

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.025

联网微型光伏逆变器分段混合控制方法研究

黄学宇, 陈国定*, 胡孟杰, 严 墩
(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对交错反激微型光伏逆变器在临界电流连续模式(BCM)控制下开关管频带宽、控制复杂和在电流断续模式(DCM)控制下变压器功率转换密度低、并网电流质量差等问题,提出了一种分段混合控制方法。该控制方法对微逆变器的工作周期进行了分段,使微逆变器在单个反激式的电流断续模式下和交错反激式的临界电流连续模式下交替工作。详细分析了分段混合控制下交错反激变换器产生正弦电流的原理,给出了具体实现方案的开关序列和波形。研究结果表明,分段混合控制方法作用下联网微逆变器可实现与电网电压同频、同相的并网电流输出,并提高微逆变器工作效率和功率转换量,该控制方法适合于微逆变器的各个功率等级。

关键词: 分段混合控制; 微逆变器; 并网电流; 交错反激

中图分类号: TP13; TM72 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0522-05

Segmented hybrid control method of photovoltaic grid-connected micro-inverter

HUANG Xue-yu, CHEN Guo-ding, HU Meng-jie, YAN Dun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at overcome the shortcoming of photovoltaic grid-connected interleaved flyback micro-inverter under the control of the boundary current mode(BCM)and discontinuous current mode(DCM), a segmented hybrid control method was proposed. The work cycle of micro-inverter was segmented under the new control method, and the micro-inverter worked in the single flyback of discontinuous current mode and interleaved flyback of boundary current mode alternately. The principle of the segmented hybrid control method was analyzed and the switching sequence and waveforms of the proposed method were given. The results indicate that the high performances in efficiency and transferred power quantity can be achieved under the segmented hybrid control method, the control method could fit all power levels of the micro-inverter.

Key words: segmented hybrid control; micro-inverter; grid-connected current; interleaved flyback

0 引 言

传统光伏并网发电系统中,太阳能光伏板一般通过串、并联形式得到一定的功率、电压等级,但光伏组件间存在特性差异,各个组件的发电效率彼此各不相同,在部分阴影条件下,可能会引起电池串内部产生不匹配损耗和热斑等现象。为了克服发电系统中太阳能光伏板串、并联发电造成的缺陷,采用微型逆变

器的单个光伏组件并网发电系统成为光伏并网的发展趋势之一^[1]。

交错反激型拓扑结构以其结构简单、成本低、效率高等优点而被广泛应用于微逆变器中。临界电流连续模式(BCM)和电流断续模式(DCM)是交错反激微逆变器中常用的电流控制模式,它们具有各自的优缺点,在不同输出功率等级工作时,两种控制模式下微逆变器的工作效率完全不同,单个控制模式难以适应微逆变器的不同功率等级^[2]。

收稿日期: 2013-10-09

作者简介: 黄学宇(1989-),男,浙江温州人,主要从事电力电子与光伏发电技术方面的研究. E-mail: 286176334@qq.com

通信联系人: 陈国定,男,博士,教授. E-mail: gdchen@zjut.edu.cn

本研究对交错反激联网微型逆变器提出一种分段混合控制方法。该控制方法在半电网周期内对交错反激微逆变器进行分段控制,每个段区间采用最适合的工作模式,克服BCM、DCM两种工作模式各自的缺点,在控制简化的基础上,尽量提高交错反激微逆变器的并网电流质量和电能转换率,最终使整个光伏并网发电系统输出高效、稳定的并网电流。笔者结合电流型最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制方法,建立仿真模型验证控制方法的可行性和有效性^[3-5]。

1 微逆变器拓扑及 BCM、DCM 分析

1.1 交错反激逆变器拓扑结构

交错反激逆变器的主电路拓扑结构如图1所示。它主要由开关管 S_1 、 S_2 , 变压器 T_1 、 T_2 , 二极管 D_1 、 D_2 构成的交错反激变换电路和一个由开关管 $S_3 \sim S_6$ 构成的全桥极性变换电路组成。 S_1 、 S_2 是功率主开关,在控制信号作用下交错导通,双反激电路工作下使得开关频率近似为原来两倍,可减小输出电流纹波;全桥极性变换电路开关管 $S_3 \sim S_6$ 工作在工频频率下,实现对正弦半波的极性变换。

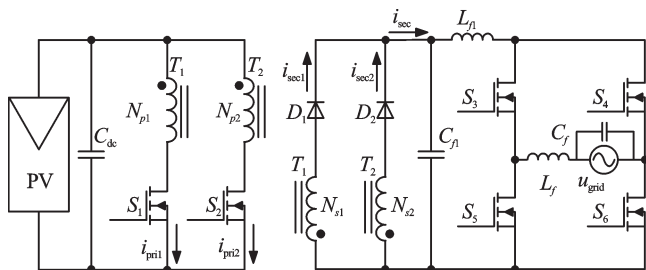


图1 交错反激微逆变器主电路拓扑结构

1.2 BCM、DCM 正弦控制分析

为使并网逆变器的电流 i_{grid} 和电网电压 u_{grid} 同频同相,反激变换器应该工作在具有电流源特性的BCM和DCM下^[6]。反激变换器工作于BCM和DCM时的变压器电流波形如图2所示。

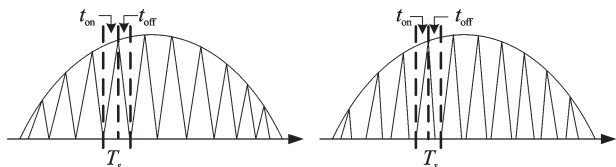


图2 反激变换器BCM和DCM下变压器电流波形

1.2.1 BCM 正弦电流控制分析

反激变换器工作在BCM时,变压器的励磁时间和去磁时间之和等于开关周期 T_s , 设开关管占空比为 D , 则有:

$$DT_s U_{pv} = \frac{|u_{grid}|}{n} (1-D) T_s \quad (1)$$

得占空比:

$$D = \frac{|u_{grid}|}{nU_{pv} + |u_{grid}|} \quad (2)$$

式中: U_{pv} — 光伏输出电压, u_{grid} — 电网电压, n — 变压器副边与原边匝比。

在一个开关周期内, 单个反激变换器输出的能量为:

$$E_1 = \frac{1}{2} L_p i_{pp}^2 \quad (3)$$

式中: L_p — 变压器原边电感, i_{pp} — 原边电流峰值。

且:

$$i_{pp} = \frac{U_{pv}}{L_p} DT_s \quad (4)$$

逆变器输出能量为:

$$E_2 = P_{op} \sin^2 \omega t T_s \quad (5)$$

式中: P_{op} — 逆变器输出功率峰值。

由于反激变换器的开关频率远大于工频频率, 可以认为在一个开关周期 T_s 内交错反激变换器输出能量之和等于逆变器输出能量, 即:

$$\frac{1}{2} L_p i_{pp}^2 \times 2 = P_{op} \sin^2 \omega t T_s \quad (6)$$

由式(4)和式(6), 可得反激变换器在BCM下开关周期:

$$T_s = L_p P_{op} \left(\frac{\sin \omega t}{U_{pv} D} \right)^2 \quad (7)$$

BCM控制下, 变压器电流不存在断续, 功率转换密度相对较高, 但控制较复杂。从式(7)可以看出, 电网电压的电角度越小, 开关周期越小, 也就是开关频率越大, 而实际开关频率有限^[7]。

1.2.2 DCM 正弦电流控制分析

反激变换器工作在DCM下时, 开关周期 T_s 固定, 仍满足式(7)的关系^[8]。因此DCM下反激变换器的开关管占空比:

$$D = \sqrt{\frac{2L_p P_{op}}{U_{pv}^2 T_s}} \cdot |\sin \omega t| \quad (8)$$

DCM控制简单, 被广泛应用, 但是由于其存在变压器电流断续, 该模式的应用被限制在小功率场合。

2 分段混合控制方法

针对交错反激逆变器在BCM、DCM控制模式下的不足, 本研究提出一种新的控制方法, 使交错反激逆

变器工作在分段混合模式下。文献[9]详细分析了交错反激逆变器工作在BCM和DCM下时,不同功率等级对应的效率变化和电路功率损耗情况。本研究考虑逆变器工作在BCM、DCM两种模式下的优缺点,综合电路功率损耗和工作效率,将正弦半波工作周期分为两个部分,并采用不同的模式进行控制。控制区间分布图如图3所示。

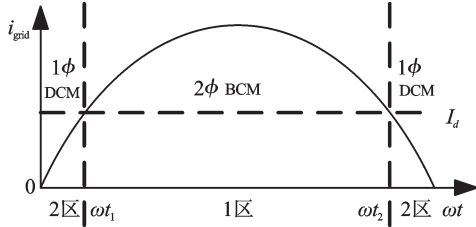


图3 分段混合控制的区间分布图

在低功率级的2区,采用开关频率固定的DCM控制;DCM控制工作在低功率输出段时,其功率损耗占

输入功率比重大,效率低,所以2区采用单个反激变换器在DCM下工作。在高功率级的1区,输出功率较大,本研究采用变压器电流连续的BCM控制;交错反激变换器同时工作,提高工作频率,减小电流纹波。

分区电流 I_d 的选取主要根据反激变换器开关管的开关频率、工作效率和并网电流的THD值来选取,同时可通过实验实际数据进行调整。

分段混合控制方法的控制框图如图4所示。图4中,MPPT环节根据光伏电池输出电压电流和并网电流大小计算光伏电池最大功率点电流参考,通过后级的PI控制器得到最大并网电流参考值,参考值与锁相得到的正弦相位信号相乘值经分段调制后与载波频率调制输出的载波进行比较得到交错反激变换器主开关的两路控制信号 SW_{s1} 、 SW_{s2} 。全桥极性变换电路的4个控制信号 $SW_{s3} \sim SW_{s6}$ 由工频控制PWM模块根据电网电压相位信号生成。

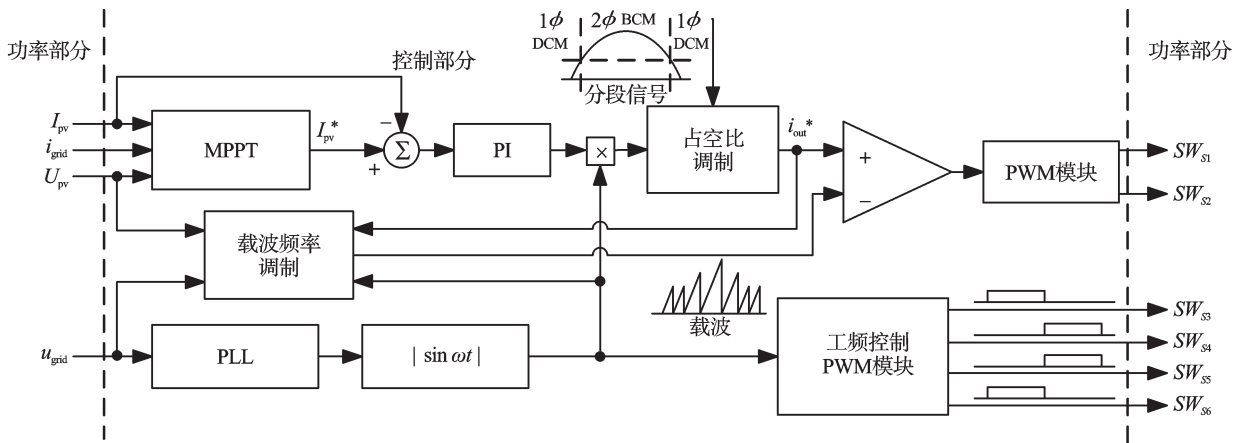


图4 分段混合控制框图

光照强度等外界条件发生变化时,光伏电池侧输入电流发生波动,分段混合控制方法下, I_d 不变,占空比调制环节根据重新跟踪的参考并网电流进行重新调制,保证分段混合控制模式切换的稳定。

微逆变器采用分段混合控制方法的具体实施方案开关序列和波形如图5所示。

同一开关周期内,反激变换器变压器原副边电流峰值关系式为:

$$\frac{i_{pp}}{i_{sp}} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (9)$$

式中: L_s 一变压器副边电感。

因此当交错反激变换器原边电流 i_{ref1} 是正弦半波时,并网电流即为正弦波。

单个反激变换器工作在DCM时,由式(6)可知变压器原边电流为:

$$i_{ref1} = \sqrt{\frac{2P_{op} T_s}{L_p}} \cdot |\sin \omega t| \quad (10)$$

交错反激变换器工作在BCM时,由式(2,4,6)得变压器原边电流为:

$$i_{ref2} = \frac{nP_{op}}{U_{gp}} |\sin \omega t| + \frac{P_{op}}{U_{pv}} |\sin \omega t|^2 \quad (11)$$

式中: U_{gp} 一电网电压 u_{grid} 的峰值。

可以看出 i_{ref2} 是叠加了少量谐波的正弦半波。

由以上研究分析可知,交错反激联网逆变器在分段混合控制方法下能实现并网电流与电网电压同频同相控制。

3 实验仿真

为了验证本研究所提控制方法的可行性和有效

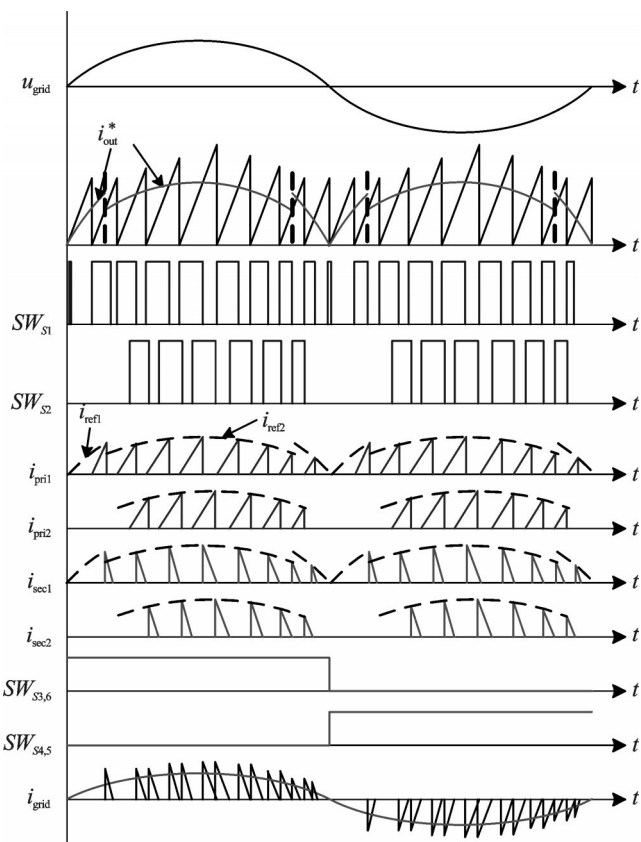


图5 分段混合控制方法下开关序列和波形

性,笔者采用 Matlab/Simlink 仿真软件对系统进行建模仿真验证。

基于电池组件 Slarex MSX60 60W 的参数,笔者建立了本研究仿真所需的电池组件模型^[10],电池组件在 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光照强度下的光伏特性 $I-V$ 与 $P-V$ 曲线如图6所示。

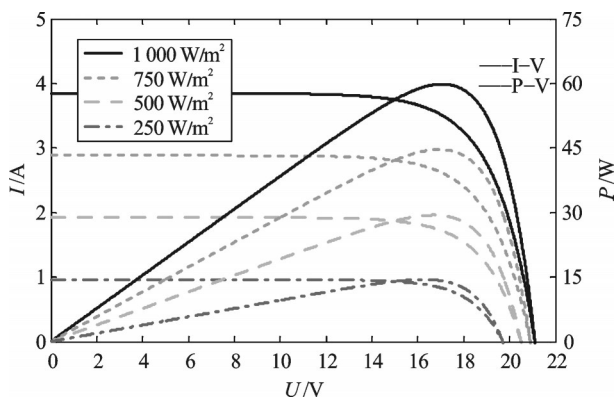


图6 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光照下光伏特性 $I-V$ 及 $P-V$ 曲线

本研究根据图1、图4的电路拓扑和控制模型,搭建交错反激微型逆变器模型及控制系统^[11]。设光照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,光伏模型采用4个MSX60电池组件串并联,电路仿真参数设置如表1所示, P_0 为逆变器额定功率。

分段混合控制方法下流过开关管 S_1 、 S_2 的电流

表1 仿真参数

P_0/W	$L_s/\mu\text{H}$	n	I_d/A	$C_f/\mu\text{F}$	L_f/mH
250	50	6	0.467	0.5	3

i_{pri1} 、 i_{pri2} 仿真波形,变压器副边二极管 D_1 、 D_2 电流 i_{sec1} 、 i_{sec2} 波形,以及流过滤波电感 L_f 的电流 i_{lf} 波形和并网电流 i_{grid} 波形如图7所示。由图7可以看出,在每个电网周期内,两个反激变换器交替工作在本研究所提的工作模式下,实现了并网电流和电网电压的同频同相,波形质量较高。

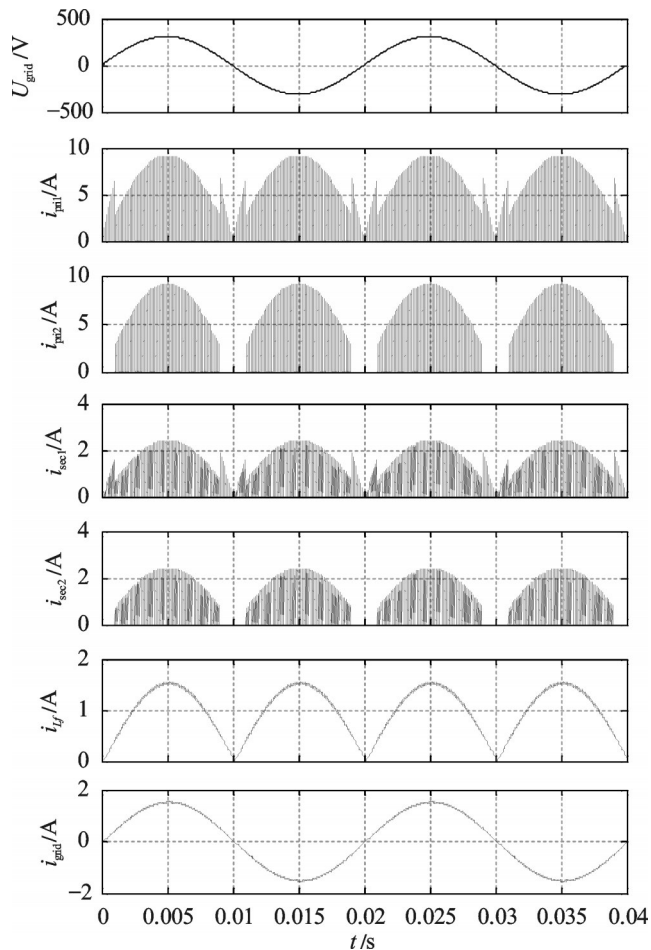


图7 分段混合控制方法下仿真波形

根据图6所示的光伏特性曲线,本研究采用4个光伏组件串、并联,在光照强度 E 变化时,光伏电池输出电压 U_{pv} 、输出电流 I_{pv} 、输出功率 P_{pv} 、并网电流幅值 I_{grid} 和滤波电流 i_{lf} 以及并网电流 i_{grid} 的仿真波形如图8所示。给定的光照强度 E 条件: $0\sim 0.233\ \text{s}$ 为 $750\ \text{W}/\text{m}^2$, $0.233\ \text{s}\sim 0.466\ \text{s}$ 为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, $0.466\ \text{s}\sim 0.7\ \text{s}$ 为 $500\ \text{W}/\text{m}^2$,对应的最大功率点功率分别为 $178.5\ \text{W}$ 、 $239.4\ \text{W}$ 、 $117.6\ \text{W}$ 。由图8可以看出,在不同时间点光照强度突变后,MPPT控制下系统都能准确、快速地跟踪光伏电池的最大功率点,控制精度较高,且具有很高的电能转换率。

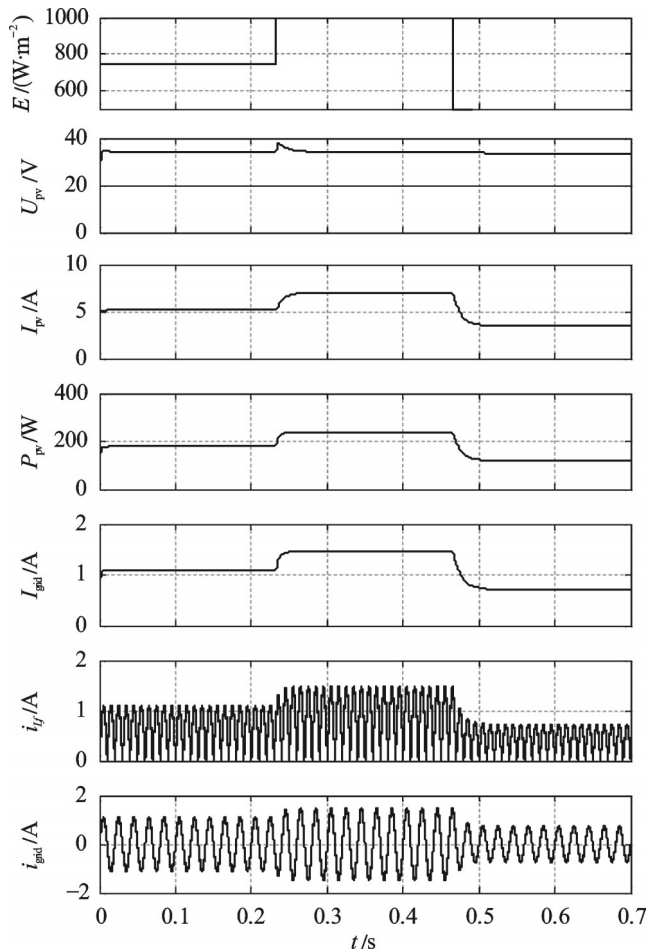


图8 MPPT作用下仿真波形

4 结束语

本研究通过分段混合控制方法实现了联网微逆变器输出并网电流与电网电压的同频同相。该方法根据常用BCM、DCM电流控制的优缺点,在并网电流周期内选择不同的控制模式进行电流控制,使微逆变器在大功率和小功率场合下都能保持高效、稳定的功率输出。因此分段混合控制方法可适合于微逆变器的各个功率等级,对微逆变器技术和光伏产业发展具

有一定促进意义。

本研究主要对分段混合控制方法在交错反激微逆变器中的应用做理论分析和验证,在今后的研究中,还需对该方法进行进一步实际验证,以达到更好的效果和使用价值。

参考文献(References):

- [1] 高文祥,王明渝,王立健,等. 光伏微型逆变器研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):147-155.
- [2] 马海啸,龚春英,王红梅,等. 新型带有钳位电容的交错反激变换器的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):107-112.
- [3] 陈毅东,杨育林,王立乔. 一种新型变步长MPPT控制在风电并网系统中的运用[J]. 太阳能学报,2012,33(3):462-467.
- [4] 王洪斌,贺峻华,贺辉. 具有优化步长的最速下降法MPPT控制[J]. 电机与控制学报,2012,16(10):21-25.
- [5] 吴俊娟,姜一达,王强,等. 一种改进的光伏系统MPPT控制算法[J]. 太阳能学报,2012,33(3):478-484.
- [6] 陈道炼,李磊,刘剑,等. 电流源高频交流环节AC/AC变换器研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):98-101.
- [7] 古俊银,吴红飞,陈国呈,等. 软开关交错反激光伏并网逆变器[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):40-45.
- [8] HYOK J Y, YONG J D, HYUNG K J, et al. Dual mode switching strategy of flyback inverter for photovoltaic AC modules[C]. Power Electronics Conference (IPEC), 2010: 2924-2929.
- [9] ZHANG Zhi-liang, HE Xiao-fei, REN Xiao-yong, et al. Multi-mode control for photovoltaic grid-connected interleaved flyback micro-inverters to achieve high efficiency in wide load range[C]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012: 2433-2438.
- [10] 彭乐乐,孙以泽,林学龙,等. 工程用太阳电池模型及参数确定法[J]. 太阳能学报,2012,33(2):283-286.
- [11] 周林,冯玉,郭珂,等. 单相光伏并网逆变器建模与控制技术研究[J]. 太阳能学报,2012,33(3):485-493.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

黄学宇,陈国定,胡孟杰,等. 联网微型光伏逆变器分段混合控制方法研究[J]. 机电工程,2014,31(4):522-526.

HUANG Xue-yu, CHEN Guo-ding, HU Meng-jie, et al. Segmented hybrid control method of photovoltaic grid-connected micro-inverter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4): 522-526.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>