zhang Xiaobing. Cascaded four-switch Buck-Boost LLC converter with wide gain range and high efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1103-1115. (in Chinese)

[5] Ren Xiaoyong, Ruan Xinbo, Qian Hai, et al. Dual-edge modulated four-switch Buck-Boost converter [C]// 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, 2008: 3635-3641.

[6] 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. (in Chinese)

[7] Callegaro L, Ciobotaru M, Agelidis V G, et al. A solution

for the gain discontinuity issue of the non-inverting Buck-Boost converter [C]// IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy, 2016: 1245-1250.

[8] 节帅. 高效率非隔离四开关 Buck-Boost 变换器的研究与设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Jie Shuai. Research and design of high efficiency non-isolated four-switch Buck-Boost converter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

[9] 程诗伟, 赵世伟. 双关二次型结构的耦合电感高增益 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 29-39.
Cheng Shiwei, Zhao Shiwei. Dual-switch quadratic high-gain DC-DC converter with coupled inductor [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 29-39. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] Xu Hui, Wang Fei, Guo Hui. Short-time scale mode transition control of the four-switch Buck-Boost converter [C]// 2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Shanghai, China, 2021: 62-67.

[12] Zhang Neng, Zhang Guidong, See K W. Systematic derivation of dead-zone elimination strategies for the noninverting synchronous Buck-Boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3497-3508.

[13] Carralero L L O, Barbara da S e Silva G S, Costa F F, et al. PV emulator based on a four-switch Buck-Boost DC-DC converter [C]// 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). Santos, Brazil, 2019: 1-5.

[14] Ceci M F, D'Amico M B. Development of a four-switch Buck-Boost converter: Operation modes, control and experimental results [J]. IEEE Latin America Transactions, 2019, 17(11): 1849-1857.

[15] Chen Chengwei, Chen K H, Chen Y M. Modeling and controller design for a four-switch Buck-Boost converter in distributed maximum power point tracking PV system applications [C]// 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA, 2012: 1663-1668.

[16] Xu Chengzhi, Liu Lianxi. A four modes and smooth transition non-inverting Buck-Boost converter [C]// 2021 IEEE 14th International Conference on ASIC (ASICON). Kunming, China, 2021: 1-4.



王红斌

**作者简介：**

王红斌(1972— )，男，硕士，教授级高级工程师。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：1348497302@qq.com。

陈奥博(1988— )，男，本科，工程师。研究方向：并网变换器稳定性及柔直换流阀相关技术。E-mail：13450489643@139.com。

薛云涛(1991— )，男，硕士，工程师。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：2466740451@qq.com。

欧阳有鹏(1985— )，男，硕士，高级工程师。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：ouyangyp@nrec.com。

贺宇航(1997— )，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：新能源发电技术和分布式电源。E-mail：heyuhang.chn@foxmail.com。

陈武(1981— )，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子。E-mail：chenwu@seu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)