

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.014

基于无源综合控制的独立光伏发电系统

诸波¹, 胡克用²

(1. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014;
2. 杭州师范大学 钱江学院, 浙江 杭州 310036)

摘 要:针对独立光伏发电系统含有的单向 Boost 和双向 Buck-Boost DC/DC 变换器具有本质的非线性, 对该 DC/DC 变换器采用无源控制非线性控制, 结合 PI 控制的综合控制方法。为了实现蓄电池采用限流充电和恒压充电两阶段充电方式, 兼顾对直流母线电压进行有效控制, 对两类 DC/DC 变换器分别采取两种模式的控制方式, 并对 Boost 变换器进行无源电流控制设计和对 Buck 变换器进行无源电压设计。最后, 仿真验证证明了所提控制策略对独立光伏发电系统能量管理的有效性。

关 键 词:光伏发电; DC/DC 变换器; 无源控制; 充电方式

中图分类号: TM910.6 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2014)02-0053-06

Stand-Alone Photovoltaic System Based on Passivity Hybrid Control

ZHU Bo¹, HU Keyong²

(1. Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China;
2. Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Aiming at the essential nonlinearity of unidirectional Boost converter and bidirectional Buck-Boost converter, DC/DC converters in Stand-alone Photovoltaic System, DC/DC converters were controlled by nonlinear control method of passivity-based control, and combined with PI control of hybrid control. In order to incorporate two-stage battery charging method, current-limited charging and constant voltage charging, with effective control for DC bus voltage, two control modes were employed for above DC/DC converters and for Boost converter and Buck converter, and passivity-based control for current regulation and passivity-based control for voltage regulation were designed. Finally, the simulation results show that the effectiveness of control method is proposed for stand-alone photovoltaic system energy management.

Key words: PV generation; DC/DC converter; passivity-based control; charging method

在独立光伏发电系统中, DC/DC 电力变换器作为电力变换接口。关于电力电子变换的控制器设计方法分为两类: 线性和非线性。线性方法依赖于局部线性化方法。当平衡点发生较大变化时, 控制性能并不能保持一致。并且, 电力电子变换器的动态方程具有本质的非线性特性^[1]。所以, 电力电子变换器更适合用非线性方法进行控制器设计。鲁棒, 反馈线性化, 滑模, 无源控制 (PBC) 为常用的非线性设计方法。无源控制基于能量观点, 通过无源化, 运用李雅普诺夫方

法, 确保系统大范围稳定。它因控制规律简单、稳定性好、动态性能优越受到广泛应用。文献^[2-5]对整个独立光伏发电系统, 进行欧拉-拉格朗日 (E-L) 建模或者进行端口受控哈密顿 (PCHD) 建模, 在此基础上进行无源控制设计, 结合相应能量管理策略, 配置相应的平衡点, 协调能量在系统的流动。但在能量管理策略中, 忽略了蓄电池充电电流的限制; 独立光伏发电系统都以双向 Buck-Boost 直流变换器作为蓄电池电力变换接口, 却只利用了双向 Boost 工作方式对蓄电池充放电

收稿日期: 2013-09-30; 修回日期: 2013-11-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA050405)

作者简介: 诸波 (1986), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事光伏蓄电池混合系统的控制与能量管理的研究。E-mail: zjutzb8866@gmail.com

电流进行控制,却没利用 Buck 工作方式对蓄电池充电电压进行控制。再者,对于无源控制(PBC),在参数已知精确建模的前提下,运用无源化方法,设计出控制规律,再合理、精确地配置期望平衡点。而对于独立光伏发电系统,光照、温度、负载参数和蓄电池的充放电状态的变化,不易精确配置平衡点。对此,可通过外环 PI 电压环,获取内环无源电流控制的期望平衡点。

基于此,对于一种含有单向 Boost 变换器和双向 Buck-Boost 直流变换器的独立光伏发电系统结构,提出了一种新型的控制策略:即单向 Boost 变换器是基于无源电流对光伏阵列输出功率进行控制,双向 Buck-Boost 直流变换器是基于对直流母线电压和蓄电池充放电进行同时控制;再对 Boost 变换器进行无源电流控制设计和对 Buck 变换器进行无源电压设计;最后通过仿真验证证实了所提控制策略的正确性。

1 系统结构

文中采用的独立光伏发电系统如图 1 所示。

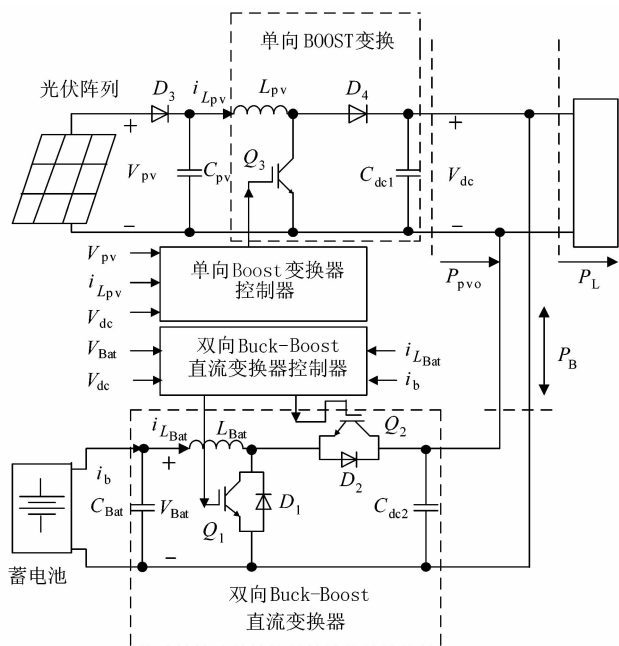


图 1 系统结构

Figure 1 System structure

系统结构包括一个光伏阵列系统、蓄电池、两类 DC/DC 变换器和负载。

光伏阵列系统把太阳能转化成电能,为系统的主要供能源。光伏阵列 I-V 特性方程^[6]

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q}{kT_c A} \left(\frac{V}{N_s} + I \frac{R_s}{N_p} \right) \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中, I_{ph} 为光生电流, I_s 为二极管暗电流。 q, k, A 分别为电子电荷量 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), 玻耳兹曼常数 ($1.38 \times$

10^{-23} J/K) 和二极品质因数。 T_c 为光伏电池的绝对温度/K。 R_s 为串联电阻。 N_s 和 N_p 分别为光伏组件串联数目和并联数目。

由图 1 可知,混合系统中含有两类 DC/DC 变换器,即单向 Boost 变换器和双向 Buck-Boost 直流变换器^[7]。双向 Buck-Boost 直流变换器存在双向 Boost 变换器和 Buck 变换器 2 种工作方式。

2 控制模式及无源控制策略

独立光伏发电系统运行情况受光照、温度、负载、蓄电池充放电状态影响,为了合理管理混合系统的能量流动,协调光伏阵列和蓄电池的能量供应,文中提出 DC/DC 变换器在相应条件下的控制模式。

2.1 DC/DC 变换器控制模式

2.1.1 双向 Buck-Boost 直流变换器控制模式

双向 Buck-Boost 直流变换器工作方式和控制模式的切换是基于蓄电池充电方式的改变。蓄电池充电分为限流充电和恒压充电 2 个充电阶段。

当充电电压小于恒压充电电压阈值时,对蓄电池进行限流充电。充电电流受光伏阵列输出功率和负载影响不能保证恒流充电,但需限制在最大充电电流范围内。对于蓄电池限流充电阶段,双向 Buck-Boost 直流变换器作为双向 Boost 工作方式,采用 PI 电压为外环,无源电流控制为内环的控制模式。通过 PI 电压外环,调节母线电压到期望值,间接配置无源电流控制内环控制蓄电池充放电电流值。

当充电电压大于恒压充电电压阈值时,对蓄电池进行恒压充电。在此阶段,双向 Buck-Boost 直流变换器作为 Buck 工作方式,采用无源电压控制蓄电池充电电压。

2.1.2 单向 Boost 变换器控制模式

通过单向 Boost 变换器,对光伏阵列输出功率控制主要分为最大功率追踪和功率限制输出两种控制模式。这两种控制模式都是基于直流母线电压变化,通过无源电流控制。

一般情况下,对光伏阵列进行最大功率追踪,可通过蓄电池充放电,调节混合系统的功率平衡,使得直流母线电压稳定到期望值 V_{dc-ref} 。最大功率追踪控制算法基于电流的扰动观察法^[8-10]。但当光伏输出功率太大或者负荷太小,蓄电池充电电流达到最大值或者蓄电池已进入恒压充电阶段,蓄电池需要接受的功率已超过所能接受功率的上限,额外的功率只能流向负载,导致直流母线电压上升。这时只能通过减小光伏阵列输出功率,限制光伏阵列输出功率,调节混合系统的功率平衡,使得直流母线电压保持到最大允许电压

$V_{dc-ref} + \Delta V$ (ΔV 取值小于等于 V_{dc-ref} 的 10%), ΔV 为直流母线电压允许的波动范围。

基于上面两类 DC/DC 变换器在不同条件下所对应的相应的控制模式,提出独立光伏发电系统的控制系统结构,如图 2 所示。

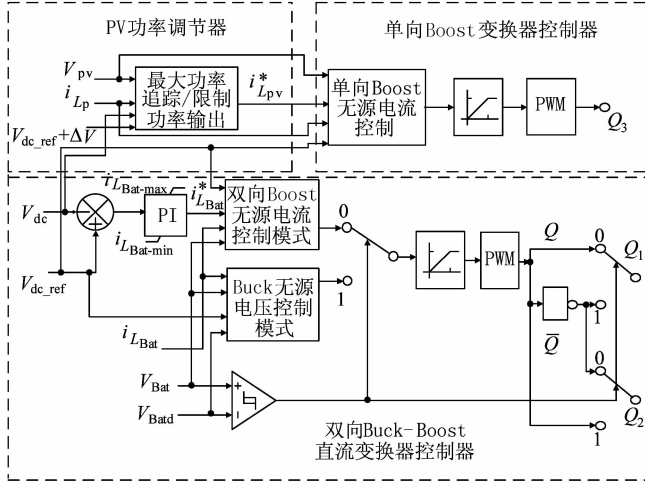


图 2 控制系统结构

Figure 2 Control system structure

2.2 无源控制策略设计

2.2.1 Buck 变换器无源电压控制设计

当双向 Buck-Boost 直流变换器工作于 Buck 方式时,电路拓扑结构简化如图 3 所示。

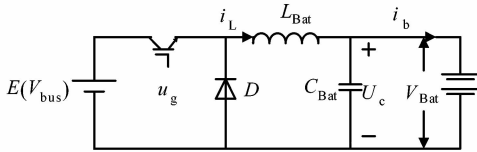


图 3 Buck 变换器

Figure 3 Buck converter

对于电流连续型变换器,取电感电流 i_L 和电容器电压 u_C 为状态变量,即 $z = [z_1 \ z_2]^T = [i_L \ u_C]^T$, u_g 为占空比信号,则电路的平均状态矩阵形式方程

$$M\dot{Z} + JZ = E \quad (2)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} Eu_g \\ -i_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设期望的平均状态向量为

$$Z_d = [z_{1d} \ z_{2d}]^T \quad (4)$$

满足矩阵方程(2)。

设平均状态向量误差

$$e = [e_1 \ e_2]^T = [z_1 - z_{1d} \ z_2 - z_{2d}]^T \quad (5)$$

根据矩阵方程(2),可得误差动态方程

$$M\dot{e} + Je = E - (MZ_d + JZ_d) \quad (6)$$

因误差动态方程缺乏阻尼项,所以在误差动态方程两边添加阻尼耗散项 $R_d e$

$$R_d = \begin{pmatrix} r_{d1} & 0 \\ 0 & r_{d2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

可得具有耗散阻尼项的误差动态方程为

$$M\dot{e} + Je + R_d e = E - (MZ_d + JZ_d - R_d e) \quad (8)$$

$$\text{当} \quad E = MZ_d + JZ_d - R_d e \quad (9)$$

$$\text{可得} \quad M\dot{e} + Je + R_a e = 0 \quad (10)$$

取误差能量函数 $H_e = \frac{1}{2} e^T M e$ 作为李雅普诺夫函数。则 H_e 对时间的导数

$$\begin{aligned} \dot{H}_e &= e^T M \dot{e} = e^T [-Je - R_a e] \\ &= -e^T R_a e < 0, \forall e \neq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

所以误差动态方程(8)渐近稳定于 0。

把矩阵方程(9)扩展成下面的微分方程组

$$\begin{cases} Eu_g - Lz_{1d} - z_{2d} + r_{a1}(z_1 - z_{1d}) = 0 \\ -i_b + z_{1d} + r_{a2}(z_2 - z_{2d}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当电路处于稳态时,有 $z_{1d} = z_{2d} = 0$, 则有

$$\begin{cases} Eu_g - z_{2d} + r_{a1}(z_1 - z_{1d}) = 0 \\ -i_b + z_{1d} + r_{a2}(z_2 - z_{2d}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由公式(13)第 2 个式子,可得

$$z_{1d} = i_b - r_{a2}(z_2 - z_{2d}) \quad (14)$$

把公式(14)代入公式(13)第 1 个式子,经过适当变换,即得无源控制率表达式

$$u_g = \frac{z_{2d} - r_{a1}[z_1 - i_b + r_{a2}(z_2 - z_{2d})]}{E} \quad (15)$$

其中, E 为直流母线电压, z_{2d} 为蓄电池电压期望值 V_{batd} , 即蓄电池恒压控制电压值, i_b 为蓄电池充电电流值, r_{a1} 和 r_{a2} 为阻尼系数,选择合适的值可获得较好的动静态特性。

2.2.2 两类 Boost 变换器无源电流控制

Boost 变换器无源设计包括单向 Boost 和双向 Boost(双向 Buck-Boost 直流变换器的双向 Boost 工作方式)。为了便于设计无源控制器,两类变换器统一为如图 4 所示的 Boost 变换器。

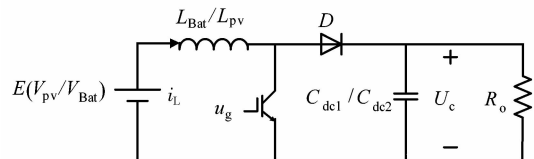


图 4 Boost 变换器

Figure 4 Boost converter

取电感电流 i_L 和电容器电压 u_C 为状态变量, 即 $z = [z_1 \ z_2]^T = [i_L \ u_C]$, u_g 为占空比信号, 则电路的平均状态矩阵形式方程

$$M\dot{z} + J(u_g)z + Rz = \varepsilon \quad (16)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & 1 - u_g \\ -(1 - u_g) & 0 \end{bmatrix}, \\ R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

假设期望的平均状态向量为

$$z^* = [z_1^* \ z_2^*]^T \quad (18)$$

具体设计过程与 Buck 无源电压控制类似, 不再赘述。通过获得误差动态方程, 再由能量成型与阻尼注入, 最后验证李雅普诺夫函数稳定性。可得满足稳定条件的微分方程组

$$\begin{cases} L\dot{z}_1^* + z_2^*(1 - u_g) - r_{al}(z_1 - z_1^*) = E \\ Cz_2^* - (1 - u_g)z_1^* + \frac{z_2^*}{R_o} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

由公式(19)第1式子, 可得控制率表达式

$$u_g = 1 - \frac{E + r_{al}(z_1 - z_1^*)}{z_2^*} \quad (20)$$

对于单向 Boost 变换器, z_1^* 电感电流期望值来源于 PV 功率调节器输出的电流参考值 i_{Lpv}^* , E 为光伏阵列输出电压; 对于双向 Boost 变换器, z_1^* 电感电流期望值来源于外环直流母线电压 PI 调节输出值 i_{Lbat}^* , E 为蓄电池输出电压。 z_2^* 同为两类 Boost 变换器的直流母线电压稳态值, 即直流母线电压期望值, r_{al} 为阻尼系数, 意义同前。

3 仿真验证及讨论

文中建立的仿真模型包括光伏阵列模型, 单向 Boost 模型, 双向 Buck-Boost 直流变换器模型, 蓄电池模型, 负载模型, 并在 MATLAB/Simulink 环境仿真。

光伏阵列模型是基于光伏 $I-V$ 输出特性方程(1)给定。光伏组件相关参数如下: 最大功率 205 W, 最大功率点电流 7.71 A, 短路电流 8.36 A, 串联数目为 54。光伏阵列构成形式: 3×3 光伏组件构成。

蓄电池选 Simulink 通用铅酸蓄电池模型^[11], 采用受控电压源和内阻串联作为蓄电池动态模型。蓄电池仿真相关参数如下: 容量为 100 Ah, 恒压充电电压为 51.44 V。蓄电池以额定容量 C 的比例作为充放电速率单位, 文中以 C_{10} 作为最大充电电流, 即以 10 A 作为最大充电电流。

两类 DC/DC 变化器相关仿真参数如下, $C_{pv} = 1\ 500\ \mu F$, $L_{pv} = 23.2\ mH$, $C_{dc1} = 330\ \mu F$, $C_{bat} = 87\ \mu F$, $L_{bat} = 20\ mH$, $C_{dc2} = 100\ \mu F$ 。

直流母线电压为 200 V, $\Delta V = 10\%$ 。PI 电压外环参数为 $K_p = 0.025$, $K_i = 30$ 。

针对独立光伏发电系统仿真模型以及有关参数, 在光照变化和负载变化的条件下, 系统基于 DC/DC 不同控制模式协调能量流动, 运行情况如图 5 - 图 8 所示。

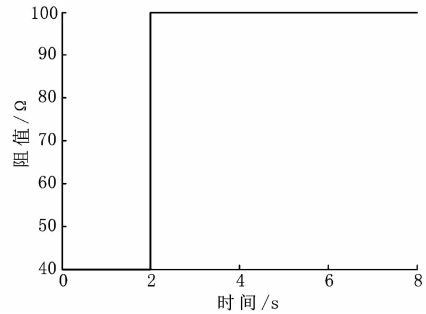


图5 负载电阻曲线

Figure 5 Load resistance curve

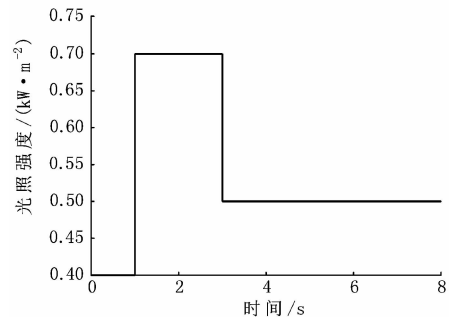


图6 光照强度曲线

Figure 6 Solar irradiance curve

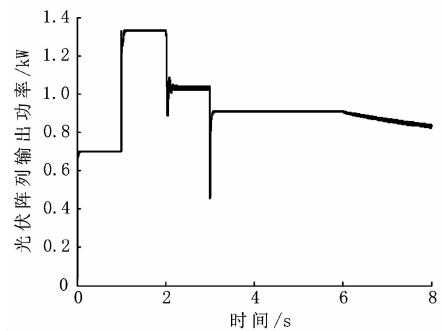


图7 光伏阵列输出功率曲线

Figure 7 PV array power curve

结合图 9 蓄电池电流曲线和图 10 蓄电池电压曲线可知, 在 4.5 s 之前, 蓄电池按限流充电方式充电, 在此时段, 双向 Buck-Boost 直流变换器作为双向 Boost 变换器, 以 PI 电压外环, 无源电流控制内环作为控制

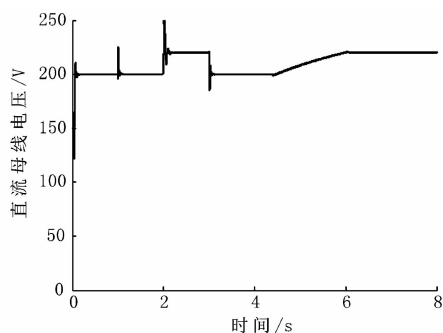


图8 直流母线电压曲线

Figure 8 DC bus voltage curve

模式;在4.5 s之后,蓄电池进入恒压充电阶段,在此阶段,双向 Buck-Boost 直流变换器作为 Buck 变换器,无源电压控制作为控制模式。

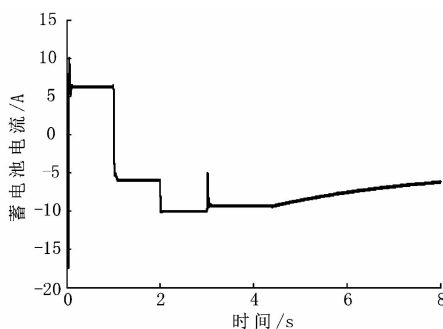


图9 蓄电池电流曲线

Figure 9 Battery current curve

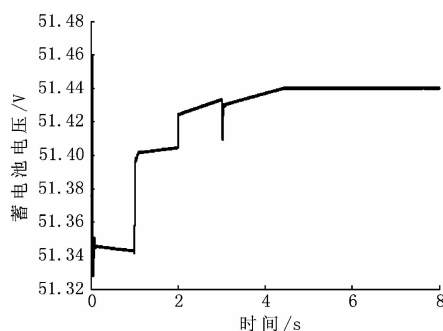


图10 蓄电池电压曲线

Figure 10 Battery voltage curve

0~2 s 时间区间:从图6光照强度图可知,在1 s时刻,光照强度突然增大,图7中的光伏阵列输出功率也随着增大,说明单向 Boost 变换器对光伏阵列进行最大功率追踪控制,且表明基于电流控制的扰动观察法是有效的。在同一时刻,从图9可知,蓄电池由于光伏输出功率的增大,由放电状态转变为充电状态,而图8中的直流母线电压在1~2 s区间始终稳定于期望值200 V。这说明通过外环PI直接调节直流母线电压,间接无源电流控制蓄电池电流,这种PI+PBC作为双

向 Boost 变换器的控制模式,能够有效调节混合系统的功率平衡。

2~3 s 时间区间:从图5负载电阻曲线图可知,在2 s时刻,负载电阻突然变大,即负载负荷突然变小,图8中的直流母线电压突然上升,图9表明,双向 Boost 变换器通过PI+PBC控制模式,促使蓄电池充电电流突然变大,直到达到最大充电电流,这时,通过PI+PBC控制模式控制双向 Boost 来调节直流母线电压失效。从图8可知,直流母线电压会突然上升,但一旦超过最大允许值,对光伏阵列由最大功率追踪转变为功率限制输出模式。从图7可知光伏阵列输出功率也随着减小,最终直流母线电压稳定到允许最大值。

3.0~4.5 s 时间区间:从图6可知,在3 s时刻,光照强度突然减小,图7显示光伏阵列输出功率随着减小,图8表明直流母线电压跌落。此时,对光伏阵列又将进行最大功率追踪控制。通过PI+PBC控制双向 Boost 变换器调节直流母线电压。图8显示,在3.0~4.5 s区间,母线电压重新回到200 V。

0~4.5 s 时间区间:在4.5 s之前,蓄电池以限流方式充电,蓄电池充电电流随着光照强度和负载电阻变化而变化,但始终不会超过其最大值。

4.5~8.0 s 时间区间:4.5 s之后,蓄电池以恒压充电方式充电,以 Buck 无源电压控制模式控制蓄电池充电电压,从图9和图10可知,蓄电池充电电流逐渐变小,直流母线电压缓慢上升,直到6 s,直流母线电压上升达到到母线电压允许最大值。在此之后,对光伏阵列通过单向 Boost 变换器由最大功率追踪控制转为功率限制控制。

4 结论

针对独立光伏发电系统中作为电力变换接口的单向 Boost 变换器和双向 Buck-Boost 直流变换器具有本质的非线性,对其采用无源控制,结合PI控制,根据混合系统能量管理策略,分别运用两种模式的控制方式:1)对单向 Boost 变换器,基于无源电流,根据母线电压变化,对光伏阵列进行最大功率追踪和限制功率输出两种模式控制;2)对双向 Buck-Boost 直流变换器,由限流充电阶段确定双向 Boost 工作方式下的无源电流控制作为内环,PI电压控制作为外环的控制模式,由恒压充电阶段确定 Buck 工作方式下的无源电压控制模式。最后,通过MATLAB仿真验证在光照强度和负载发生变化时,该控制策略在满足蓄电池二阶段充电过程中,同时对直流母线电压进行了有效的控制,对于

(下转第60页)