

# Boost 结构太阳能收集电路的 MPPT 控制方法研究

郑明才<sup>1</sup>, 赵小超<sup>1,2</sup>, 胡恩博<sup>1</sup>, 郑金兵<sup>3</sup>

(1. 湖南第一师范学院信息科学与工程学院, 长沙 410205; 2. 湖南大学数学与计量经济学院, 长沙 410082; 3. 中国电子科技集团第 48 研究所, 长沙 410111)

**摘要:** 针对太阳能收集电路的收集效率和可实现性问题, 提出一种 Boost 结构太阳能收集电路的 MPPT 控制方法。利用 Boost 电路 PWM 工作时的升压作用将光伏电池生成的电能强制性储存于大容量电容中, 为光伏电池生成电能的最大化收集提供实现可能。通过实时检测光伏电池等效状态和收集电路等效负载确定 Boost 电路的 MPPT 控制脉冲最优占空比, 迫使收集电路实时工作在光伏电池的 MPPT 工作点附近, 尽可能达到提高太阳能收集效率的目的。通过分析收集电路工作过程, 给出了光伏电池等效状态和收集电路等效负载的实时检测方法以及 MPPT 控制脉冲最优占空比的确定方法。理论分析和实验结果表明, 该控制方法下的 Boost 结构太阳能收集电路的收集效率高、实现容易。

**关键词:** 太阳能收集; Boost 电路; MPPT 控制; 最优占空比

## Research on MPPT Control Method for Solar Energy Collecting Circuit Based on Boost Structure

ZHENG Mingcai<sup>1</sup>, ZHAO Xiaochao<sup>1,2</sup>, HU Enbo<sup>1</sup>, ZHENG Jinbing<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Hunan First Normal University, Changsha 410205, China; 2. College of Mathematics and Econometrics, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. The Forty-eighth Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China)

**Abstract:** Aiming at the collection efficiency and realizability of solar energy collecting circuit, a method of maximum power point tracking (MPPT) control for solar energy collecting circuit based on Boost structure is presented. The electric energy of photovoltaic cells is mandatory stored in large capacity capacitors by the Boost convertor in PWM working mode, which provides the possibility of maximum power collection. According to the real-time detection values of photovoltaic cells' equivalent state and collecting circuit's equivalent load, the optimal control pulse duty cycle for Boost convertor is determined to force the collecting circuit to work near the MPPT operating point of the photovoltaic cells in real time and to achieve the purpose of improving the collection efficiency of solar energy collecting circuit as far as possible. The working process of the collecting circuit is analyzed, the real-time detection methods of photovoltaic cells' equivalent state and collecting circuit's equivalent load are given, and a computing method to determine the optimal control pulse duty cycle for the MPPT control solar energy collecting circuit is presented. The theoretical analysis and experiment results validate that the solar energy collecting circuit has the advantages of high collection efficiency and easy implementation.

**Keywords:** solar energy collecting; Boost circuit; MPPT control; optimal duty cycle

资源的紧缺和能源成本的持续增长使得光伏发电成为新能源行业的研究热点之一。光伏发电涉及的技术问题很早就受到人们的重视及研讨,并不断提出新的解决方案<sup>[1]</sup>。在光伏发电的关键技术中,太阳能的最大功率跟踪 MPPT (maximum power point tracking) 控制是提高光伏发电系统能量输出效率亟需解决的首要问题。由于光伏电池的最大功率点随光照强度和环境温度动态变化,以及输出负载的复杂动态变化,如何让光伏电池实时工作在最大功率点涉及复杂的控制问题<sup>[2]</sup>。考察已提出的光伏发电系统最大功率点跟踪方案<sup>[3]</sup>,虽然各具特色,但在动态跟踪的快速性和稳态跟踪精度等方面仍显不足,常用的扰动观测法 P&O (perturb-observe)<sup>[4]</sup>和增量电导法 INC (increment conductance)<sup>[5]</sup>等自寻优策略也存在跟踪的快速性和稳态跟踪精度的矛盾,引发可实现性和效率等问题。为了克服这些问题,出现了许多智能控制方法<sup>[6]</sup>,但大都显得比较复杂而不便于实际应用或实现困难,开发具有更优良动态及静态特性的、易实现的 MPPT 控制方法成为研究人员尤其是工程技术人员不懈的追求<sup>[7-8]</sup>。在现有研究中,结合具体实现方式的 MPPT 控制方法研究还不多见,有待进行深入而有针对性的研究。

本文结合当前主流技术水平,从提高太阳能电收集效率和收集电路的易实现性出发,针对 Boost 结构的太阳能收集电路提出一种易实现的 MPPT 控制方法。收集电路利用 Boost 电路的升压作用,尽可能多地收集电能,通过 MPPT 控制方法尽可能地提高收集电路的电收集效率,通过 MPPT 控制脉冲最优占空比预存储的方式简化实时控制时的控制脉冲宽度计算,从而提高系统实现的实时性、高效率和易实现性,克服传统常用 MPPT 控制方法因步长选择不同而导致的跟踪速度和跟踪精度的矛盾。

## 1 太阳能收集电路设计与分析

### 1.1 太阳能收集电路设计

为实现光伏电池的最大电功率输出,要求光伏电池等效负载与等效内阻满足相应的阻抗匹配条

件,但实际应用中,光伏电池的实际内阻和负载是独立动态变化的,导致简单的阻抗变换电路无法满足动态阻抗匹配的要求,需在光伏电池和其负载间加入特殊的调节电路才有可能实现。综合已有的研究成果<sup>[9-14]</sup>,高频 PWM 开关变换电路可以实现该功能。本文重点研究太阳能的电收集。为高效收集太阳能,实现光伏电池的最大电功率输出,在光伏电池与储能电容间加入高频 PWM 开关控制的非隔离 Boost 电路,根据光伏电池和等效负载实时状态调节 Boost 电路的 PWM 控制脉冲宽度以实现阻抗匹配,达到 MPPT 控制的目的,收集电路的等效模型如图 1 所示。图中, $U_i$  为光伏电池的等效受控电压源, $R_i$  为光伏电池的等效敏感电阻, $L$  为储能电感, $C$  为大容量储能电容, $D$  为电能收集隔离二极管, $Q$  为 MOS 开关管, $R_s$  为光伏电池输出电流采样电阻, $R_L$  为收集电路等效输出负载,CPU 为 MPPT 控制核心,A/D 为状态检测的模/数转换器件。

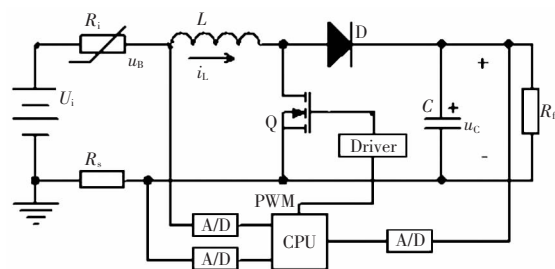


图1 太阳能收集电路等效模型

Fig.1 Equivalent model of solar energy collecting circuit

### 1.2 太阳能收集电路分析

在高频 PWM 控制脉冲的控制下,Boost 电路的工作过程分为开关管 Q 导通和关断 2 个阶段,在不同的阶段,收集电路有不同的运行行为。

在开关管 Q 导通阶段,收集电路中的电感电流  $i_L(t)$  和电容电压  $u_C(t)$  可分别表示为

$$i_L(t) = (i_L(t_0) - \frac{U_i}{R_i + R_s})e^{-\frac{R_i + R_s}{L}(t-t_0)} + \frac{U_i}{R_i + R_s} \quad (1)$$

$$u_C(t) = u_C(t_0)e^{-\frac{1}{R_L C}(t-t_0)} \quad (2)$$

式中, $t_0$  为开关管 Q 导通阶段的起始时刻。

在开关管 Q 关断阶段,收集电路中的电感电流  $i_L(t)$  和电容电压  $u_C(t)$  可分别表示为

$$i_L(t) = \begin{cases} (c_1\lambda_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} + c_2\lambda_2 e^{\lambda_2(t-t_0)})C + \frac{c_1}{R_{Lz}} e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{c_2}{R_{Lz}} e^{\lambda_2(t-t_0)} + \frac{U_i - U_{Dth}}{R_i + R_s + R_{Lz}} & u_D \geq U_{Dth} \\ 0 & u_D < U_{Dth} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_C(t) = \begin{cases} c_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} + c_2 e^{\lambda_2(t-t_0)} + \frac{U_i - U_{Dth}}{R_i + R_s + R_{Lz}} & u_D \geq U_{Dth} \\ u_C(t_0) e^{-\frac{1}{R_s C}(t-t_0)} & u_D < U_{Dth} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $t_0$  为开关管 Q 关断阶段的起始时刻;  $u_D$  为二极管 D 承受的正向压降;  $U_{Dth}$  为二极管 D 正向导通时的压降;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $c_1$ 、 $c_2$  分别为参数, 表示为

$$\lambda_1 = \frac{-\left(\frac{L}{R_{Lz}} + R_i C + R_s C\right) + \Delta}{2LC} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{-\left(\frac{L}{R_{Lz}} + R_i C + R_s C\right) - \Delta}{2LC} \quad (6)$$

$$c_1 = u_C(t_0) - \frac{R_{Lz}(U_i - U_{Dth})}{R_i + R_s + R_{Lz}} - \frac{1}{\lambda_2 C - \lambda_1 C} (i_L(t_0) - \lambda_1 C u_C(t_0) + \frac{\lambda_1 C R_{Lz}(U_i - U_{Dth}) - u_C(t_0)}{R_i + R_s + R_{Lz}}) \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{1}{\lambda_2 C - \lambda_1 C} (i_L(t_0) - \lambda_1 C u_C(t_0) + \frac{\lambda_1 C R_{Lz}(U_i - U_{Dth}) - u_C(t_0)}{R_i + R_s + R_{Lz}}) \quad (8)$$

式中,  $\Delta = \sqrt{\left(\frac{L}{R_{Lz}} + R_i C + R_s C\right)^2 - 4LC \frac{R_i + R_s + R_{Lz}}{R_{Lz}}}$ 。

## 2 太阳能收集电路 MPPT 控制

### 2.1 收集电路 MPPT 控制的最优占空比

光伏电池生成的电能中, 一部分被光伏电池等效内阻和收集电路本身消耗, 另一部分被收集电路储存或供给负载。Boost 电路收集的有效电能为储能电容  $C$  中储存的能量和负载  $R_{Lz}$  消耗的能量之和, 即

$$\xi(t) = \frac{1}{2} C u_C^2(t) + \int_{-\infty}^t \frac{u_C^2(t)}{R_{Lz}} dt \quad (9)$$

收集电路收集的能量与控制脉冲占空比有关, 在一个 PWM 周期内收集的能量可表示为

$$\xi_p(D_c) = \int_{D_s T_s}^{T_s} i_L(t) u_C(t) dt \quad (10)$$

式中:  $D_c$  为 PWM 控制脉冲占空比;  $T_s$  为 PWM 周期。

当  $d\xi_p(D_c)/dD_c=0$  时, 可得 PWM 周期内收集能量最多时的脉冲占空比  $D_{CM}$ , 它与  $R_i$ 、 $R_{Lz}$ 、 $R_s$ 、 $L$ 、 $C$  相关, 当收集电路元件参数  $R_s$ 、 $L$ 、 $C$  确定后,  $D_{CM}$  主要由动态变化的  $R_i$ 、 $R_{Lz}$  决定, 其关系可表示为

$$D_{CM} = f_{DCM}(R_i, R_{Lz}) \quad (11)$$

### 2.2 最优占空比的实时确定方法

要最大化收集电路收集的能量, 需寻找最优的 PWM 控制脉冲占空比, 使  $\xi(t)$  在每个 PWM 周期内的取值最大化。由于 Boost 电路为开关电路, 若要用解析的方式求解最优控制脉冲占空比极其困难, 需用其他近似求解方式进行控制脉冲占空比的寻优。研究发现, 电路可确定性元件参数选定后, 最大功率输出时的 PWM 控制脉冲占空比与光伏电池的等效内阻  $R_i$  和收集电路的等效负载电阻  $R_{Lz}$  存在基本固定的单调值对应关系, 可事先计算出不同  $R_i$  和  $R_{Lz}$  关键场景下的最优控制脉冲占空比以供实时 MPPT 控制时近似计算控制脉冲宽度使用。

确定光伏电池的实际等效内阻时, 可在每个 PWM 控制周期内, 检测开关管 Q 导通起止时刻的光伏电池端电压和输出电流, 经过计算得到, 其求解方程组为

$$\begin{cases} u_B(t_0) = U_i - R_i i_L(t_0) \\ u_B(t_p) = U_i - R_i i_L(t_p) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $t_0$  和  $t_p$  分别为某个脉冲的起始时刻和终止时刻。

由式(12)可得光伏电池在测量时段的等效状态为

$$\begin{cases} R_i = \frac{u_B(t_p) - u_B(t_0)}{i(t_0) - i(t_p)} \\ U_i = u_B(t_0) + \frac{u_B(t_p) - u_B(t_0)}{i(t_0) - i(t_p)} i_L(t_0) \end{cases} \quad (13)$$

收集电路等效负载  $R_{Lz}$  可根据开关管 Q 导通阶段的测量值  $u_C(t_0)$  和  $u_C(t_p)$  近似求得, 即

$$R_{Lz} = \frac{t_p - t_0}{C \ln\left(\frac{u_C(t_p)}{u_C(t_0)}\right)} \quad (14)$$

考虑到实现的实时性和难易程度, 具体实现

时,式(14)可简化为

$$R_{fz} = \frac{u_c(t_0)(t_p-t_0)}{u_c(t_0)-u_c(t_p)} \quad (15)$$

获得光伏电池等效状态和收集电路等效负载后,可根据  $R_i$  和  $R_{fz}$  确定控制脉冲的最优占空比,并根据最优占空比和 PWM 频率确定控制脉冲宽度。由于存储备用的最优占空比的场景数量有限,不可能涵盖任意  $(R_i, R_{fz})$  场景,实际场景  $(R_i, R_{fz})$  时的最优控制脉冲占空比  $D_{CM}(R_i, R_{fz})$  可根据直接邻近的4个存储场景  $(R_{i1}, R_{fz1})$ 、 $(R_{i1}, R_{fz2})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz1})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz2})$  近似确定,图2为实际场景与4个直接邻近存储场景  $(R_{i1}, R_{fz1})$ 、 $(R_{i1}, R_{fz2})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz1})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz2})$  以及4个中间场景  $(R_i, R_{fz1})$ 、 $(R_i, R_{fz2})$ 、 $(R_{i1}, R_{fz})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz})$  的关系。

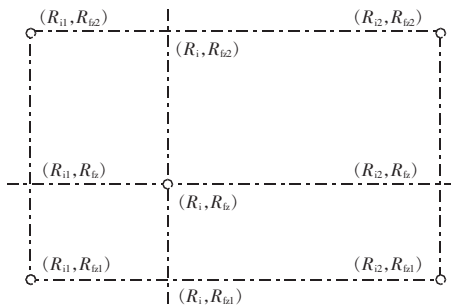


图2 实际场景与邻近存储场景以及中间场景的关系

Fig.2 The relationships among the actual scene and the adjacent storage scene and the middle scene

实际场景  $(R_i, R_{fz})$  时的最优占空比  $D_{CM}(R_i, R_{fz})$  的确定过程如下:

首先,根据实际场景  $(R_i, R_{fz})$  查询出4个直接邻近存储场景  $(R_i, R_{fz1})$ 、 $(R_{i1}, R_{fz2})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz1})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz2})$ ;

其次,根据实际场景和4个直接邻近存储场景确定4个中间场景  $(R_i, R_{fz1})$ 、 $(R_i, R_{fz2})$ 、 $(R_{i1}, R_{fz})$ 、 $(R_{i2}, R_{fz})$ ;

然后,根据4个直接邻近存储场景的最优占空比近似计算出4个中间场景的最优占空比  $D_{CM}(R_i, R_{fz1})$ 、 $D_{CM}(R_i, R_{fz2})$ 、 $D_{CM}(R_{i1}, R_{fz})$ 、 $D_{CM}(R_{i2}, R_{fz})$ , 计算公式分别为

$$D_{CM}(R_i, R_{fz1}) = D_{CM}(R_{i1}, R_{fz1}) - \frac{R_{i1} - R_i}{R_{i1} - R_{i2}} \cdot [D_{CM}(R_{i1}, R_{fz1}) - D_{CM}(R_{i2}, R_{fz1})] \quad (16)$$

$$D_{CM}(R_i, R_{fz2}) = D_{CM}(R_{i1}, R_{fz2}) - \frac{R_{i1} - R_i}{R_{i1} - R_{i2}} \cdot [D_{CM}(R_{i1}, R_{fz2}) - D_{CM}(R_{i2}, R_{fz2})] \quad (17)$$

$$D_{CM}(R_{i1}, R_{fz}) = D_{CM}(R_{i1}, R_{fz1}) - \frac{R_{fz1} - R_{fz}}{R_{fz1} - R_{fz2}} \cdot [D_{CM}(R_{i1}, R_{fz1}) - D_{CM}(R_{i1}, R_{fz2})] \quad (18)$$

$$D_{CM}(R_{i2}, R_{fz}) = D_{CM}(R_{i2}, R_{fz1}) - \frac{R_{fz1} - R_{fz}}{R_{fz1} - R_{fz2}} \cdot [D_{CM}(R_{i2}, R_{fz1}) - D_{CM}(R_{i2}, R_{fz2})] \quad (19)$$

最后,根据4个中间场景的最优占空比近似计算出实际场景  $(R_i, R_{fz})$  时的最优占空比  $D_{CM}(R_i, R_{fz})$ , 即

$$D_{CM}(R_i, R_{fz}) = \frac{1}{4} [D_{CM}(R_i, R_{fz1}) + D_{CM}(R_i, R_{fz2}) + D_{CM}(R_{i1}, R_{fz}) + D_{CM}(R_{i2}, R_{fz})] \quad (20)$$

### 3 实例分析

结合目前主流技术水平和应用情况,针对图1所示的 Boost 结构太阳能收集电路,选择元件参数的情况如表1所示。

表1 太阳能收集电路元件及参数

Tab.1 Components and parameters of collecting circuit

开关频率/ kHz	光伏电池/ V, W	$L/\mu\text{H}$	$C/\mu\text{F}$	$R_f/\Omega$	$U_{\text{Dth}}/\text{V}$	$R_s/\Omega$
100	24, 80	330	1 000	1~100	0.7	0.5

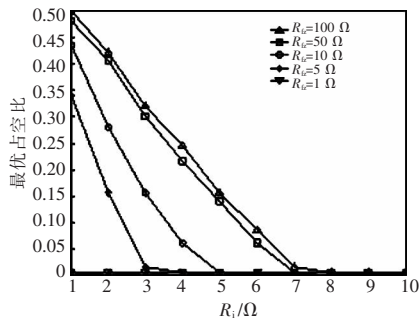
借助仿真计算软件,得到不同  $(R_i, R_{fz})$  关键场景下对应最大功率传输时的最优控制脉冲占空比,如表2所示。收集电路运行时的主要关系和结果如图3~图6所示。

图3为不同关键场景下最优占空比与  $R_i$  和  $R_{fz}$  的对应关系。由图3可见,当  $R_{fz}$  不变时,  $R_i$  越大,最优占空比越小;当  $R_i$  一定时,  $R_{fz}$  越大,最优占空比越大。这是因为 Boost 结构太阳能收集电路中,电感储能的大小受  $R_i$  大小和开关管导通时长影响,电感释放能量的多少受  $R_{fz}$  大小和开关管关断时长影响。当电感在每个开关周期储能最多、释放能量最彻底时,收集的电能最多,当  $R_i$  小时,电感储能阶段的时间常数大,MPPT 控制需要控制脉冲的占空比大;当  $R_{fz}$  小时,电感能量释放快,需要的电感释

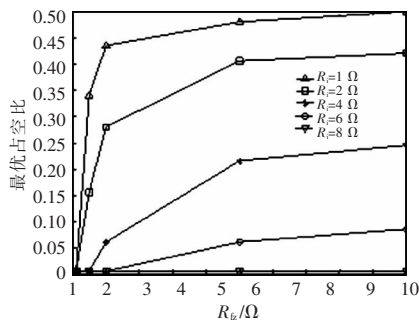
表 2 不同  $R_i$  和  $R_L$  时 MPPT 最优控制脉冲占空比

Tab.2 MPPT optimal control pulse duty cycle at different key scene of  $R_i$  and  $R_L$

$R_i/\Omega$	$R_L/\Omega$				
	100	50	10	5	1
1	0.500	0.480	0.435	0.340	0.005
2	0.420	0.405	0.280	0.155	0.005
3	0.320	0.300	0.155	0.015	0.005
4	0.245	0.215	0.060	0.005	0.005
5	0.155	0.140	0.005	0.005	0.005
6	0.085	0.060	0.005	0.005	0.005
7	0.015	0.005	0.005	0.005	0.005
8	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
9	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005



(a) 最优脉冲占空比随  $R_i$  变化的情况



(b) 最优脉冲占空比随  $R_L$  变化的情况

图 3 不同场景下的 MPPT 最优控制脉冲占空比

Fig.3 The optimal MPPT control pulse duty cycle

放能量的时长可以短,而增加电感储能时长可以增加电感的储能,所以 MPPT 控制时的控制脉冲占空比大。

图 4 为不同( $R_i, R_L$ )时的 MPPT 最优控制脉冲占空比关系曲面。由图可见,MPPT 最优控制脉冲占空比在不同( $R_i, R_L$ )情况下具有单调性,说明根据

直接邻近存储场景近似计算实际场景时的 MPPT 最优控制脉冲占空比具有实际可行性和有效性。当控制精度要求较高时,可通过适当增加存储场景粒度的方式予以保证。

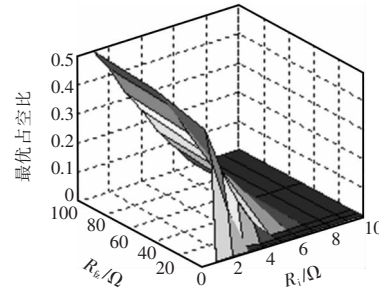


图 4 不同场景下的 MPPT 最优控制脉冲占空比曲面

Fig.4 The curved surface for MPPT optimal control pulse duty cycle of different scenarios

图 5 为光伏电池等效内阻  $R_i=5 \Omega$ 、等效输出负载  $R_L=100 \Omega$  时,不同控制脉冲占空比下对应的能量收集效率。由图可见,控制脉冲占空比为 0.155 时,电能量收集效率最高,约为 0.39,比理想效率 0.5 低,这是因为电流采样电阻以及隔离二极管等元器件消耗了部分能量的缘故。

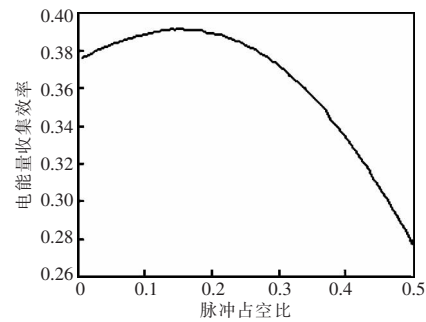


图 5 不同控制脉冲占空比时的能量收集效率

( $R_i = 5 \Omega, R_L = 100 \Omega$ )

Fig.5 Energy collection efficiency of different control pulse duty cycle ( $R_i = 5 \Omega, R_L = 100 \Omega$ )

图 6 所示为太阳能收集电路工作时,电路中的电感电流和储能电容电压的响应过程。由图可见,随着收集电路工作时间的增长,电感电流快速从无到有并逐步增大,在电感电流的作用下,储能电容的电压逐渐升高,当电容电压增大到一定值时,阻碍电感释放能量的趋势趋于明显,电感电流从超调值处开始减小,电容电压继续增加,但增加的速度

趋缓;当电容电压进一步增加到一定值时,电感电流与等效负载输出电流趋于相等,每个 PWM 周期内电感释放的能量近似等于等效负载  $R_L$  消耗的能量,电容的充电和放电达到平衡,电容电压最终趋于稳定,电感电流的均值也趋于稳定。

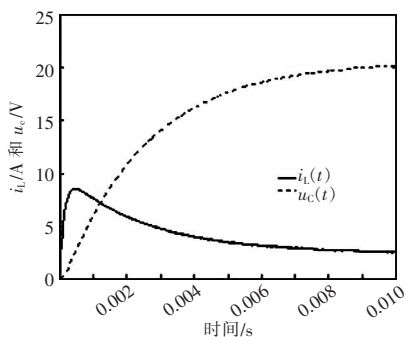


图6 收集能量最大化时的电感电流和电容电压

Fig.6 The inductive current and capacitance voltage when the collecting energy is maximized

## 4 结语

光伏电池将光能转化为电能的多少受光照强度和电池温度影响,借助 PWM 控制 Boost 电路可以将光伏电池转换过来的电能收集、存储起来以供负载或后续变换电路使用。在光伏电池的电能收集过程中,为降低光伏电池等效内阻耗能引起光伏电池温度的升高,应让收集电路收集的能量尽可能多,即光伏电池按 MPPT 输出;Boost 电路应根据光伏电池等效状态和等效输出负载状态自动地确定并工作在相应的最优控制脉冲占空比下。由于光伏电池等效状态及收集电路等效负载的动态复杂性,MPPT 最优控制脉冲占空比的精确计算比较困难,为降低系统实现对 CPU 的要求,本文采取了收集电路可确定性元件参数确定前提下的关键场景状态预存储的方式,根据预存的关键场景近似计算实时场景下的最优控制脉冲占空比,以减小计算复杂度。但当元件参数存在误差或改变后,如何快速准确地自适应调整或实时确定 Boost 电路的 MPPT 最优控制脉冲占空比有待进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 王子龙, 王一波. 光伏发电系统测控技术研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(4):1023-1028.  
Yang Zilong, Wang Yibo. Research on measurement and control technology for PV power generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(4):1023-1028(in Chinese).
- [2] 邵伟明, 程树英, 林培杰, 等. 局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法及实现[J]. 电源学报, 2016, 14(1):27-34, 42.  
Shao Weiming, Cheng Shuying, Lin Peijie, et al. MPPT algorithm and realization for photovoltaic array under partial shadow[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(1):27-34, 42 (in Chinese).
- [3] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(s1):229-234.  
Yang Yongheng, Zhou Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(s1):229-234(in Chinese).
- [4] 倪雨, 郝帅翔. 扰动观测法控制 MPPT 系统运动特性分析[J]. 电子学报, 2015, 43(7):1388-1894.  
Ni Yu, Hao Shuaixiang. Motion characteristics analysis of P&Q control MPPT system[J]. Acta Electronic Sinica, 2015, 43(7):1388-1894(in Chinese).
- [5] 张澧生, 施佳, 施大发. 一种改进 INC 和 MPC 的光伏最大功率点跟踪算法[J]. 电源学报, 2014, 12(2):95-100.  
Zhang Lisheng, Shi Jia, Shi Dafa. A photovoltaic MPPT based on improved INC and MPC algorithm[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(2):95-100(in Chinese).
- [6] Mishra A, Farzinfar M, Bahadornajad M, et al. Evaluating the impact of different PV control strategies on distribution network operation[C]. Power Engineering Conference, 2014: 1-6.
- [7] 高嵩, 罗浩, 何宁, 等. 基于 MPPT 的新型变步长增量电导法的研究[J]. 电气传动, 2015, 45(2):16-20.  
Gao Song, Luo Hao, He Ning, et al. Research on a new method for variable step size INC based on maximum power point tracking[J]. Electric Drive, 2015, 45(2):16-20(in Chinese).
- [8] 王丰, 吴新科, Fred C. Lee, 等. 嵌入式智能光伏模块的最大功率输出统一控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21):81-89.

- Wang Feng, Wu Xinke, Fred C L, et al. Application of unified output MPPT control in DMPPT PV systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):81-89(in Chinese).
- [9] 张颖超, 龙江涛, 郭振, 等. 基于新型混合储能结构的独立光伏发电系统[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12):2461-2467.  
Zhang Yingchao, Long Jiangtao, Guo Zhen, et al. Stand-alone PV system based on new structure of hybrid energy storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2461-2467(in Chinese).
- [10] 刘兴杰, 郭栋, 王凯龙. 基于电气外特性的光伏发电系统模型等效方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10):231-238, 265.  
Liu Xingjie, Guo Dong, Wang Kailong. Equivalent modeling method for PV system based on its electric external characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 231-238, 265(in Chinese).
- [11] 王盼宝, 王卫, 吴炎. 光伏发电系统中无电流传感器型MPPT控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):64-68.  
Wang Panbao, Wang Wei, Wu Yan. Strategy of MPPT control without current sensors for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):64-68(in Chinese).
- [12] 蒋玮, 陈武, 胡仁杰, 等. 光伏发电系统中超级电容器充电策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12):31-37.  
Jiang Wei, Chen Wu, Hu Renjie, et al. Charging strategy for super capacitor of photovoltaic generation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 31-37(in Chinese).
- [13] 谢玲玲, 龚仁喜, 李崎勇. 光伏发电最大功率点跟踪交错并联 Boost 变换器的动力学特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6):38-45.  
Xie Lingling, Gong Renxi, Li Jiyong. Analysis of dynamical characteristics of the interleaved boost converter in maximum power point tracking for photovoltaic power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6):38-45(in Chinese).
- [14] 方波, 白政民, 张元敏. 基于 FB-PS-PWM 软开关技术的光伏发电 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 71-75, 79.  
Fang Bo, Bai Zhengmin, Zhang Yuanmin. Research of MPPT in PV system based on FB-PS-PWM ZVS soft-switching technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6):71-75, 79(in Chinese).



郑明才

## 作者简介:

郑明才(1969-),男,通信作者,博士,教授,研究方向:电力电子与电力传动、电能质量控制,E-mail:dysfzmc@163.com。

赵小超(1971-),女,副教授,研究方向:复杂系统建模与分析,E-mail:dysfzxc@126.com。

胡恩博(1982-),男,硕士,讲师,研究方向:电子信息技术,E-mail:7253004@qq.com。

郑金兵(1990-),男,助理工程师,研究方向:传感器与检测技术,E-mail:dysfzjb@126.com。