Research on the Stability of Photovoltaic Power System Based on Dual Buck Inverter

Chen Chunliu, Hong Feng, Wang Chenghua, Ou Yangjing
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, China, 210016
*E-mail: chenchunliu*803@163.*com*

Abstract: The stability of photovoltaic power system based on dual buck inverter is researched in this paper. Dual buck inverter overcomes the shoottthrough problem in the traditional inverters, and this topology has development potential and research value because of its high reliability. Since the circuit works in half-bridge input mode, the input voltage is un-balanced, the instability caused by the un-balanced voltage limits the development and promotion of the circuit. The theoretical value of the un-balanced voltage is analyzed and the minimum input capacitance value of DBI is deduced. A three-loop control strategy is proposed. This strategy will feed forward the un-balanced voltage of input capacitors into the traditional double-loop control system to control the capacitor voltage deviation, which can solve the problem of un-balanced voltage effectively and reduce the minimum input capacitance value. The theoretical analysis result and the three-loop control strategy are verified by the simulation and experimental results. The experiment of 1kW photovoltaic system based on dual buck inverter verifies the three-loop control strategy can effectively improve the system stability.

Keyword: photovoltaic, inverter, voltage balance, stability, three-loop control

基于双 buck 逆变器光伏发电系统的稳定性研究

陈春柳，洪峰，王成华，欧阳静
南京航空航天大学信息科学与技术学院，南京，中国，210016
E-mail: chenchunliu803@163.com

摘要：本文研究了基于双 buck 逆变器光伏发电系统的稳定性。双 buck 逆变器是近年来提出的一种新型逆变拓扑，克服了传统逆变器的直通问题，该拓扑因其高可靠性的特点具有发展潜力和研究价值。由于电路需引入半桥输入方式，因此存在不均压问题，引发的不稳定性限制了该电路在光伏发电系统中的发展和推广。本文分析了不均压问题的产生机理及 DBI 正常工作时所需的最小输入电容值，针对双 buck 逆变器的不均压问题提出了一种三环控制方案。该方案将电容电压偏差前馈加入传统的双闭环控制系统，对电容电压偏差进行控制，可有效解决不均压问题，减小电路正常工作所需的最小输入电容值。仿真和实验验证了理论分析及三环控制方案可有效解决不均压问题。1kW 基于双 buck 逆变器的光伏发电系统实验验证了三环控制方案可有效提高系统稳定性。

关键词：光伏 逆变器 均压 稳定 三环控制

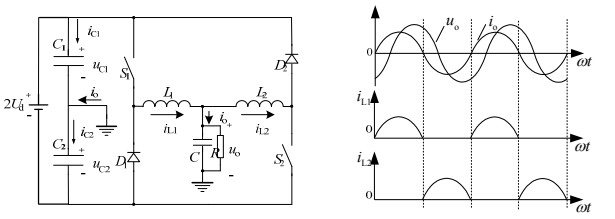
1. 引言

一次能源面临枯竭的危机和其引起的环境污染是大力发展光伏发电系统的主要原因 [1]。光伏发电系统具有耐用、安全、无噪声及其它公害等特点 [2]。研究光伏发电系统的稳定性对加速其发展具有重要意义。逆变器作为光伏发电系统的重要组成部分，提高其稳定性对系统的稳定性的提高具有重要意义。

国家自然科学基金（50907033）和高等学校博士点基金（20093218110001）资助项目。

传统桥式逆变器存在桥臂直通问题，双buck逆变器 (Dual Buck Inverter，简称DBI)是一种近年来提出的、具有发展潜力和研究价值的拓扑结构。该电路最初由N. R. Zargari[3]提出，旨在提高逆变电路的可靠性，克服传统逆变器的直通问题。Gerald R. Stanley 将其成功应用于功率放大器 [4]，由于不需要设置死区时间，开关管可工作在较高开关频率（200KHz）下，并输出高质量电压波形。为提高效率研究者又进一步提出了半桥输入方式的双buck逆变器结构 [5]，如图 1(a)所示，该电路工作在无环流工作模式：两个buck直-

直变换器分别提供半周期电流，如图 1(b)所示。环流的消除有效降低电路损耗，同时，DBI中功率开关的体二极管不工作，电感电流由独立的D_1、D_2续流。研究者们对DBI电路的磁集成 [6]、多电平应用 [7]等多层次的内容展开探讨，这些研究对进一步提高该电路的功率密度、拓展应用范围具有积极意义，但由于电路必须引入半桥输入方式，提高了器件电压应力和桥臂输出电压谐波含量，并带来了输入不均压问题，降低了电路的稳定性。由于电路特性及电感电流初始相位角导致电流型控制半桥逆变器分压电容不均压的产生，分压电容中点电压漂移将导致输出电压和电流波形的畸变，使电路性能恶化，甚至使系统失控 [8]。分布式 [9]均压控制策略解决了输入串联输出并联逆变器的不均压问题。在功率电路中增加元器件可解决电流型控制半桥AC/ DC变换器中的直流分压电容电压偏差问题 [10]。本文为提高光伏发电系统的稳定性，在借鉴国内外研究学者对各种电路的输入不均压问题分析及解决方案的基础上分析了DBI输入不均压的产生机理，提出一种三环控制方案提高DBI的稳定性，进行了仿真及实验验证。



(a) DBI 主电路　　(b) 输出电压、电流和电感电流波形示意图

Figure 1 Non-biased mode DBI circuit and waveforms

图 1 无环流 DBI 主电路及电压电流波形

2. 输入不均压的产生机理

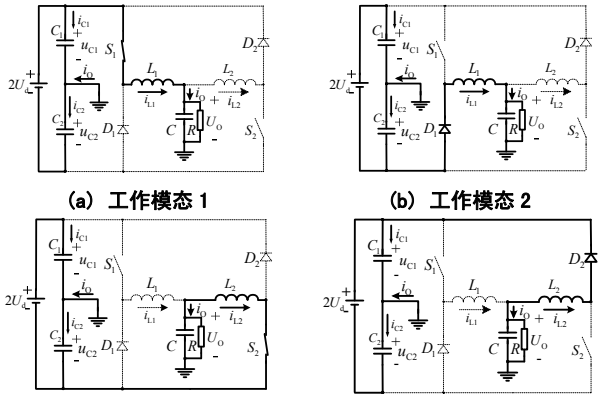
首先对DBI输入不均压问题进行理论分析，DBI在无环流工作模式下有四个开关模态，其中正、半周期各有两个工作模态，具体电路等效图如 图 2 所示。

正半周期时 buck 电路 1 工作，即 S_1，L_1，D_1 工作，具体的模态分析如下：

● 模态 1：S_1 导通，S_2 关断，如图 2(a)所示，此时电容 C_1 与电源共同给输出提供能量，电容 C_1 两端电压逐渐减小，电容 C_2 两端电压逐渐增大。

● 模态 2：S_1 关断， S_2 关断，如图 2(b)所示，此时为电容 C_1 给输出提供能量，电容 C_1 两端电压逐渐减小，电容 C_2 两端电压逐渐增大。

负半周期时 buck 电路 2 工作，即 S_2，L_2，D_2 工作，工作模态与正半周期类似。下文对电容不均压问题进行详细的理论推导：设电容 C_1、C_2 两端的初始电压值为 U_{C10}，U_{C20}，各电压电流量及参考方向参见图 2 标注。由于 C_1、C_2 两端的电压和始终为 $2U_d$ 可推导得



(a) 工作模态 1　　(b) 工作模态 2

(c) 工作模态 3　　(d) 工作模态 4

Figure 2 Working models of DBI

图 2 DBI 的工作模态

$$i_{C1} = -\frac{C_1}{C_2} i_{C2} \tag{1}$$

再根据基尔霍夫电流定律及电容状态方程推导得

$$u_{C1} = U_{C10} - \frac{1}{C_1 + C_2}\int_0^t i_o dt \tag{2}$$

$$u_{C2} = U_{C20} + \frac{1}{C_1 + C_2}\int_0^t i_o dt \tag{3}$$

正常工作时 u_o 为正弦或余弦，设 $u_o = U_o \sin \omega t$，则

$$u_{C1} = U_{C10} - \frac{U_o}{R\omega(C_1 + C_2)} - \frac{U_o}{C_1 + C_2}\sqrt{C^2 + \frac{1}{R^2\omega^2}}\sin(\omega t + \theta) \tag{4}$$

（式中 $\theta = \operatorname{arccot}(-RC\omega)$）

所以电容 C_1 两端电压的平均值为

$$\overline{u_{C1}} = U_{C10} - \frac{U_o}{R\omega(C_1 + C_2)} \tag{5}$$

电容 C_1 两端电压的脉动值为

$$\Delta u_{C1} = \frac{2U_o}{C_1 + C_2}\sqrt{C^2 + \frac{1}{R^2\omega^2}} \tag{6}$$

同理可得电容 C_2 两端电压的瞬时值、平均值及脉动值，推导得两电容的平均值差值为

$$\Delta\overline{u_C} = \overline{u_{C1}} - \overline{u_{C2}} = U_{C10} - U_{C20} - \frac{2U_o}{R\omega(C_1 + C_2)} \tag{7}$$

为保证电路正常工作需满和足 u_{C1} 和 u_{C2} 的最小值大于输出电压的最大值，推导得

$$C_1 + C_2 \geq \frac{U_o}{U_{C10} - U_o}\left(\frac{1}{R\omega} + \sqrt{C^2 + \frac{1}{R^2\omega^2}}\right) \tag{8}$$

上述理论分析可以看出正常工作时，不均压值与 U_{C10}、U_{C20}、U_o、R、ω、(C_1+C_2)有关。为保证电路正常工作输入电容值需参考公式(8)，当输出功率较大，即 R 小时，需要很大的输入电容，对整个电路的体积、

978-1-935068-17-4 © 2010 SciRes.

重量、成本、使用寿命等均产生不利的影响。因此为提高电路稳定性，本文在对 DBI 不均压理论分析的基础上提出一种解决不均压问题的方案。

3. 三环控制原理

上文分析了输入电容不均压问题，为避免输出波形畸变需对C_1，C_2 电容的中点电位进行控制，而传统的电压电流双闭环控制系统中不包含对该中点电位的控制，其框图如 图 3 虚线框外所示。

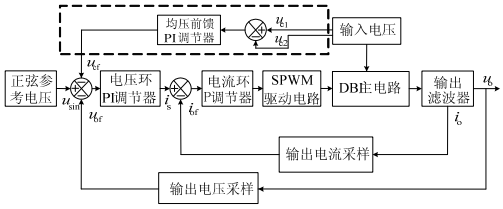


Fig. 3 Block diagram of three-loop control strategy with input capacitors' voltage feed-forward

图 3 加入电容电压偏差前馈的三环控制系统原理框图

本文根据DBI输入电压不均压的产生机理提出了一种将电容电压偏差$\triangle u_C=u_{C1}-u_{C2}$ 通过前馈方式加入传统的双闭环控制系统的三环控制方案。由公式(8)可知不均压的产生与U_o/R有关，即与i_o有关，由公式(2)、(3)可知i_o与流过电容的电流成一定的比例关系，因此可以将反映输入电容电压偏差量的信号通过PI调节器后加入电压环PI调节器，改变传统双环控制的电流给定信号，以此来调节电感电流，使其中产生一部分电流用于平衡电容电压。电容电压偏差前馈的三环控制原理框图如 图 3 所示，虚线框中为加入的电容中点电压偏差前馈电路，即将两电容电压差值加入电压环中，改变电压环的输出，即改变电流环的给定，从而改变SPWM波，通过改变各开关管的导通、断开时间，产生用于补偿电容电压差值的电流，解决均压问题。

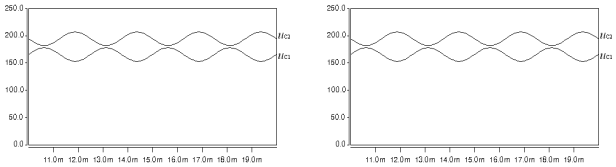
当$\triangle u_C>0$ 时，若电路处于正半周期工作模态，由于均压环节的作用将延长开关 S_1 的导通时间，相应的电容 C_1 两端电压将逐渐减小，电容 C_2 两端电压会逐渐增加；若电路处于负半周期工作模态，由于均压环节的作用将延长开关 S_2 的断开时间，相应的也会使电容 C_1 两端电压逐渐减小，电容 C_2 两端电压逐渐增加，减小$\triangle u_C$ 的值，最终实现均压。同理可推出当$\triangle u_C<0$ 时电路的工作模态的变化。

4. 仿真分析

4.1 电路参数对电容电压有效值偏差值的影响

根据 图 3 虚线框外所示的双闭环控制系统原理框图进行仿真分析，仿真条件为输入 360V直流电压，输出 115V/400Hz，滤波电感$L_1=L_2=160\mu H$，滤波电容 $C=10nF$，输出电阻$R=25\Omega$。

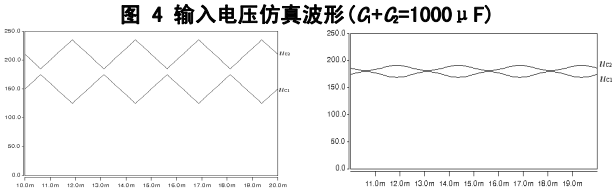
当输入电容C_1+C_2 为定值 1000μF时，只改变C_1，C_2 的差值对应的电容电压偏差如 图 4 所示，$C_1=C_2=500\mu F$ 时电容电压波形如 图 4(a) 所示，$C_1=300\mu F$，$C_2=700\mu F$时电容电压波形如 图 4(b)所示，由 图 4 可看出C_1+C_2 为定值时改变C_1，C_2 的差值对电容电压振荡幅度及偏差无影响。



(a) C_1=500μF，C_2=500μF　　(b) C_1=300μF，C_2=700μF

Fig. 4 Simulation waveforms of input voltage (C_1+C_2=2000μF)

图 4 输入电压仿真波形(C_1+C_2=1000μF)



(a) C_1+C_2=500μF　　(b) C_1+C_2=2000μF

Fig. 5 Simulation waveforms of input voltage (C_1+C_2 Proportional increase)

图 5 输入电压仿真波形(C_1+C_2按比例增大)

当输入电容C_1+C_2 按比例增大时，对应的电容电压差值如 图 5 所示，图 5 (a)为$C_1+C_2=500\mu F$时电容电压波形，此时电容电压已非正弦波，由于此时输出已严重畸变，电容电压也畸变；图 5(b) 为$C_1+C_2=2000\mu F$时电容电压波形，由 图 5 可看出C_1+C_2 增大时，电容电压振荡幅度及偏差相应减小。

4.2 加入电容电压偏差前馈后的仿真

根据 图 3 所示的系统原理框图进行仿真分析，仿真条件与 4.1 节仿真条件相同，$C_1=C_2=470\mu F$。

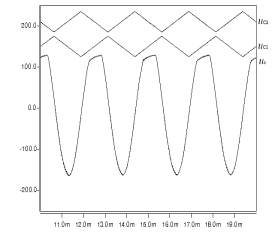


Fig. 6 Simulation waveforms of double-loop control system

图 6 双环控制系统的仿真波形

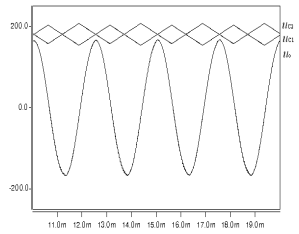


Fig. 7 Simulation waveforms of three-loop control system

图 7 三环控制系统的仿真波形

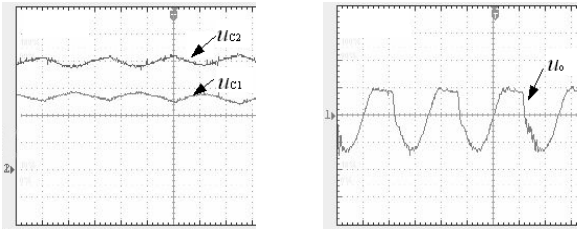
不加前馈时仿真波形如图 6 所示，加前馈电路的仿真波形如 图 7 所示。双环控制与三环控制的仿真波形对比可以看出，三环控制可有效减小电容电压差值，从而减小输出电压波形畸变。

4.3 电路正常工作输入电容最小值的仿真

本小节讨论加入均压环节前后该临界值的变化。根据图 3 的双闭环控制系统原理框图进行仿真分析，仿真条件与 4.1 节仿真条件相同。当不加均压环节时保证输出电压不畸变的最小输入电容值之和为 800μF；加入均压环节时保证输出电压不畸变的最小输入电容值之和为 500μF。

5. 实验结果

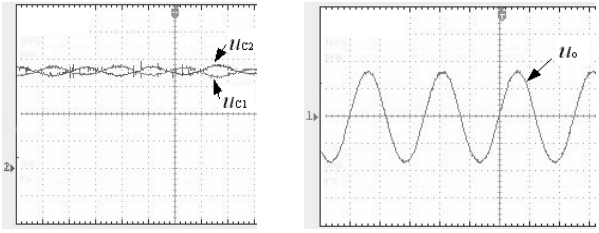
根据 图 3 的电容电压偏差前馈的三环控制系统原理框图进行硬件实验，实验条件与 4.1 节仿真条件相同，C_1=C_2=470μF，双环控制系统的实验波形如 图 8 所示，图 8(a)横轴为 1mS/div，纵轴为 50V/div，图 8(b)横轴为 1mS/div，纵轴为 100V/div，由 图 8(a)可看出输入电容两端电压存在偏差，由于输入电容两端电压存在偏差导致输入电压发生畸变，如 图 8(b)所示。加入电容电压前馈后的三环控制系统的实验波形如 图 9 所示，图 9 (a)横轴为 1mS/div，纵轴为 50V/div，图 9 (b)横轴为 1mS/div，纵轴为 100V/div。实验波形与仿真波形图 6 基本吻合，但由于实际电路中的器件为非理想器件其输入电容电压差值与仿真的输入电容电压差值相比更大。



(a) 输入电压　　(b) 输出电压

Fig. 8 Experiment waveforms of double-loop control system

图 8 双环控制系统的实验波形



(a) 输入电压　　(b) 输出电压

Fig. 9 Experiment waveforms of three-loop control system

图 9 三环控制系统的实验波形

由 图 9 可看出加入前馈电路后解决了输入电容两端电压的偏差，输出波形已基本无畸变，但电容电压振荡幅度没有变化。

1kW 的 DBI 三环控制光伏发电系统硬件电路也成功搭建，顺利通过测试、拷机，实验验证了该方案可有效提高光伏发电系统的稳定性。

6. 结论

本文阐述了提高逆变器稳定性对提高光伏发电系统稳定性的重要意义，分析了新型双 buck 逆变器电路拓扑存在的输入不均压问题的产生机理，仿真及实验验证了理论推导的正确性。根据不均压的产生机理提出的三环控制方案，该方案增加的电路器件少，将电容电压偏差前馈加入传统的双闭环控制系统。1kW 的 DBI 三环控制光伏发电系统的仿真及实验的输出电压波形验证该方法简单易行，可有效减小电容电压偏差值，从而减小输出电压波形畸变。不均压问题的解决促进了高可靠性的双 buck 电路拓扑在光伏发电系统中的发展和推广，可有效提高光伏发电系统的稳定性。

References (参考文献)

[1] Hong Soo Goh, Armstrong.M, Zahawi.B. The Effect of Grid Operationg Conditions on the Current Controller Performance of Grid Connected Photovoltaic Inverters [C].13th European Conference on Power Electronics and Applications. 2009: 1~8.

[2] Young-Hyok Ji, Jun-Gu Kim, Sang-Hoon Park, et al. C-language based PV array simulation technique considering effects of partial shading [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology. 2009: 1~6.

[3] N R Zargari, P D Zargari, G Joos. A two- Switch high-performance current regulated DC/AC converter module[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(3): 583-589.

[4] Gerald R. Stanley, Kenneth M. Bradshaw. Precision DC-to-AC power conversion by optimization of the output current waveform the half bridge revisited[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(2): 372-380.

[5] Liu Jun, Yan Yang-guang. A novel hysteresis current controlled dual buck half bridge inverter[C]. 2003 IEEE 34th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2003, 4: 1615-1620.

[6] Hong Feng Shan Renzhong Wang Huizhen Yan Yangguang. A novel dual buck inverter with integrated magnetics. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 76-81.
洪峰，单任仲，王慧贞，严仰光. 一种新型的磁集成双 Buck 逆变器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 76-81.

[7] Hong Feng, Wang Cheng-Hua, Ji Ding-yi, Yan Yang-guan. Three level dual Buck half bridge inverter [C]. Sustainable Power Generation and Supply, 2009: 1-5.

[8] Chen Dong-hua, Xie Shaojun. Research on current-mode control half-bridge inverter(I)—voltage un-balance of input capacitors. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 85-88.
陈东华，谢少军. 电流型控制半桥逆变器研究(I) ——直流分压电容不均压问题[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 85-88.

[9] Jiang Guibin, Pei Yuanqing, Yang Xu, et al. Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconncetion[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98.

[10] Lin B R ,Hung T L. Single-phase half-bridge converter topology for power quality compensation[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2002, 149(5): 351-359.

978-1-935068-17-4 © 2010 SciRes.