

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802403

# 基于多模式控制的储能用双向 Buck-Boost DC/DC 变换器\*

吴少雷<sup>1</sup> 肖坚红<sup>2</sup> 冯玉<sup>1</sup> 史亮<sup>1</sup> 张良<sup>3</sup>(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力有限公司 合肥 230022;  
3. 国电南瑞南京控制系统有限公司 南京 2111061)

**摘要:** 由于各种分布式能源的大量接入, 电网需要加入储能单元以平抑潮流的波动。储能系统中, 为了在宽输入、输出电压范围的情况下实现高效双向电能转换, 探讨一种基于多模式控制的双向 Buck-Boost DC/DC 变换器。当输入电压显著高于输出电压时, 变换器工作在 Buck 模式, 采用谷值电流控制。当输入电压显著低于输出电压时, 变换器工作在 Boost 模式, 采用峰值电流控制。当输入电压接近输出电压时, 变换器工作在 Buck-Boost 组合模式, 采用移相控制来实现平滑过渡。为了实现高精度的输出和快速的动态响应, 控制环路采用二型补偿器。通过 Buck 模式和 Boost 模式小部分重叠工作的方式, 消除了传统 Buck-Boost 变换器在模式切换时存在的断续现象。制作的 1 kW 实验样机具有 97.5% 的峰值效率以及 Buck 模式与 Boost 模式平滑切换的特点。

**关键词:** Buck-Boost DC/DC; 多模式控制; 双向变换器; 储能系统

**中图分类号:** TN712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Multi-mode control based bidirectional Buck-Boost DC/DC converter for energy storage

Wu Shaolei<sup>1</sup> Xiao Jianhong<sup>2</sup> Feng Yu<sup>1</sup> Shi Liang<sup>1</sup> Zhang Liang<sup>3</sup>(1. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230601, China;  
2. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China;  
3. NARI Control System Limited Inc., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Due to the high level penetration of several types of distributed energy source, storage system needs to be added in modern power system to suppress power flow fluctuation. In order to realize high efficiency bidirectional power conversion under the circumstance of wide input and output voltage range in energy storage system, a bidirectional buck-boost DC/DC converter based on multi-mode control is studied in this paper. When the input voltage exceeds the output voltage above a certain threshold, valley current mode control is employed and the converter operates as buck region. When the output voltage exceeds the input voltage above a certain threshold, peak current mode control is used and the converter operates as boost region. Furthermore, when the input voltage is similar to the output voltage, phase-shift mode control is adopted to obtain seamless transition and the converter operates in a manner of buck and boost combination. In order to realize high accuracy output and fast dynamics, Type II compensator is employed. By the approach of small portion overlapping between Buck region and Boost region, the discontinuity happened at region transition in traditional Buck-Boost converter is eliminated. 97.5% peak efficiency is achieved in the 1 kW hardware prototype and the transition between Buck region and Boost region is smooth.

**Keywords:** buck-boost DC/DC; multi-mode control; bidirectional converter; energy storage

## 0 引言

近年来, 微网中集成的分布式能源越来越多, 种类不

同, 容量各异<sup>[1-4]</sup>。分布式储能作为平抑潮流波动的重要环节, 其作用不言而喻<sup>[5]</sup>。而储能系统要想接入微网, 通常需要双向功率变换器作为接口。

收稿日期: 2018-11

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901100); 国网公司科技项目(配电网供电可靠性多维度分析与评价)资助

为了兼容不同容量电池组的电压等级,一般要求双向功率变换器能适应较宽的输入、输出电压范围。在 6 种基本 DC/DC 拓扑中,Buck-Boost 变换器以其结构简单、成本低廉的优势得到诸多研究和应用。为了实现正电压输出和双向功率流动,人们又发展出了所谓的四开关 Buck-Boost 变换器<sup>[6-8]</sup>。该变换器有两个显著的问题需要考虑,工作模式和升、降压区间的平滑过渡。对于工作模式而言,倘若采取传统的方式,即两颗主管同时开关,两颗续流管也同时开关,则会暴露经典 Buck-Boost 拓扑天然效率较低的问题。因此,目前比较流行的是级连型控制,即当输入电压显著高于输出定电压时,作为 Buck 变换器来控制;当输出电压显著高于输入电压时,作为 Boost 变换器来控制;当两者接近时,像经典 Buck-Boost 一样控制<sup>[9-10]</sup>。这就引出了第 2 个问题,当输入电压和输出电压接近时,由于占空比到输出的传递函数存在非线性,区间过渡时输出纹波较大。文献[11]在 Buck-Boost 工作区间内,采用双载波,单调制波的双沿调制方法分别产生两颗主管的占空比,从而控制区间的平滑切换。这种方法属于电压模式控制,环路补偿设计复杂,动态响应较慢。文献[12-13]的控制与文献[11]类似,用单载波,双调制波的方法实现区间过渡。但该方法本质上也是电压模式控制,具有与文献[11]同样的缺点。文献[14-15]针对射频功放的应用领域,详细探讨了四开关 Buck-Boost 在区间切换时存在的非线性现象以及导致的输出电压纹波过大问题,并且提出了降压区间和升压区间重叠工作的策略,但是牺牲了效率。文献[16]考虑了实际变换器中一些固有参数和寄生参数对区间切换的影响,通过较复杂的计算来实现占空比补偿,从而改善区间切换时的变换器特性断续和非线性的问题。该方法运算来较大,通常需要高性能数字处理器才能完成,成本较高。

本文探讨一种基于多模式控制的四开关升降压变换器。根据输入电压和输出电压的关系来决定变换器的工作模式(Buck 模式、Boost 模式和 Buck-Boost 组合模式)。当变换器工作在降压模式和升压模式时,分别采用谷值电流控制和峰值电流控制,具有效率高,控制简单,动态响应快的特点。当变换器工作在 Buck-Boost 组合模式时,采用移相控制,具有效率高,平滑切换的特点。

## 1 变换器的工作模式

传统的 Buck-Boost 拓扑具有器件电气应力大,效率较低等天然劣势。图 1 中为采用传统工作模式的四开关 Buck-Boost 变换器各功率器件的电气应力情况。可以看出,由于电感电流的平均值为输入电流和输出电流之和,因此,采用传统工作模式的四开关 Buck-Boost 中的开关器件和电感都具有电压、电流应力大的特征,从而导致较大的导通损耗和开关损耗,效率较低。倘若采取级联型工作模式,即当输入电压大于输出电压时,S3 始终关闭,S4 始终开通,变换器工作在 Buck 模式;当输入电压小于输出电压时,

S1 始终开通,S2 始终关闭,变换器工作在 Boost 模式,这样就能汲取 Buck、Boost 变换器应力较小,效率较高的优势。

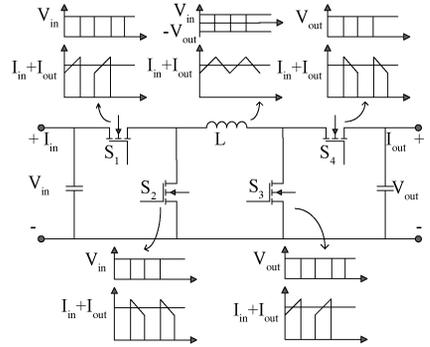


图 1 传统四开关 Buck-Boost 变换器应力情况

需要注意的是,当输入电压与输出电压接近或完全相同时,由于实际电路中通常存在最大占空比和最小占空比的限制、传输延时、死区时间、开关噪声、功率器件非线性等因素,四开关 Buck-Boost 变换器从控制信号  $V_c$  到输出的传递函数具有断续和非线性的特性,从而导致在工作区间切换时,输出会出现较大的振荡或纹波,传递函数的特性如图 2 所示,其中的  $d$  表示输出电压与输入电压的比值。因此,在工作区间切换时,需要特别的控制设计来尽量确保平滑过渡。

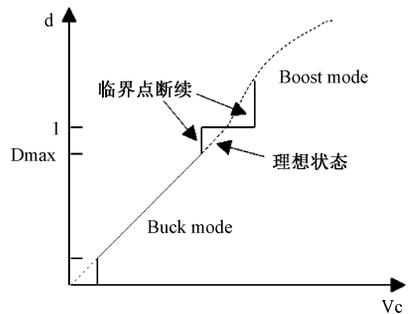


图 2 从控制到输出的传递特性

## 2 多模式控制策略

如前文讨论,为了使四开关 Buck-Boost 变换器获得高效率,应根据输入电压和输出电压的关系,使其分别工作在 Buck 模式和 Boost 模式。当输入电压和输出电压接近或相同时,本文采用移相控制的方法,使其工作在 Buck 和 Boost 相结合的模式,如图 3 所示。

图 4 简要描绘了变换器的控制逻辑。由于 Buck 模式和 Boost 模式分别采用谷值电流控制和峰值电流控制,因此斜坡补偿的波形倾斜的方向想法,可以利用先进微控制器中的可编程斜坡发生器灵活产生。电感电流的采样通过开尔文接触式采样电阻 R1 实现。由于变换器双向功率转换,分压电阻 R2、R3 以及 R4、R5 分别采样输入电压和输

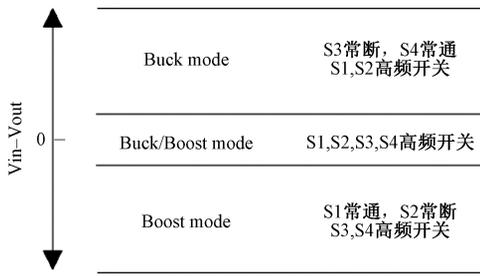


图 3 变换器的工作模式

输出电压进入经过阻容补偿的电压环控制器。电感电流采样结果加入相应的斜坡补偿后再与电压环的输出信号  $V_c$  相比较,再去驱动相应的控制逻辑和 MOSFET 驱动电路。

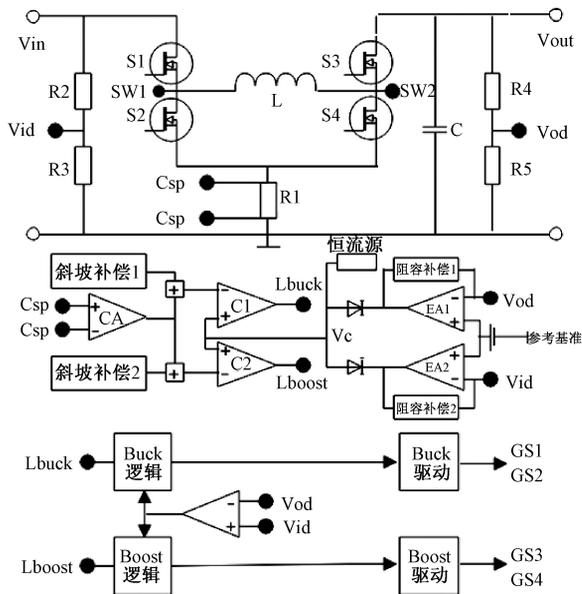


图 4 变换器的控制电路

由于控制电路的实施均基于电流控制模式,因此通常通过 II 型补偿器的设计来获得足够的相位余量和增益余量,从而保证足够的变换器输出精度和良好的动态响应。II 型补偿器的设计如图 5 所示,其传递函数如式(1)所示。

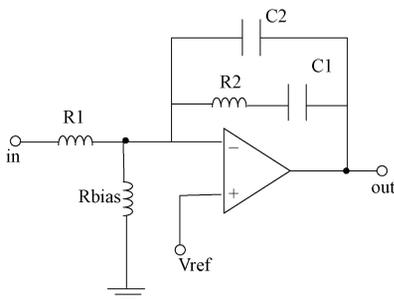


图 5 II 型补偿器

$$G(S) = \frac{1 + SR_2C_1}{SR_1(C_1 + C_2) \left(1 + SR_2 \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}\right)} \quad (1)$$

2.1 基于谷值电流控制的 Buck 模式

当输入电压显著高于输出电压时,控制变换器工作在 Buck 模式。在此模式中, S3 始终关断, S4 一般情况下始终导通,除非在电感电流断续情况下检测到逆向电流。在每个开关周期开始时, S2 首先开通,电感电流被 CA 采样后加上斜坡补偿再与控制信号  $V_c$  进行比较。当电感电流小于  $V_c$  时, S2 关断, S1 开通,如图 6 所示。

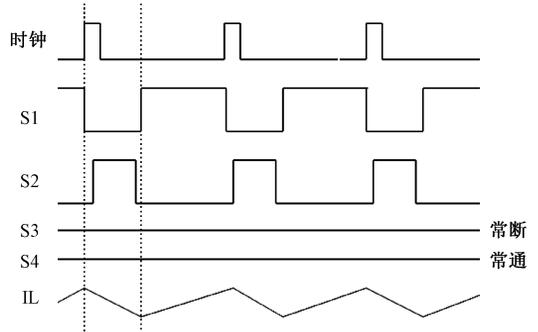


图 6 Buck 模式的谷值电流控制

变换器工作在 Buck 模式时,开关 S2 的占空比可表示为:

$$D_{bus2} = (1 - V_{OUT}/V_{IN}) \quad (2)$$

当输入电压和输出电压接近时, S2 的占空比逐渐减小。为了保证自举驱动的可靠、稳定工作, S2 需要预留足够的导通时间给自举电容充电。因此,当占空比低于  $D_{bus2,MIN}$  时,变换器将进入 Buck-Boost 工作模式。

2.2 基于峰值电流控制的 Boost 模式

当输入电压显著低于输出电压时,控制变换器工作在 Boost 模式。在此模式中, S1 始终导通, S2 始终关断。在每个开关周期开始时, S3 首先开通,电感电流被 CA 采样后加上斜坡补偿再与控制信号  $V_c$  进行比较。当电感电流大于  $V_c$  时, S3 关断, S4 开通,如图 7 所示。

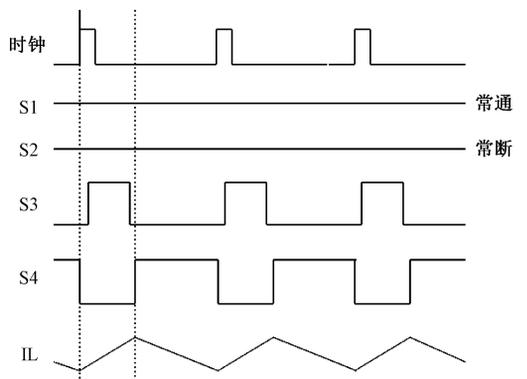


图 7 Boost 模式的峰值电流控制

变换器工作在 Boost 模式时, S2 的占空比可表示为:

$$D_{\text{bos3}} = (1 - V_{\text{IN}}/V_{\text{OUT}}) \quad (3)$$

当输入电压和输出电压接近时, S3 的占空比逐渐减小。为了保证自举驱动的可靠、稳定工作, S3 需要预留足够的导通时间给自举电容充电。因此, 当占空比低于  $D_{\text{bos3, MIN}}$  时, 变换器将进入 Buck-Boost 工作模式。

### 2.3 基于移相控制的 Buck-Boost 模式

当输入电压与输出电压接近或相等时, 控制变换器工作在 Buck-Boost 组合模式。在每个开关周期开始时, 当控制电路先开通 S2、S4 时, 在前半个开关周期变换器首先工作在 Buck 模式。当 PWM 比较器 C1 动作后, S2 关断, S1 开通, 直到半个开关周期结束。后半周期开始时, S3 开通, S4 关断, 变换器工作在 Boost 模式。当 PWM 比较器 C2 动作时, S3 关断, S4 开通, 直到整个开关周期结束。如果在一个开关周期开始时, 控制电路先开通 S1、S3, 则变换器在前半个周期工作在 Boost 模式。当 PWM 比较器 C2 动作后, S3 关断, S4 开通, 直到半个开关周期结束。后半周期开始时, S1 关断, S2 开通, 变换器工作在 Buck 模式。当 PWM 比较器 C1 动作时, S1 开通, S2 关断, 直到整个开关周期结束, 如图 8 所示。

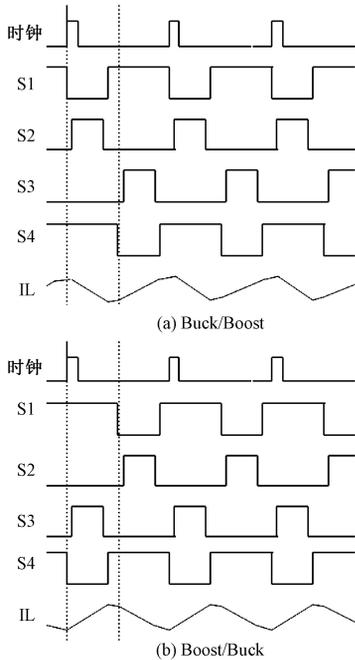


图 8 Buck-Boost 组合模式的移相控制

当变换器穿越临界切换点时, 通过移相的控制方式将 Buck 模式与 Boost 模式部分重叠, 以各自连续的控制到输出传输特性来相互补偿切换点存在的断续和非线性特性, 很大程度上提升了过渡的平滑性。

## 3 仿真与硬件实验

在仿真软件 Simplis 中搭建了变换器的电路模型, 包括

主电路和控制电路, 保护电路未包含在内。限于篇幅原因, 这里只给出变换器工作在 Buck 模式时的时钟信号, S1 的驱动信号和电感电流波形, 如图 9 所示。

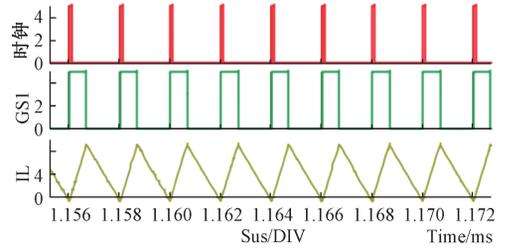


图 9 Buck 模式时钟, 驱动及电感电流仿真波形

在实验室制作了 1 kW 小功率实验样机对文中探讨的控制策略进行验证。部分主要器件的参数设置如表 1 所示。功率开关选择英飞凌公司额定电压 100 V, 最大电流 316 A 的 HEXFET, 型号为 IRF100P219, 其在 25 °C 环境下的通态电阻典型值仅为 1.4 mΩ。

表 1 主要器件的参数设置

参数	数值
输入电压	24~48 V
输出电压	36 V
输入电容	100 μF
输出电容	470 μF
电感	65 μH
最大功率	1 kW
开关频率	200 kHz

图 10 为变换器工作在 48 V 输入, 36 V 输出时的开关节点 SW1、SW2 波形以及电感电流 IL 波形。

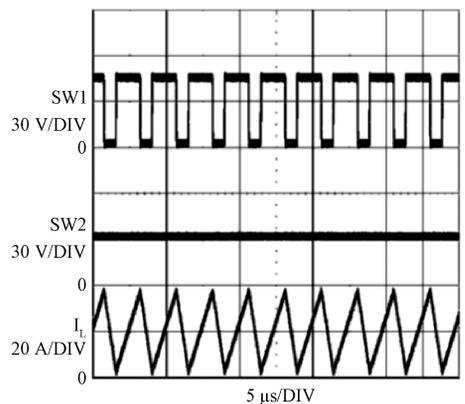


图 10 输入 48 V、输出 36 V 时开关节点及电感电流波形

可以看出, 此时变换器稳定工作在 Buck 模式, 开关节点 SW2 的电压始终等于输出电压。

图 11 为变换器工作在 24 V 输入, 36 V 输出时的开关节点 SW1、SW2 波形以及电感电流 IL 波形。可以看出, 此时变换器稳定工作在 Boost 模式。开关节点 SW1 的电压

始终等于输入电压。

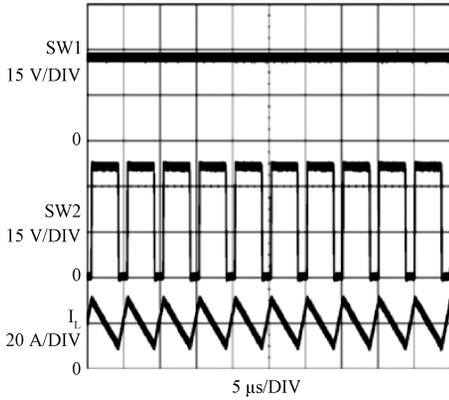


图 11 输入 24 V、输出 36 V 时开关节点及电感电流波形

图 12 为变换器工作在 36 V 输入、36 V 输出时的开关节点 SW1、SW2 波形以及电感电流  $I_L$  波形。

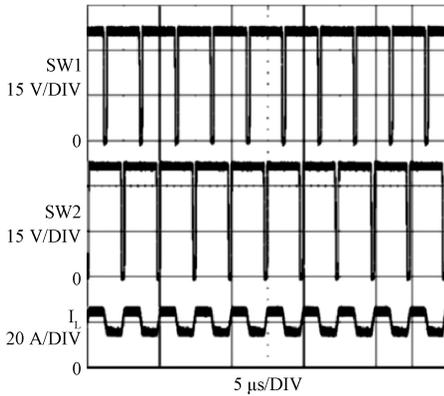


图 12 输入 36 V、输出 36 V 时开关节点及电感电流波形

此时变换器工作在 Buck-Boost 组合模式。从图中波形可以看出,当输入电压和输出电压相等时,电感电流规则且稳定,过渡平滑。

图 13 为输入 48 V、输出 36 V 时变换器在 10% 负载时

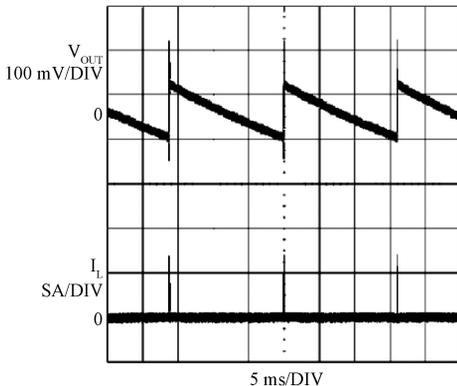


图 13 输入 48 V、输出 36 V 时,变换器在 Burst 模式下输出纹波及电感电流波形

进入 Burst 模式时输出电压纹波及电感电流  $I_L$  波形,打嗝的间隔约为 17 ms,纹波的峰峰值约为 120 mV。

图 14 为输入 48 V、输出 36 V 时变换器的效率情况,峰值效率为 97.5% 左右,发生在约 65% 负载的情况下。20% 负载至 100% 负载的效率均在 96% 以上。

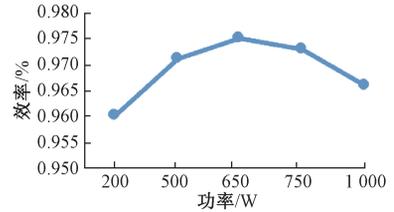


图 14 输入 48 V、输出 36 V 时的效率曲线

## 4 结 论

本文研究了一种基于多模式控制的储能用双向 Buck-Boost DC-DC 变换器。根据输入电压和输出电压的大小关系,变换器分别工作在基于谷值电流控制的 Buck 模式,基于峰值电流控制的 Boost 模式和基于移相控制的 Buck-Boost 组合模式。基于电流控制的该变换器采用 II 型补偿器进行环路补偿,具有输出精度高和动态响应快的特点。同时,由于 Buck 变换器和 Boost 变换器本身控制到输出的传输特性的连续性,通过 Buck 模式和 Boost 模式小部分重叠工作的方式,消除了传统 Buck-Boost 变换器在模式切换时存在的断续现象。1 000 W 实验样机具有 97.5% 的峰值效率以及 Buck 模式与 Boost 模式平滑过渡的特点。

## 参考文献

- [1] ZHOU X, GUO T, MA Y. An overview on microgrid technology[C]. Proceedings of IEEE ICMA, 2015: 76-81.
- [2] 孙佳, 陶晔. 新能源微电网负载自动匹配系统[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 78-81.
- [3] 付子义, 王艺龙. 基于主从结构微网控制策略运行分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 6-10.
- [4] 刘喜梅, 贺瑞, 张鹏. 直流微电网电压平衡器的控制策略[J]. 电子测量技术, 2015, 10: 32-35.
- [5] KONDRATH N. Bidirectional DC-DC converter topologies and control strategies for interfacing energy storage systems in microgrids; an overview [C]. Proceedings of IEEE SEGE, 2017: 341-345.
- [6] ORELLANA M, PETIBON S, ESTIBALS B, et al. Four switch buck-boost converter for photovoltaic DC-DC power applications [C]. Proceedings of IEEE IECON, 2010: 469-474.
- [7] YUN H, DONG M, JIAN Y, et al. Application of soft-switching technology in four switch buck-boost circuit [C]. Proceedings of IEEE ICIEA, 2017:

- 1675-1679.
- [8] REN X, TANG Z, RUAN X, et al. Four switch buck-boost converter for telecom DC-DC power supply applications[C]. Proceedings of IEEE APEC, 2008: 1527-1530.
- [9] REN X, RUAN X, QIAN H, 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.
- [10] ZHANG N, BATTERNALLY S, LIM K, et al. Analysis of the non-inverting buck-boost converter with four-mode control method[C]. Proceedings of IEEE IECON, 2017: 876-881.
- [11] REN X, RUAN X, QIAN H, et al. Dual-edge modulated four-switch buck-boost converter [C]. Proceedings of IEEE PESC, 2008: 3635-3641.
- [12] YUAN C, RUAN X, CAO W, et al. A two-mode control scheme with input voltage feed-forward for the two-switch buck-boost DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 2037-2048.
- [13] ISHII T, YOSHIDA M, MOTOMORI M, et al. Buck-boost converter. U.S. Patent 7 268 525, 2007.
- [14] RAJARSHI P, MAKSIMOVIC D. Smooth transition and ripple reduction in 4-switch non-inverting buck-boost power converter for WCDMA RF power amplifier[C]. Proceedings of IEEE ISCAS, 2008: 3266-3269.
- [15] RAJARSHI P, MAKSIMOVIC D. Analysis of PWM nonlinearity in non-inverting buck-boost power converters[C]. Proceedings of IEEE PESC, 2008: 3741-3747.
- [16] LEE Y, 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.

### 作者简介

吴少雷, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电技术管理、分布式电源与微电网。

E-mail: Wusl081x@ah.sgcc.com.cn

肖坚红, 本科, 正高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

史亮, 硕士, 高级工程师, 从事配电网运维检修工作。

冯玉, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电技术管理。

张良, 本科, 工程师, 研究方向为用电信息采集、电动汽车等智能用电方向。

E-mail: zl\_nari@163.com