

一种基于四开关 Buck-Boost 变换器的四模式控制策略

曹以龙¹, 吴 丹¹, 朱冬冬¹, 江友华¹, 杨兴武²

(1. 上海电力大学电子与信息工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 四开关 Buck-Boost FSBB(four-switch Buck-Boost)变换器电路工作在 Buck 和 Boost 两种工作模式时可以获得更高的工作效率,但是在 2 种模式之间相互切换时,就会出现影响变换器性能的盲区。通过分析四开关变换器输入输出电压的转换比和开关管占空比之间的关系,从而推导出盲区产生的原因,并对传统的两模式控制策略加以改进,提出了一种电压控制带补偿的四模式控制策略,使开关管在全部工作电压范围内均可工作于有效占空比区间,从而消除盲区的影响。通过环路补偿网络设计,提高变换器的性能,减小了输入电压、负载等扰动的影响,实现了整个系统的稳定、高效运行。仿真及实验验证了控制策略正确且可行。

关键词: 四开关 Buck-Boost 变换器; 盲区; 四模式控制; 小信号模型

Four-mode Control Strategy Based on Four-switch Buck-Boost Converter

CAO Yilong¹, WU Dan¹, ZHU Dongdong¹, JIANG Youhua¹, YANG Xingwu²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The four-switch Buck-Boost(FSBB) converter circuit can achieve a higher operating efficiency in both the Buck and Boost modes. However, when it switches between these two modes, a blind area affecting the performance of the converter will appear. By analyzing the relationship between the conversion ratio of input to output voltage and the duty ratio of the switching tube, the cause of blind area is deduced. Moreover, a four-mode control strategy of voltage control with compensation is proposed to improve the traditional two-mode control strategy, so that the switch tube can work at the effective duty cycle interval within the whole voltage range, thus eliminating the influence of blind area. Then, the control loop is improved by compensation to improve the performance of the converter and reduce the influence of voltage, load and other disturbances, thereby realizing the stable and efficient operation of the whole system. Finally, simulation and experimental results verified the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

Keywords: four-switch Buck-Boost(FSBB) converter; blind area; four-mode control; small signal model

随着便携式电子设备的广泛使用,对电子设备电源部分要求也越来越高。电子设备需要适应不同大小的输入电压,以便对接各种设备^[1-3]。四开关 Buck-Boost FSBB(four-switch Buck-Boost)变换器因其可升、降压的突出能力,使其既适合便携式

电子设备,也广泛用于电力系统、电池供电和功率因数校正器 PFC(power factor corrector)电源。与传统的 Buck-Boost 变换器相比,FSBB 电压应力更小,为了获得高效率,FSBB 变换器多采用两模式控制,即输出电压高于输入电压时工作在 Buck 模式,反之工作于 Boost 模式^[4]。输入电压非常接近输出电压时,占空比接近于 1,但由于开关管等电子元件不可避免的控制局限性,实际开关管的占空比无法达到 1,导致 FSBB 的电压转换比不连续,可能导致占

收稿日期:2020-6-20;录用日期:2020-09-07

基金项目:上海市科技创新行动计划资助项目(19DZ1205402)
Project Supported by Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(19DZ1205402)

空比紊乱,进而引起系统在 Buck、Boost 模式间摇摆切换。将输入电压与输出电压非常接近的小范围称为盲区,盲区将导致变换器的输出电压纹波增大和电压失稳^[5-6]。

文献[6-11]提出几种解决方案来缓解盲区问题。最简单的是以降低效率为代价,控制变换器在 Buck-Boost 单模式下运行。文献[6]提出了一种复杂的补偿方法,需要对电源设备的运行性能细节进行精确测量,实际应用比较困难;文献[7]提出了一种三模双边缘调制方法,当输入电压达到预定的输出值附近时一个占空比被夹住在最大值,另一个占空比被控制调节输出电压,该方法中 2 个占空比的极限不同,要求其下限值为 0 才能完全消除盲区,但因为电子元件的实际限制,不可能达到;文献[10]提出了一种改进的占空比重叠控制方法,即重叠降压和升压模式的占空比,并设置合适的占空比限制,这种方法能消除脉冲跳变现象,实现模式的平滑过渡,但无法解决盲区问题;文献[11]提出了一种三模控制方法消除 2 种模式间的波动,当变换器工作在 Buck、Boost 模式时采用高频率,在缓冲模式时使用低频率。

为此,本文提出一种环路补偿的电压控制型四模式控制策略。通过分析输入、输出电压转换比与占空比的关系,推导出盲区产生原因,对传统控制策略加以改进,以彻底消除盲区影响。为更好地降低 Boost 模式右半平面零点对整个工作电压范围的影响,在 Boost 模式小信号模型基础上通过双极点双零点补偿电路改善控制环路,有效提升 FSBB 变换器的整体性能和通过仿真和实验验证所提控制方法的正确性和有效性。

1 四开关 Buck-Boost 变换器

四开关 Buck-Boost 变换器如图 1 所示。图中:开关管 Q_1 、 Q_2 构成 Buck 单元,定义单元占空比 d_1 ;开关管 Q_3 、 Q_4 构成 Boost 单元,定义单元占空比 d_2 ; L 、 C 分别为电感、电容, R_L 为电感寄生电阻, R_C 为电容等效串联电阻, R 为负载电阻; V_{in} 为输入电

压, V_{out} 为输出电压。当 R_L 、 R_C 趋于 0 时,由电感伏秒平衡原理得到电压增益无损表达式^[12]为

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d_1}{1-d_2} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,FSBB 变换器的电压增益仅与 d_1 、 d_2 有关,且两者互不影响。占空比取值恒小于等于 1,因此当占空比 d_2 取值趋近于 0 时,FSBB 变换器等效于 Buck 变换器;当占空比 d_1 取值趋近于 1 时,FSBB 变换器等效于 Boost 变换器。

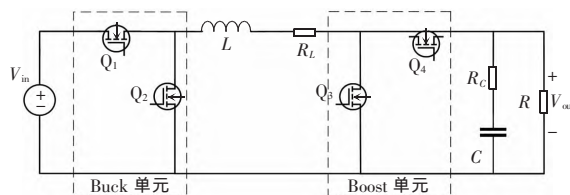


图 1 四开关 Buck-Boost 变换器

Fig. 1 FSBB converter

2 FSBB 控制策略

研究表明,FSBB 变换器的双模调制策略,即在输入电压高于输出电压时变换器工作在 Buck 模式,反之则工作在 Boost 模式,可以显著提高变换器的整体效率,但这种调制策略也存在一个不容忽视的缺点。由于实际中非理想性电子元器件、开关噪声以及电路布局等不可避免的影响和干扰,占空比总是有一个上限值 d_{max} 和一个下限值 d_{min} ,因此, $1-d_1$ 和 d_2 只能实现区间 $[d_{min}, d_{max}]$ 范围值,两模式盲区示意如图 2 所示,这表明电压转换比 V_{out}/V_{in} 只能在电压范围 $[V_{in_min}, V_{mid1}]$ 、 $[V_{mid2}, V_{in_max}]$ 取值,而区间 $[0, V_{in_max}]$ 、

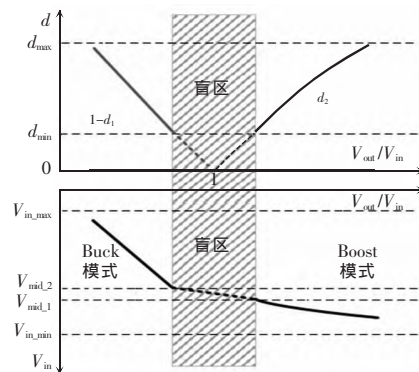


图 2 两模式盲区示意

Fig. 2 Schematic of blind area in two modes

$[V_{mid_1}, V_{mid_2}]$ 和 $[V_{in_min}, \infty]$ 则无法取到。为了实现电压转换的连续性,无法忽略 $[V_{mid_1}, V_{mid_2}]$ 的范围,而由于占空比的局限,此范围无法直接得到。因此,将其定义为盲区,如图2阴影区域。

为了消除盲区,需要取得 $[V_{mid_1}, V_{mid_2}]$ 区间的输入输出电压转换比,这意味着需要在双模调制方案中插入其他的工作模式。因此,通过插入过渡模式来实现 Buck 模式和 Boost 模式的平滑变换。

2.1 四模式控制原理

为解决上述问题,本文提出一种四模式控制方

案,在 FSBB 变换器拓扑的基础上,采用带补偿电压反馈的四模式切换控制策略,图3给出了所采用系统的整体结构,在不同模式下给电压控制器不同的电压参考 V_{ref} ,通过输入电压与参考电压 V_{ref} 的大小来判断进入哪种工作模式,与 V_{ref} 比较得到误差电压 $E(s)$,然后经过补偿校正环路得到控制信号 $V_c(s)$,再与锯齿波信号比较产生对应的 PWM 信号来控制 d_1 、 d_2 ,从而改变输出电压。

FSBB 的工作模式与占空比范围如表1所示。

结合表1,可以得到4种模式的切换过程。

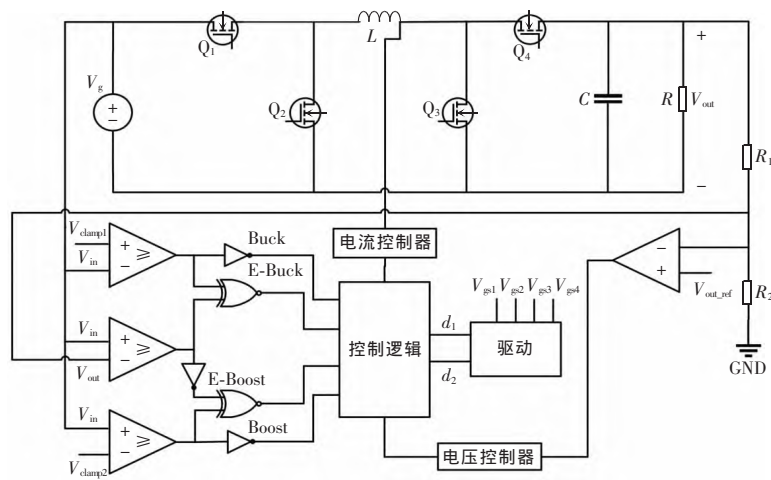


图3 系统整体控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the whole system

表1 FSBB 的工作模式与占空比范围

Tab. 1 Working modes of FSBB converter and the corresponding duty cycle range

模式	占空比	
	d_1	d_2
Buck 模式	V_{out}/V_{in}	0
E-Buck 模式	$V_{out}(1-d_{x1})/V_{in}$	d_{x1}
E-Boost 模式	d_{x2}	$1-V_{in}d_{x2}/V_{out}$
Boost 模式	1	$1-V_{in}/V_{out}$

图3中, V_{clamp1} 为 Buck 模式的电压最小值, V_{clamp2} 为 Boost 模式的电压最大值, 设置占空比的最小值 d_{x1} 和最大值 d_{x2} 。则当 V_{in} 大于 V_{clamp1} 时, 为 Buck 降压模式, 此时只有一对开关管工作, 占空比取值 $d_1=V_{out}/V_{in}$, $d_2=0$, V_{out} 保持不变, V_{in} 减小, 则占空比 d_1 的值增大; 当输入电压 V_{in} 减小至低于 V_{clamp1} 但高于 V_{out} 时, 切换至 E-Buck 模式, 此时 2 对开关

管均处于工作状态, 由占空比 $d_1=V_{out}(1-d_{x1})/V_{in}$ 调节输出, 占空比 d_2 取固定值 d_{x1} , 可以保证 d_1 的取值肯定小于 1, 避免进入盲区; 当 V_{in} 继续减小至低于 V_{out} 但高于 V_{clamp2} 时, 切换至 E-Boost 模式, 此时 2 对开关管均处于工作状态, 占空比 d_1 取固定值 $1-d_{x2}$, 由占空比 $d_2=1-V_{in}d_{x2}/V_{out}$ 调节输出, 保证了 2 组占空比均在极限值范围内, 不会进入盲区; 当 V_{in} 继续减小至低于 V_{clamp2} 时, 切换至 Boost 升压模式, 此时只有 1 对开关管工作, 占空比取值 $d_1=1$, $d_2=1-V_{in}/V_{out}$ 。

2.2 系统设计

图4为 FSBB 变换器闭环控制框图, 图中, $G_{V_{in} \rightarrow V_{out}}(s)$ 为变换器 V_{in} 到 V_{out} 的传递函数, $H(s)$ 为输出电压采样系数, $G_c(s)$ 为输出电压调节器传递函数, $G_m(s)$ 为 PWM 调制器传递函数, $G_{vd}(s)$ 为控制到输出电

压传递函数。

根据文献[13]所述建模方法,得到图 5 所示的 FSBB 变换器的小信号交流模型。由此推导出 Buck 工作模式下变换器控制-输出的传递函数 $G_{vd_buck}(s)$ 为

$$G_{vd_buck}(s) = \frac{v_{in}(1+sR_cC)}{LC\left(1+\frac{R_c}{R}\right)s^2+\left(\frac{L}{R}+R_cC\right)s+1} \quad (2)$$

Boost 模式下变换器控制-输出的传递函数 $G_{vd_boost}(s)$ 为

$$G_{vd_boost}(s) = \frac{v_{in}(1+sR_cC)\left(1-\frac{sL}{D'^2R}\right)}{LC\left(1+\frac{R_c}{R}\right)s^2+\left(\frac{L}{R}+R_cC\right)s+D'^2} \quad (3)$$

其中, $D' = \frac{v_{out}-v_{in}}{v_{out}}$ 。

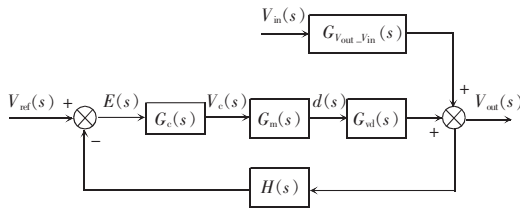


图 4 FSBB 的电压闭环控制框图

Fig. 4 Voltage closed-loop control block diagram of FSBB converter

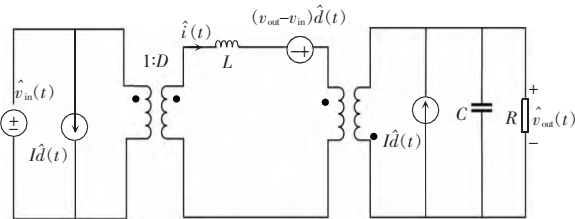


图 5 FSBB 变换器小信号交流模型

Fig. 5 Small signal AC model of FSBB converter

2.3 控制设计

由式(3)可知, Boost 模式下电压环路增益函数比 Buck 模式多了一个右半平面 RHP(right half plane)零点, 该零点频率为

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \frac{R v_{in}^2}{L v_{out}^2} = \frac{v_{in}^2}{2\pi L P_o} \quad (4)$$

式中, P_o 为输出功率。采用 PID 调节器来提高低频增益和动态响应速度, 当负载增大时, RHP 零点频

率降低, 在设计电压环时需要保证环路增益的截止频率低于 RHP 零点频率的最小值^[13-14]。而对于 Buck 模式没有这一限制, 因此补偿网络按 Boost 模式设计。实际工作中在 Boost 模式输入电压最小并且满载时达到最低频率, 因此将这一值作为截止频率可以达到的最大值。根据给定参数, 输入电压最小为 3 V, 电感 L 为 20 μ H, 满载输出功率 P_o 为 12 W, 代入式(4)可得 $f_z=5.97$ kHz。通常截止频率选为 RHP 频率值的 1/2~1/4, 所以选择截止频率 $f_o=2.98$ kHz。

开关频率 $f=20$ kHz, 选择穿越频率 $f_c=\frac{1}{5}f=4$ kHz。补偿网络的 2 个零点频率 f_{z1} 、 f_{z2} 设计为原始回路函数两个相近极点的 1/2~1/4 处, 所以取 $f_{z1}=f_{z2}=131$ kHz。

补偿网络的 2 个极点, 其中, 第 1 个用于消除 ESR 零点 $f_{p1}=f_z=\frac{D'^2R}{2\pi L}=53$ kHz; 第 2 个用于抑制高频噪声, 选为 f_c 的 10 倍, 即 $f_{p2}=10f_c=40$ kHz。因此补偿网络公式为

$$G_c(s) = K \frac{\left(1 + \frac{s}{2\pi \cdot 131}\right)^2}{s \left(1 + \frac{s}{2\pi \cdot 53\,000}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi \cdot 40\,000}\right)} \quad (5)$$

式中, K 为补偿网络的增益。预校正后系统的开环传递函数 $G_c(s)G_0(s)|_{K=1}$ 在穿越频率 f_c 处的增益为 $-A$, 为使补偿后 $G_c(s)G_0(s)$ 在穿越频率 f_c 处的增益等于 0, 则 K 取值为

$$20 \lg K = A \quad (6)$$

补偿后 Boost 和 Buck 开环传递函数 Bode 图如图 6 所示。图 6(a) 给出补偿后的系统开环传递函数的 Bode 图, 可见此时穿越频率 4 kHz, 且当 $f=4$ kHz 时, PID 补偿网络增益 $K=1$ 时对应的开环对数幅值为 -17.2 dB, 代入式(6)可以求得 $K=108.4$, 再将 K 值代入式(5); 图 6(b) 给出了 $K=108.4$ 补偿后的系统 Boost 开环传递函数的 Bode 图, 可见校正后穿越频率为 4 kHz, 相位裕度为 80° ; 图 6(c) 给出了补偿后的 Buck 开环传递函数的 Bode 图, 校正后穿越频率为 4 kHz, 相位裕度为 84° , 系统稳定。

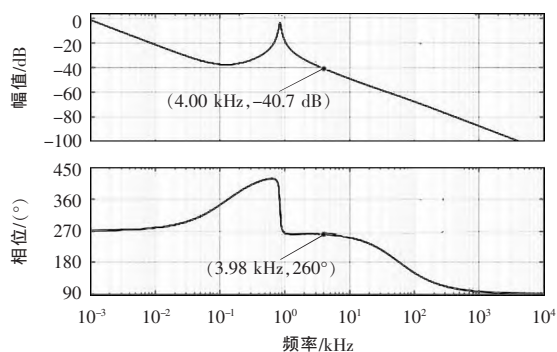
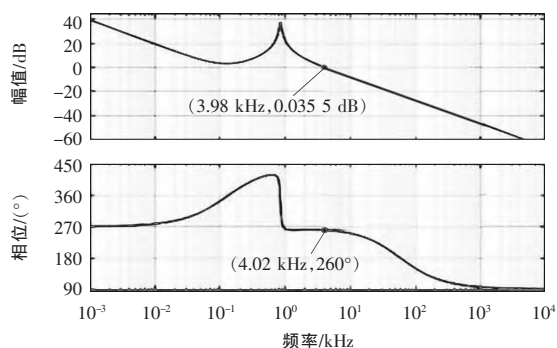
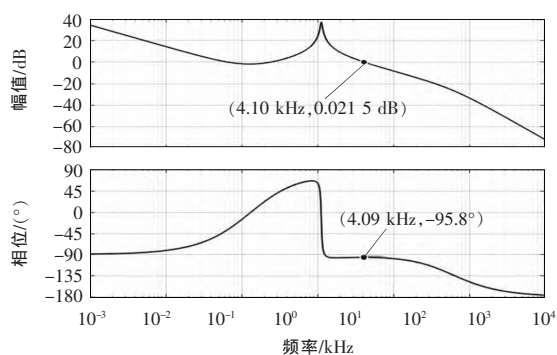
(a) $K=1$ 的 Boost 开环传函 Bode 图(b) $K=108.4$ 的 Boost 开环传函 Bode 图(c) $K=108.4$ 的 Buck 开环传函 Bode 图

图6 补偿后 Boost 和 Buck 开环传函 Bode 图

Fig. 6 Bode diagrams of compensated Boost and Buck open-loop transfer functions

3 实验结果

四开关 Buck-Boost 硬件平台如图 7 所示,为了验证所提控制策略的正确性和有效性,搭建了一台实验样机,电路的参数如表 2 所示。根据前文分析,设置极限占空比 $[d_{x1}, d_{x2}]=[0.1, 0.9]$ 。

图 8 为 4 种控制模式下的 2 组占空比波形,可以看出实验波形与理论基本一致。

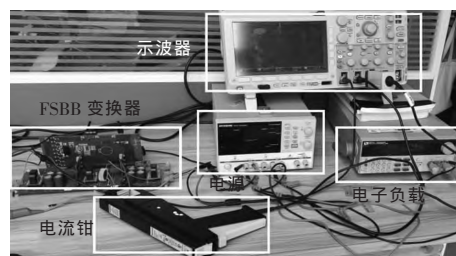


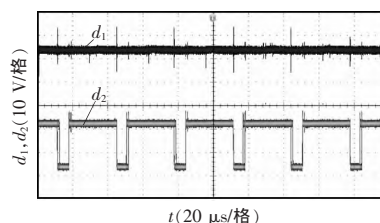
图7 四开关 Buck-Boost 硬件平台

Fig. 7 FSBB hardware platform

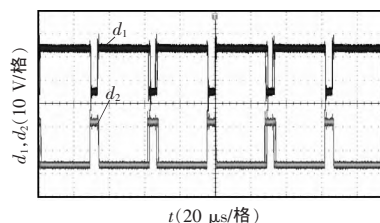
表2 样机参数

Tab. 2 Parameters of prototype

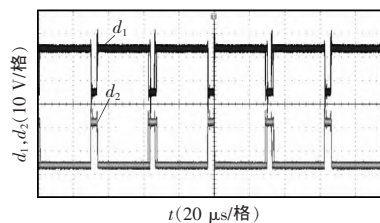
参数	数值	参数	数值
输入电压 V_{in}/V	3~36	电感 $L/\mu H$	20
输出电压 V_{out}/V	8~16	开关频率 f/kHz	20
输出功率 P_o/W	12	负载 R/Ω	12~100



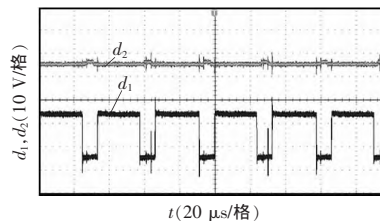
(a) Boost 模式



(b) E-Boost 模式



(c) E-Buck 模式



(d) Buck 模式

图8 不同模式下的占空比波形

Fig. 8 Waveforms of duty cycle in different modes

图 9 展示了负载不变的情况下, 输入电压 5、11、13、20 V 情况下对应的 4 种控制模式的输出电压、电感电流的实验波形。

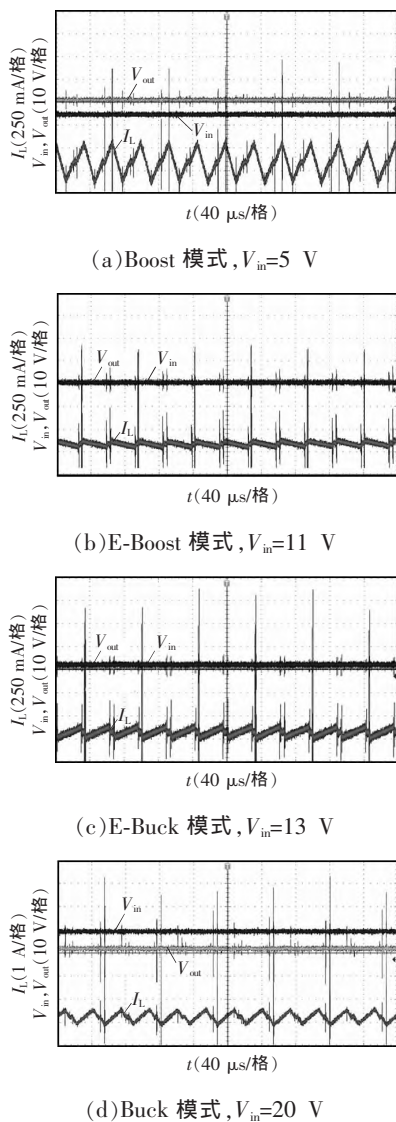


图 9 不同模式下的输出电压和电感电流实验波形

Fig. 9 Experiment waveforms of output voltage and inductor current in different modes

为了验证所提出的四模式控制策略的动态性能, 又进行了一些输入电压和负载条件突变的实验, 具体实验结果如图 10 和图 11 所示。图 10 显示了当负载保持不变仅有输入电压变化时, 输出电压的实验波形。可以看出, 切换过程中没有出现大的波动, 输出电压稳定, 模式切换的瞬态响应性能也比较令人满意。图 11 显示了 4 种控制模式下负载突然变化时对应的输出电压和输出电流的实验波

形。可以看出, 随着负载的变化, 输出电压基本保持稳定, 系统带负载能力较好。当输入电压增大时, 纹波也略有增大, 这是由于输入源的内部电阻引起的。

实验结果很好地证明了本文所提四模式控制策略的正确性和有效性。

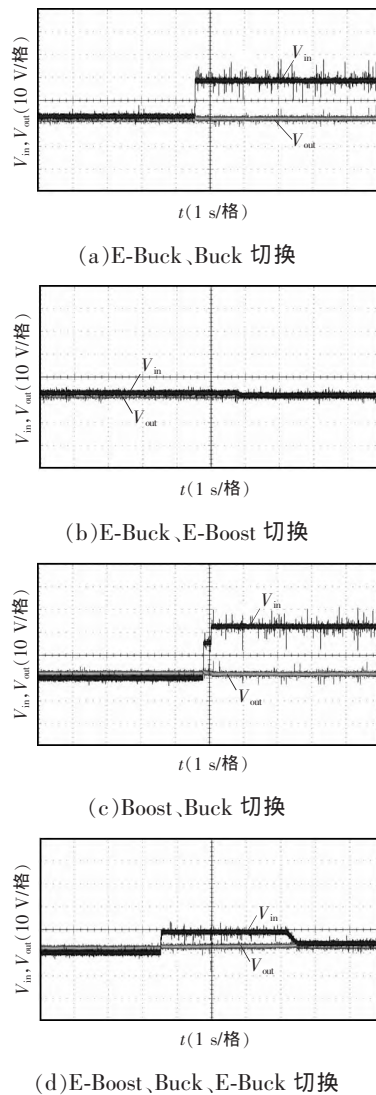
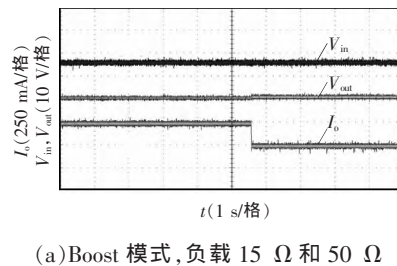


图 10 不同模式切换的电压实验波形

Fig. 10 Experiment waveforms of voltage during switching between different modes



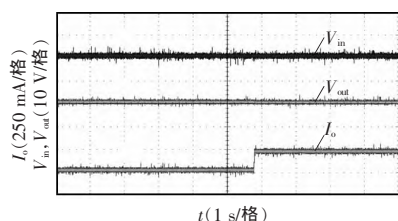
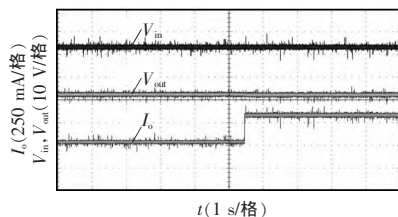
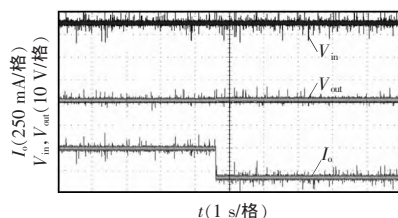
(b)E-Boost 模式,负载 50 Ω 和 25 Ω (c)E-Buck 模式,负载 25 Ω 和 15 Ω (d)Buck 模式,负载 25 Ω 和 100 Ω

图 11 不同模式下负载改变的实验波形

Fig. 11 Experiment waveforms under load changes in different modes

4 结论

为了解决四开关 Buck-Boost 变换器的两模式控制策略不能解决输入输出电压接近时模式频繁切换以及盲区的问题,本文提出了一种带环路补偿的电压控制的四模式控制策略,仿真及实验结果表明:

(1)所提的控制策略能够有效解决双模控制方案存在的盲区问题,使系统获得更好的整体性能。

(2)FSBB 系统能在提出的带补偿的四模式控制策略下平稳运行,补偿参数合理,系统响应迅速。

参考文献:

- [1] Yao Chuan, Ruan Xinbo, Wang Xuehua, et al. Isolated Buck-Boost DC/DC converters suitable for wide input-voltage range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(9): 2599-2613.
- [2] 颜湘武,王杨,葛小凤,等. 双管 Buck-Boost 变换器的

带输入电压前馈双闭环控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 65-70, 77.

Yan Xiangwu, Wang Yang, Ge Xiaofeng, et al. Dual-loop control with input voltage feedforward for dual-switch Buck-Boost converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 65-70, 77 (in Chinese).

- [3] Zhao Xiaonan, Zhang Lanhua, Born R, et al. A high-efficiency hybrid resonant converter with wide-input regulation for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3684-3695.
- [4] 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 on high efficiency non-isolated four switch buck-boost converter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 (in Chinese).
- [5] Wang Xiangcheng, Tian Feng, Batarseh I. High efficiency parallel post regulator for wide range input DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 852-858.
- [6] 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.
- [7] 王少斌, 苏淑靖, 任婷. 宽输入全桥 Buck-Boost 变换器控制策略研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(12): 110-114.
- Wang Shaobin, Su Shujing, Ren Ting. Study on control strategy of full bridge Buck-Boost converter based on wide input voltage [J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(12): 110-114 (in Chinese).
- [8] Stahl G, Rodriguez M, Maksimovic D. A high-efficiency bidirectional buck-boost DC-DC converter [C]// 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1362-1367.
- [9] Ceci M F, D'Amico M B. An alternative strategy for reducing mode transitions in a four-switch buck-boost converter [C]// 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2011: 1920-1923.
- [10] Ren Xiaoyong, Ruan Xinbo, Qian Hai, et al. Dual-edge modulated four-switch buck-boost converter [C]// 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes: IEEE, 2008:

3635-3641.

- [11] Ren Xiaoyong, Ruan Xinbo, Qian Hai, et al. Three-mode dual-frequency two-edge modulation scheme for four-switch Buck-Boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 499-509.
- [12] 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, 191.
- 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, 191 (in Chinese).
- [13] 刘树峰. 宽输入范围 DC/DC 变换器及其效率提升方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Liu Shufeng. Research on DC/DC converter with wide input voltage and the method of improving efficiency [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [14] Agostinelli M, Priewasser R, Marsili S, et al. Fixed-frequency pseudo sliding mode control for a Buck-Boost DC-

DC converter in mobile applications: A comparison with a linear PID controller [C]// 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2011: 1604-1607.



曹以龙

作者简介:

曹以龙(1965-),男,博士,教授。研究方向:电力电子与电力传动。E-mail:caoyilong2004@126.com。

吴丹(1995-),女,通信作者,硕士研究生。研究方向:电子电源。E-mail:784544848@qq.com。

朱冬冬(1995-),男,硕士研究生。研究方向:电力电子、功率因数校正电路。E-mail:15061077735@163.com。

江友华(1974-),男,博士,教授。研究方向:谐波治理、电能质量优化及电力系统自动化。E-mail:jyhua0306@sina.com。

杨兴武(1981-),男,博士,副教授。研究方向:电力电子技术在电力系统中应用。E-mail:yangxingwu@shiep.edu.cn。