

包含光储供电系统三端口变换器工作状态分析

胡长斌¹, 马腾飞¹, 马建立², 徐铮²

(1. 北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144;

2. 北京智源新能电气科技有限公司, 北京 102600)

摘要: 分布式发电供能技术是当代智能微电网的重要组成部分, 其中三端口隔离型直流变换器发挥了重要作用。因为蓄电池储能系统可以实现能量的流动和储存, 所以三端口隔离型直流变换器与光储供电系统结合可以实现能量的多方向流动。为了实现上述目的, 研究并设计了一种包含光储供电系统的三端口直流变换器系统, 研究采用的方法是根据现实中存在的工作场景分析出三端口变换器不同的工作状态, 其中包括了光伏输出、蓄电池和直流负载的工作状况分析, 并在传统移相控制和光伏最大功率跟踪控制相结合的基础上, 相对地设计了不同的控制方法, 通过控制策略实现了系统内的能量流动和协调管理。最后, 进行了模型的搭建和验证, 验证了工作场景分析及能量流动协调管理的可行性。

关键词: 三端口隔离型变换器; 移相控制; 能量管理

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24160

Analysis of Working State of Three-port Converter Including Photovoltaic Power Generation and Energy Storage Power Supply System

HU Changbin¹, MA Tengfei¹, MA Jianli², XU Zheng²

(1. College of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Beijing Zhiyuan Xinneng Electric Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: Distributed power generation technology is an important part of modern smart microgrid, in which three-port isolated DC converter plays an important role. Because the storage battery system can realize the flow and storage of energy, so the combination of three-port isolated DC converter and photovoltaic power generation and energy storage power supply system can realize the multi-direction flow of energy. In order to achieve the above purpose, a DC converter including photovoltaic power generation and energy storage power supply system of the three-port system was studied and designed, the research methods were based on real work scenarios that exist in the analysis of three-port converter different working condition, including the photovoltaic output, the working condition analysis of storage battery and DC load. Based on the combination of traditional phase shift control and photovoltaic maximum power tracking control, different control methods were designed to realize the energy flow and coordination management in the system through the control strategy. Finally, the model was built and verified to verify the feasibility of work scene analysis and energy flow coordination management.

Key words: three-port isolated converter; phase shift control; energy management

近年来, 分布式发电技术和蓄电池储能技术得到了快速发展, 在常规火力发电不足的情况下, 利用太阳能、风能及其他能源为直流负载直接供电是一种十分方便的供电方式, 特别是最近十年以来, 电动汽车领域、能源互联网、智能电网以及能量路由器等概念的提出, 对于低成本、低损耗、安全可靠的多端口变换器的研究变得十分

重要。当前, 国内外学者们对于多端口变换器的拓扑及控制方法已经进行了大量的研究。

多端口变换器从拓扑结构的类型上分为共直流母线的多端口变换器、共交流母线的多端口变换器、直流-直流自耦变压器拓扑的多端口变换器、模块化多端口变换器以及桥式的多端口变换器等。其中桥式变换器是目前应用最广泛的

作者简介: 胡长斌(1982—), 男, 博士, 教授, Email: changbinlove@163.com

通讯作者: 马腾飞(1996—), 男, 硕士, Email: 2454621579@qq.com

一种,根据桥式变换器衍变出来的拓扑结构方式也多种多样^[1],从电能转换类型上来分,多端口变换器又分为DC/DC型、DC/AC型和复合型等三类^[2]。文献[3]对隔离型三端口变换器进行了等效变换,并且进行了小信号模型的推导,采用虚拟电阻的方法来改善系统控制的有效性。文献[4]提出了一种新型的多端口DC/DC模型,并且结合了光伏系统进行了实验验证。文献[5]对于三端口隔离型变换器的工作过程进行了推导,并且提出了采用连续和离散两种不同的混沌控制策略与移相相结合的控制技术,并且通过实验验证了控制的正确性。文献[6]针对以蓄电池和超级电容为电源输入的多端口DC/DC变换器提出了根据系统的实际工作状态而不断变化的控制策略,实现变换器的工作稳定性和准确性,但是并没有进一步进行实物验证。

目前对微电网内部能量管理的协调控制是目前智能微电网的研究比较前沿的方向,协调控制的设计研究包括协调控制的控制算法设计、电力电子设备的电气控制设计和设备与设备之间的通讯程序设计。而设备的应用场景和工作状态的分析是对协调控制的研究的基础,研究的方向主要为对于一个需要多个不同控制的系统,分析出正确的并且具有实际意义的工作场景,并且

设计出不同的控制方式来控制系统的不同的工作状态。

本文将三端口隔离型全桥DC/DC变换器与光伏直流输入模块和直流蓄电池结合组成了包含光储供电系统的三端口直流变换器系统。研究的控制方法是在采用传统移相控制的基础上,结合了光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制光伏的输出,与蓄电池结合来实现分布式能源供电。根据应用场景分析出系统的工作状态,并且进行仿真验证,为系统的协调控制提供依据^[7-13]。

1 三端口DC/DC变换器系统的拓扑与控制

1.1 三端口DC/DC变换器系统的拓扑与控制

多端口变换器的结构包括三类:非隔离型、部分隔离型和隔离型。其中隔离型DC/DC变换器是采用高频多绕组变压器实现电气隔离,这样既可以保证电路输入输出端口的安全,还可以通过变压器实现升压和降压等功能。三端口隔离型直流变换器是双向隔离型DC/DC变换器的拓展,可以在端口处接入直流输入和输出。光伏变换输出与三端口DC/DC变换器结合构成的系统其拓扑结构如图1所示。

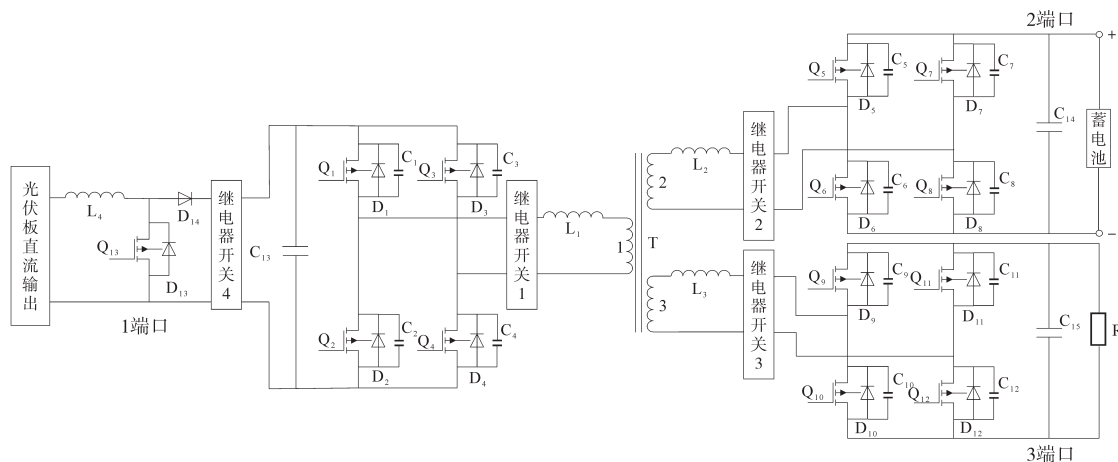


图1 包含光储供电系统的三端口隔离型直流变换器拓扑

Fig.1 Three-port isolated DC converter topology including photovoltaic power generation and energy storage power supply system

图1中,1端口为太阳能光伏输入端口,光伏板输出稳定的直流电压为系统提供能量来源;2端口为蓄电池端口,蓄电池在整个光储供电系统中的作用是支撑系统电压稳定;3端口为直流负载端口,直流负载端口可分为纯电阻负载和蓄电池负载。

在变压器的三个输出端口和直流母线处设

计了电磁继电器作为硬件开关,可以根据需要通过系统控制继电器的吸合和关断,从而实现端口的接入和接出。

变压器是整个系统中的重要部分,主要作用是电气隔离和能量交换,变压器T采用高频变压器,变压器工作频率为 $f_r=40\ 000\ \text{Hz}$,变压器内阻约为 $R_T=0.002\ \Omega$,变压器T变比为 $T_1:T_2:$

$T_3=1:1:1$,其它器件IGBT并联电容 $C_1\sim C_{12}$ 容量为 $0.000\ 004\text{ F}$,电容 $C_{13}\sim C_{15}$ 容量为 0.003 F ,电感 $L_1\sim L_3$ 为 $0.000\ 04\text{ H}$,电感 L_4 为 0.001 H 。IGBT开关管导通频率为 $f_{\text{IGBT}}=10\ 000\text{ Hz}$ 。三端口变换器的负载端口最大输出电流为 $I_3=10\text{ A}$,最大输出电压为 $U_3=150\text{ V}$,最大输出功率 $P_3=1\ 500\text{ W}$,通过欧姆定律可以推算出三端口变换器的直流负载端口的功率变化如图2所示。

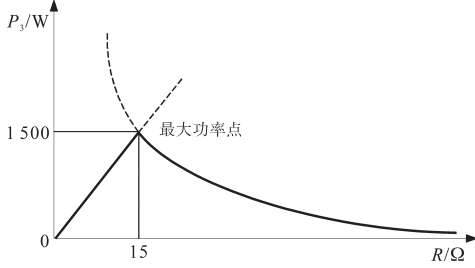


图2 三端口直流变换器输出功率示意图

Fig.2 Schematic diagram of output power in three-port DC converter

图2中,当负载输出电压 $U_3=150\text{ V}$,电阻 $R<15\ \Omega$, $I_3=10\text{ A}$ 时,输出端口功率为 $P_3=UI=I^2R$,功率 P_3 与电阻 R 呈正比例函数关系;当负载输出电压 $U_3=150\text{ V}$,电阻 $R>15\ \Omega$, $I_3<10\text{ A}$ 时,输出端口功率为 $P_3=UI=U^2/R$,功率 P_3 与电阻 R 呈反比例函数关系。可知变换器的负载在电阻 $R=15\ \Omega$ 时,变换器的输出功率最大。

1.2 三端口DC/DC变换器的移相控制设计

对于三端口的控制系统设计分为两大部分:第一为具有控制能量流动方向和稳定输入输出电压电流功能的移相控制;第二为控制太阳能光伏电池组最大功率输出的MPPT控制。两个控制相结合实现了对三端口变换器光储供电系统的功率控制。

分析两端口的双向DC/DC变换器的功率特性与移相角的关系可以相对地推理出三个端口的全桥变换器的功率特性。在两端口双向DC/DC变换器中 V_{H1} 为全桥 H_1 的交流输出电压, V_{H2} 为全桥 H_2 的交流输出电压,流过电感的电流为 I_L 可以表示为

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{V_{\text{H1}}(t) - V_{\text{H2}}(t)}{L} \quad (1)$$

设 $t_0=0$,则 $t_1=DT_{\text{hs}}$ (D 为半个周期内的移相比, T_{hs} 为半个开关周期), $t_2=T_{\text{hs}}$,考虑到在稳态下,流过电感的平均电流在一个开关周期内为0,则

$$I_L(t_2) = -I_L(t_0) \quad (2)$$

两端口双向DC/DC变换器共有功率正向流和功率反向流两种状态,其中 V_{in} 和 V_{out} 分别为直流端的输入电压和输出电压。功率正向流动时,各个状态的电感电流表达式为

$$I_L(t) = I_L(t_0) + \frac{V_{\text{in}} + nV_{\text{out}}}{L}(t - t_0) \quad (3)$$

$$I_L(t) = I_L(t_1) + \frac{V_{\text{in}} - nV_{\text{out}}}{L}(t - t_1) \quad (4)$$

$$I_L(t) = I_L(t_2) + \frac{-V_{\text{in}} - nV_{\text{out}}}{L}(t - t_2) \quad (5)$$

$$I_L(t) = I_L(t_3) + \frac{-V_{\text{in}} + nV_{\text{out}}}{L}(t - t_3) \quad (6)$$

功率反向流动时,各个状态的电感电流表达为

$$I_L(t) = I_L(t_0) + \frac{-V_{\text{in}} - nV_{\text{out}}}{L}(t - t_0) \quad (7)$$

$$I_L(t) = I_L(t_1) + \frac{V_{\text{in}} - nV_{\text{out}}}{L}(t - t_1) \quad (8)$$

$$I_L(t) = I_L(t_2) + \frac{V_{\text{in}} + nV_{\text{out}}}{L}(t - t_2) \quad (9)$$

$$I_L(t) = I_L(t_3) + \frac{-V_{\text{in}} + nV_{\text{out}}}{L}(t - t_3) \quad (10)$$

结合式(1)~式(10),可以得出两端口双向DC/DC变换器的传输功率 $P_{\text{DC/DC}}$ 为

$$P_{\text{DC/DC}} = \frac{1}{T_{\text{hs}}} \int_0^{T_{\text{hs}}} V_{\text{H1}} I_L(t) dt = \frac{nV_{\text{in}} V_{\text{out}}}{2f_s L} D(1-D) \quad (11)$$

其中 $f_s = 1/(2T_{\text{hs}})$ $0 \leq D \leq 1$

式中: n 为变压器变比; f_s 为开关频率。

经过分析,在两端口双向DC/DC变换器中可以通过调节移相比 D 来调节传输功率流动的大小和方向。当 $0 < D < 0.5$ 时,传输功率随着移相比 D 的增大而增大;当 $0.5 < D < 1$ 时,传输功率随着移相比 D 的增大而减小。

经过上述分析,要实现三个端口之间的能量流动,只需要控制各个端口开关管的驱动方波信号的移相角。设三端口变换器内端口2与端口1的相对对应开关管的移相角度为 φ_{12} ,端口3与端口1的相对对应开关管的移相角度为 φ_{13} ,端口3与端口2的相对对应开关管的移相角度为 φ_{23} 。对于三端口内的能量流动,取决于 φ_{12} , φ_{13} 和 φ_{23} 的移相角正负。在三端口变换器的控制中,开关管的占空比固定,蓄电池端口的作用为变压器提供电压支撑,平衡三端口变换器内部的能量,对内部电能的传递具有削峰填谷的作用。

光伏直流端口的控制目的是通过移相控制稳定光伏端口的直流母线电压。负载端口的控

制目的是通过移相控制控制端口的输出电压来控制输出功率的大小,在负载端负载可分为两种:蓄电池负载和纯阻型负载。其中蓄电池负载是如电动汽车等带有储能功能的负载,当电动汽车充电时由电动汽车的电池管理系统(battery management system, BMS)与变换器的控制通讯,回馈出所需的电压值和电流值,由控制器控制变换器输出。当超出最大电流时,采用控制电流的方法来控制电池负载的充放电。功率型负载的控制基本与蓄电池型负载的控制相同。控制流程图如图3所示。

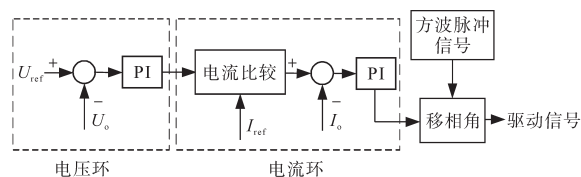


图3 负载端口的移相控制流程图

Fig.3 Phase shift control flow chart of load port

工作状态控制器的作用是控制与高频变压器三个端口处相连接的继电器的关断和吸合。工作控制器根据控制指令发出控制继电器的高低电平信号,从而控制继电器工作来控制端口的接入与接出。控制示意图如图4所示。

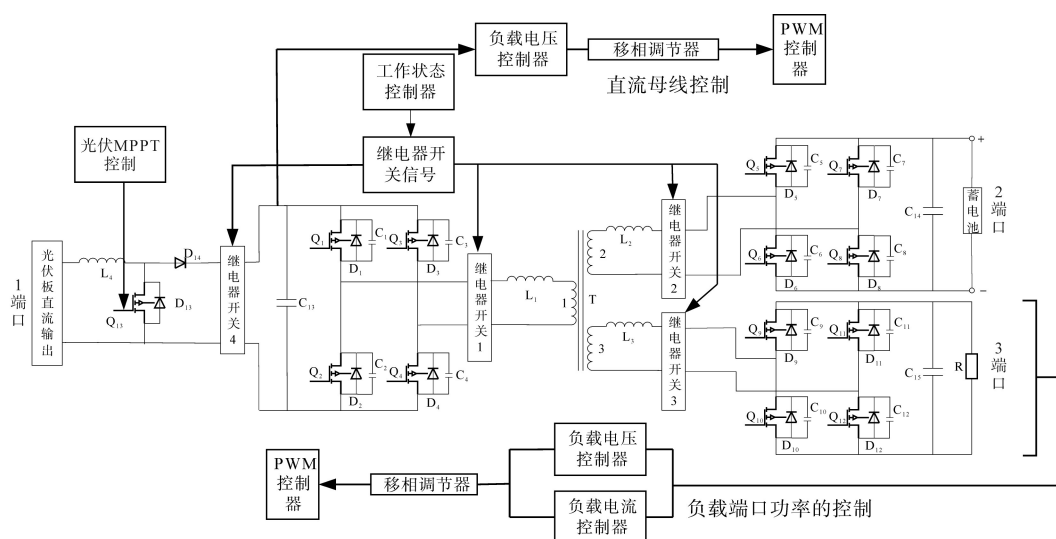


图4 包含光储供电系统的三端口隔离型直流变换器控制示意图

Fig.4 Control diagram of three-port isolated DC converter including photovoltaic power generation and energy storage power supply system

1.3 光伏变换系统的控制设计

光伏MPPT算法包括扰动观察法、恒电压法、电导增量法,本文采用扰动观察法,扰动观察法是通过不断地外加扰动电压来观察光伏电池输出功率的变化,从而寻找出最大功率点。光伏电池的输出特性为非线性,输出的最大功率为实时变化的,对光伏电池输出系统建模如图5所示。

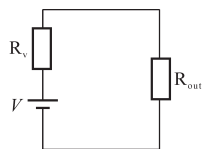


图5 光伏电池输出系统模型

Fig.5 Photovoltaic cell output system model

图5中, R_v 为光伏电源等效内阻, R_{out} 为光伏直流输出时等效负载电阻,则负载功率 P 表达式如下:

$$P = I^2 R_{out} = \left(\frac{V}{R_v + R_{out}} \right)^2 R_{out} \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dR_{out}} = V^2 \frac{R_v - R_{out}}{(R_v + R_{out})^3} \quad (13)$$

式中: I 为负载电流。

由式(12)、式(13)可以得出系统输出功率达到最大值时 R_v 和 R_{out} 相等,也就是 $U_{Rv} = \frac{1}{2}V$ 。设定电压 $V=200\text{ V}$,根据上述公式计算输出电压 $U_{Rv} = \frac{1}{2}V=100\text{ V}$ 。负载电阻 $R_{out}=5\ \Omega$,太阳能电池的输出功率为 $P=UI=2\ 000\text{ W}$ 。

2 三端口DC/DC变换器的能量管理

设光伏电池实际输出功率为 P_1 ,蓄电池的充放电功率为 P_2 ,负载工作所需功率为 P_3 ,分析三端口变换器的移相角共有8种状态,如表1所示。

表1 三端口直流变换器的工作状态及其移相角度的分析

Tab.1 Analysis of working state and phase shift angle of three-port DC converter

移相角的大小	工作状态
$\varphi_{12}<0, \varphi_{23}>0, \varphi_{13}>0$	电阻负载 光伏输出功率小, $P_1<P_3$, 蓄电池放电
$\varphi_{12}>0, \varphi_{23}>0, \varphi_{13}>0$	电阻负载 光伏输出功率大, $P_1>P_3$, 蓄电池充放电
$\varphi_{12}>0, \varphi_{23}<0, \varphi_{13}>0$	电池负载 光伏输出功率大, 蓄电池充电, 电池负载充放电
$\varphi_{12}>0, \varphi_{23}<0, \varphi_{13}<0$	电池负载 光伏输出功率小, 蓄电池充电, 电池负载放电
$\varphi_{12}<0, \varphi_{23}<0, \varphi_{13}<0$	电池负载 光伏输出功率小, 蓄电池充放电, 电池负载放电
$\varphi_{12}<0, \varphi_{23}>0, \varphi_{13}<0$	电池负载 光伏输出功率小, 蓄电池放电, 电池负载充放电
$\varphi_{12}>0, \varphi_{23}>0, \varphi_{13}<0$	非有效工作状态 能量环流状态
$\varphi_{12}<0, \varphi_{23}<0, \varphi_{13}>0$	非有效工作状态 能量环流状态

在负载端为负载电阻的情况下,结合实际应用情况分析三个端口的工作情况,共分析设计了以下几种工作场景:

工作状态A:负载不接入系统,由光伏输出单独给蓄电池充电。

工作状态B:光伏输出不接入系统,由蓄电池单独为电阻负载供电。

工作状态C:光伏输出功率 P_1 小于负载所需功率 P_3 ,蓄电池接入系统,由光伏和蓄电池共同为负载供电。

工作状态D:光伏输出功率 P_1 大于负载所需功率 P_3 ,蓄电池接入系统,由光伏同时为蓄电池和负载供电。

3 三端口DC/DC变换器的多状态工作模式仿真验证

选用Matlab/Simulink仿真工具搭建了三端口隔离型直流变换器的仿真模型。对变换器的各个工作状态和能量管理进行仿真验证,在仿真过程中,控制继电器工作的控制由定时开关进行模拟。设 V_{H1}, V_{H2}, V_{H3} 分别为三端口变换器的桥臂与电感之间的输出电压, I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} 分别为流过电感 L_1, L_2, L_3 的电流,光伏电池实际输出功率为 P_1 ,蓄电池的充放电功率为 P_2 ,负载工作所需功率为 P_3 ,负载电阻为 R 。

工作状态A:初始状态,继电器1、继电器2、继电器4吸合,继电器3断开,模拟负载端口不接入系统,由光伏输出单独给蓄电池充电的场景。

第0s时,系统控制启动,开关管工作,光伏MPPT最大功率跟踪模组接入系统。蓄电池初始电量10%,系统稳定运行时工作状态A相关波形如图6所示。

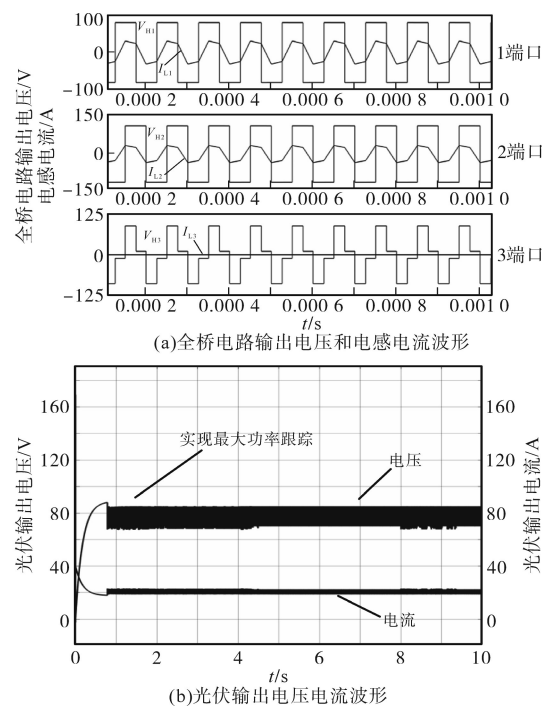


图6 系统稳定运行时工作状态A仿真波形

Fig.6 The simulation waveforms when the system running stably in working state A

观察图6a中的全桥电路的输出电压波形和电流波形,2端口的电压方波相对于1端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{12}>0$,并且电感电流为正向流动,说明实现了光伏对蓄电池的充电。图6b波形显示光伏输出电流 $I_1=20$ A,电压 $U_1=80$ V,实现了设定的光伏最大的输出功率 $P_1 = U_1 I_1 = 1\,600$ W,蓄电池充电。

工作状态B:初始状态,继电器2和继电器3吸合,继电器1和继电器4断开,模拟光伏输出不接入系统,由蓄电池单独为电阻负载供电的场景。第0s时,系统控制启动,开关管工作,蓄电池接入系统。负载端口接入负载电阻 $R=15\ \Omega$,系统稳定运行时,工作状态B相关波形如图7所示。

观察图7a中的全桥电路的输出电压波形和电流波形,3端口的电压方波相对于2端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{23}>0$,并且电感电流为正向流动,说明实现了蓄电池对负载的供电。图7b波形显示实现了设定的蓄电池放电,负载端口稳定输出电流 $I_3=10$ A,电压 $U_3=150$ V,负载输出功率 $P_3 = U_3 I_3 = 1\,500$ W,蓄电池放电。

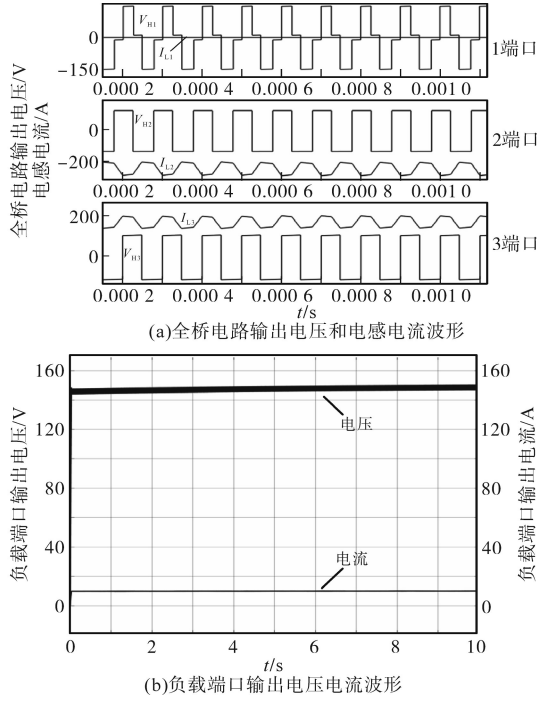


图7 系统稳定运行时工作状态B仿真波形

Fig.7 The simulation waveforms when the system running stably in working state B

工作状态C:初始状态,继电器1、继电器2、继电器3吸合,继电器4断开,模拟光伏小功率输出,电池电量充足的场景。第0 s时,系统控制启动,开关管工作,蓄电池提供变压器交流电电压,对直流母线上电容 C_{13} 预充电至设定直流母线电压值 $V_{Bus}=200$ V,第1 s时,继电器4吸合,光伏MPPT最大功率跟踪模组接入系统。负载端口接入负载电阻 $R=15\ \Omega$,系统稳定运行时,工作状态C相关波形如图8所示。

观察图8a中的全桥电路的输出电压波形和电流波形,2端口的电压方波相对于1端口的电压方波实现了超前,实现了移相角 $\varphi_{12}<0$,3端口的电压方波相对于2端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{23}>0$,3端口的电压方波相对于1端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{13}>0$,说明实现了蓄电池作为主要能量输出与光伏系统共同为负载供电。图8b波形显示负载端口稳定输出电流 $I_3=10$ A,电压 $U_3=150$ V,负载输出功率 $P_3=U_3I_3=1\ 500$ W。图8c波形显示光伏输出电流 $I_1=15$ A,电压 $U_1=60$ V,实现了设定的光伏最大的输出功率 $P_1=U_1I_1=900$ W,蓄电池放电。

工作状态D:初始状态,继电器1、继电器2、继电器3吸合,继电器4断开,模拟光伏大功率输

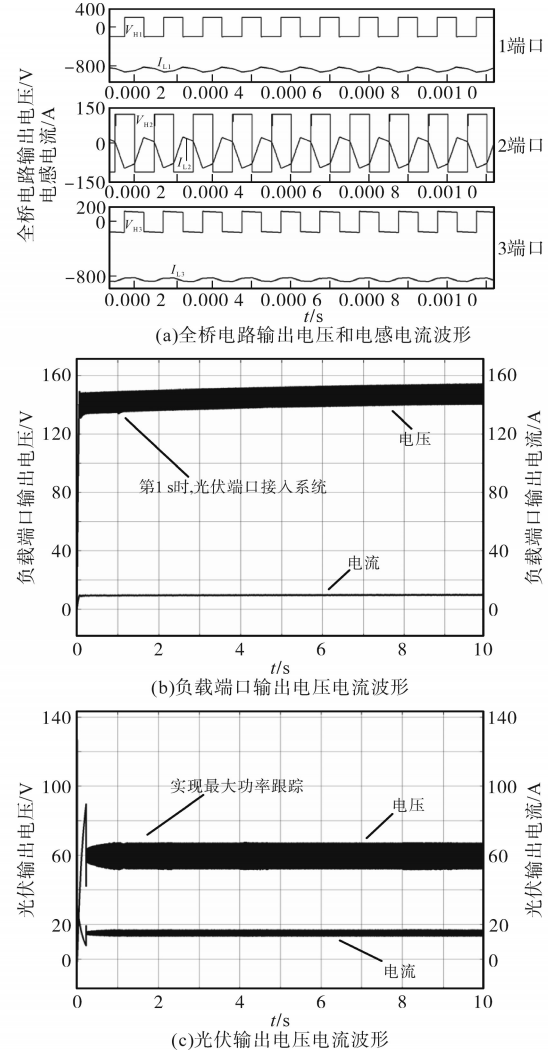


图8 系统稳定运行时工作状态C仿真波形

Fig.8 The simulation waveforms when the system running stably in working state C

出,电池电量不足的场景。第0 s时,系统控制启动,开关管工作,蓄电池提供变压器交流电电压,对直流母线上电容 C_{13} 预充电至设定直流母线值 $V_{Bus}=200$ V,第1 s时,继电器4吸合,光伏MPPT最大功率跟踪模组接入系统。负载端口接入负载电阻 $R=15\ \Omega$,系统稳定运行时,工作状态D相关波形如图9所示。

观察图9a中的全桥电路的输出电压波形和电流波形,2端口的电压方波相对于1端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{12}>0$,电感电流为反向流动,3端口的电压方波相对于2端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{23}>0$,3端口的电压方波相对于1端口的电压方波实现了滞后,实现了移相角 $\varphi_{13}>0$,说明实现了光伏系统作为主要能源输出同时为蓄电池和负载供电。图9b波形显示负载端口稳定输出电流 $I_3=10$ A,

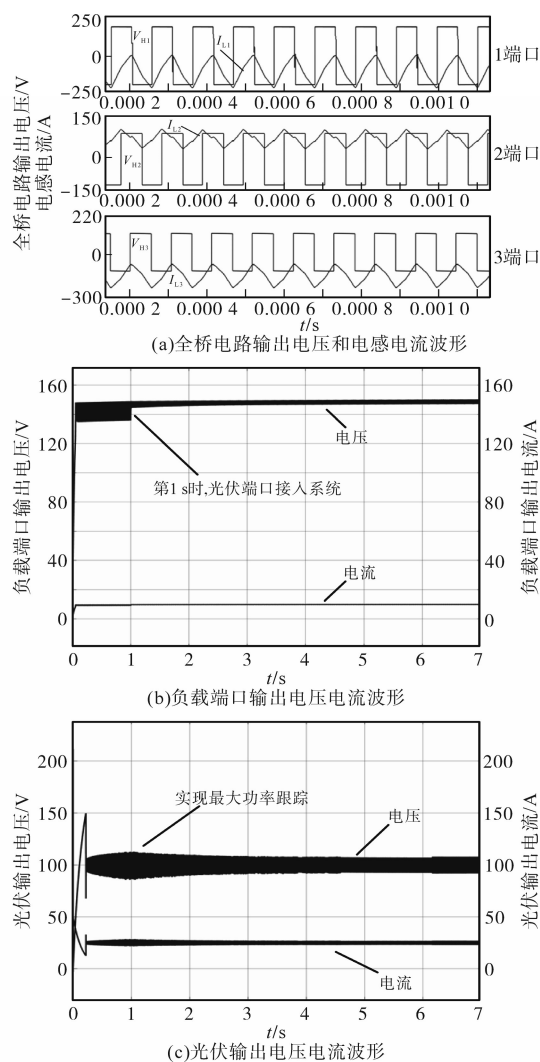


图9 系统稳定运行时工作状态D仿真波形

Fig.9 The simulation waveforms when the system running stably in working state D

电压 $U_3=150\text{ V}$, 负载输出功率 $P_3=U_3I_3=1\ 500\text{ W}$ 。图 9c 波形显示光伏输出电流 $I_1=25\text{ A}$, 电压 $U_1=100\text{ V}$, 实现了设定的光伏最大的输出功率 $P_1=U_1I_1=2\ 500\text{ W}$, 蓄电池放电。

由图 8a~图 8b 和图 9a~图 9b 可以看出, 蓄电池在系统中起到了削峰填谷的作用, 电池在不同的工作场景中, 蓄电池充放电为系统提供了稳定。从图 8c 和图 9c 可以看出光伏的输出控制在系统中具有很重要的作用, 当负载的功率需求和蓄电池的电量发生变化时, 光伏输出端口能调节输出为系统提供能量, 反之当系统所需要能量较少时, 光伏输出端口也可以限制功率。通过对工作状态 A、工作状态 B、工作状态 C 和工作状态 D 的仿真, 验证了控制三端口变换器内部的能量在三个端口之间的流动是可以实现的, 并且验证了控制方法的正确性。

4 结论

本文分析了基于包含光储供电系统的三端口直流变换器的使用场景和能量管理, 在控制方法中将光伏 MPPT 最大功率输出控制和移相控制结合, 并在 Matlab 软件中进行功能验证。首先验证了光伏输出和蓄电池、蓄电池和负载之间的工作情况是稳定正常运行的, 然后验证了光伏输出、蓄电池和负载三个端口结合的系统的稳定性。实现了在光伏输出的功率变化的情况下, 蓄电池实现了相应的充放电, 并与光伏输出结合, 共同维持了整个系统的稳定和系统内的能量流动。表明所设计的包含光储供电系统的三端口变换器的能量的协调控制是可以实现的, 并且为多端口变换器的协调控制的程序设计提供了可以参考的理论依据。

参考文献

- [1] 宫金武, 查晓明, 王盼, 等. 大容量多端口变换器拓扑研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(5): 1-9.
GONG Jinwu, ZHA Xiaoming, WANG Pan, et al. Review of topology research on high-power multi ports converter[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(5): 1-9.
- [2] 曾进辉, 何智成, 孙志峰, 等. 微电网多端口变换器拓扑结构研究综述[J]. 分布式能源, 2017, 2(6): 1-7.
ZENG Jinhui, HE Zhicheng, SUN Zhifeng, et al. Research review on multiport converter topology in micro power grid[J]. Distributed Energy, 2017, 2(6): 1-7.
- [3] 邓明杰. 隔离型三端口变换器的分析和控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
DENG Mingjie. Analysis and control of isolated three port DC-DC converter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [4] 吴明. 基于多端口 DC/DC 变换器的直流微电网建模与控制[D]. 合肥: 安徽工程大学, 2019.
WU Ming. Modeling and control of dc microgrid based on multi-port DC/DC converter[D]. Anhui: Anhui Polytechnic University, 2019.
- [5] 储凯. 三端口隔离型双向直流/直流变换器的设计与控制[D]. 南京: 东南大学, 2015.
CHU Kai. Design and control of the three-port bidirectional DC/DC converter[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [6] 张晓达, 王韧秋, 陈金香, 等. 三端口双向 DC-DC 变换器多模态切换建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 209-214.
ZHANG Xiaoda, WANG Renqiu, CHEN Jinxiang, et al. Multi-modality switch modeling and analysis for bidirectional DC-DC converters with three-ports[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 209-214.

(下转第 48 页)

- YAN Chenyu, FAN Yanfang, YAO Bo. Strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation of hybrid energy storage system using self-adaptive variational mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1898-1960.
- [11] 施杰, 伍星, 柳小勤, 等. 变分模态分解结合深度迁移学习诊断机械故障[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 129-137.
- Shi Jie, WU Xing, LIU Xiaoqin, et al. Mechanical fault diagnosis based on variational mode decomposition combined with deep transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 129-137.
- [12] 杜佳耘, 雷勇, 李永凯, 等. 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 51-59.
- DU Jiayun, LEI Yong, LI Yongkai, et al. Hybrid energy storage strategy based on parameter optimized variational mode decomposition[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 51-59.
- [13] 刘明宇, 姚芳, 李志刚, 等. 风电机组功率模型参数辨识及风资源利用率评估[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 305-315.
- LIU Mingyu, YAO Fang, LI Zhigang, et al. Power model parameter identification and wind resource utilization evaluation of wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(12): 305-315.
- [14] 张旭辉, 林海军, 刘明珠, 等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 44-50.
- ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Model parameter identification of UKF based on ACO-PSO[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 44-50.
- [15] 殷丽娟, 赵熙临, 梅真. 基于混沌粒子群优化算法的微电网优化运行技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 55-61.
- YIN Lijuan, ZHAO Xilin, MEI Zhen. Optimizing technology for microgrid operation based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 55-61.
- [16] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [17] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.
- LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.
- [18] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220.
- YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.
- [19] GAMAGE D, ZHANG X, UKIL A. Fuzzy logic controller for efficient energy management of a PV system with HESS[C]// Washington DC, IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018: 3556-3561.
- [20] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 19(2): 441-448.
- 收稿日期: 2021-11-11
修改稿日期: 2021-12-31
- YIN Lijuan, ZHAO Xilin, MEI Zhen. Optimizing technology for microgrid operation based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 55-61.
- ~~~~~
(上接第 16 页)
- [7] 范冬冬. 新型隔离三端口拓扑及控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- FAN Dongdong. Research on the new isolated three-port-converter and control strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2020.
- [8] 李微, 周雪松, 马幼捷, 等. 三端口直流微电网母线电压控制器及多目标控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 92-102.
- LI Wei, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Three-port DC microgrid bus voltage controller and multi-objective control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 92-102.
- [9] 冯兴田, 陶媛媛, 孙添添, 等. 基于储能的多端口电源系统能量管理与控制策略[J]. 电力系统及其自动化, 2018, 40(4): 66-69.
- FENG Xingtian, TAO Yuanyuan, SUN Tiantian, et al. Energy management and control strategy for multiport power supply systems based on energy storage [J]. Power System & Automation, 2018, 40(4): 66-69.
- [10] 齐贤斌. 用于光储系统的三端口电源变换器及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- QI Xianbin. Research on the three-port power converter and its control strategy for photovoltaic and storage[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2019.
- [11] 温兆伦. 用于光储系统的三端口变换器及多峰值 MPPT 研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WEN Zhaolun. Research on the three-port power converter and multi-peak MPPT for photovoltaic and storage[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2020.
- [12] 邓凯, 赵伟, 罗敏, 等. 适用于光储充直流微网的绿色高效电力变换器[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 42-71.
- DENG Kai, ZHAO Wei, LUO Min, et al. Power converter with green converting and high efficiency for PV-storage-charging DC micro grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 42-71.
- [13] 郁家麟, 肖龙海, 胡舟, 等. 面向微电网集群的多端口能量路由及其分布式控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 46-51.
- YU Jialin, XIAO Longhai, HU Zhou, et al. Multi-terminal energy router and its distributed control strategy for micro-grid clusters[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 46-51.
- 收稿日期: 2022-01-06
修改稿日期: 2022-02-15