

文章编号: 2095-4980(2022)02-0176-05

基于耦合电感高增益 Buck-Boost 变换器小信号建模

高鹏飞¹, 李克艰¹, 刘红霞², 申文娟¹, 刘科满¹

(1.西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2.中国航天科技集团公司第九研究院 第七七一研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 基于耦合电感的高增益变换器在新能源发电和直流微电网中均有良好的应用前景。论文在分析基于耦合电感的高增益升降压(Buck-Boost)变换器工作原理的基础上, 采用开关流图法建立变换器的模型, 详细推导了变换器的稳态模型和交流小信号模型; 电力仿真(PSIM)软件对变换器小信号模型的仿真结果证明论文模型的正确性。论文结果对高增益 DC/DC 变换器控制回路的设计具有较高的参考价值。

关键词: 耦合电感; 高增益; Buck-Boost 变换器; 开关流图法; 小信号模型

中图分类号: TN624; TM132

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020239

Small signal modeling for high step-up Buck-Boost converter based on coupled inductor

GAO Pengfei¹, LI Kejian¹, LIU Hongxia², SHEN Wenjuan¹, LIU Keman¹

(1.School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 2.The 771 Research Institute, The Ninth Research Institute, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an Shaanxi 710119, China)

Abstract: The high gain converter based on coupled inductance has a good application prospect in both new energy generation and DC microgrid. The operating principle of high gain Buck-Boost converter based on coupled inductance is analyzed, the switching flow diagram method is adopted to establish the converter model, and the steady state model and AC small signal model are derived in detail. The simulation results of Power SIMulation(PSIM) software on the converter small signal model prove the correctness of the proposed model. The results of this paper have high reference value for the design of control circuit of high gain DC/DC converter.

Keywords: coupled inductor; high gain; Buck-Boost converter; switching flow-graph method; small signal model

石化类能源的消耗, 使新能源发电技术得到广泛关注^[1]。由于太阳能电池和燃料电池等产生直流电的电压通常较低, 不能满足并网和未来接入直流微电网的需求, 因而高增益 DC/DC 变换器作为新能源并网以及直流微电网的接口吸引了大量学者的研究兴趣^[2]。变换器级联、开关电容、开关电感和耦合电感是最常见的构造高增益方法。但变换器级联随着级联级数增加, 变换器损耗增加, 效率下降^[3-4]。开关电容技术通常只能实现整数倍输入电源电压的输出, 且通常需要多个开关电容网络级联来实现较高的增益, 会降低变换器稳定性^[5]。开关电感变换器中的二极管电感网络, 不仅没有减小功率开关管的电压应力, 反而形成较高的导通损耗^[6]。基于耦合电感变换器可以通过调节耦合电感的比例系数实现增益的调节, 降低开关管电压应力和损耗, 通过占空比调节输出电压, 实现较高的电压增益^[7], 是一种较为理想的实现高增益 DC/DC 变换器方法。状态空间平均法和开关元件平均模型法等变换器的建模中都已取得理想的效果^[8], 但由于高增益耦合电感的引入, 增加了变换器工作状态, 变换器的建模难度也随之加大, 传统建模方法很难满足需求。论文对耦合电感 Buck-Boost 变换器工作原理进行深入分析, 采用开关流图建模法推导变换器的模型。采用 PSIM 软件对建立的模型进行了仿真验证。论文的建模方法较传统的建模物理意义突出, 可直观求得系统变量关系, 具有简化计算、方便快捷等优点。

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71006103); 西安市科技计划项目资助(Z18134)

1 高增益 Buck-Boost 变换器工作原理

基于耦合电感的高增益 Buck-Boost 变换器如图 1(a)所示，传统变换器中的电感被中心抽头电感替代。中心抽头电感用励磁电感 L_m 和变比为 N_2/N_1 的理想变压器并联来等效(图 1(b)和图 1(c))。

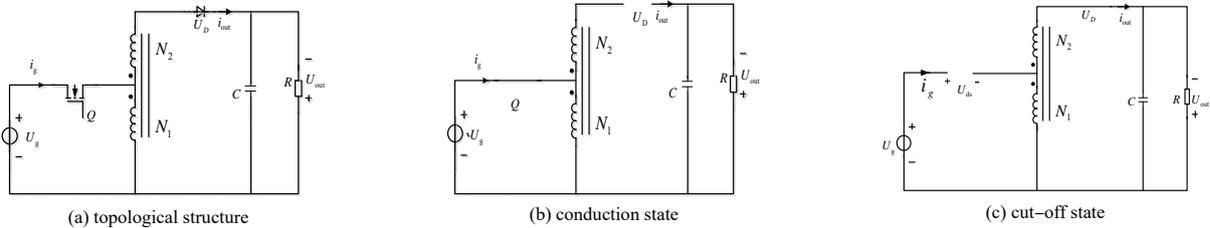


Fig.1 Working principle of high-gain Buck-Boost converter
图 1 高增益 Buck-Boost 变换器工作原理

根据开关管 Q 导通和截止，变换器可以用图 1(b)和图 1(c)进行等效分析。为了简化分析，对变换器进行如下假设：工作在连续电流模式下，开关管 Q 和二二极管 V_D 是理想器件，输出电容器 C 足够大，以致电压纹波可以忽略不计，同时忽略耦合电感的漏电感。

开关管 Q 导通时，续流二极管 V_D 反向偏置，电源电压 U_g 对耦合电感的原边线圈 N_1 进行充电，原边线圈储能增加；当 Q 关断时，续流二极管 V_D 导通，耦合电感储存的能量传输到副边线圈 N_2 上。同时电源电压、原边线圈电压、副边线圈电压共同向电容 C 和负载 R 供电，电容 C 储能，直至开关管 Q 导通。

当开关管 Q 导通、二极管 V_D 截止，励磁电感 L_m 的励磁电压 U_{Lm} 为

$$U_{Lm} = U_g \tag{1}$$

开关管 Q 关断时(二极管 V_D 导通)，励磁电感 L_m 的励磁电压 U'_{Lm} 为

$$U'_{Lm} = -\frac{1}{1-n} U_{out} \tag{2}$$

式中 n 为耦合电感等效变压器的变比， $n = N_2 / N_1$ 。

根据励磁电感 L_m 的伏秒平衡有

$$DU'_{Lm} = -(1-D)\frac{1}{1-n} U_{out} \tag{3}$$

式中 D 为占空比。

进而有变换器的增益为：

$$M = \frac{(n-1)D}{1-D} \tag{4}$$

可以通过调整耦合电感抽头的位置和开关管 Q 的占空比来调整变换器的输出，还可计算出开关管 Q 和二二极管 V_D 的电压应力：

$$\begin{cases} U_{ds} = U_{in} + \frac{U_{out}}{n} \\ U_D = U_{out} - nU_{in} \end{cases} \tag{5}$$

在相同的输入和输出情况下，与基于 Boost 变换器结构的高增益变换器二极管具有较高的电压应力，但是开关管的电压应力要小很多，这有利于选用导通电阻较小的开关管来减小导通损耗，提高变换器的效率^[9-10]。

2 基于信号流图的变换器建模

开关系统是离散、非线性和时变系统，处于不同工作状态下的电路参数会发生变化，这增加了建模难度。论文采用基于三端网络的耦合电感建模方法^[11]，推导高增益 Buck-Boost 变换器的稳态模型和小信号模型。

2.1 通用三端组件与模型

开关管、功率二极管和耦合电感是导致高增益 Buck-Boost 变换器非线性的原因，可以将它们看作一个整体，称为三端开关器件。三个端口的编号为 0,1 和 2，其中 1 端连接有源开关器件，2 端连接无源开关器件，0

端不连接任何开关器件^[12-14], 如图 2 所示。

三端组件中励磁电感 L_m 为:

$$L_m = L_1 \left(\frac{N_{10}}{N_1} \right)^2 \quad (6)$$

式中: L_1 为 N_2 开路测得的原始耦合电感绕组 N_1 的电感值; N_{10} 为开关管 K 导通后在端口 1,0 之间的有效匝数; 与励磁电感相互并联电感有效绕组的匝数比为:

$$a = \frac{N_{10}}{N_{20}} = \frac{N_1}{N_1 - N_2} = \frac{1}{1-n} \quad (7)$$

式中: N_{20} 为二极管 \bar{K} 导通后端口 2,0 之间的有效匝数; 耦合电感的匝数比为 $n = N_2 / N_1$ 。

连续导电模式下三端开关器件有两个工作过程, 对应控制信号 $K(d(t))$ 所在支路导通及关断, 通常控制信号由开关管栅极脉冲序列实现。控制支路的输出信号 $y(t)$ 与输入信号 $x(t)$ 和开关信号 $K(d(t))$ 之间的关系为

$$y(t) = d(t)x(t) \quad (8)$$

控制回路输出可以展开为 $y(t) = Y + \hat{y}(t)$, 其中 Y 为直流分量, $\hat{y}(t)$ 为扰动分量。类似地将输入变量和控制变量进行展开有

$$Y + \hat{y}(t) = (D + \hat{d}(t))(X + \hat{x}(t)) \quad (9)$$

可以得到三端组件的稳态模型为 $Y = DX$, 对应的流图如图 3(a) 所示。忽略二阶扰动, 可以得到三端组件的交流小信号模型为

$$\hat{y}(t) \approx X\hat{d}(t) + D\hat{x}(t) \quad (10)$$

在此基础上构建的小信号流图如图 3(b) 所示。利用前面的方法可以建立控制支路 \bar{K} 的开关流图模型。

三端组件励磁电感两端电压表达式为:

$$U_{Lm}(t) = KU_{10}(t) + a\bar{K}U_{20}(t) \quad (11)$$

式中: U_{10} 为端口 1 和 0 之间的电压; U_{20} 为端口 2 和 0 之间的电压; 系数 K 和 \bar{K} 对应占空比 D 和 $D'=1-D$ 。进而考虑式(11)励磁电感的伏安特性, 可以得到图 4 三端口网络的开关流图模型。

$$\dot{I}_{Lm} = \frac{1}{r + sL_m} U_{Lm} \quad (12)$$

2.2 变换器稳态模型

根据图 2 三端口模型和图 1 中的变换器结构可以确定端口 1 电压为电源 U_g 的电压, 端口 2 电压为输出电压 U_{out} , 端口 0 接地电位为 0。变换器稳态开关流图模型如图 5 所示。电阻 r 用来等效三端网络的损耗, 包括耦合电感的损耗、功率管和二极管的导通损耗。电阻 r 与励磁电感相 L_m 串联。

根据变换器的开关流图可以计算电感稳态电流 I_{Lm} 与电源电压 V_g 的比值为:

$$\frac{I_{Lm}}{U_g} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{D}{r + a^2 D'^2 R} = \frac{D}{a^2 D'^2 R} \quad (13)$$

输出电压 U_{out} 为

$$U_{out} = -aD'R I_{Lm} \quad (14)$$

式中的负号是因为输出电压与参考方向相反导致。

将式(14)代入式(13)同时忽略三端网络的损耗有

$$\frac{U_{out}}{U_g} = \frac{U_{out}}{I_{Lm}} \times \frac{I_{Lm}}{U_g} = -\frac{D}{aD'} = \frac{(n-1)D}{1-D} \quad (15)$$

式(15)结果与前面利用伏秒平衡得到的结果是一致的, 这初步证明了稳态模型的正确性。

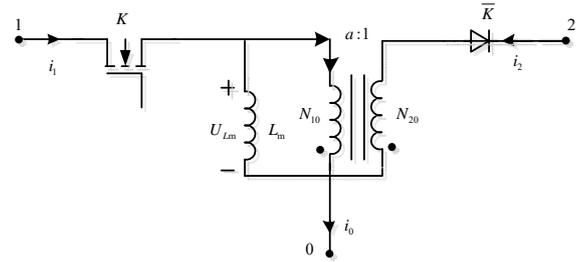


Fig.2 Three-port generic model
图 2 三端口通用模型

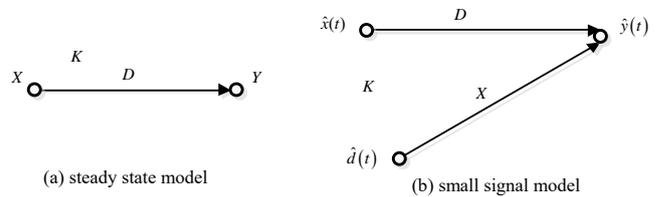


Fig.3 Signal flow diagram model of switch branches
图 3 开关支路的信号流图模型

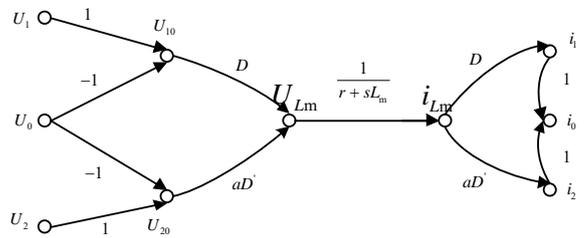


Fig.4 Switch flow diagram model of three-port network
图 4 三端口网络的开关流图模型

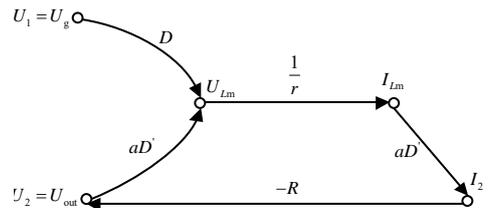


Fig.5 Steady-state switching flow diagram of the converter
图 5 变换器稳态开关流图

2.3 变换器小信号模型

与推导变换器的稳态模型相似，将图 4 的三端组件的模型代入图 1 变换器中，代入 $\hat{d}' = -\hat{d}$ ，可得到图 6 高增益变换器小信号模型。变换器的输出电流与端口 2 电流 i_2 方向相反：

$$U_{out} = -\frac{R}{(1+RCs)}i_2 \quad (16)$$

变换器的输出电压与电感两端电压扰动量的比值为：

$$\frac{\hat{U}_{out}}{\hat{U}_{Lm}} = \frac{-aD'R}{(RCs+1)sL_m + a^2D^2R} \quad (17)$$

将所有输入信号 d 所在的支路移动至节点 U_{Lm} ，可以得到简化的小信号模型(如图 7)。

根据梅森规则，可以推导出占空比扰动 \hat{d} 到输出电压扰动 \hat{U}_{out} 的传递函数

$$\frac{\hat{U}_{out}}{\hat{d}} = \frac{-aD'R}{(RCs+1)sL_m + a^2D^2R} \left(U_g - aU_{out} - \frac{sL_m}{D'}I_{Lm} \right) \quad (18)$$

3 仿真分析

为验证高增益 Buck-Boost 变换器模型正确性，使用 PSIM 软件对变换器交流特性进行了仿真实验，仿真电路如图 8(a)所示，高增益变换器的主要参数见表 1。从输出电压的波形(图 8(b))可以看出，输出电压为 400 V。仿真得到的变换器增益为 8.33，与式(15)稳态模型计算得到的 8.36 一致，证明论文模型的正确性。

分别利用 PSIM 的交流分析功能扫描输出到占空比传递函数的频率特性，用 Matlab 根据式(18)绘制变换器的频率特性曲线(如图 9 所示)。可以看到论文模型和 PSIM 模型在低频处的直流增益相同，都为 65.0 dB，相位都为 180°；在大于 100 Hz 时论文模型和 PSIM 模型也具有很好的一致性(100 Hz 处论文仿真模型出现轻微谐振)，由此证明了论文模型的正确性。

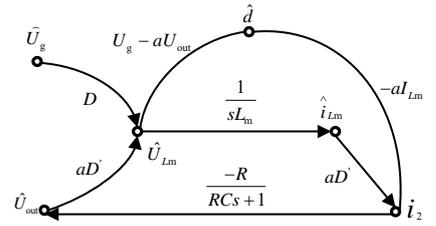


Fig.6 Small signal model of high gain converter
图 6 高增益变换器小信号模型

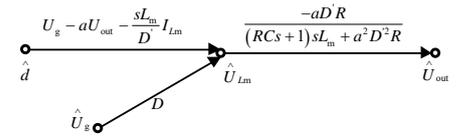
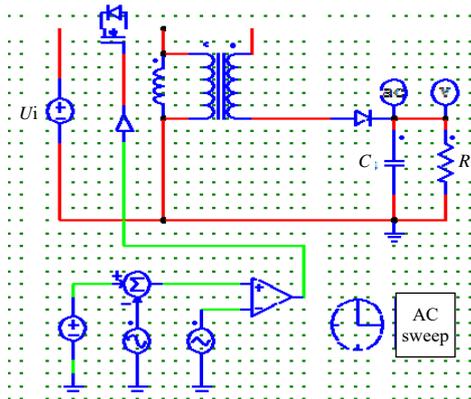


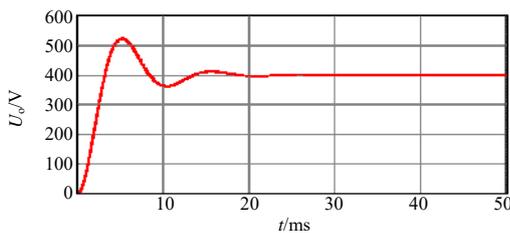
Fig.7 Simplified small signal model
图 7 简化小信号模型

表 1 高增益变换器主要参数

parameter	value
input voltage U_{in}/V	48
output voltage U_{out}/V	400
output resistance R/Ω	10
switching frequency f/kHz	100
duty cycle D	0.65
magnetizing inductance $L_m/\mu H$	65.45
turns ratio $n=N_2/N_1$	5.5
output capacitor $C/\mu F$	220

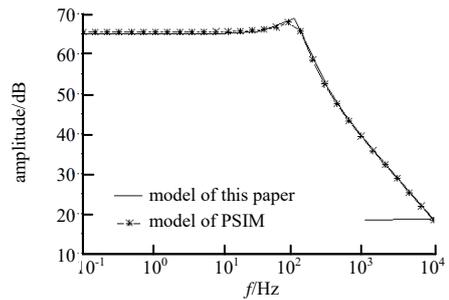


(a) circuit diagram

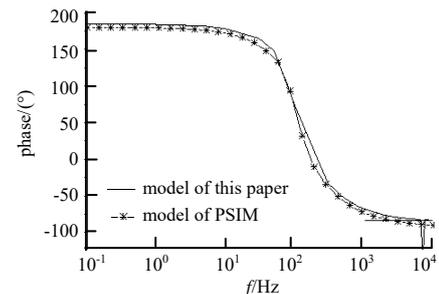


(b) output voltage waveform

Fig.8 Steady-state simulation of the high gain converter
图 8 高增益变换器稳态特性仿真



(a) amplitude frequency characteristics



(b) phase frequency characteristics

Fig.9 Frequency characteristics of the high gain converter
图 9 高增益变换器的频率特性

4 结论

高增益 DC/DC 变换器在新能源发电和直流微电网中有良好的应用前景。论文将耦合电感和开关元件作为三端网络,利用开关流图建立了高增益 Buck-Boost 变换器的模型;分别推导了变换器的稳态模型和交流小信号模型;用 PSIM 软件对基于耦合电感的高增益变换器进行了仿真与分析,证明了论文稳态模型和交流小信号模型的正确性。论文结果对进一步进行高增益 DC/DC 变换器的环路设计具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 罗全明,张阳,闫欢,等. 一种带耦合电感的有源钳位高增益 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(27):4576-4582. (LUO Quanming,ZHANG Yang,YAN Huan,et al. An active clamp high boost converter with coupling inductance[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014,34(27):4576-4582.)
- [2] 邱海波,许建平,陈章勇. 一种耦合电感高增益开关 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2015,49(7):4-6. (QIU Haibo, XU Jianping,CHEN Zhangyong. A coupling inductance high-gain switch DC/DC converter[J]. Power Electronics Technology, 2015,49(7):4-6.)
- [3] 刘倪,张昌华,段雪,等. 并网逆变器小信号建模方法对比及其适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2018,42(23):134-140. (LIU Ni,ZHANG Changhua,DUAN Xue,et al. Comparison and applicability analysis of small signal modeling methods for grid-connected inverter[J]. Automation of Power Systems, 2018,42(23):134-140.)
- [4] 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 novel zero-input ripple high-gain DC-DC converter[J]. Journal of Electrical Technology, 2018,33(2):284-292.)
- [5] YAO Jia,ZHENG Kaisheng,ABRAMOVITZ A. Small-signal model of switched inductor boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019,34(5):4036-4040.
- [6] 李楠,王萍,贝太周,等. 新型高增益开关电容直流升压变换器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017,29(6):2936-2944. (LI Nan,WANG Ping,BEI Taizhou,et al. New high-gain switching capacitor DC boost converter[J]. Journal of Power System and Automation, 2017,29(6):2936-2944.)
- [7] BABAEI Mohamd Reza,KAZEMI Farhda Mohajel. Application of transformer less high gain DC/DC converter for grid-connected offshore windfarms[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2016,19(3):329-336.
- [8] 吴贵洋,张家岩,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. A single-tube dual-inductance high-gain boost converter[J]. Power Electronics Technology, 2017,51(5):14-16.)
- [9] DAS Moumita,AGARWSAL Vivek. Design and analysis of a high-efficiency DC-DC converter with soft switching capability for renewable energy applications requiring high voltage gain[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,63(5):2936-2944.
- [10] 熊泽成,尹强,任晓丹,等. 高增益隔离 DC/DC 变换器的研究[J]. 电气传动, 2017,47(12):39-43. (XIONG Zecheng,YIN Qiang,REN Xiaodan,et al. Research on high gain isolated DC/DC converter[J]. Electric Transmission, 2017,47(12):39-43.)
- [11] 陈浩,胡雪峰,王建章,等. 一种高增益交错耦合电感 DC/DC 变换器[J]. 电源学报, 2018,23(4):1-16. (CHEN Hao,HU Xuefeng,WANG Jianzhang,et al. A high-gain staggered coupling inductor DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2018,23(4):1-16.)
- [12] YAO Jia,ABRAMOVITZ Alexander,SMEDLEY Keyue Ma. Analysis and design of charge pump-assisted high step-up tapped inductor SEPIC converter with an “inductor-less” regenerative snubber[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,30(10):5565-5580.
- [13] TATTIWONG Kaweevat,BUNLAKSANANUSORN Chanin. A novel clamp-mode coupled-inductor boost converter with high step-up voltage gain[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017,12(2):809-819.
- [14] 姚子睿,曾君,刘俊峰,等. 基于耦合电感的高增益低电压应力 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(12):3659-3665. (YAO Zirui,ZENG Jun,LIU Junfeng,et al. High-gain low-voltage stress boost converter based on coupled inductance[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019,39(12):3659-3665.)

作者简介:

高鹏飞(1993-),男,西安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术.email:gp0821@126.com.