

# 基于双环控制的光伏制氢变流器设计与仿真

白 蕾<sup>1,3</sup>,苑易伟<sup>2\*</sup>,胡 平<sup>1,3</sup>,杨宝兰<sup>1</sup>

(1. 陕西工业职业技术学院 电气工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 3. 陕西高校青年创新团队, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**变流器是实现光伏发电适用于制氢系统的重要器件,因此,研究变流器相关技术具有十分重要的使用价值和理论意义。该文研究了光伏制氢变流器及双环控制方法。首先,根据光伏制氢系统要求分别计算 Boost 电路和 Buck-Boost 电路的元件参数。然后,设计了光伏发电模块的控制回路,通过控制 Boost 电路中 IGBT 的导通和关断来升高光伏阵列的输出电压,使其能够达到最大功率点。设计基于电流环和电压环相结合的双环控制策略,控制电路中开关的导通和关断,保证系统输出电压和功率的稳定。储能模块的控制回路通过控制 Buck-Boost 电路中 IGBT 的导通和关断,实现蓄电池的充电和放电使得母线电压保持稳定。蓄电池的控制回路采用双环控制,使得光伏制氢系统的控制精度更高。完成设计后搭建光伏制氢系统仿真模型,观察系统在不同情况下的输出波形,验证设计的可行性。

**关键词:**制氢;光伏;变流器;双环控制

中图分类号:TK91

文章编号:1000-0682(2024)02-0130-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.023

## Design and simulation of photovoltaic hydrogen production converter based on dual-loop control

BAI Lei<sup>1,3</sup>, YUAN Yiwei<sup>2\*</sup>, HU Ping<sup>1,3</sup>, YANG Baolan<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Shaanxi Xianyang 712000, China; 2. Faculty of Automation and Information Engineering Xi'an University of Technology, Shaanxi Xi'an 710048, China; 3. The Youth Innovation Team of Shaanxi Universities, Shaanxi Xianyang 712000, China)

**Abstract:** Converters are important devices for achieving photovoltaic power generation suitable for hydrogen production systems. Therefore, studying converter related technologies has significant practical value and theoretical significance. This article studies the photovoltaic hydrogen production converter and the dual loop control method. Firstly, calculate the component parameters of the Boost circuit and the Buck Boost circuit according to the requirements of the photovoltaic hydrogen production system. Then, the control circuit of the photovoltaic power generation module was designed to increase the output voltage of the photovoltaic array by controlling the on and off of the IGBT in the Boost circuit, enabling it to reach the maximum power point. Design a dual loop control strategy based on the combination of current loop and voltage loop to control the conduction and shutdown of switches in the circuit, ensuring the stability of system output voltage and power. The control circuit of the energy storage module controls the on and off of the IGBT in the Buck Boost circuit to charge and discharge the battery and maintain stable bus voltage. The control circuit of the battery adopts dual loop control, which makes the control accuracy of the photovoltaic hydrogen production system higher. After completing the design, build a simulation model of the photovoltaic hydrogen production system, observe the output waveform of the system under different conditions, and verify the feasibility of the design.

**Keywords:** hydrogen production; photovoltaic; converter; dual loop control

收稿日期:2023-11-19

**基金项目:**陕西省博士后基金(项目编号:2023BSHYDZZ140);陕西工业职业技术学院自然科学类重点项目(项目编号:2022YKZD-002);陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(项目编号:2022JM-388);陕西工业职业技术学院科技创新专项(项目编号:2022YKZX-021)

**第一作者:**白蕾(1988—),女,陕西咸阳人,硕士,副教授,研究方向为新能源技术、电气自动化。

## 0 引言

开发清洁、绿色、低碳的新能源是人类社会可持续发展的必要选择,是造福子孙后代的必由之路。氢目前被认为是一种清洁能源载体<sup>[1]</sup>,通过利用可再生能源产生的电力将水分解成氢气和氧气。可再生能源和制氢系统的整合为实现零碳经济的全球目标提供了新的途径<sup>[2]</sup>。伴随着太阳能行业的大规模、高速发展,将太阳能运用到制氢技术上,对于改善人类生存环境使得人类社会不断发展具有十分重要的意义。

在光伏电解水制氢过程中,变流器是非常重要的设备之一<sup>[3]</sup>。当光照强度或温度改变时,光伏阵列的最大功率点也会发生改变,导致输出电压不能够实现恒定。但想要保证制氢装置的可靠高效运行,那么就必须控制母线电压稳定。电解水制氢技术是利用光伏板产生的直流电将水电解为氢气和氧气<sup>[4]</sup>。变流器先将光伏板的输出电压泵升至最大功率时的电压,然后并联储能模块实现稳压输出。

目前对于变流器已经有了大量的研究,现有研究主要集中于单向变换器结构与控制<sup>[5]</sup>。随着光伏发电、制氢及储能的技术发展,单向变换器已无法满足储能系统和制氢系统的双向变换需求<sup>[6]</sup>。因此,该文设计了双向直流/直流变换器的结构及控制模块,并对电路参数进行了计算,实现光伏制氢系统的稳压输出。最后通过仿真,双向 DC/DC 变换器能够在不同负载条件下实现光伏制氢系统直流母线的电压稳定。

## 1 DC/DC 变换器设计

为了充分利用光伏能源,需要利用变流器将光伏板的输出电压调节为最大功率时的电压,然后并联储能模块实现稳压输出。直流斩波装置能够将直流电直接转变为另一数值的电压,直流斩波器能够节约 20% - 30% 的电能<sup>[7]</sup>,也能够抑制网侧谐波电流产生的不良影响<sup>[8]</sup>。

该文选用的是 Boost 变换器,其作用是将输入电压抬升到某一数值,使得其输出电压能够与负载匹配。在光线或温度较低时光伏发电的输出电压会偏低,利用 Boost 电路将光伏电池输出的直流电提高到期望的范围内并保持恒定。Boost 电路基本电路图如 1 所示。Boost 变换器主要由电源  $E$ 、二极管  $D$ 、电感  $L$ 、场效应晶体管  $S$ 、负载电阻  $R$  和滤波电容  $C$  组成。

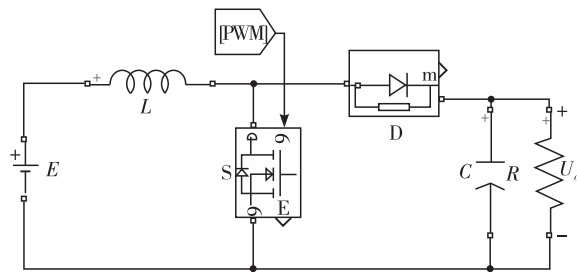


图 1 Boost 变换器原理图

Boost 变换器有两种工作模式,分别是电感电流连续(CCM)和电感电流断续(DCM)。CCM 模式下电感电流连续,此时电路是线性定常系统,因此选择 CCM 模式为 Boost 电路的工作模式。当  $S$  导通时,电源  $E$  会给电感供电,假设  $S$  导通时间为  $t_{on}$ ,在电感通电过程中电感储存的能量就是  $EIt_{on}$ 。当  $S$  断开时,电容  $C$  的电感由电感  $L$  和电源  $E$  提供。假设  $S$  断开的的时间为  $t_{off}$ , $S$  断开后电感  $L$  会释放能量,大小为  $(U_o - E)It_{off}$ ,在稳定工作的情况下,电感  $L$  储存和释放的能量遵循能量守恒定律:

$$EIt_{on} = (U_o - E)It_{off} \quad (1)$$

移相得:

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{1}{1 - D} E \quad (2)$$

再次移相得:

$$E = (1 - D)U_o \quad (3)$$

式中:周期  $T = t_{on} + t_{off}$ ,占空比  $D = \frac{t_{on}}{T}$ 。

Boost 电路中的储能电感  $L$  可以提高电压,电容  $C$  则可以维持电压的稳定,这也是 Boost 电路的一个重要功能。

如图 2 所示,把光伏电池连接到 Boost 电路,其中  $U_{in}$  是电路的输入电压, $U_o$  是电路的输出电压。

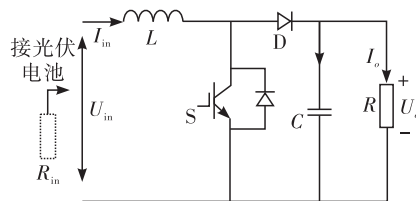


图 2 含光伏电池的 Boost 变换器原理图

假设 Boost 变换器为理想变换器,则电路转换效率为 100%。此时电路的输入功率等于输出功率,电感自身阻值可忽略。可得:

$$I_o = I_{in} (1 - D) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以得出输入阻抗的关系式:

$$R_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = \frac{U_o}{I_o} (1 - D)^2 = R (1 - D)^2 \quad (5)$$

根据公式,只要负载  $R$  保持不变,通过调节 Boost 电路的占空比就能够改变输入电阻阻值  $R_{in}$ ,从而使输入电阻与光伏板本身输出的电阻达到匹配,进而能够使光伏电池输出最大功率,实现最大功率点的跟踪。这是 Boost 电路在其中的第二个关键功能。而 Boost 电路中 IGBT 的触发由控制回路产生的 PWM 信号控制,从而实现最大功率的跟踪和稳压输出。

## 2 Boost 变换器设计参数

该文中搭建的光伏阵列模型参数如下:

光伏阵列的开路电压  $U_{oc} = 308 \text{ V}$ ,短路电流  $I_{sc} = 24.5 \text{ A}$ ,最大功率点对应电流  $I_m = 21 \text{ A}$ ,最大功率点对应电压  $U_m = 238 \text{ V}$ ,最大功率  $P_m = 4998 \text{ W}$ 。

### 2.1 电感参数选择

Boost 变换器工作在 CCM 模式,由伏安特性可得:

$$U_i DT = (U_o - U_i)(1 - DT) \quad (6)$$

$$U_o = \frac{U_i}{1 - D} \quad (7)$$

电压增益为:

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (8)$$

假设电路没有损耗则:

$$P_i = P_o \quad (9)$$

式中: $P_i$ 为电池板输出功率; $P_o$ 为后级消耗的功率。

$$P_i = U_i I_i \quad (10)$$

$$P_o = U_o I_o \quad (11)$$

则有:

$$\frac{I_o}{I_i} = 1 - D \quad (12)$$

式中: $I_i$ 为电池板输出的平均电流。

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow \Delta i_L = \frac{U_i DT}{L} \quad (13)$$

式中: $\Delta i_L$ 为输入电流的纹波电流。

定义:

$$\eta_i = \frac{\Delta i_L}{I_L} \quad (14)$$

由式(7)~(13)可得:

$$L = \frac{(1 - D)^2 D U_o^2 T}{\eta_i P_o} \quad (15)$$

由式(15)可知,当  $D = 0.33$  时, $L$  取得最大值。

$$L_{\max} = \frac{4 U_o^2 T}{27 \eta_i P_o} \quad (16)$$

为了保证电流的纹波要求,则:

$$L \geq L_{\max} \quad (17)$$

系统的最小占空比为:

$$D_{\min} = 1 - \frac{U_i}{U_o} = 1 - \frac{U_{oc}}{U_o} = 1 - \frac{308}{400} = 0.23 \quad (18)$$

在本系统光伏阵列中: $U_{oc} = 308 \text{ V}$ , $U_o = 400 \text{ V}$ ,电流的纹波  $\eta_i \leq 25\%$ , $P_o = 4998 \text{ W}$ 。

考虑取开关管的开关频率  $f = 10 \text{ kHz}$ , $T = 0.1 \text{ ms}$ ,由式(16)(17)可得:

$$L_{\max} = \frac{4 \times 400^2 \times 0.1 \times 10^{-3}}{27 \times 0.25 \times 4998} = 1.9 \text{ mH} \quad (19)$$

则  $L \geq L_{\max} \Rightarrow L \geq 1.9 \text{ mH}$ ,取  $L = 2 \text{ mH}$ 。

### 2.2 电容参数选择

假定纹波电流完全流经电容,那么在电容的电流降至零之前将保持充电状态;而当电流超过零时,与电池板一起释放出电能,为电感提供储能。

在  $\Delta t = 0.05 \text{ ms}$  时间内,电流的变化量  $\Delta i = 16 \text{ A}$ ,设  $\Delta u = 1\% U_o = 4 \text{ V}$ ,由  $\Delta i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$ , $C_1 = 0.1 \text{ mF}$ 。

电容  $C_2$  为支撑电容,并联在光伏发电模块和负载模块之间。假设流经二极管电流的所有纹波电流都流经电容。

制氢负载为纯阻性,母线电压稳定在  $400 \text{ V}$ 。由式(8)和(12)可得:

$$\Delta U_o = \frac{I_o DT}{C_2} \quad (20)$$

由式(9)和式(20)可得:

$$\Delta U_o = \frac{P_o DT}{C_2 U_o} \quad (21)$$

设电容电压的纹波系数为:

$$\eta_u = \frac{\Delta U_o}{U_o} \quad (22)$$

由式(21)和式(22)可得:

$$C_2 = \frac{P_o DT}{\eta_u U_o^2} \quad (23)$$

假设  $\eta_u = 0.5\%$ , $D_{\max} = 0.95$ ,本系统中  $P_o = 4998 \text{ W}$ , $T = 0.1 \text{ ms}$ ,则带入(23)可得:

$$C_2 = \frac{4998 \times 0.95 \times 0.1 \times 10^{-3}}{0.005 \times 400^2} = 593 \text{ } \mu\text{F} \quad (24)$$

## 3 双向 DC/DC 变换器的设计

### 3.1 储能模块

储能模块主要是通过蓄电池的充放电来稳定直流母线的电压。当母线电压大于给定电压时,蓄电池会自动吸收功率,降低直流母线电压;相反,当母

线电压小于给定电压时,蓄电池就会输出功率,升高母线电压。储能模块的仿真如图3所示。

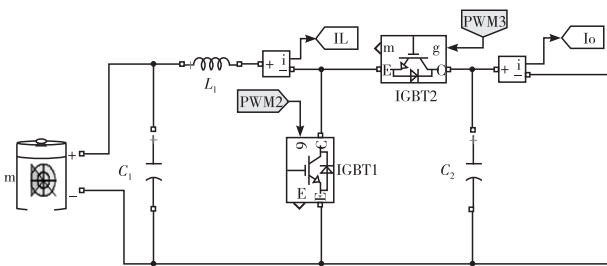


图3 储能模块仿真图

### 3.2 双向DC/DC变换器

蓄电池需要吸收功率和输出功率,所以应该通过双向DC/DC变换器与直流母线连接。双向DC/DC(Buck-Boost)变换器是升降压式变换器,是一种输出电压既可低于输入电压也可高于输入电压的不隔离直流变换器,但其输出电压的极性与输入电压相反。Buck-Boost变换器可看做是Buck变换器和Boost变换器合并了开关管串联连接组成的。相较单向变换器,Buck-Boost可实现电压能量双向传输<sup>[9]</sup>,使系统减少功率器件使用量,降低了系统的损耗,提高了系统的效率,提升系统的动态性能。

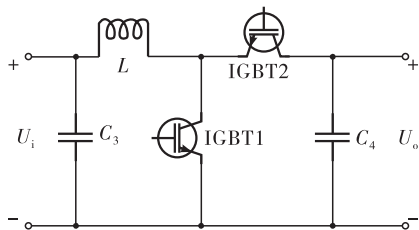


图4 双向Buck-Boost变换器电路原理图

Buck-Boost变换器电路原理图如图4所示,Buck-Boost变换器有显著的优势:需要的元器件数量较少、结构相对简单、容易控制、可靠性高等。在图4中,IGBT1和IGBT2为工作方式互补,从 $U_o$ 到

$U_i$ 时,电路工作在降压模式,此时IGBT1处于关断状态,IGBT2由PWM信号控制通断;从 $U_i$ 到 $U_o$ 时,电路工作在升压模式,此时IGBT2处于关断状态,IGBT1由PWM信号控制通断。

### 3.3 双向DC/DC变换器控制电路

图5为Buck-Boost变换器的控制电路。该变换器的控制回路由PWM、电流内环控制回和电压外环控制回路组成。通过电流内环可以加快系统的调节速度,也能够有效防止蓄电池因电流过大被损坏。电压外环用于调节电压跟随给定,电流内环可以使得电流输出能够快速跟随输入的变化而变化。控制策略均采用PI控制,比例控制可以快速的反应误差,而积分控制不断积累系统产生的误差,并对输出误差进行消除。控制回路输出PWM信号控制双向Buck-Boost变换器中IGBT的导通和关断,从而实现储能电池的充放电。

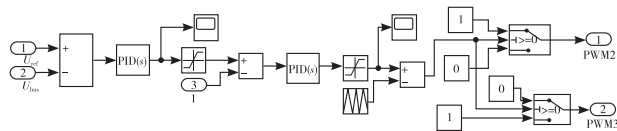


图5 双向Buck-Boost变换器的控制电路仿真图

在Buck-Boost变换器电路中,当电路工作在Boost模式时,电池放电,电压从左向右,可以有效保持直流母线的稳定。当电路工作在Buck模式时,电压则是从右向左,电池恒压充电<sup>[10-11]</sup>。通过控制储能电池的充放电使得直流母线电压保持恒定。

## 4 仿真结果及分析

光伏制氢系统由光伏发电模块、储能电池模块、制氢模块、控制模块和观测模块组成,系统仿真如图6所示。

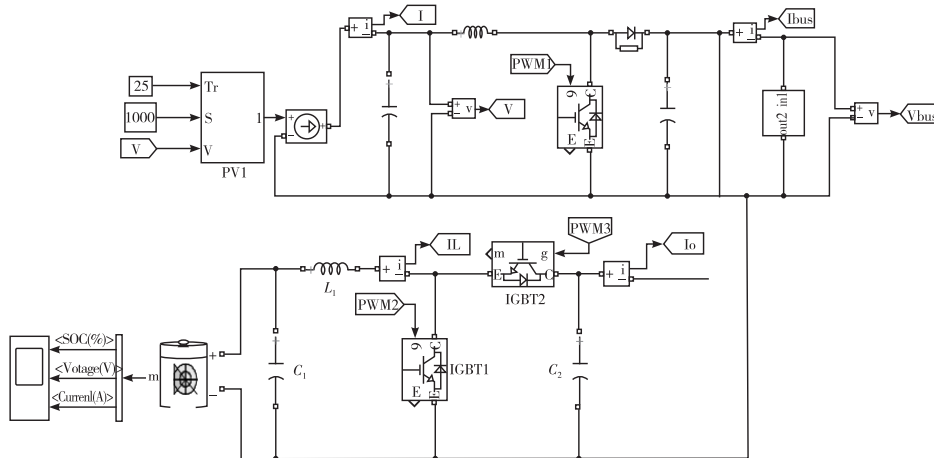
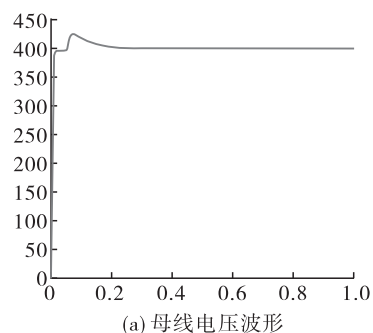


图6 光伏制氢系统仿真图

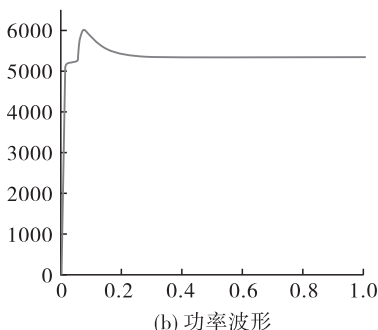
光伏发电模块的功能是实现光伏阵列的最大功率追踪并且保持在最大功率点持续输出;储能电池模块是根据光伏阵列输出的大小,来决定吸收功率还是输出功率。如果光伏阵列的输出电压高于预设值,蓄电池会吸收功率来维持母线电压恒定;反之,蓄电池会输出功率维持母线电压,蓄电池起到“削峰填谷”的作用;制氢模块利用阻性负载模拟制氢装置;控制模块分为光伏发电控制回路和储能电池控制回路,由控制回路产生的 PWM 信号驱动 IGBT 的导通和关断。

电解水制氢系统用纯阻性的电阻代替。三个电阻值设定为  $R_1 = 30\ \Omega$ 、 $R_2 = 50\ \Omega$ 、 $R_3 = 30\ \Omega$ 。为了模拟在运行时负载由轻载和重载之间的切换,观察系统在轻载和重载条件下的运行情况以及过渡过程,电阻采用并联的方式连接。设置  $R_1$  导通时间为  $0 \sim 1\ \text{s}$ 、 $R_2$  导通时间为  $1 \sim 2\ \text{s}$ 、 $R_3$  导通时间为  $2 \sim 4\ \text{s}$ 。在仿真运行至  $1\ \text{s}$  时负载由  $30\ \Omega$  增加至  $50\ \Omega$ ,表示由轻载切换至重载,在  $2\ \text{s}$  时负载由  $50\ \Omega$  又变回  $30\ \Omega$ ,表示由重载切到轻载。

图 7(a) 是在光照条件保持在  $1000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,温度保持在  $25\ ^\circ\text{C}$ ,负载恒定为  $30\ \Omega$  的条件下系统的输出。从图中可以看出,输出电压快速上升,在  $0.2\ \text{s}$  后稳定在  $400\ \text{V}$ 。系统输出电压的峰值电压  $V_{\text{ip}} = 424.5\ \text{V}$ ,超调量为  $6.1\%$ 。系统的快速性和稳定性都比较好,且超调量小有利于保护制氢装置。



(a) 母线电压波形



(b) 功率波形

图 7 恒定负载条件下光伏制氢系统的输出

光伏制氢系统的输出功率如图 7(b) 所示。从图中可以看出,系统输出功率在  $0.25\ \text{s}$  后稳定在  $5350\ \text{W}$ ,系统在初始时段有超调量,峰值功率为  $6000\ \text{W}$ ,超调量为  $12\%$ 。系统输出功率稳定在  $5350\ \text{W}$ ,说明当负载恒定时,输出功率也是恒定的。

当制氢系统功率为  $30\ \Omega$  时,输出功率最终稳定在  $5350\ \text{W}$ ,而光伏阵列的最大功率为  $4998\ \text{W}$ ,光伏制氢系统的输出功率大于光伏阵列的最大功率,此时蓄电池输出功率,保持母线电压稳定。

图 8 为蓄电池当前剩余电量所占电池总容量百分比,从图中看出,开始时电量消耗的较快是因为光伏阵列还未达到最大功率点,所以蓄电池输出功率较大,耗电量快。图中折线斜率很快又变小,此时光伏阵列已经实现了最大功率的追踪,并且能够稳定在最大功率点,由于光伏制氢系统的输出功率大于光伏阵列的最大功率,储能电池的输速率保持恒定,近似一条直线。仿真结果说明当输出功率大于光伏阵列的最大功率时,储能电池能够正常输出电能提供给制氢系统。

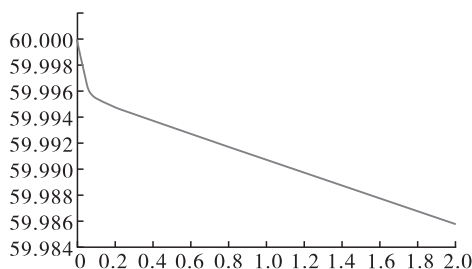


图 8 恒定负载条件下蓄电池电量消耗波形

切换负载时光伏制氢系统的输出电压如图 9 所示。仿真运行至  $1\ \text{s}$  时负载由轻载切换为重载,在仿真运行至  $2\ \text{s}$  时负载又由重载切换为轻载。如图 9(a) 所示,仿真开始运行后,母线电压在很快时间内能够稳定在  $400\ \text{V}$ ,当仿真运行至  $1\ \text{s}$  时母线电压波形出现波动,这是由于切换负载造成的,但母线电压波动幅度很小并且能够很快再次稳定。当仿真运行至  $2\ \text{s}$  时负载由重载切换为轻载,此时母线电压再次出现波动,但波动也很小。

图 9(b) 为切换负载时光伏制氢系统输出功率波形图,由于母线电压要保持  $400\ \text{V}$ ,由  $P = U^2/R$ ,当轻载切换为重载时系统的输出功率减小;当系统由重载切换至轻载时,输出功率变大。



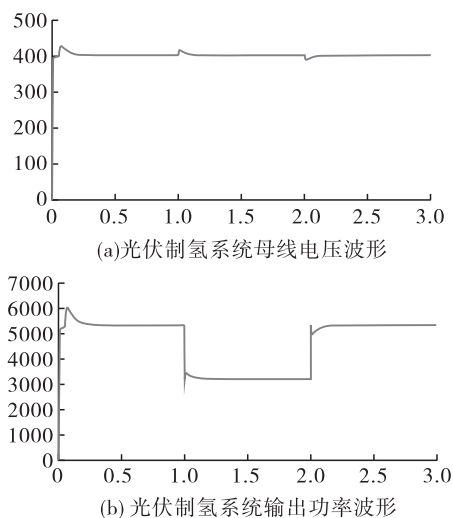


图9 切换负载条件下光伏制氢系统的输出

图10是切换负载条件下蓄电池电量的电量消耗。仿真运行在0~1s时光伏制氢系统处于轻载,由于输出功率大于光伏阵列的最大功率,此时蓄电池需要输出电能,因此蓄电池的电量一直在下降。仿真运行在1~2s时光伏制氢系统处于重载,此时输出功率小于光伏阵列的最大功率,蓄电池需要吸收功率,从图中可以看出蓄电池的电量在不断上升。

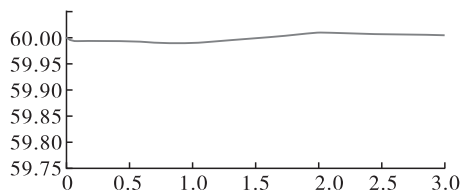


图10 切换负载条件下蓄电池电量消耗波形

由光伏制氢系统在恒定负载条件下和切换负载的条件下得仿真结果可以看出,该文设计的基于双环控制的光伏制氢变流器能够很好的控制光伏制氢系统的输出,当系统遇到干扰时,系统的波动很小并且能够很快的恢复平衡状态。从仿真结果来看,该文所设计的基于双环控制的光伏制氢变流器能够满足设计要求,可以实现稳压输出。

## 5 总结

该文针对光伏耦合电解水制氢系统及储能蓄电池系统,设计了光伏制氢变流器。首先,采用Boost电路将电池板输出的电压泵升到设定电压的值。在

直流系统中加入蓄电池作为储能模块,起到稳定直流母线电压的作用,使得光伏制氢系统能够在光照不足或温度较低条件下仍然能够正常工作。储能模块与直流母线的连接采用了双向DC/DC变换器,使得蓄电池能够通过充电和放电控制母线电压稳定。储能模块的控制回路采用双闭环控制,使得系统的稳定性和快速性变得更好。通过对于光伏制氢变流器的仿真分析,双闭环控制对于系统的稳定性和快速性有着明显的提升并且系统的误差明显减小。

### 参考文献:

- [1] 詹阔.“双碳”背景下我国氢能产业发展现状综述[J]. 铁路采购与物流,2023,18(07):37-39.
- [2] Sabrina Fernandes Macedo, Drielli Peyerl. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(19): 10460-10473.
- [3] 刘普,崔艺博,刘兆峰,等. 基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4):114-125.
- [4] 韩睿康. 可再生能源制氢技术与应用[J]. 节能,2023, 42(06):94-96.
- [5] 唐欣,李珍,李勇,等. 并网变流器频率耦合振荡分析及解耦控制设计[J]. 中国电机工程学报,2023,43(08):3127-3137.
- [6] 曲建鑫,李振新,孙佳,等. 可再生能源耦合氢储能隔离型变换器设计[J]. 吉林电力,2022,50(06):8-12+29.
- [7] 李仁贵,荣军,刘凯,等. Boost变换器在单相功率因数校正技术中的应用[J]. 船电技术,2015,35(08):32-35.
- [8] 苏锐. DC电源直流斩波电路设计[J]. 通信电源技术,2019,36(02):136-137.
- [9] 胡舒阳. 直流微网中双向DC/DC变换器的研究[D]. 扬州:扬州大学,2013.
- [10] 时颖,杭阿芳,田行璇,等. 直流微电网双向Buck-Boost变换器控制模型的研究[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(06):14-17.
- [11] 聂进新,赵志斌,于守森,等. 基于PLECS仿真的四开关Buck-Boost变换器参数设计[J]. 电子设计工程, 2023,31(16):62-66.