

Study on the Pre-photovoltaic System under Partial Shading Condition

Yue Zhang[†], Jincao Chen

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

[†]Email: Zyue9099@163.com

Abstract

This paper studied the two-stage pre-photovoltaic system, and proposed to use Buck-Boost circuit as system topology according to wide output voltage range of PV array under partial shading conditions. Three-level technology has been used to solve the problems of large switch voltage stress and large voltage ripple and current ripple appeared in the circuit. And the midpoint-voltage balance control strategy has also been designed based on pulse width modulation to improve the reliability of the system. Meanwhile, for the limitations of the existing conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithm under uneven illumination, we put forward an MPPT algorithm based on mathematical model which is suitable for any lighting conditions. The results have shown that the designed system can effectively balance midpoint-voltage and reduce current ripple and voltage ripple. After adding MPPT algorithm, PV system can track the maximum power point more accurately, which owns high stability, high reliability and high energy efficiency.

Keywords: *Buck-Boost; Three-level; Pulse Width Modulation; Midpoint-voltage Balance; Mathematical Model; MPPT Algorithm*

局部阴影条件下光伏发电前级系统的研究

张悦, 陈劲操

南京理工大学, 江苏 南京 210094

摘要: 对两级式光伏发电前级系统进行了研究, 根据光伏阵列在局部阴影条件下具有宽范围输出电压的特点, 提出采用 Buck-Boost 电路作为系统拓扑结构, 利用三电平技术解决电路中出现的开关管电压应力和电压电流纹波较大的问题, 并设计了基于脉宽调制的中点电压平衡控制策略保证系统运行的可靠性。同时针对现有常规太阳能电池最大功率点跟踪 (MPPT) 算法在光照不均匀条件下应用的局限性, 提出一种适用于任意光照条件的基于数学模型的 MPPT 算法。结果表明, 所设计的系统可以有效维持中点电压平衡, 输出电压电流纹波较小, 可靠性高, 稳定性强, 加入 MPPT 算法后在光照均匀和不均匀条件下均能准确进行最大功率点跟踪控制, 具有较高的能源利用率。

关键词: Buck-Boost; 三电平; 脉宽调制; 中点电压平衡; 数学模型; MPPT 算法

引言

随着全球电气化程度的发展, 对传统能源的消耗也在日渐增多, 在这种情况下, 用可再生资源代替常规化石燃料、维持能源的可持续发展成为一种必然。在众多的不可再生资源中, 太阳能凭借永不枯竭、无污染、不受地域限制等优势成为最具潜能的新能源之一。太阳能的主要利用方式为光伏发电, 目前人们在光伏发电领域内的研究主要集中在以单级式或两级式光伏发电系统为基础, 加入电导增量法、扰动观察法等常规 MPPT 算法进行最大功率点跟踪控制。单级式发电系统结构简单, 但由于只有一个能量变换环节, 控制时既要保证追踪太阳能电池最大功率点又要保证并网电能质量, 控制环节较为复杂, 不易实现^[1]。同时

在 MPPT 算法方面, 文献[2]提出一种改进扰动观测 MPPT 方案, 这种方案只适用于光照均匀条件下的应用, 当光伏阵列所处光照条件不均匀时, 该系统可能会无法准确追踪最大功率点导致系统效率降低。文献[3]提出一种基于模拟电路的 MPPT 方法, 它可以应用于局部阴影条件下, 但是通过硬件方式实现 MPPT 会降低光伏系统的可靠性和跟踪速度。本文在光伏发电领域现有研究成果的基础上, 主要对两级式光伏发电前级系统进行研究, 提出采用三电平 Buck-Boost 电路作为系统拓扑, 并针对光照不均匀条件下现有常规 MPPT 算法不适用的情况, 提出一种基于数学模型的 MPPT 算法, 算法的设计可以保证系统在任意光照条件下均能进行 MPPT 控制, 有效提高了系统的能源利用率。

1 光伏电池建模与仿真

研究光伏电池的关键是要根据固体物理理论的指导推导出光伏电池的理论数学模型, 并通过对模型简化得到工程实用模型, 因此光伏电池的建模对于光伏发电系统的设计与仿真具有重要意义。

1.1 光伏电池工程实用模型的建立

晶体硅光伏电池常用的电路模型如图 1 所示^[4]:

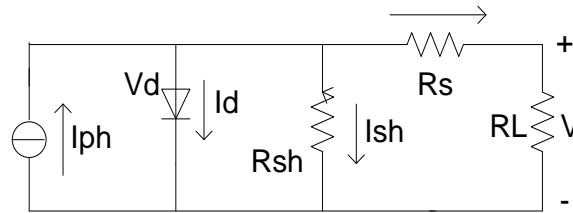


图 1 光伏电池电路模型

图 1 中, I_{ph} 为光生电流, I_d 为暗电流, I_{sh} 为旁路电流, I 为负载电流; R_{sh} 为并联等效电阻, R_s 为串联等效电阻, R_L 为负载电阻, 负载电流见式(1)。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式(1)中, T 为太阳电池表面工作温度, n 为 PN 结曲线因子, q 为电荷常数, K 为波尔兹曼常数, I_0 为二极管反向饱和电流。由式(1)可得一定辐射强度及温度下光伏电池的输出特性, 但由于表达式中的 5 个参数 (包括 I_{ph} 、 I_0 、 R_s 、 R_{sh} 和 n) 与辐射强度及电池温度有关, 实际确定比较困难, 不方便工程使用。而光伏组件厂商一般只提供标准测试条件下的 V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_M 、 I_M 等数据, 因此需要根据这些测试数据建立工程精度允许下的光伏电池实用模型。

在解析表达式(1)的基础上, 采用以下两点假设: 1) 忽略 $I_{sh}=(V+IR_s)/R_{sh}$, 因为通常情况下旁路电流远小于光生电流; 2) 假定 $I_{ph}=I_{sc}$, 因为通常情况下 R_s 远小于二极管正向导通电阻。则太阳电池方程可简化为单指数模型:

$$I = I'_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{C_2 V'_{oc}}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

其中,

$$C_1 = \left(1 - \frac{I'_M}{I'_{sc}} \right) e^{-\frac{V'_M}{C_2 V'_{oc}}} \quad (3)$$

$$C_2 = \left(\frac{V'_M}{V'_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I'_M}{I'_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (5)$$

$$V'_{oc} = V_{oc} [1 - c(T - T_{ref})] \ln[e + b(S - S_{ref})] \quad (6)$$

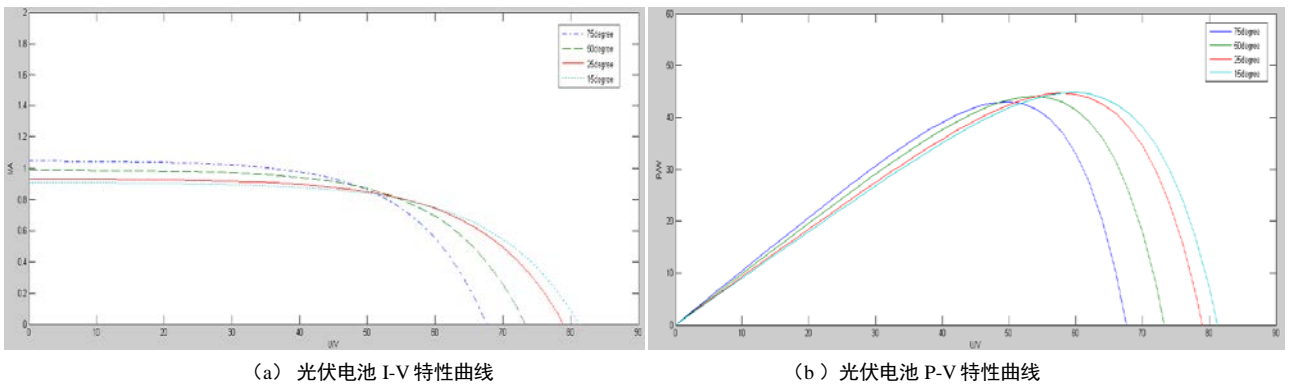
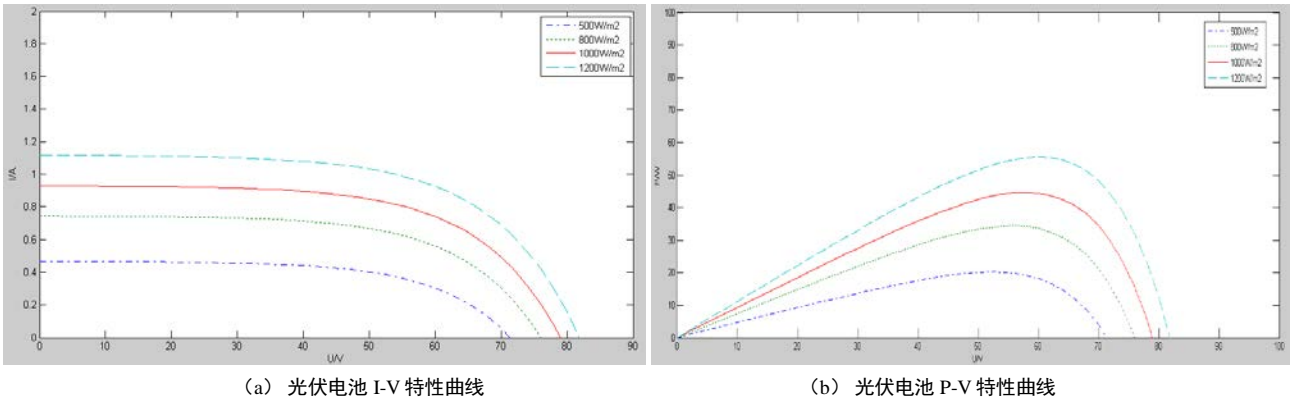
$$I'_M = I_M \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (7)$$

$$V'_M = V_M [1 - c(T - T_{ref})] \ln[e + b(S - S_{ref})] \quad (8)$$

式(5)-式(8)中, T_{ref} 为 25°C , S_{ref} 为 1000W/m^2 , 补偿系数 a 、 b 、 c 为常数, 通过大量试验数据拟合, 得出这些补偿系数的典型值为: $a=0.0025(^{\circ}\text{C})^{-1}$, $b=0.0005(\text{W/m}^2)^{-1}$, $c=0.00288(^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

1.2 光伏电池模型的仿真与分析

实验中所使用的光伏电池在标准测试条件下($s=1000\text{W/m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$)下 $V_{oc}=79\text{V}$ 、 $I_{sc}=930\text{mA}$ 、 $V_M=60\text{V}$ 、 $I_M=740\text{mA}$, 根据式(2)在 simulink 仿真环境下搭建工程实用仿真模型, 得到不同光照和温度条件下的光伏电池的输出特性曲线如图 2 和图 3 所示。从图 2 和 3 可知, 在光照均匀的情况下, 光伏电池的 I-V 曲线为单阶梯形状, P-V 曲线为单峰值, 光照因素主要影响光伏电池输出电流, 温度因素主要影响输出电压。



2 光伏阵列多峰值模型建立与仿真分析

2.1 光伏阵列多峰值数学模型的建立

在实际应用中, 由于单个光伏电池输出功率有限, 一般通过将光伏电池进行串并联组成光伏阵列来作为发电系统的能量输入部分。阵列受灰尘、树木、建筑等因素的影响, 其中的电池常处于光照不均匀的工作环境中, 在这种条件下, P-V 曲线会出现多个峰值, I-V 特性曲线会出现分段形式^{[5][6]}, 以光伏阵列单支路结构为例进行电路分析, 得到多模块串联支路电流方程见式(9)。

$$I = \begin{cases} I_{sc1} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V/N_{s1}}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}, & I_{sc2} \leq I \leq I_{sc1} \\ I_{sc2} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V/N_{s2}}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}, & 0 \leq I \leq I_{sc2} \end{cases} \quad (9)$$

其中: N_{s1} ---非遮挡串联模块数目;

N_{s2} ---遮挡串联模块数目;

推广可得任意光照条件下光伏阵列的数学模型, 见式 10。

$$\begin{cases} I_a = \sum_{x=1}^{N_p} I_x \\ V_a = \max \{V_x\} \end{cases} \quad (10)$$

其中: I_x ---式(9)中所得串联支路电流;

V_x ---串联支路电压;

N_s ---光伏电池中模块串联数目;

N_p ---光伏电池中模块并联数目。

2.2 光伏阵列仿真模型建立与分析

根据式(10)建立不均匀光照下光伏电池的仿真模型, 通过仿真模型模拟光伏电池处于光照相同、温度不同和温度相同、光照不均匀情两种情况下的光伏特性曲线, 分别如图 4 和图 5 所示。图 4 中, 光照值固定为 1000W/m^2 , 温度值分别为 60°C 、 30°C 和 0°C , 图 5 中, 温度值设定为 25°C , 光照值分别设定为 1000W/m^2 , 800W/m^2 , 600W/m^2 , 用来模拟光伏电池处于不均匀辐射条件下。

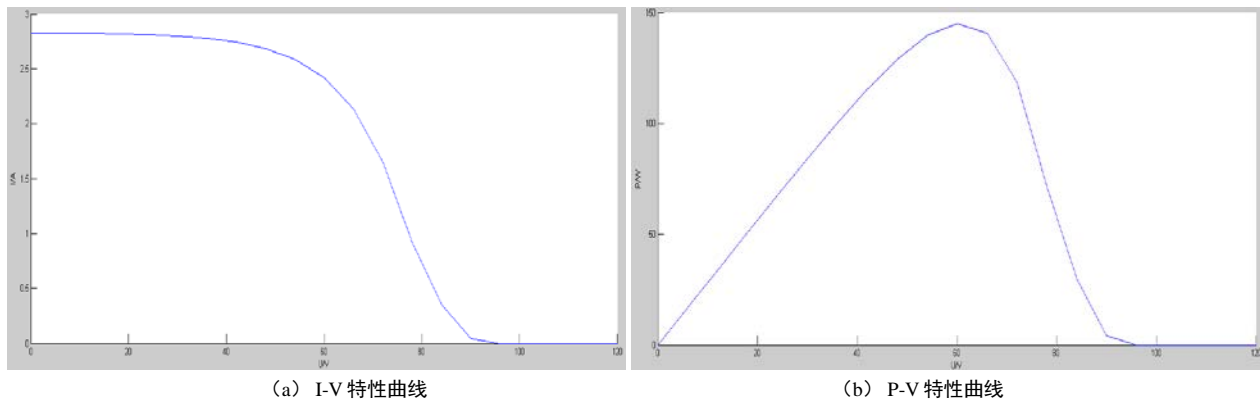


图 4 光照相同、温度不同条件下的光伏电池特性曲线

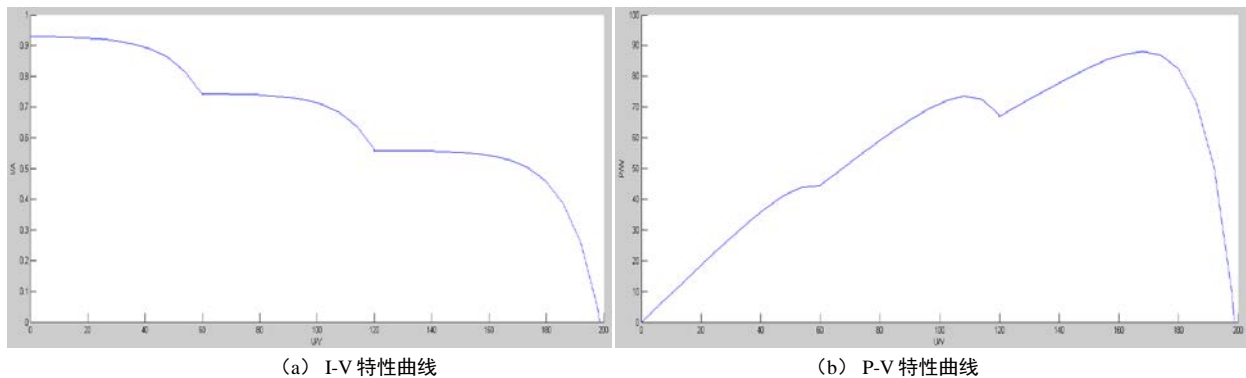


图 5 温度相同、光照不均匀的光伏电池特性曲线

从图 4 和图 5 中可以看出, 在光照均匀温度不同的条件下, 光伏电池的特性曲线呈现单峰特性, 温度相

同光照不均匀条件下呈现多峰值形状，由式(9)可知，光照不均匀条件下光伏输出电流为分段形式为多峰值现象产生的最根本原因，上文已经提到，温度因素主要影响光伏电池输出电压，对光生电流影响很小，所以在均匀光照而温度变化的环境下，光伏电池特性曲线呈现单峰值。模型的建立忽略了光伏模块阵列中二极管的损耗，但是由于二极管良好的开关特性，损耗对于整个光伏模块阵列来说可以忽略不计，因此光伏电池多峰值模型可以用于模拟光伏电池非均匀辐射情况。

3 基于数学模型的多峰值 MPPT 算法的提出

当光照不均匀条件下光伏电池 P-U 曲线为多峰值时，现有常规 MPPT 算法的运用会导致光伏电池跟踪的峰值点并不是最大功率点，造成能源的浪费。在这种情况下，提出一种光伏电池多峰值最大功率点跟踪算法具有重要意义^[7]。

本文提出了一种基于数学模型的多峰值 MPPT 算法，算法建立式(10)的基础上，具体实现分为三个步骤：(1)根据光伏电池所处外界条件的情况确定光照值和温度值；(2)通过式(10)计算得到不均匀辐射下光伏电池的输出电压电流值，根据所得电压电流值确定全局最大功率点所在范围；(3)在光伏电池的输出电压达到最大功率点电压波动允许范围内时启动常规单峰值 MPPT 算法，完成最大功率点的跟踪。

将多峰值 MPPT 算法应用于光伏发电系统，得到的仿真曲线如图 6 和 7 所示。图 6 为光伏阵列处于不均匀光照条件下的特性曲线，初始设定环境条件为温度 25°C ，三种辐射强度分别为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 $800\text{W}/\text{m}^2$ 和 $600\text{W}/\text{m}^2$ 的环境下，为验证算法的动态跟踪特性，在 0.21s 时将光照强度切换为 $1200\text{W}/\text{m}^2$ 、 $900\text{W}/\text{m}^2$ 和 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，根据式(10)计算可得，光伏阵列处于两种辐射强度下，最大功率分别为 88W 和 93W ，最大功率点电压分别为 168V 和 177V 。图 7 为多峰值算法用于单个光伏电池在均匀光照下进行最大功率点跟踪的特性曲线，初始设定环境条件为温度 25°C ，光照 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ， 0.246s 时将光照切换为 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，由式(2)可知，光伏电池处于两种光照条件下，最大功率分别为 44W 和 34W ，最大功率点电压分别为 60V 和 55V 。

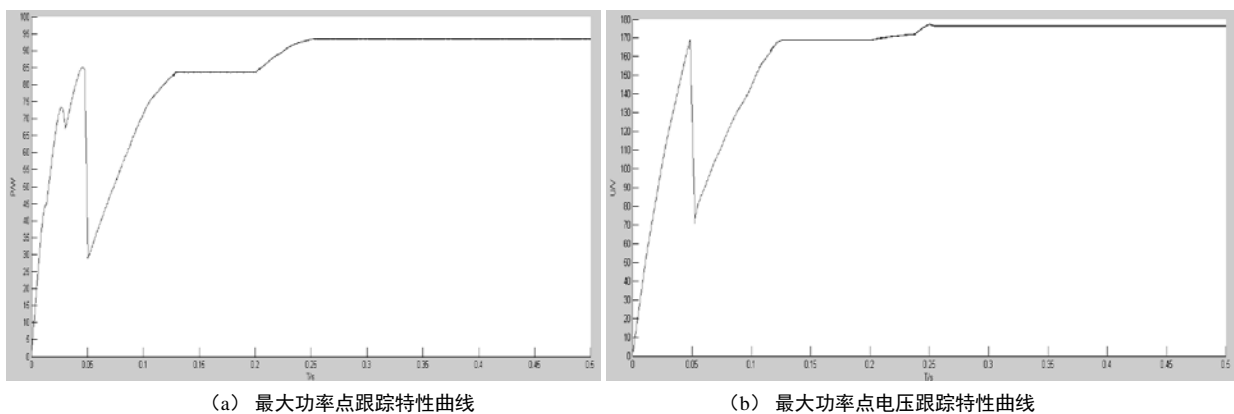


图 6 不均匀光照下加入 MPPT 算法后系统的跟踪特性

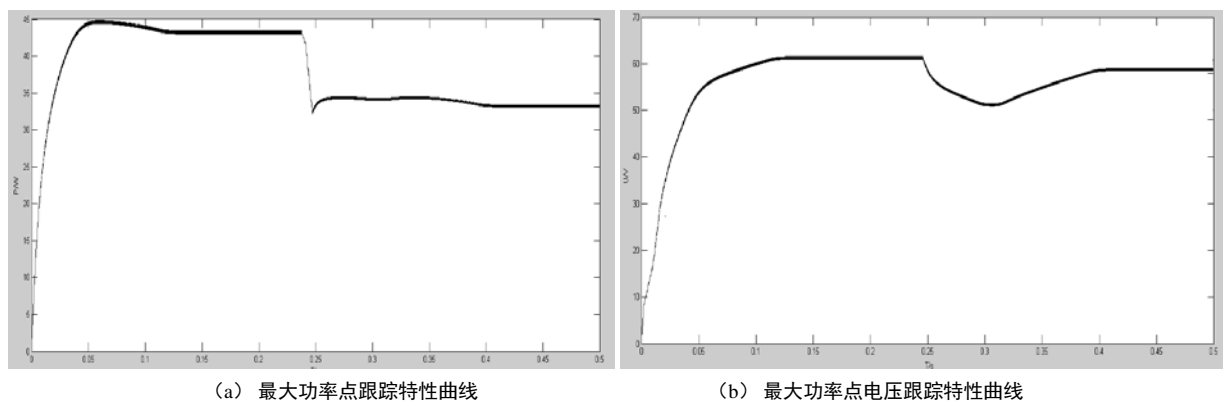


图 7 均匀光照下加入 MPPT 算法后系统的跟踪特性

从图 6 和 7 可以看出，在误差允许范围内，光伏阵列和光伏电池在不同辐射条件下均能有效跟踪到最大功率点，且动态跟踪特性较好，稳定性较高。从而验证了算法可用于光照均匀和非均匀条件下的最大功率点跟踪控制，具有可行性。

4 光伏发电系统变换器的研究

4.1 三电平直流变换器拓扑结构的提出

光伏发电前端系统的设计需要对 DC-DC 变换器进行研究，由于光伏阵列在局部阴影条件下具有较大的电压输出范围，因此选择一种适合宽范围电压输入的 DC-DC 变换器成为一种必然。考虑到 Buck-Boost 变换器可工作占空比范围宽且输入输出电压比和占空比满足一定数学关系^[8]，本次研究选择 Buck-Boost 电路作为光伏发电前端系统的拓扑结构，同时由于常规 Buck-Boost 电路的开关管在闭合后所承受的电压较大，过高的电压应力会带来开关管选择的难度，降低系统的可靠性。为了降低开关管电压应力并且提高系统的稳定性，提出采用三电平变换器的解决方案^[9]。三电平 Buck-Boost 变换器结构如图 8 所示，变换器的参数设计见表 1。

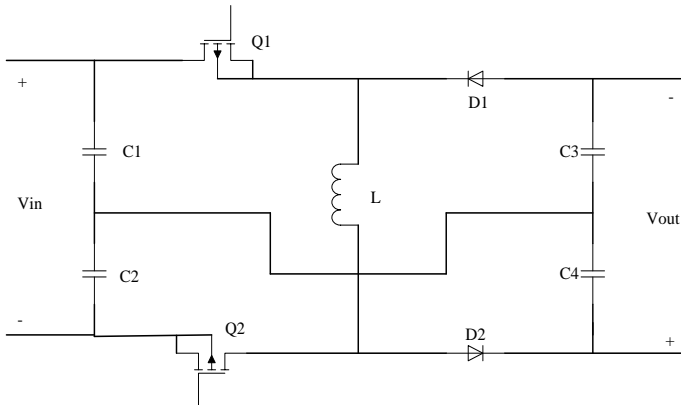


图 8 三电平 Buck-Boost 拓扑结构

表 1 Buck-Boost 变换器参数设计

功率	输入电压	输出电压	工作频率	输入电容	输出电容	电感
120W	120V	400V	10KHz	400uF	4.7uF	3mH

4.2 基于脉宽调制的中点电压平衡策略的提出及仿真分析

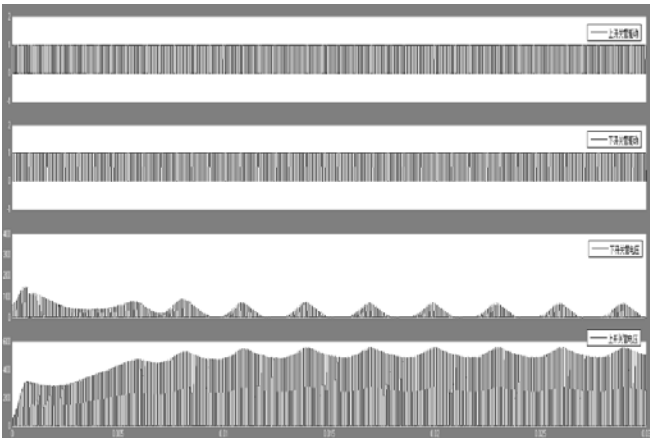


图 9 开关管驱动和电压波形

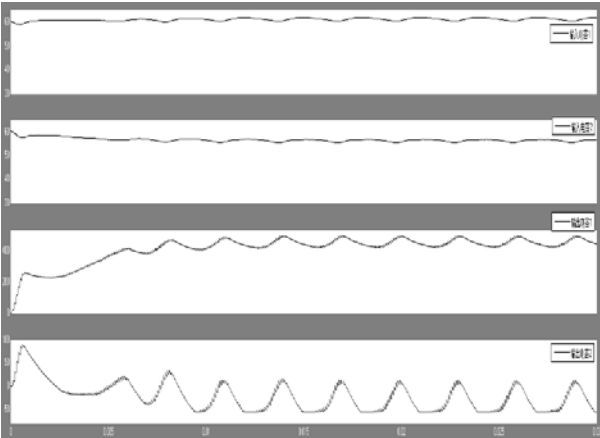


图 10 变换器输入输出电容电压波形

三电平的产生源于输入输出端电容的分压，因此存在中点电压平衡问题。正常情况下进行多峰值 MPPT

控制时，上下开关管交替导通，变换器工作正常。但是当出现软硬件故障导致某只开关管驱动发生变换时，中点电压即出现不平衡的情况，导致某个开关管上电压应力过大，严重时甚至烧毁开关管^[10]。所以在三电平 Buck-Boost 变换器中加入控制策略维持中点电压平衡是十分必要的。仿真中通过开关管驱动脉冲的变化模拟中点电压不平衡，得到的仿真波形如图 9 和 10 所示。

图 9 中，上面两个波形为三电平变换器两只开关管的驱动波形，下面两个波形为两只开关管电压应力的波形，可以看出，两只开关管电压应力存在较大差异。图 10 中，上面两个波形分别为输入端两个电容的电压波形，下面两个波形分别为输出端两个电容的电压波形，从可以看出，输入端两个电容和输出端两个电容都存在较大的电压偏差，即出现中点电压不平衡情况，从而导致开关管电压应力相差较大。

针对三电平技术中存在的中点电压不平衡的情况，提出一种基于开关管驱动脉冲宽度调制的控制策略，见表 2。

表 2 基于脉冲宽度调制的中点电压平衡控制策略

电路工作状态	占空比 $D < 0.5$		占空比 $D > 0.5$	
输入端电压关系	$V1 > V2$	$V1 < V2$	$V1 > V2$	$V1 < V2$
输出端电压关系	$V3 > V4$	$V3 < V4$	$V3 > V4$	$V3 < V4$
电压调节目标	提高中点电压	降低中点电压	提高中点电压	降低中点电压
电压调节方式	下开关管持续关断	上开关管持续关断	上开关管持续导通	下开关管持续导通
L1	1		0	
L2	1	0	1	0
L3	1	0	1	0
L4	是否需要调节			

表 2 中， $V1$ 和 $V2$ 表示输入端两个电容的电压， $V3$ 和 $V4$ 表示输出端两个电容的电压， $L1$ ， $L2$ ， $L3$ 和 $L4$ 为设定的变量。 $L1$ 的不同取值表示电路工作于升压或降压模式， $L2$ 的不同取值表示输入端电容电压关系， $L3$ 不同取值表示输出端电容电压关系， $L4$ 表示启动调节开始的时刻，仿真中设计当中点不平衡电压超过 5V 时启动调节，因此将 $L4$ 取值为 1 表示不平衡电压超过设定值，需要进行电压调节，取值为 0 表示不需要调节。系统加入控制策略后，开关管门源级之间加入和图 9 中相同占空比的驱动脉冲，得到的仿真波形如图 11 和图 12 所示。

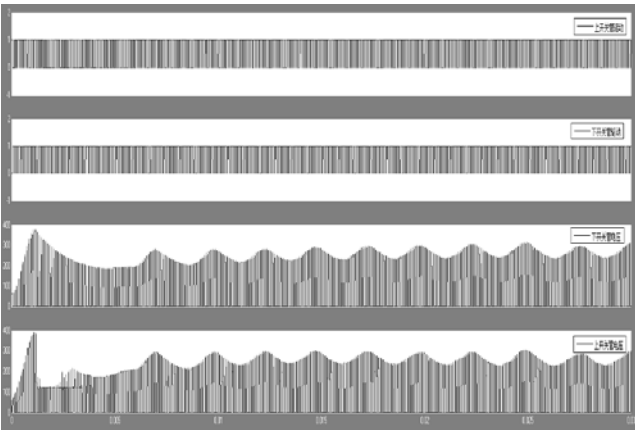


图 11 开关管驱动和电压波形

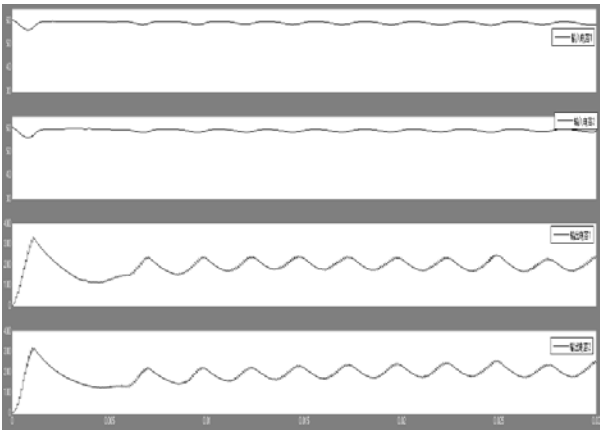


图 12 变换器输入输出电容电压波形

从图 11 中可以看出，加入控制策略后的开关管驱动呈现交替导通的情况，电压应力基本保持一致，同时，从图 12 中可以看出，加入控制策略后，输入端两个电容电压基本相等，输出端两个电容电压基本相等，

中点电压平衡,从而证明了控制策略的可行性。基于脉宽调制的中点电压平衡策略的提出,可以有效保证光伏发电系统在进行多峰值最大功率点跟踪控制时的稳定性。

5 结语

本文研究的光伏发电前级系统利用三电平 Buck-Boost 电路作为功率变换电路,有效的降低了开关管电压应力和电压电流纹波,提高了系统的稳定性,同时加入基于脉宽调制的中点电压平衡控制策略,保证系统的可靠运行。在此基础上设计了基于数学模型的多峰值 MPPT 算法,经过验证分析,算法在均匀和非均匀辐射强度下均能快速稳定的跟踪到系统最大功率点,实用性较强。在今后的研究中,可以在前级系统之后并入后级逆变系统,将产生的电能进行并网控制,完成光伏发电系统的完整设计。

REFERENCES

- [1] Yi Fan. Study of Control Strategy of Two-Stage Grid-Connected Inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014
- [2] Yongheng Yang, Keliang Zhou. PV Modeling and MPPT Control Strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, S1:229-234
- [3] Junjie Ge, Zhengming Zhao, Liqiang Yuan, et al. Multimodal MPPT Algorithm Based On Analog Position Circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 10:16-21
- [4] Wang Fu, Lin Zhou, Ke Guo, et al. Study of PV Engineering Mathematical Model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 10:211-216
- [5] Koray Sener Parlak. PV Array Reconfiguration Method Under Partial Shading Conditions[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63:713-721
- [6] Xiaoyan Liu, Xinmei Qi, Shousen Zheng, et al. Modeling and Analysis of PV Array in Partial Shadeing Conditions[J]. Power System Technology, 2010, 11:192-197
- [7] Shanlou Song, Longhu Chen, Xiaoju Chen, et al. Study of PV System Based On Partical Swarm Multimodal MPPT Algorithm[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 05:1354-1356
- [8] Chuan Yao. Research of Wide Range for Input Voltage Buck-Boost DC-DC Converter and Control Strategy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013
- [9] Liang Zhang, Henghua Yong, Weiwei An, et al. PWM Modulation of T-Type Three-Level DC-DC Converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, S1:332-336
- [10] Zhiou Xu, Guojun Tan. Study on Power Loss of High Power Three-Level Converter[J]. Energy Procedia, 2011, 11:306-313

【作者简介】



张悦(1990-),女,满族,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动和嵌入式开发方面的研究。
Email: Zyue9099@163.com

陈劲操(1956-),男,汉族,硕士研究生导师,教授,主要从事电力电子与电力传动和电力电子在电力系统的应用方面的研究。Email: jcchen@mail.njust.edu.cn