

光伏发电系统前级宽输入DC/DC Boost变换器

冷明全^{1,2},程为彬^{1,2},刘峰^{1,2},郭颖娜^{1,2}

(1. 西安石油大学 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:峰值电流模式DC/DC Boost变换器输入电压范围较宽,适用于两级式光伏发电系统的前级。DC/DC Boost变换器的输入电压较低时,一般采用固定斜坡补偿来保证其稳定运行,低输入电压范围宽时,往往需要过补偿,无法达到设计功率。提出一种动态斜坡补偿的方法,使变换器在较宽输入电压下都能稳定工作且具有较高效率。40 W样机测试结果显示:输入电压在16~24 V的范围内,变换器均能稳定工作。

关键词:光伏发电系统;宽输入电压;DC/DC变换器;动态补偿

中图分类号:TM **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19197

DC/DC Boost Converter with Wide Input Voltage in Photovoltaic Power Generation System as Pre-stage

LENG Mingquan^{1,2}, CHENG Weibin^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, GUO Yingna^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. MOE Key Laboratory of Photoelectricity Gas & Oil Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: The DC/DC boost converter operating in peak current mode has a wide input voltage range, which is suitable for the pre-stage of a two-stage photovoltaic power generation system. The constant slope compensation is usually used to ensure the DC/DC Boost converter stable operation when the input voltage is low. Over compensation is often required when the range of low input voltage is wide, but it's unable to reach the design power. A method of dynamic slope compensation was proposed, which can make the converter work steadily and have high efficiency under the wide input voltage. The testing results of the 40 W prototype show that the converter works steadily in the input range voltage from 16 V to 24 V.

Key words: photovoltaic generation system; wide input voltage; DC/DC converter; dynamic compensation

太阳能光伏发电因其清洁、环保、持续和长久等优势已成为应对能源短缺、气候变化与节能减排的重要选择之一^[1-2]。但是,光伏发电系统易受天气变化影响^[3],造成输出电压在一个较宽的范围内变化,给后级并网逆变器的参数设计带来极大考验。两级式结构的出现解决了这一问题,前级DC/DC变换器适应宽范围的输入电压,而且还可以对系统进行分级控制,因此两级式并网发电系统受到了越来越广泛的关注^[4-6]。

文献[7]人为地将输入电压范围划分为若干个子区间,采用同构拓扑,通过最优组合找到各输入电压区间内最优拓扑方法,但不能保证电路

参数在任意输入电压下都工作于最优状态。文献[8]提出一种适用于光伏系统前级在半桥和全桥2种结构下工作的DC/DC变换器,但是输入电压宽范围变化时,电路中的励磁电感设计必须足够小,会引起电路无功功率增大、电路损耗增加,效率降低。文献[9]采用模糊自适应PID控制器控制输出电压,具有良好的动态和瞬态性能,但是模糊控制器的设计比较复杂。

本文提出一种动态斜坡补偿的新方法,补偿幅值能够随输入电压的变化而实时调整,确保变换器在宽输入电压范围内都能稳定工作,电路结构简单、易实现。

基金项目:陕西省工业攻关计划(2016GY-059);陕西省教育厅重点项目(15JS083)

作者简介:冷明全(1992-),男,硕士研究生,Email:1511910253@qq.com

1 传统固定斜坡补偿的缺陷分析

Boost变换器占空比 $D>0.5$,即输入电压 U_i 小于输出电压 $U_o < U_o/2$ 时,即使没有外部扰动自身也不能稳定运行^[10],通常采用固定斜坡补偿的方式来拓宽变换器的稳定工作范围。固定斜坡补偿的电感电流如图1所示。

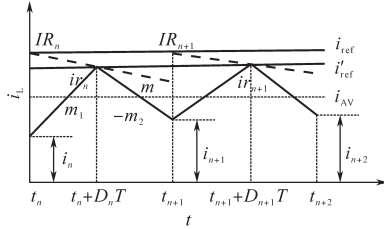


图1 固定斜坡补偿电感电流波形

Fig.1 Inductor current waveforms with constant slop compensation

根据理想电路平衡条件,得到稳定状态下DC/DC Boost变换器电路离散迭代方程为

$$\begin{cases} i_n = IR_n - mD_n T - m_1 D_n T \\ i_{n+1} = IR_n - mD_n T - m_2(1 - D_n)T \end{cases} \quad (1)$$

其中 $m = U_m/L$ $m_1 = U_i/L$ $t \in [t_n, t_n + D_n T]$
 $m_2 = (U_o - U_i)/L$ $t \in [t_n + D_n T, t_{n+1}]$

式中: T 为频闪采样周期; D_n 为第 nT 频闪采样周期内的控制占空比, $D_n \in [0, 1]$; i_n, i_{n+1} 分别为第 nT 时刻和第 $(n+1)T$ 时刻的电感电流频闪采样值; m_1 为电感充电斜率;电感放电斜率; U_m 为固定斜坡补偿时的补偿电压, m 为固定斜坡补偿斜率。

整个工频周期内,相邻开关周期电感电流增量为

$$\Delta i_{n+k} = [(m - m_2)/(m + m_1)] \cdot \Delta i_n = \alpha^k \Delta i_n \quad (2)$$

根据电路的稳定条件可得,特征系数应满足的条件为 $-1 < \alpha < 1$,进而得到固定斜坡补偿时的补偿电压应满足:

$$U_m > 0.5U_o - U_i \quad (3)$$

令参考电流为额定功率时的输入电流值,即 $i_{ref} = U_o^2/(R_L U_i)$ 进行分析, R_L 为负载电阻。得到固定斜坡补偿后参考电流表达式:

$$i'_{ref} = i_{ref} - mD_n T = U_o^2/(R_L U_i) - mD_n T \quad (4)$$

由式(4)可以看出,斜坡补偿项的加入可保证变换器稳定工作,但降低了参考电流,损失部分设计功率。为满足光伏系统宽范围输入电压,需要进行过补偿,导致变换器设计功率损失很大。

2 动态斜坡补偿

从稳定状态下电感电流的平均值 i_{AV} 出发,反推参考电流的表达式。令 i_{AV} 为额定功率时的输入电流值,即 $i_{AV} = P/U_i = U_o^2/R_L U_i$ 进行分析,得:

$$\begin{aligned} i_{AV} &= i_n + m_1 D_n T/2 \\ &= IR_n - (m + m_1)D_n T + m_1 D_n T/2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i'_{ref} &= IR_n - mD_n T \\ &= \frac{U_o^2}{R_L U_i} + \frac{U_o - 0.5U_i}{L} \cdot \frac{U_o - U_i}{U_o} T - \frac{U_m}{L} D_n T \end{aligned} \quad (6)$$

为使电路在输入电压变化时的稳定速度最快,令 $\alpha = 0$ ^[10],得到动态补偿电压 $U_{ms} = U_o - U_i$ 。

对比固定斜坡补偿时的参考电流表达式(4),动态斜坡补偿由于 $(U_o - 0.5U_i)/L \cdot (U_o - U_i)/U_o T$ 的引入,一方面抬高了参考电流,使变换器能够达到设计功率要求;另一方面补偿幅值随输入输出电压的变化实时调整,进而能够适应光伏系统输入电压宽范围变化的需要。其中,动态补偿项通过乘法器即可实现。

3 电路原理图

图2为电路原理图,其中,主电路为Boost电路,控制回路由电压外环和电流内环构成双闭环控制,电流内环的参考电流由电压外环提供,电感电流采用互感器采样,以避免电阻取样的损耗,主芯片采用ML4812,升压电感 $L=0.2$ mH,开关频率 $f=50$ kHz, $R_L=40$ Ω 。

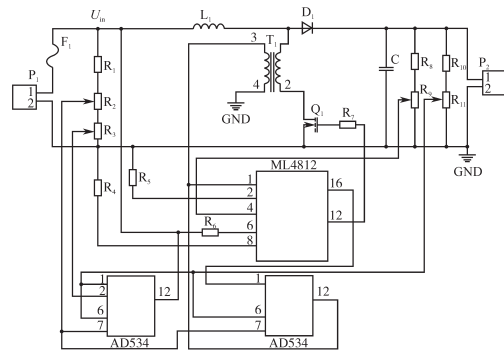


图2 电路原理图

Fig.2 Circuit schematic diagram

对比式(4)、式(6)中的动态补偿项通过左边乘法器实现,斜坡项通过芯片内部振荡信号与输入输出采样信号通过乘法器得到。

4 实验结果分析

搭建一个40 W变换器样机进行实验验证。

输入由RIGOL可编程直流线性稳压电源提供,输入电压范围为16~24 V。

图3为 $U_{in}=20$ V时的工作波形,其中图3a和图3b分别为20 V输入电压时固定斜坡补偿与动态斜坡补偿变换器的输出电压 U_o 、电感电流 i_L 以及占空比 D 的实测工作波形。

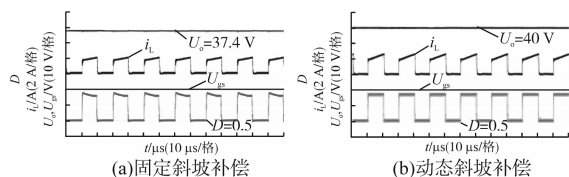


图3 $U_{in}=20$ V时的工作波形

Fig.3 Operating waveforms with $U_{in}=20$ V

当输入电压 $U_{in}=20$ V时,固定斜坡补偿虽然能使变换器稳定运行,但是降低了输出电压,损失了设计功率;采用动态斜坡补偿后,变换器占空比 D 稳定为0.5,输出电压 $U_o=40$ V,变换器稳定运行。关键点 $U_{in}=16$ V和 $U_{in}=24$ V时变换器的工作波形对比分别如图4和图5所示。

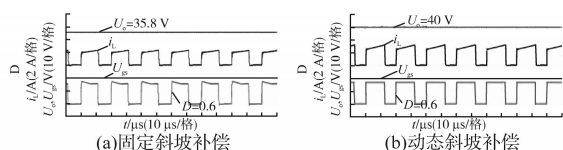


图4 $U_{in}=16$ V时的工作波形

Fig.4 Operating waveforms with $U_{in}=16$ V

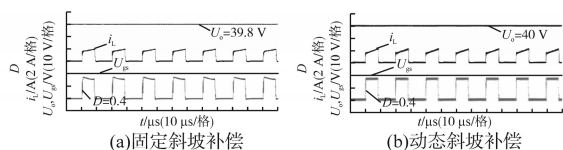


图5 $U_{in}=24$ V时的工作波形

Fig.5 Operating waveforms with $U_{in}=24$ V

输入电压由16 V变化到24 V时变换器的工作波形如图6所示。

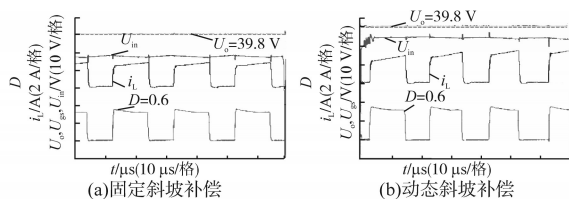


图6 输入电压变化时变换器的工作波形

Fig.6 Operating waveforms of the converter with changing the input voltage

可以看出,采用动态斜坡补偿后,实现了输入电压的宽范围。样机在16~24 V的输入电压变化范围内,即使占空比 $D>0.5$ 也正常稳定运行。实验数据总结如表1所示。

表1 不同输入电压下的实验结果

Tab.1 The experimental results under different input voltages

U_{in}/V	I_m/A	P_m/W	P_o/W	D	$\eta/\%$
16	2.76	44.16	40.11	0.6	90.83
20	2.16	43.20	40.18	0.5	93.01
24	1.78	42.72	40.20	0.4	94.10

5 结论

分析了固定斜坡补偿应用于光伏发电系统存在的缺陷,提出一种能够根据输入输出电压调整斜坡补偿幅值的动态斜坡补偿新方法,推导了动态斜坡补偿时参考电流的表达式,并设计了40 W样机进行实验验证。结果表明,所提动态斜坡补偿方法同时克服了Boost变换器在占空比 $D>0.5$ 时的不稳定现象,以及固定斜坡补偿降低设计功率的问题。设计的宽输入变换器可应用在光伏发电系统的前级。

参考文献

- [1] 闫云飞,张智恩,张力,等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报,2012,33(S1):47-56.
- [2] Luo F L. Double Output Luo-converters-voltage Lift Technique [J]. Electric Power Applications, IEEE Proceedings 1999, 146 (4):415-432.
- [3] Wang Z, Li H. An Integrated Three-port Bidirectional DC-DC Converter for PV Application on a DC Distribution System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (10): 4612- 4624.
- [4] 王立乔,孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [5] 张力,阮新波,任小永. 两级式逆变器中前级直流变换器的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):660-670.
- [6] 任碧莹,郝金莉,孙向东,等. 一种新颖的两级式光伏并网控制方法[J]. 电气传动,2016,46(7):61-65.
- [7] Chen W, Rong P, Lu Z, et al. A Novel 200~800 V DC Ultra-wide Range Input DC-DC Converter with Optimum Intelligent Polymorphic Topologies[C]//APEC, 2009:51-57.
- [8] Liang Z, Guo R, Wang G, et al. A New Wide Input Range High Efficiency Photovoltaic Inverter [C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition IEEE, 2010:2937-2943.
- [9] 张少如,张云清,王利军,等. 太阳能发电中DC/DC变换器控制[J]. 河北工业大学学报,2010,39(2):41-43.
- [10] 程为彬,郭颖娜,康思民,等. Boost变换器中参数斜坡共振控制能力研究[J]. 物理学报,2009,58(7):4439-4448.

收稿日期:2018-06-18

修改稿日期:2018-08-02