

# 双管 Buck-Boost 变换器的带输入电压前馈 双闭环控制策略

颜湘武<sup>1</sup>, 王 杨<sup>2</sup>, 葛小凤<sup>2</sup>, 张 波<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网新源张家口风光储示范电站有限公司, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 针对宽范围输入的双管 Buck-Boost 变换器, 在 Buck 和 Boost 两模式之间进行切换和输入电压发生波动时, 电感电流和输出电压存在较大波动的问题, 提出了带输入电压前馈的两模式平均电流控制策略。该策略通过将具有电压电流双闭环结构的平均电流控制与单载波-双调制的调制方法相结合, 来提高变换器的动态响应性能, 实现变换器两模式的自动近似平滑切换, 同时对电感电流进行有效控制, 保护设备安全。为了克服传统双闭环前馈函数实现和化简困难的缺点, 提出将输入电压前馈引入电流内环从而大幅提高了变换器的输入动态响应性能。最后建立了 MATLAB/Simulink 仿真模型和硬件试验平台, 验证了所提控制方法的有效性。

**关键词:** 宽范围输入 DC/DC; 平均电流法; 单载波-双调制; 输入电压前馈; 双管 Buck-Boost 变换器

**中图分类号:** TM 46

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.010

## 0 引言

双管 Buck-Boost 变换器将 Buck 模式和 Boost 模式联合使用后, 具有升降压功能、功率直通通路<sup>[1]</sup>和开关管电压应力低等优点, 在电池充放电及新能源发电等需要宽范围输入特性的领域得到广泛应用<sup>[2-6]</sup>。

双管 Buck-Boost 变换器在电感电流连续的情况下, 工作在 Boost 模式时, 控制输出电压传递函数存在右半平面零点, 限制了系统带宽, 降低了输入动态响应速度。文献[7]和[8]分别提出采用伪滑模控制和模型预测控制来提高控制系统的动态响应速度, 但是这 2 种方法属于非线性控制方法, 原理与设计比较复杂。由于双管 Buck-Boost 变换器工作在 Buck 和 Boost 模式时, 其电路分别等效于传统的 Buck 和 Boost 电路, 因此文献[9]提出使用传统的峰值电流控制来提高系统的动态响应速度。为了克服峰值电流法需要谐波补偿且抗干扰能力差的缺点, 文献[10]提出采用平均电流控制来提高系统动态性能。但是上述 2 种方法不能够实现变换器在 2 种模式之间的自动切换, 文献[11]提出双载波-单调制或者双调制-单载波的调制方法实现变换器在 2 种模式之间的自动近似平滑切换, 但是这 2 种调制方式在 2 种模式下使用的是同一个调节器, 因此 Buck 模式下的动态响应速度也会受到 Boost 右半平面零点限制的影

响。文献[12]提出了带输入电压前馈的电压型控制, 通过输入电压的前馈作用提高了变换器的输入动态响应速度, 但是由于电压型控制未对电感或者开关管电流进行控制, 需要额外的电流保护模块, 同时其动态响应性能也较电流型控制差<sup>[13-14]</sup>。

为此, 本文通过采用具有电压电流双闭环结构的平均电流法作为基础控制, 并与双调制-单载波的调制方式相结合, 在实现变换器 Buck 和 Boost 模式自动切换的同时, 对电感电流进行了控制, 在一定程度上提高了系统的动态响应性能。为了更好地减小 Boost 模式下右半平面零点对变换器整个工作范围的影响, 在 Buck 和 Boost 工作模式的小信号模型基础上, 推导了适用于平均电流法的输入电压前馈函数, 有效地提升了变换器的输入动态响应性能, 并通过仿真和实验验证了所提控制方法的有效性。

## 1 两模式平均电流控制原理

图 1 为双管 Buck-Boost 变换器两模式平均电流控制原理, 电路拓扑中有  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  2 个开关管, 通过控制这 2 个开关管的导通时间<sup>[15]</sup>和相位差<sup>[16]</sup>等可使

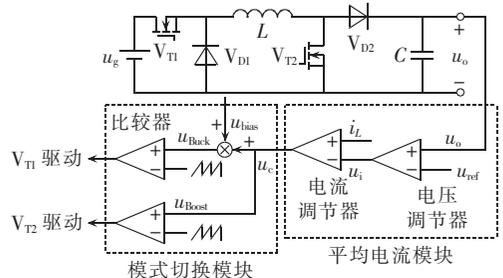


图 1 两模式平均电流控制原理

Fig.1 Principle of two-mode average current control

收稿日期: 2016-01-11; 修回日期: 2016-08-24  
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050603); 河北省自然科学基金资助项目(E2014502-109); 河北省科技计划项目(15214307D)  
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050603), the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2014502109) and the Science and Technology Program of Hebei Province(15214307D)

变换器工作在多种工作方式下。其中比较常用的是 Buck 和 Boost 两模式工作方式。当开关管  $V_{T1}$  高频开关、 $V_{T2}$  常断时,为 Buck 模式,变换器可等效为传统的 Buck 变换器;当开关管  $V_{T2}$  高频开关、 $V_{T1}$  常通时,为 Boost 模式,变换器可等效为传统的 Boost 变换器。

在这 2 种模式下,变换器输入、输出电压与 2 个开关管占空比之间的关系都满足式(1)<sup>[1]</sup>。

$$\frac{u_o}{u_g} = \frac{d_1}{1-d_2} \quad (1)$$

其中,  $d_1$ 、 $d_2$  分别为开关管  $V_{T1}$ 、 $V_{T2}$  的占空比;  $u_o$ 、 $u_g$  分别为变换器输出与输入电压。

图 1 中平均电流模块由输出电压外环调节器和电感电流内环调节器共同组成电压电流双闭环结构。模式切换模块通过在平均电流模块输出的调制信号  $u_c$  上叠加一个偏移量  $u_{bias}$  实现 2 种模式的自动切换,其原理如图 2 所示。

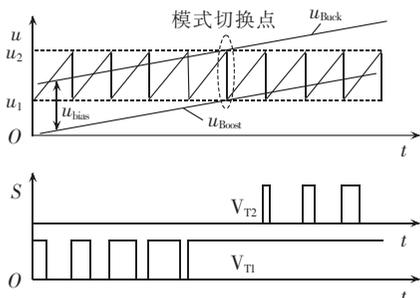


图 2 两模式切换控制方法波形图

Fig.2 Waveforms of mode switching control

图 2 所示为双调制-单载波模式自动切换方法,通过在调制信号  $u_c$  上叠加  $u_{bias}$  得到调制信号  $u_{Buck}$  和  $u_{Boost}$ ,并分别与同一个载波信号作比较来得到开关管  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  所需的占空比。从图 2 中可看出,当 2 个调制信号之间的差值  $u_{bias}$  小于锯齿波的峰峰值  $u_2 - u_1$  时,调制信号  $u_{Buck}$  和  $u_{Boost}$  在模式切换点处就会同时与载波相交,从而进入 Buck-Boost 工作模式<sup>[2]</sup>。为了降低开关损耗,防止变换器在模式切换过程中进入 Buck-Boost 工作模式,调制信号需要满足式(2)。

$$u_{bias} = u_{Buck} - u_{Boost} \geq u_2 - u_1 \quad (2)$$

为了使变换器不脱开关管的调节作用,一般要求在任何时刻,至少有 1 个开关管处于高频开关的状态,因此通常要求  $u_{bias} = u_2 - u_1$ 。这同时也是实现 Buck 和 Boost 2 种模式自动平滑切换的条件<sup>[12]</sup>。

## 2 输入电压前馈的引入

### 2.1 输入电压前馈函数的推导

前馈控制能够很好地抑制甚至消除扰动信号对控制量的影响,图 3 为输入电压前馈控制框图。

前馈控制由于较易受系统模型准确性的影响,

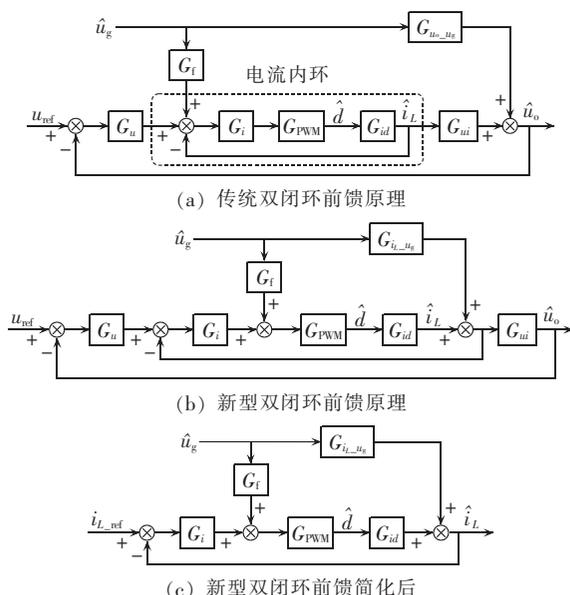


图 3 输入电压前馈控制框图

Fig.3 Block diagram of input voltage feedforward control

常常与反馈控制联合使用,图 3(a)所示为传统的双闭环扰动前馈原理。图 3 中,  $G_i$  和  $G_u$  分别为电流调节器和电压调节器的传递函数,  $G_{id}$  和  $G_{ui}$  分别为控制到电感电流和电感电流到输出电压的传递函数,  $G_{u_o-u_g}$  为输入电压扰动到输出电压的传递函数,  $G_f$  为输入电压前馈函数,  $G_{PWM}$  为调制器的传递函数,它们在 Buck 和 Boost 模式下的表达式可参考文献<sup>[12]</sup>;  $\hat{u}_o$ 、 $\hat{u}_g$ 、 $\hat{i}_L$ 、 $\hat{d}$  分别为变换器输出电压、输入电压、电感电流、开关管占空比的扰动量。

从图 3(a)中可以看出,传统的双闭环输入电压前馈方法<sup>[17]</sup>是将经过前馈函数处理过的输入电压扰动信号前馈至外环电压调节器的输出侧。前馈函数的结果如式(3)所示。

$$G_f = -\frac{G_{u_o-u_g}}{G_{ui}} \quad (3)$$

$G_f$  在 Buck 和 Boost 2 种工作模式下的具体表达式分别如式(4)和(5)所示。

$$G_{f\_bu} = -\frac{D(RCs+1)}{RLCs^2+Ls+R} \quad (4)$$

$$G_{f\_bo} = \frac{RCD'^2s+2D'^2}{L^2C \left[ s^3 + \left( \frac{1}{RC} - \frac{RD'^2}{L} \right) s^2 - \frac{RD'^4}{L^2C} \right]} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中,  $D$  为对应开关管的占空比且  $D'=1-D$ ;  $R$ 、 $L$  和  $C$  分别为变换器负载电阻、电感和电容。从上述两式可以看出,2 种模式下的输入电压前馈函数形式复杂,在物理上很难实现,会大幅增加控制系统的设计难度。从图 1 双管 Buck-Boost 变换器的拓扑结构可以看出,输入电压的扰动会首先传递到电感电流,然后再传递至输出侧电容,最终导致输出电压的波动,若是能够通过输入电压前馈提前

将电感电流上的波动进行抑制,不仅可以很好地限制电感电流的幅值,而且可以更加快速地抑制输出电压的波动,保持稳定的输出。

图 3(b)所示为新型双闭环前馈的原理图。图中  $i_{L\_ref}$  为电压外环输出的电感电流给定值,  $G_{i_{L\_u_g}}$  为输入电压扰动到电感电流的传递函数。从图 3(b)中可以看出,新型的前馈控制方法通过将输入电压直接前馈至电流内环的电流调节器的输出侧,将输入电压的波动直接在电流内环进行抑制,保持电感电流的稳定,减小输入电压扰动对输出电压的影响。由于将前馈作用移到了内环,所以可将外环略去,化简后见图 3(c),新型输入电压前馈函数如式(6)所示。

$$G_f = -\frac{G_{i_{L\_u_g}}}{G_{PWM} G_{id}} \quad (6)$$

其中,  $G_{PWM}$  一般等效为一个比例环节<sup>[12]</sup>, 如式(7)所示。

$$G_{PWM} = \frac{1}{u_2 - u_1} = \frac{1}{u_{saw}} \quad (7)$$

其中,  $u_1, u_2$  分别为图 2 中高频载波的谷值和峰值, 并将峰值与谷值之差定义为载波峰峰值, 用  $u_{saw}$  表示。

$G_f$  在 Buck 和 Boost 2 种模式下的具体表达式分别如式(8)和(9)所示。

$$G_{f\_bu} = -\frac{u_o}{u_g^2} u_{saw} \quad (8)$$

$$G_{f\_bo} = -\frac{u_{saw}}{u_o \left(1 - s \frac{Lu_o^2}{Ru_g^2}\right)} \quad (9)$$

从式(8)和式(9)可以看出,其形式较传统的双闭环前馈较易化简。Buck 模式下的输入电压前馈函数只与输入、输出电压的静态工作点和载波幅值有关。Boost 模式下,还与频率有关系,但是由于传统的新能源发电和充电设备的输出电压的波动频率往往很低,  $(1 - Lu_o^2 s) / (Ru_g^2)$  可以近似等效为 1<sup>[12]</sup>, 因此输入电压前馈函数的值将主要受所选静态工作点的影响。随着静态工作点的变化,前馈函数的表达式不发生变化,只是其值会改变,并在所选静态工作点处具有最好的前馈效果,其余范围前馈作用将稍微弱化。本文由于采用电压电流双闭环结构的平均电流法,其本身就具有较快的输入动态响应速度<sup>[14]</sup>, 可以在前馈作用较弱处起到补偿效果,因此本文将静态工作点选在模式切换处,在加强变换器模式切换处的输入动态响应性能的同时,实现前馈函数的统一。因此,2 种工作模式下的输入电压前馈函数可以最终化简为式(10)。

$$G_{f\_bu} = G_{f\_bo} = G_f = -u_{saw} / u_o \quad (10)$$

### 2.2 带输入电压前馈的两模式平均电流控制策略

图 4 所示为带输入电压前馈的两模式平均电流控制策略图,图中  $G_f$  为新型输入电压前馈函数。从图中可以看出,输入电压信号经过前馈函数的处理

后,分别与调制信号  $u_{Buck}$  和  $u_{Boost}$  叠加再经过比较器的调制后就可以得到所需的 PWM 波。并且,从式(10)可以看出,由于 2 种模式下的输入电压前馈函数相同,不再需要对  $u_{bias}$  进行调整,直接令其与高频载波相等即可实现变换器 2 种模式的自动平滑切换。

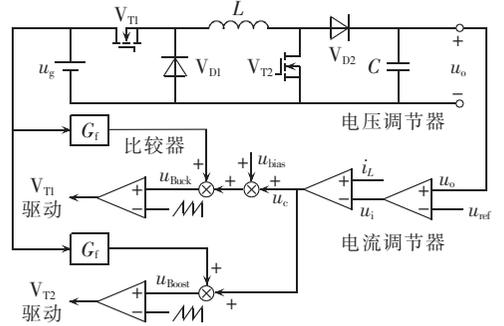


图 4 带输入电压前馈的两模式平均电流控制策略  
Fig.4 Two-mode average current control combined with input voltage feedforward

### 2.3 仿真比较

本文利用 MATLAB/Simulink 软件搭建了仿真模型,对所提控制方法进行了仿真分析,并与单环的电压型控制进行比较。仿真参数如下:输入电压为 100~400 V,输出电压为 200 V,输出功率为 800 W,负载电阻为 50 Ω,电感为 4 mH,开关频率为 30 kHz,输出侧电容为 490 μF,输入侧电容为 220 μF,开关管型号为 IKW40N120H3,二极管型号为 IDW20G1-20C5。图 5 为变换器输入电压到输出电压的波特图。

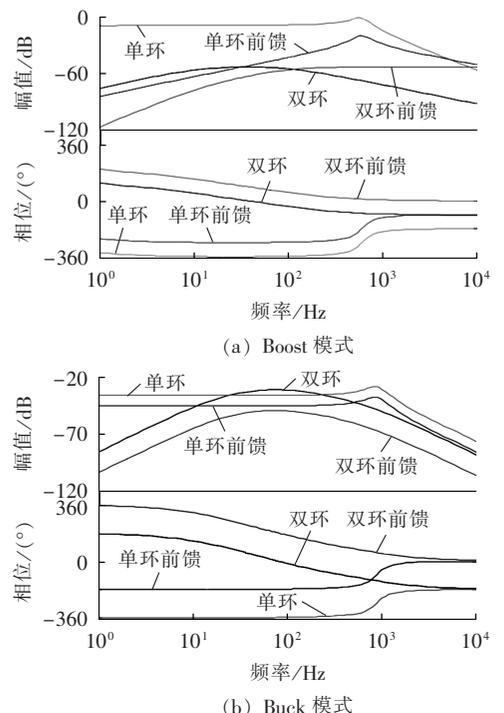


图 5 输入电压到输出电压的波特图  
Fig.5 Bode diagrams of input voltage and output voltage

图 5 中单环指的是只有电压环的电压型控制,单环前馈指的是带输入电压前馈的电压型控制,双环指的是本文中提到的具有电压电流双闭环结构的平均电流控制,双环前馈指的是带输入电压前馈的平均电流控制。图 5(a)和(b)所示分别为变换器在输入电压为 100 V 和 400 V 时,各种控制方法的幅频和相频响应特性。从图 5 中可以看出,在 2 种工作模式下,在低频范围内,双环控制的输入动态响应比单环好,且加入输入电压前馈后,都能够有效增强其输入动态响应性能,其中带输入电压前馈的双闭环控制具有最好的动态响应性能。

图 6 所示为变换器在 Boost 模式下,输入电压从 120 V 变为 170 V 时,电感电流  $i_L$  和输出电压  $u_o$  在 4 种控制方法下的仿真波形图。图 7 所示为变换器在 Buck 模式下,输入电压从 220 V 变为 270 V 时,各个状态量的仿真波形图。

从图 6 和图 7 中可以看出,当输入电压  $u_g$  发生变化时,会在电感电流和输出电压上造成一个很大的冲击。当不加输入电压前馈时,单环控制下,电感电流和输出电压的冲击会远远超出允许的范围;双环控制下,冲击虽然会有所减小,但还是不能够满足部分场合的要求。当加入输入电压前馈后,单环和双环控制下的输出电压和电感电流的冲击得到了很好的抑制,但是由于单环电压型控制动态响应速度慢,电路要经过一定的振荡后才能够达到稳定状态,这不仅会给出下级设备带来不稳定因素,也会加大变换

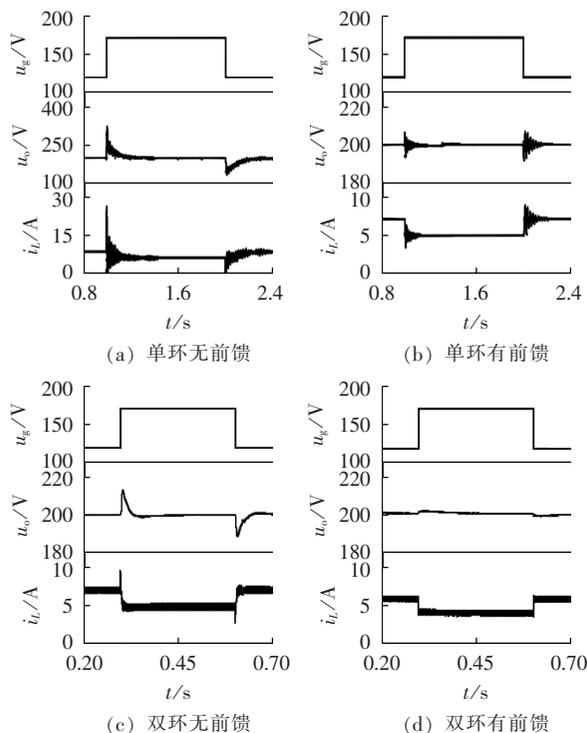


图 6 Boost 模式下输入电压跃变仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of input voltage step-change in Boost mode

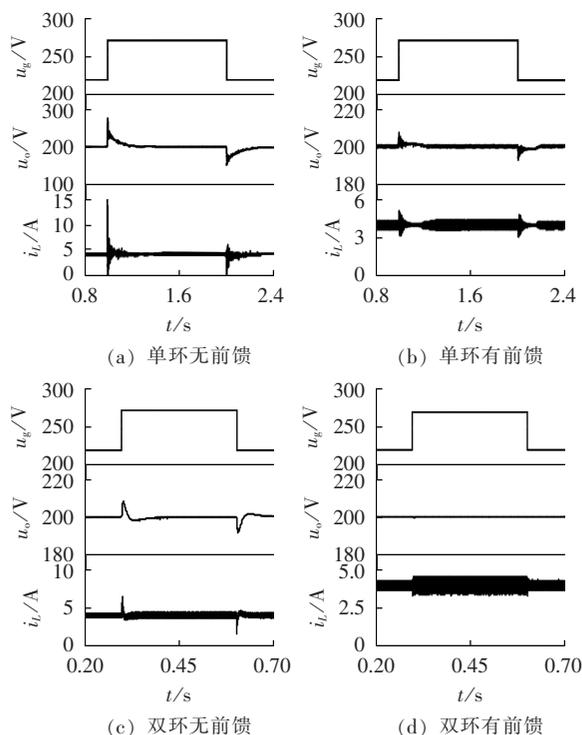


图 7 Buck 模式下输入电压跃变仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of input voltage step-change in Buck mode

器的功率损耗和电磁干扰,而双环控制则由于具有很快的动态响应速度,能够很快地在前馈控制粗调的基础上进行微调,使电路实现稳定的输出,同时还对电感电流进行了控制,保证了设备的安全稳定运行。

图 8 所示为变换器在 Buck 和 Boost 2 种模式之

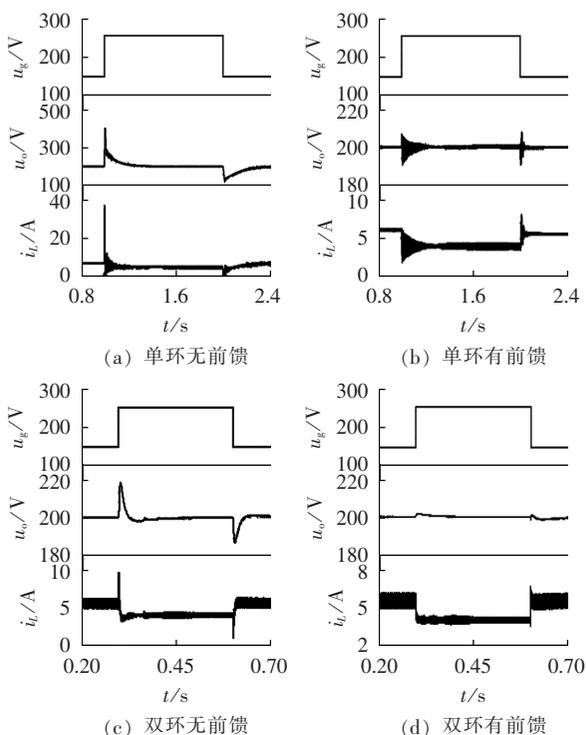


图 8 两模式切换的仿真波形图

Fig.8 Simulative waveforms of mode switching

间互相切换时的仿真波形图。从图 8 中可以看出,当变换器的输入电压在 150~250 V 之间变化时,在没有加入输入电压前馈时,电感电流和输出电压上都会产生一个冲击,单环电压型控制由于动态性能较差,且没有对电感电流进行控制,导致电感电流上的冲击往往会超出允许值。在加入输入电压前馈后,变换器抑制输入电压波动的能力大幅增强,能够很快地根据输入电压的变化完成模式的切换。但是,单环电压型控制在模式切换完成后,还需要一定时间的振荡过程才能实现稳定的输出,动态响应较慢。带输入电压前馈的双闭环控制能够在前馈的作用下很快地实现稳定输出,使变换器能够根据输入电压的变换自动完成两模式的平滑切换。

### 3 实验验证

为了验证所提带输入电压前馈的电压电流双闭环控制方法的有效性,在实验室搭建了一台 800 W 的试验样机,其参数与仿真参数一致。

由于变换器工作在两模式下时可以分别等效为传统的 Buck 和 Boost 电路,已有大量文献对其参数的设计进行了讨论,具体的设计步骤和方法可以参考文献[18]。同时为了方便开关管的选取和变换器容量的提升,本文中所选取开关管的开关频率为 30 kHz,电压和电流调节器使用传统的 PI 调节器。

图 9 和图 10 分别为输入电压在 120~170 V 和 220~270 V 之间变化时,电感电流和输出电压的实验波形图。从图 9 和图 10 中可以看出,在不加入输入电压前馈时,输入电压发生变化时,会在电感电流和输出电压上产生冲击,严重时甚至会烧毁开关管,危及设备工作安全。从图 9(b)和 10(b)中可以看出,加入输入电压前馈后,能够大幅提高变换器的输入

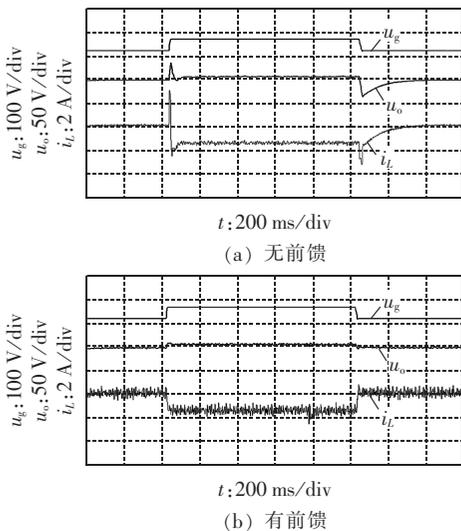


图 9 Boost 模式下输入电压跃变实验波形  
Fig.9 Experimental waveforms of input voltage step-change in Boost mode

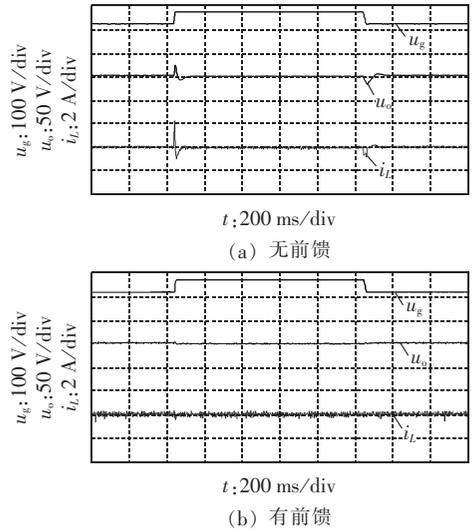


图 10 Buck 模式下输入电压跃变实验波形  
Fig.10 Experimental waveforms of input voltage step-change in Buck mode

动态响应性能,很好地抑制输入电压波动对变换器的影响,保证稳定的输出,同时还可以有效控制电感电流的大小,防止电流过大烧毁设备。

图 11 所示为输入电压在 150~250 V 之间变化时的实验波形图。从图 11(a)中可以看出,变换器在 Buck 和 Boost 模式切换时,电感电流存在较大的冲击,这不仅会导致输出电压产生波动,严重时可能还会烧毁电感和开关管,因此十分有必要对电感电流进行适当的控制。从图 11(b)可以看出,输入电压前馈的引入,可以很好地抑制电感电流和输出电压的波动,实现变换器 2 种模式的自动平滑切换,与理论和仿真结果相符。

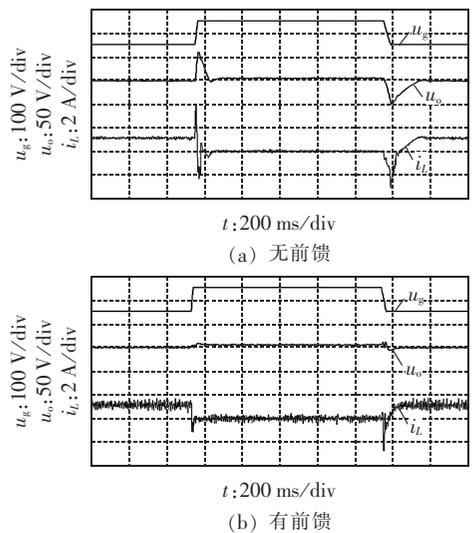


图 11 两模式切换的实验波形  
Fig.11 Experimental waveforms of mode switching

### 4 结论

本文针对双管 Buck-Boost 变换器的两模式控制

策略进行了研究,提出了带输入电压前馈的两模式电压电流双闭环控制策略。该控制策略加入了电流内环,不仅对电感和开关管的电流进行了控制,有效地保护了设备的安全,而且能够提高变换器的动态响应性能。同时,将输入电压前馈引入了电流内环,克服了传统双闭环前馈函数难以实现和化简的缺点,并利用了内环的快速调节特性,很好地抑制了输入电压波动对电感电流和输出电压的影响。最后实验室通过搭建仿真模型和800 W的试验样机,验证了所提控制策略的有效性。

### 参考文献:

- [1] CHEN J, MA KSIMOVIC D, ERICKSON R. Buck-Boost PWM converters having two independently controlled switches[C]//2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001. [S.l.]:IEEE, 2001:736-741.
- [2] MA Y, WANG H, CHEN G, et al. A novel method for smooth transition in step-up/step-down DC-DC converter[C]//IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits, 2009. Hong Kong, China:IEEE, 2009:95-98.
- [3] QIAO H, ZHANG Y, YAO Y, et al. Analysis of Buck-Boost converters for fuel cell electric vehicles[C]//IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2006. Shanghai, China:IEEE, 2006:109-113.
- [4] 晏坤, 王辉, 漆文龙, 等. 微电网储能系统中基于PWM加双重移相控制的双向DC/DC变换器研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4):44-52.  
YAN Kun, WANG Hui, QI Wenlong, et al. Bidirectional DC/DC converter based on PWM plus dual phase-shift control for microgrid storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):44-52.
- [5] 郑玢鑫, 程杉, 谭超. ZVS隔离型高增益DC/DC变换器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5):70-76.  
ZHU Fenxin, CHENG Shan, TAN Chao. ZVS isolated high step-up DC/DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):70-76.
- [6] 杨亮, 苏剑, 刘海涛, 等. 单相并网逆变器的直流分量抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4):145-150.  
YANG Liang, SU Jian, LIU Haitao, et al. DC component suppression strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):145-150.
- [7] 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 on Circuits and Systems (ISCAS). Rio de Janeiro, Brazil:IEEE, 2011:1604-1607.
- [8] MARIETHOZ S, ALMER S, MORARI M. Optimal control of a two control input Buck-Boost converter[C]//48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009 Held Jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Shanghai, China:IEEE, 2009:6575-6581.
- [9] LEE Y H, HUANG S C, WANG S W, et al. Power-tracking embedded Buck-Boost converter with fast dynamic voltage scaling for the SoC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3):1271-1282.
- [10] HWANG B H, SHEEN B N, CHEN J J, et al. A low-voltage positive Buck-Boost converter using average-current-controlled techniques[C]//2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Seoul, Korea:IEEE, 2012:2255-2258.
- [11] LEE Y J, KHALIGH A, EMADI A. A compensation technique for smooth transitions in a non-inverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4):1002-1015.
- [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.  
YAO Chuan, RUAN Xinbo, CAO Weijie, et al. An input voltage feedforward control strategy for two-switching Buck-Boost DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):36-44.
- [13] 周国华, 许建平. 开关变换器调制与控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6):815-831.  
ZHOU Guohua, XU Jianping. A review of modulation and control techniques for switching converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):815-831.
- [14] DIXON L H. Average current mode control of switching power supplies[J]. Unitrode Product & Applications Handbook, 1990, 1:356-369.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 金以慧. 过程控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1993:125-134.
- [18] 曹伟杰. 双管Buck-Boost变换器的输入电压前馈控制方法[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
CAO Weijie. Input voltage feed-forward control method of two-switch Buck-Boost converter[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

### 作者简介:



颜湘武

颜湘武(1965—),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统、现代电力变换、新型储能与节能(E-mail:xiangwu@ncepu.edu.cn);

王杨(1990—),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统(E-mail:wang8668yang@163.com);

葛小凤(1989—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统(E-mail:gexf6962@126.com);

张波(1981—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统、现代电力变换(E-mail:adam166@163.com)。

(下转第77页 continued on page 77)

补偿[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):51-57.

CHEN Chuanrui, MU Longhua, ZHU Guofeng. Reactive and harmonic compensation based on interleaved flyback type photovoltaic microinverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):51-57.

[15] 易灵芝, 何东, 王书颖, 等. 面向直流楼宇供电技术的新型多输入 Buck-Boost 变换器[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):86-92.

YI Lingzhi, HE Dong, WANG Shuhao, et al. Multi-input Buck-Boost converter for DC building power supply[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):86-92.

[16] 孙晋坤, 刘庆丰, 冷朝霞, 等. 基于效率模型的 DC-DC 变换器并联系统电流分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15):10-18.

SUN Jinkun, LIU Qingfeng, LENG Zhaoxia, et al. A current distribution strategy for parallel DC-DC converters based on the

efficiency model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15):10-18.

#### 作者简介:



严骏华

严骏华(1990—),男,上海人,硕士研究生,研究方向为多功能光伏微型逆变器(E-mail:1333659@tongji.edu.cn);

车龙华(1963—),男,江苏无锡人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量(E-mail:lhmu@tongji.edu.cn);

朱国锋(1987—),男,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为智能电网的电能质量评估(E-mail:justaway@163.com)。

## Research on phase shedding current of multiphase parallel Boost converter for PV system

YAN Junhua, MU Longhua, ZHU Guofeng

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** When the DC conversion section of PV system adopts the multiphase parallel structure, the output voltage variation of PV battery may cause the efficiency decrease of parallel system due to the phase shedding current shift, aiming at which, a phase shedding current modification algorithm is proposed based on the efficiency model of converter. With multiphase Boost converter as an example, its efficiency model is built and its phase shedding current for optimizing the overall efficiency of system is deduced. The effect of input voltage variation on the phase shedding current is analyzed. A phase shedding current modification algorithm based on the parameters of efficiency model is proposed, and its error sources, as well as the corresponding influencing levels, are analyzed. The simulative and experimental results prove that, compared with the phase shedding strategy without the consideration of PV input voltage variation, the proposed algorithm improves the operational efficiency of parallel system.

**Key words:** multiphase parallel converter; efficiency model; photovoltaic cells; phase shedding current

(上接第 70 页 continued from page 70)

## Dual-loop control with input voltage feedforward for dual-switch Buck-Boost converter

YAN Xiangwu<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, GE Xiaofeng<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station Co., Ltd., State Grid Xin Yuan Company, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** A strategy of two-mode average current control combined with input voltage feedforward is proposed for the wide input-range dual-switch Buck-Boost converter to suppress the big fluctuation of its inductive current and output voltage during the mode switching and when the input voltage fluctuates, which combines the single-carrier dual-modulation method with the average current control in the voltage-current dual close-loop configuration to improve the dynamic response performance of the converter, realize the approximately smooth and automatic switching between Buck and Boost modes, and effectively control the inductive current for the safety of equipments. The input voltage is fed forward to the inner current loop to avoid the troublesome simplification and implementation of feedforward function for traditional dual close-loop control and greatly improve the dynamic response performance of converter input. A MATLAB/Simulink model and a hardware test platform are established to verify the validity of the proposed control strategy.

**Key words:** wide input-range DC/DC; average current control method; single-carrier dual-modulation; input voltage feedforward; two-switch Buck-Boost converter