

基于新型高增益Boost变换器的仿真研究

丁 敏 吴桂清 胡 锦

(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 420006)



丁 敏 男 1992年生, 硕士研究生, 主要研究方向为航天器电源系统设计。



吴桂清 男 1966年生, 教授, 主要研究方向为开关电源、嵌入式系统及应用等。

摘要: 高增益 DC/DC 变换器在光伏、新能源以及航空航天等领域得到了广泛的应用。为了提高 Boost 电路在高增益应用场合的可靠性, 提出一种新型高增益 Boost 变换器。该新型变换器在传统的 Boost 电路上加入了开关电容单元和耦合电感升压单元, 电路可用较合理的占空比得到高输出电压, 而且减小了开关管的电压应力和输入电流纹波, 提高了变换器的效率。详细分析了电路的工作原理与稳态特性, 给出了电路控制策略, 在此基础上通过 PSIM 仿真软件进行了实验验证。仿真实验结果表明, 该新型高增益 Boost 变换器在理论上是正确可行的。

关键词: 高增益 Boost 电路 耦合电感 仿真

中图分类号: TM46

Simulation Research Based on a New High Gain Boost Converter

Ding Min Wu Guiqing Hu Jin

(Electrical and Information Engineering of Hunan University

Changsha 420006 China)

Abstract: High gain DC/DC converters have been widely used in photovoltaic, new energy, aerospace and other fields. In order to improve the reliability of Boost circuits in high gain applications, a new high gain Boost converter is proposed. The new converter added the switched capacitor unit and the coupling inductor lift unit on the traditional Boost circuit. The circuit can get the high output voltage with a reasonable duty cycle, and also reduce the voltage stress and the input current ripple of the switch tube, thus improving the efficiency of the converter. In this paper, the working principle and steady state characteristics of the circuit are analyzed in detail, and the control strategy of the circuit is given. On the basis of the theory, the experimental verification is carried out by using PSIM simulation software. The simulation results show that the new high gain Boost converter is theoretically correct and feasible.

Keywords: High gain Boost circuits, coupled inductor, simulation

1 引言

能源短缺是全世界亟待解决的问题。随着光伏、风力发电以及燃料电池等新能源的出现，可再生能源的并网发电系统需要更高电压传输比的直流功率变换器^[1]。由于非离线式功率拓扑具有体积小的优点，受到了科研工作者的广泛青睐。可实现升压的非隔离式电路主要有 Boost、Buck-Boost 以及其余各种衍生电路。但 Buck-Boost 电路只有当稳态占空比 $D > 0.5$ 时才能实现升压功能，且输出电压极性反相，因此能在 $0 < D < 1$ 范围内实现升压的 Boost 电路是并网系统中提高输出电压的首选。

传统的 Boost 电路的电压增益为 $1/(1-D)$ ，当 D 无限趋近于 1 时，电路输出电压能达到无穷大，但实际上由于电容、电感等元器件的耐压和耐流能力有限，无法通过极大占空比来提高电路增益。目前已有文献提出了提高 Boost 电路增益的一些方法。其中，文献[1]利用电感和电容并联充电、串联放电的特性提出了一种单管双电感高增益 Boost 变换器，该变换器结构简单，易于控制，与本文所提电路相比，文献[1]所提电路所用元件少，可适当减小变换器体积、质量以及节约成本，但是增益提高范围较窄，只比传统 Boost 变换器提高了两倍；文献[2]提出了一种带开关电容网络的交错并联式高增益 Boost 变换器，该新型拓扑结构能降低输入电流纹波，且能提高电路增益，但较传统 Boost 变换器增益而言，只提高了 $2(1+D)$ 倍，且并联结构引入的开关管，增加了开关损耗，不利于提高效率；文献[3]结合电压自举技术和二次型变换器宽输入电压范围的特点，提出了一种新型的高增益变换器，但自举升压单元提高增益的能力有限；文献[4]结合开关电感、开关电容以及自举电压技术，提出了一种高增益、高效率的 Boost 变换器，该变换器确实提高了电路增益，但输入电流纹波依然较大；文献[5]引入耦合电感倍压单元和零输入电流纹波单元，以提高变换增益和降低输入电流纹波，但该新型拓扑结构工作复杂，参数设计较为繁琐，不易控制。

本文结合开关电容单元和耦合电感倍压单元，提出一种新型的高效率、高增益、低输入电流纹波的 Boost 变换器。

2 变换器结构及其工作原理

2.1 变换器拓扑

传统的 Boost 电路结构如图 1 所示，当电路工

作于电感电流连续模式（Current Continues Mode, CCM）时，电路的增益为

$$M = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

式中， M 为电路增益； V_0 、 V_{in} 分别为输出电压和输入电压； D 为电路稳态增益。

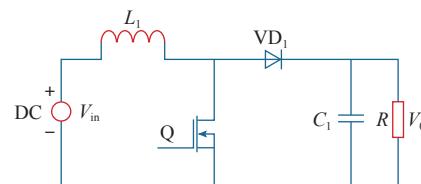


图 1 传统 Boost 变换器拓扑

Fig.1 Traditional Boost converter topology

传统的 Boost 变换器升压能力有限。为了在相同占空比情况下实现更高的输出电压，本文提出了一种新型的高增益 Boost 电路，该电路结构如图 2 所示。新型 Boost 电路在传统的 Boost 电路基础上，引入了开关电容和耦合电感倍压单元，以此来提高电路增益，降低开关管应力和减小输入电流纹波，提高效率。电路由耦合电感 L_1 、 L_2 ，二极管 $VD_1 \sim VD_4$ ，电容 $C_1 \sim C_5$ ，输入电压源 V_{in} ，开关管 Q ，以及负载电阻 R 构成。

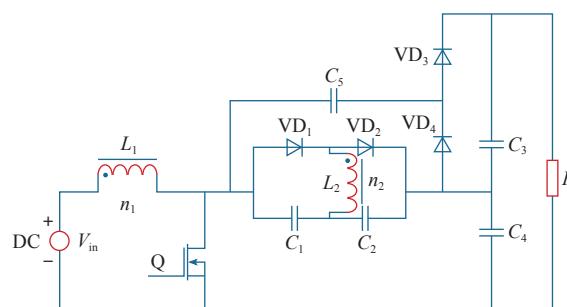


图 2 新型高增益 Boost 电路

Fig.2 New high gain Boost converter

2.2 工作原理

为了简化分析，在原理分析前先作如下假设：
① 电路工作在 CCM 模式；② 电路元件均为理想元件；③ 开关频率远远大于特征频率；④ 电路负载为纯阻性负载；⑤ 耦合电感 L_1 、 L_2 的耦合系数为 1。

当电路工作于稳态时，根据开关管在一个开关周期 T 里的开关状态，电路共有两种工作模态。

(1) 模态 1 ($t_0 \leq t \leq t_0 + dT$)。开关管 Q 导通，

二极管 VD_1 、 VD_3 因反偏而截止， VD_2 和 VD_4 正向导通。由图 3 可知（图中实线表示开通；虚线表示关断），输入电压 V_{in} 给 L_1 充电，电感电流线性上升。由于耦合电感的作用， L_2 通过 VD_2 给 C_2 充电，一方面 C_4 通过 VD_4 给 C_5 充电，另一方面 C_4 和 C_3 给负载供电。

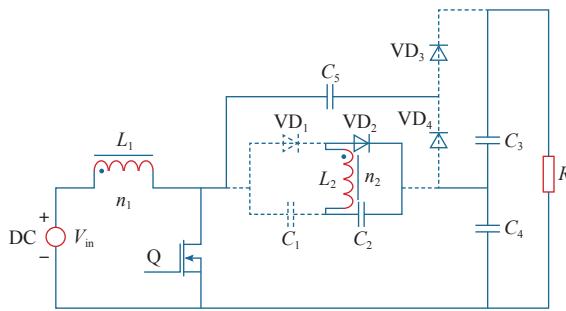


图 3 模态 1

Fig.3 Mode 1

此时，根据环路电压定理，可得各器件的电压以及输入电感电流的关系式为

$$i_{L1}(t) = I_{L1}(t_0) + \frac{V_{in}}{L_1}(t - t_0) \quad (2)$$

$$V_{C2}(t) = \frac{V_{in}}{N} \quad (3)$$

$$V_{C3}(t) + V_{C4}(t) = V_0 \quad (4)$$

$$V_{C3}(t) = V_{Cs}(t) \quad (5)$$

$$V_{L1}(t) = V_{in} \quad (6)$$

式中， d 为任意周期开关占空比； $i_{L1}(t)$ 为 t 时刻流过电感 L_1 的电流，其余相似各项以此类推； N 为电感 L_1 与电感 L_2 的匝数比。

(2) 模态 2 ($t_0 + dT \leq t \leq t_0 + T$)。开关管 Q 关断， VD_2 、 VD_4 因反偏而截止， VD_1 、 VD_3 正向导通，此时电感 L_1 电压极性反相，电流线性下降。由图 4 可知， L_2 给 C_1 充满电， C_3 、 C_4 给负载供电，此时电路各器件电压与电感 L_1 的电流关系为

$$i_{L1}(t) = \frac{V_{Cs}(t) + V_0 - V_{in}}{L_1}(t - t_0 - dT) \quad (7)$$

$$V_{Cs}(t) = V_{C3}(t) + V_{C2}(t) + V_{C1}(t) \quad (8)$$

$$V_{in} = V_{C4}(t) - V_{L1}(t) - V_{C2}(t) - V_{C1}(t) \quad (9)$$

电路工作在 CCM 时，电路的主要波形如图 5 所示。

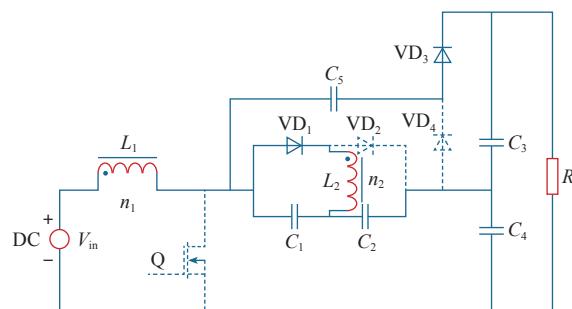


图 4 模态 2

Fig.4 Mode 2

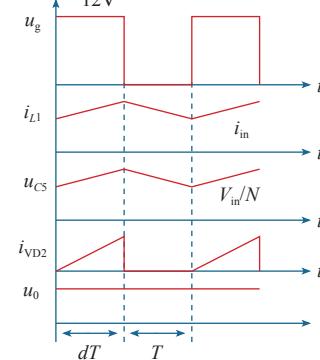


图 5 新型高增益 Boost 电路的主要工作波形

Fig.5 The main waveforms of new high gain Boost converter

3 高增益 Boost 变换器的特性分析

3.1 稳态特性

当电路工作于稳态时，电感看作是短路，电容看作断路。根据式 (2) ~ 式 (9)，结合伏秒积平衡原理，可得

$$DV_{in} = (1-D) \left[\frac{V_0}{2} - \frac{V_{in}(1+N^2)}{N^2} \right] \quad (10)$$

式中， N 为绕制在同一磁心上的耦合电感 L_1 与耦合电感 L_2 的匝数比。

所以电路的增益 M 为

$$M = 2 \left(\frac{1}{N^2} + \frac{1}{1-D} \right) \quad (11)$$

从式 (11) 可以看出，电路的增益比传统的 Boost 变换器增益至少提高了两倍。

3.2 电压应力分析

电路的电压应力对原理图参数设计与器件选型至关重要。尤其是这种 DC/DC 开关电路，电路损耗绝大部分来自于功率开关管的开关损耗与导通损

耗，这种损耗影响在高频电路尤为突出。所以开关管 Q 所承受的电压应力为

$$V_Q = V_0 - V_{C5} \quad (12)$$

式中， V_Q 为开关管 Q 两端的电压大小。

各二极管所承受的电压应力分别为

$$\begin{cases} V_{VD1} = V_{VD2} = V_{C1} \\ V_{VD3} = V_0 - V_{C4} \\ V_{VD4} = V_{C3} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 电压增益比较分析

现有文献提出的几种提高增益的方法对比见表 1。

表 1 电压增益比较

Tab.1 Voltage gain comparison

增益提高方法	电路增益 M
基于开关电容网络与并联交错结构	$3/(1-D)$
自举升压与二次变换相结合	$1+1/(1-D)$
开关电感、开关电容与自举升压相结合	$3(1+D)/(1-D)$
本文提出的方法	$2[1/N^2 + 1/(1-D)]$

根据表 1，当 $D \leq (2-N)/(2+3N)$ 时，本文所提出的提高电路增益的方法在相同占空比情况下，增益提高效果比开关电感、开关电容与自举升压相结合的方法要明显。

4 电路控制策略

电路采用峰值电流型 PWM 控制方法，控制器选择经典的 PI 控制，其控制框图如图 6 所示。双环控制方式中，电流内环可提高响应速度，电压外环保障系统稳态精度。PI 控制器的传递函数为

$$G(s) = K \frac{1+s\tau}{s\tau} \quad (14)$$

式中， K 为比例系数； τ 为延时时间； s 为复频域变量。

为了使系统稳定可靠，取电压环的比例系数 $K=0.01$ ， $\tau=5\text{ms}$ ；取电流环的 $K=10$ ， $\tau=10\text{ms}$ 。

图 6 中， G_c 为高增益 Boost 电路的电压补偿器传递函数（即 PI 控制器传递函数）； H_v 为电压采样函数； H_c 为电流采样函数； F_g 、 F_m 、 F_v 为与稳态占空比、开关周期以及斜坡补偿等相关的扰动量系数； G_{vg} 、 G_{vd} 、 G_{ig} 、 G_{id} 分别为输出 - 输入、输出 - 控制、电感电流 - 输入、电感电流 - 控制的传递函

数； Δv_{in} 为输入电压的扰动量，其余扰动量以此类推。

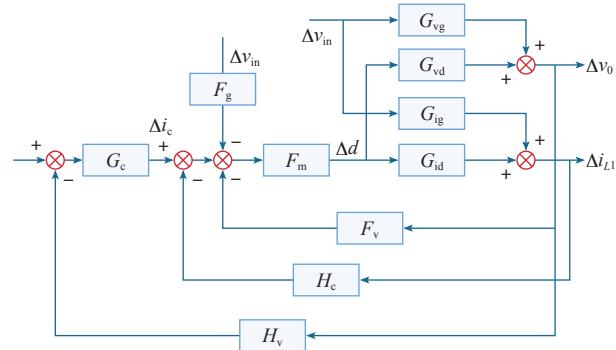


图 6 控制框图

Fig.6 Control block

5 仿真验证

5.1 PSIM 仿真验证

PSIM 是趋向于电力电子领域以及电机控制领域的仿真应用包软件，其全称是 Power Simulation，主要由 SIMCAD 和 SIMVIEM 两个软件来组成，具有仿真速度快、界面友好以及可进行波形解析等优点。本文中实验采用 PSIM 仿真环境，在实验验证前先给出高增益 Boost 电路的实验参数，见表 2。

表 2 实验参数与指标

Tab.2 Experimental parameters and indexes

参 数	指 标	参 数	指 标
输入电压 V_{in}/V	12	储能电容 $C_3/\mu\text{F}$	270
输出电压 V_0/V	80 ± 5	储能电容 $C_4/\mu\text{F}$	68
输出功率 P_0/W	140	储能电容 $C_5/\mu\text{F}$	68
开关频率 f/kHz	63	储能电感 L_1/mH	0.5
储能电容 $C_1/\mu\text{F}$	10	储能电感 L_2/mH	1
储能电容 $C_2/\mu\text{F}$	10	负载电阻 R/Ω	57

开关稳态占空比为 0.5，采样时间设置为 0.6s，采样步长设置为 $1\mu\text{s}$ 。图 7 为本文提出的新型高增益 Boost 电路的仿真实验波形。

图 7a 为输入与输出电压波形，可见当输入电压为 12V 时，输出在稳态时为 80V；图 7b 为输出电压与开关管 Q 的电压应力波形，可见开关管电压应力为输出电压的 1/2，降低了开关管的电压应力，在实际应用中可选较低耐压的开关管，减小开关损耗与导通损耗；图 7c 为电容 C_5 与二极管 VD_1 的电压应力波形，电容 C_5 两端电压为输出电压的 1/2，这与式 (12) 相符，提高了电路的可靠性；图 7d 为设

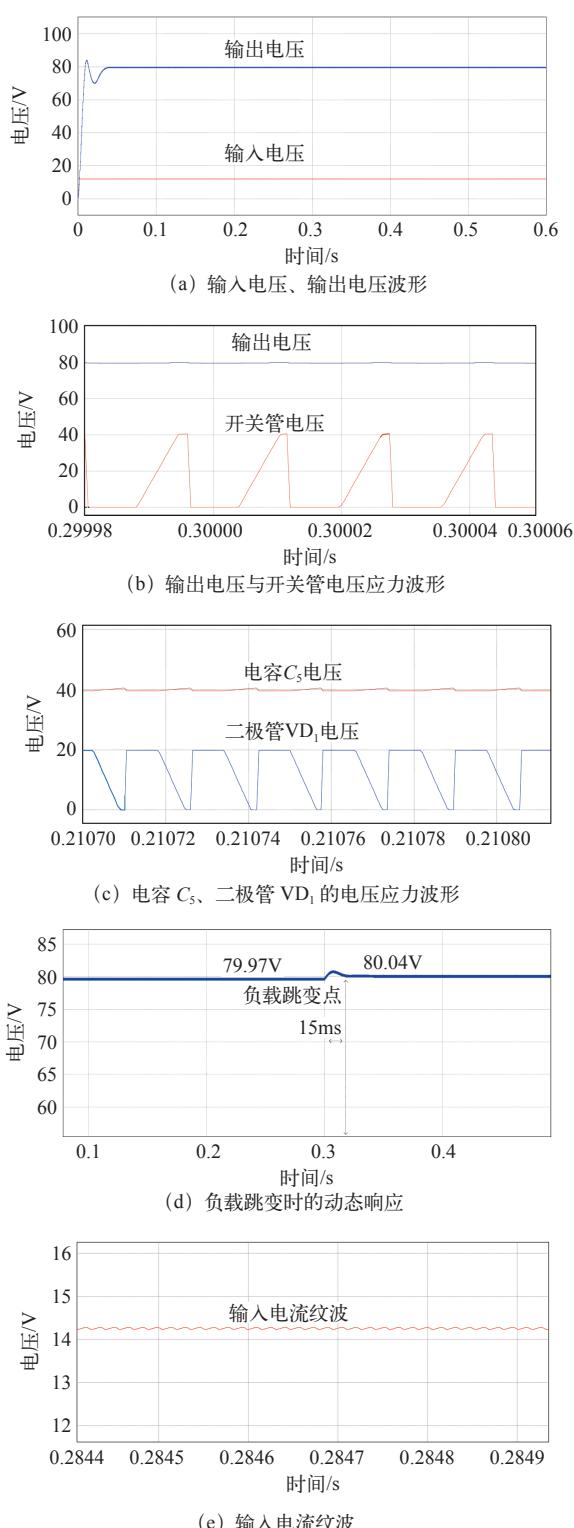


图 7 新型高增益 Boost 电路仿真实验波形
Fig.7 Simulation waveforms of new high gain Boost converter

置系统运行于 0.3s 时，输出电压突然增大 10V 的负载动态响应，图中响应速度大约为 15ms，稳态电压为 80.04V，稳态性能良好，说明控制策略有效；图 7e 为输入电流纹波，图中纹波较小，说明该电路能

有效抑制输入电流纹波。

上述实验结果验证了理论分析的正确性。

5.2 实验效率分析

本文提出的新型高增益 Boost 变换器在额定输出功率状态下的仿真效率为 82.16%，随着负载从空载到满载的变化，可得出该新型高增益变换器的效率变化趋势，如图 8 所示。

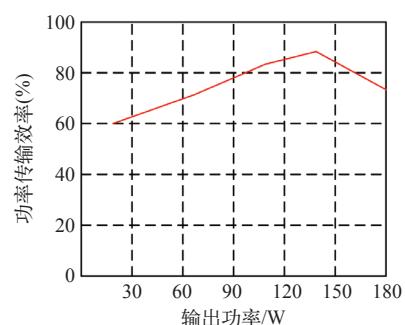


图 8 效率变化曲线

Fig.8 Efficiency change curve

由图 8 效率曲线可知，系统效率随输出功率先增大后减小，额定负载时的效率最高，为 82.16%，仿真时效率不高是因为仿真模型中的开关管完全关断的时间较长，大约为 $0.3(1-D)T$ （见图 7b），从而导致系统关断损耗较大，使得系统总体效率下降。在实际的电路应用中，开关管的开通与关断时间较短，系统效率会比仿真效率高。

6 结论

本文提出的应用于可再生能源并网发电系统的直流传输高增益 Boost 变换器，结合了电感耦合倍压单元和开关电容升压单元，使得该变换器具有电感电流连续、电压增益高等优点，在相同占空比状态下，输出直流稳态电压具有更高的电压值，同时还降低了开关管和二极管电压应力。电路可选择具有更小导通电阻的功率开关管来降低开关损耗和导通损耗^[6]。本文介绍了工作原理，推导了变换器稳态特性，在闭环控制策略下，系统具有良好的动态性能和稳定性。效率曲线分析表明，合理设计电路，可使电路工作于最佳效率点。实验仿真结果证明该变换器是可行的。

参考文献

- [1] 吴贵洋, 章家岩, 李永超, 等. 一种单管双电感高增益 Boost 变换器 [J]. 电力电子技术, 2017,

- 51(5): 14-16.
- Wu Guiyang, Zhang Jiayan, Li Yongchao, et al. Single-switch high step-up converter with double-inductor[J]. Power Electronics, 2017, 51(5): 14-16.
- [2] 陆治国, 郑璐瑶, 马召鼎, 等. 带开关电容网络的交错并联高增益 Boost 变换器 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 153-159.
- Lu Zhiguo, Zheng Luyao, Ma Zhaoding. Interleaved high gain Boost converter with switch capacitor network[J]. Transactions of China Eletrtechnical Society, 2012, 27(11): 153-159.
- [3] 张士宇, 许建平, 杨平. 新型单开关高增益 Boost 变换器研究 [J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3): 12-15.
- Zhang Shiyu, Xu Jianping, Yang Ping. Research on a new single-switch high gain Boost converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 12-15.
- [4] 唐丽, 曾怡达, 谭金练, 等. 新型高效高增益 Boost 变换器的研究 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 17-23.
- TangLi, Zeng Yida, Tan Lianjin, et al. Research on a novel high efficiency high gain Boost converter[J]. Power Electronics, 2017, 51(11): 17-23.
- [5] 高伟, 罗全明, 张阳, 等. 一种零输入电流纹波高增益 DC-DC 变换器 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 284-292.
- Gao Wei, Luo Quanming, Zhang Yang, et al. A high step-up DC-DC converter with zero input current ripple[J]. Transactions of China Eletrtechnical Society, 2018, 33(2): 284-292.
- [6] 马智文, 曾怡达, 杨辉金. 一种新型开关电感、开关电容的高增益 Boost 变换器 [J]. 电源学报, 2018, 16(2): 119-123.
- Ma Zhiwen, Zeng Yida, Yang Huijin. A new high-gain Boost converter based on switched inductor/capacitance[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 119-123.