

高性能独立光伏发电系统

High-performance Independent Photovoltaic Generator System

邓隐北¹, 郭学梅², 唐庆伟¹, 李洋¹ 编译

Translated by Deng Yinbei¹, Guo Xuemei², Tang Qingwei¹, Li Yang¹

1. 河南黎明科技有限公司; 2. 新乡学院

1. Henan Liang Ming Science and Technology Co.Ltd;

2. Xinxiang College

摘要: 本文介绍一种高性能的独立光伏 (PV) 发电系统。为使 PV 发电系统能更具灵活性和推广性, 系统后级的功率电路, 由高效的升压变换器和脉宽调制 (PWM) 逆变器组成。在 DC-DC 功率变换中, 为提高常规升压变换器的转换效率, 引入了高效的升压变换器, 以与低压的 PV 阵列并联运行, 并对 PWM 逆变器进行解耦和简化。而且为对 PWM 逆变器进行电压控制, 文中的自适应全滑模控制 (ATSMC) 系统, 可保持总谐波失真 (THD) 较小的正弦波输出电压, 在输出负载变化的情况下, 其电压的变化也较小。此外, 还介绍了不带任何光传感器的有效太阳跟踪器, 可使 PV 模块直接面向太阳, 以捕获最大的光辐照度和提高系统的效率。文献 [1] 中给出的试验结果, 证实了高性能独立光伏系统的高效升压变换器, PWM 逆变器控制以及有效太阳跟踪器的有效性。

关键词: 光伏发电系统 高效升压变换器 PWM 逆变器 太阳跟踪系统 开路电压 最大功率点跟踪 自适应全滑模控制 (ATSMC)

Abstract: This paper introduces a high-performance independent photovoltaic generator system. In order to make PV generator system more flexible and popularized, post-system power circuit is made up of high-performance step-up converter and PWM inverter. During DC-DC power conversion, high-performance step-up converter is applied to run parallelly with low-voltage PV arrays, and PWM inverter is decoupled and simplified in order to raise the conversion rate of common step-up converter. What's more, in order to curb a power control on PWM inverter, the ATSMC system in this paper could keep sine wave output voltage with a low THD, and its voltage changes only a little when output load changes. Besides, this paper introduces efficient sunlight tracker that doesn't contain any opto-sensor, thus the PV module could face directly to the sun to catch highest light irradiation and improve the efficiency of the system. In Literature I, the experiment result has proven that high-performance independent PV system, high-performance step-up converter, the control of PWM inverter as well as efficient sunlight tracker are of high performance and efficiency.

Key Words: PV Generator system, High-performance step-up converter, PWM Inverter, Sunlight tracking system, Open-circuit voltage, Maximum power point tracing, ATSMC

[中图分类号] TK513.4 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 05-0042-09

1 引言

由于大气中废气的排放和 CO₂ 量的增加, 致使地球变暖。上世纪全球表面的温度已以接近 0.6℃ / 百年的速率上升^{[1][2]}, 能量的供给和使用, 不仅关系到地球的暖化, 而且涉及到例如空气污染、酸的沉淀、臭氧耗尽、森林毁灭, 以及放射性物质的辐射等环境忧患问题。为避免产生这些后果, 一些潜在的

决措施已开始启动, 包括经过改善能效的能量储存, 减少石化燃料的利用和增加有利环保的能量供应。近年来, 由清洁、有效、无环境污染的能源输出能量, 已成为工程师和科学家的主要任务。其中, 光伏 (PV) 发电系统在调研时引起了很大重视, 因为它似乎是解决环境问题的可能途径之一。

最近, 具有高压增益的 DC-DC 变换器, 在很多工业应用

中已成为普遍需要。例如，在清洁能源的前端区段，不间断电源的直流后备能量系统，汽车头灯用的高强度放电（HID）灯，以及电信工业的应用。常见的升压变换器，甚至在极端占空比时也不能提供这么高的直流电压增益；它还可能导致严重的“反向回复”和增大所有器件的定额。在这种情况下，转换效率会降低，电磁干扰（EMI）问题会加重。过去10年中，为了提高转换效率和电压增益，已研究过很多改进型的升压变换器拓扑。虽然，变换器设计中利用了电压箝位技术操作，以克服高电压级应用中输出二极管的严重反向回复问题，但仍存在过大的开关电压应力，且辅助开关的接通时间将限制电压的增益。文献中研究了一种新颖的耦合电感器变换器策略，以使用1个简单的电感器，来提高常规升压变换器的电压增益和处理电感器的泄露问题，以及常规变换器中变压器的去磁问题。本文，介绍了高效率升压变换器拓扑的升压，以及利用DC-AC逆变器时PV模块输出直流电压的稳压。

微电子学和功率器件的发展，使得工业中广泛地应用PWM逆变器。PWM逆变器的基本机理，是通过逆变器、LC滤波器组合，将直流电压转换为正弦交流输出。由总谐波畸变（THD）、瞬态响应和效率来评定性能。这样，过去10年来对PWM逆变器的闭路调节寄予了很多关注，以便在不同负载情况下达到良好的动态响应。例如：线性控制，栅极电流控制的观测器，基于Lyapunov的控制，滑模式控制（SMC）等等。

一般，PV模块的输出功率大体上按照不同的光辐射而变化。例如，在郑州一年中最大的平均光照方向是朝南，相应的倾角为 34.72° ，因而很多PV模块均按这一位置安装。但按此方式不能持续地捕获最大的光辐射量（辐照度），故光伏发电性能不能有效地改善。最近，很多研究者致力于有关太阳跟踪系统的研究，通常的太阳跟踪器在PV板的端部装有光传感器，当来自不同光传感器的反馈信号相等时，这意味着PV板正面对着太阳，在这一相应位置具有最大的光辐射。遗憾的是光传感器起始的校核和调整是很费时的，且在不同的操作条件下装置的性能容易改变。为了克服上述缺点，本文介绍的无光传感器有效太阳跟踪系统，它是利用PV模块开路电压正比于相应的（光）辐射照度这一特性，而使PV板尾随着太阳的直照方向。

本文重点介绍的高性能独立光伏发电系统^[1]，包含3个主要部分：高效率的升压变换器，带ATSMC（自适应全滑模控制）的PWM逆变器，以及有效的太阳跟踪器。首先，有效太阳跟踪器应设计成能捕获最大的光辐射量和功率；然后是高效率升压变换器，应能将有效太阳跟踪器所捕获的功率转换成稳定的直流电压源；此外，带ATSMC的逆变器，再将升压变换器的这一直流电压源输送至交流电压源而独立利用。

2 系统概述

本文提出的高性能独立光伏（PV）发电系统，其整体结构布局如图1所示。该系统主要由PV模块、有效太阳跟踪器、高效率升压变换器、全桥逆变器、系统控制器以及输出负载组成。对于常规的光伏发电系统^{[2]、[3]、[4]}与本文所提出的解决方式之间存在的差别详述如下。

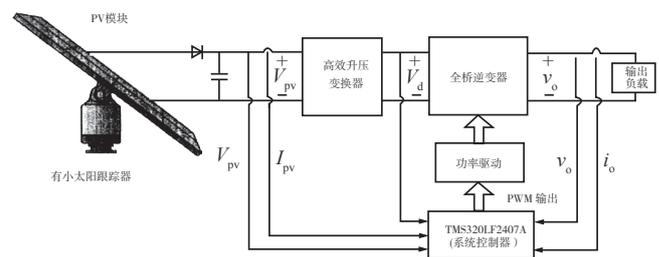


图1 高性能独立光伏发电系统的结构布局

由于光伏效应，PV板的电压较低，而有较高输出电压的PV阵列又难于制造，且当任何单个PV板失效时，PV阵列可能出现故障。此外，涉及负荷的变化，相应的输出电压（ V_{pv} ）容易变化。为满足高电压的要求，作为高性能独立光伏发电系统中主要部件之一的DC-DC变换器，需要具有高的电压增益。本文的高效率升压变换器，能减少PV板的串联数目，为逆变器利用时维持恒定的直流母线电压（ V_d ），以及能为DC-AC逆变器的控制设计解耦与简化。

有4个功率半导体器件和低通滤波器的单极PWM全桥逆变器，被视同为DC-AC功率变换器电路，以满足交流电源的要求。因为PWM逆变器控制着由DC电压源转换为AC电压源的性能，故PV发电系统AC输出波形的质量，与PWM逆变器的性能密切相关。这样，在此逆变器中藉4个功率半导体开关的切换，引入了ATSMC系统^[25]，在变动的输出负载下，以较低的总谐波畸变（THD）和较少的变化，保持着正弦波的输出电压（ V_o ）。在以前出版的文献中，未发现电力电子控制中ATSMC系统研制与应用的有关报道。

一般来说，PV模块的输出功率大体是按不同的光辐射照度而变化的。为了提高独立PV发电系统的性能，由同步电动机操作的有效太阳跟踪器，是基于PV模块的开路电压而研制的。跟踪系统保持PV板正面朝向太阳，这就可改善原固定式PV模块的发电效率。与带光传感器的常规太阳跟踪器对比，能节约成本。而且，因有效太阳跟踪器中，PV模块的开路电压要求简单，这一方式不必改动原光伏发电系统的电路结构。

文献[1]中的PWM逆变器控制和有效太阳跟踪系统，均利用写入系统控制器中的Turbo C语言执行，也即，基于数字信号处理器（DSP）开发模块。这一开发的模块有1个德克萨斯州的TMS320LF2407A中心处理单元（CPU），并带计算模块，

16通道10位A/D(模拟/数字),4通道12位D/A转换以及可编程的I/O(输入/输出)口。该CPU有40MIPS,16位固定点DSP芯片,16PWM通道,4个一般用途的定时器和2个编码器通道。PV发电系统中主要部件的功能,在以下章节中详细介绍。

3 高效的升压变换器

高效升压变换器的总体结构示于图2,图中共有7个部分:包括PV模块输入电路、原边电路、副边电路、无源的再生缓冲电路、滤波电路、直流输出电路与反馈控制机构。在这一结构中,带低压定额开关的耦合电感器,用于开关无论接通或断开时提高电压增益;而无源的再生缓冲电路,则用于吸收离散电感的能量。这样,开关的占空比可在宽范围内操控,且相关的电压增益,高于其他基于耦合电感器的变换器的增益。此外,在此结构图中的全部器件,还具有箝位电压的特性,器件的电压应力相对小于输出电压的。因此,可选择低电压、低导通损耗的器件,且在此电路中的二极管内无反向回复的电流。同时,在负载变化情况下,可利用闭环控制方法克服电源电压的漂移问题。结果,这一变换器拓扑,能增加带一个电感器的常规升压变换器的电压增益。而对基于耦合电感器的变换器,则又能处理电感器的泄漏及变压器的去磁问题。

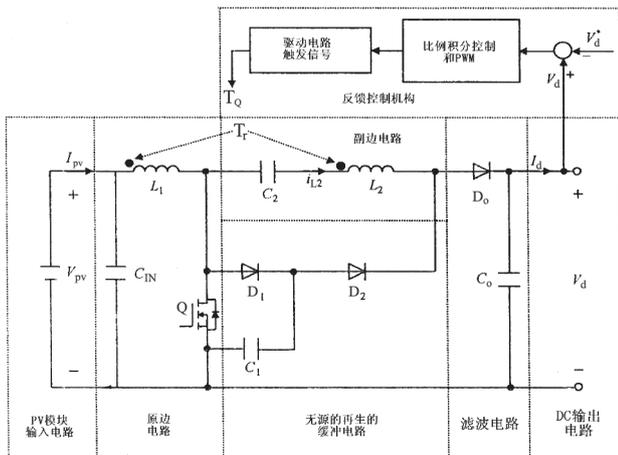


图2 高效率升压变换器的总体结构

主要的表示符号摘要说明如下: V_{pv} 和 I_{pv} 表示直流输入电压和电流; C_{IN} 为光伏模块输入电路的输入滤波电容; L_1 和 L_2 分别代表耦合电感器 (T_r) 原边和副边的单个电感器; Q 是原边电路的开关; V_d^* 和 T_Q 为反馈控制机构中的输出电压指令和触发信号; C_1 、 D_1 和 D_2 代表无源再生缓冲电路中的箝位电容器、箝位二极管和整流二极管; C_2 为副边电路中的高压电容器; D_0 和 C_0 是滤波电路的输出二极管和滤波电容器; V_d 和 I_d 表示直流输出电路的直流电压和电流。

图2中的耦合电感器,可作为理想变压器的磁化电感器

(L_m)和漏磁电感器(L_k)来建模(建立数字模型)。这一理想变压器的匝数比(n)和耦合系数(k)定义为:

$$n=N_2/N_1 \quad (1)$$

$$k=L_m/(L_k+L_m) \quad (2)$$

式中: N_1 和 N_2 分别为原边和副边的绕组匝数; V_{DS} 、 V_{Lm} 、 V_{L2} 和 V_{Lk} 分别代表开关上的电压、理想变压器原绕组与副绕组上的电压、以及泄漏电感器上的电压;而耦合电感器的原边电流(i_{L1}),由磁化电流(i_{Lm})和原边感应电流(i_1)组成;副边电流(i_{L2}),由原边感应电流经过理想变压器形成,且其值关系到匝数比(n)。此外,为了简化电路分析,开关(Q)和所有二极管(D_0 、 D_1 、 D_2)的导通电压降均忽略不计。

按文献详述的电路分析,高效率的升压变换器的电压增益(G_V),以及相应的开关电压(V_{DS})可表示如下:

$$G_V = \frac{V_d}{V_{pv}} = \frac{2+nk}{1-D} + \frac{D(1-k)(n-1)}{1-D} \quad (3)$$

$$v_{DS} = \frac{V_{pv}}{1-D} + \frac{D(1-k)(n-1)}{2(1-D)} V_{pv} \quad (4)$$

式中: D -开关(Q)的占空比。因为电压增益(G_V)对耦合系数(k)的敏感性小,以 $k=1$,式(3)和式(4)可改写为:

$$G_V = (2+n)/(1-D) \quad (5)$$

$$v_{DS} = V_{pv}/(1-D) \quad (6)$$

按照式(5)和式(6),可得到:

$$v_{DS} = V_d/(n+2) \quad (7)$$

通过对式(7)的分析,如输出电压(v_{DS})和匝数比(n)固定的话,开关电压(V_{DS})与输入电源(V_{pv})和开关的占空比(D)无关,故能确保开关(Q)的最大可保持电压是恒定的。只要输入电压不高于开关的额定电压,高效的升压变换器,即使在电压变化大的情况下,也能很好的应用到低压的PV(光伏)电源。同时,它可对PWM逆变器的控制设计解耦和简化。

4 PWM 逆变器控制

4.1 动态模型描述

图3所示为PWM逆变器的结构图,包括4个功率半导体和1个低通滤波器。图3中, r_{Lf} 和 r_{Cf} 是低通滤波器中电感器(L_f)和电容器(C_f)的等值串联电阻; Z_L 为输出负载; v_{AB} 、 v_{Cf} 和 v_o ,分别为全桥逆变器的输出电压、滤波电容器上的电压和负载电压; i_{Lf} 、 i_{Cf} 和 i_o 分别为滤波器电感电流、滤波器电容电流和负载电流;电流源(i_{Ld})力求超过由负荷变化引起的干扰。按一般的分析,在此PWM逆变器结构中可作以下假定:(1) r_{Lf} 和 r_{Cf} 值足够小,可忽略;(2)传导损耗和开关损耗为零,

因所有的功率开关假定为理想器件；(3) 开关接通和断开状态之间的延迟时间足够小，可忽略不计；(4) 因开关频率比系统的动态频率高的多，控制信号和 I/O 电压均取常数值。

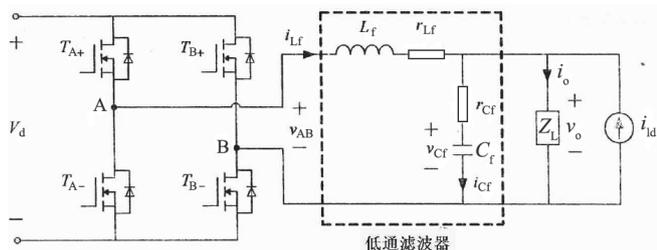


图 3 PWM 逆变器的结构

注意，虽然上述假定能同时证实所设计逆变器控制系统的合理性，但实际应用时，在假定(1)~(4)中相应元件的真实效果仍存在。

由于在单极 PWM 开关切换中正半周和负半周的对称特性，正半周时的动态方程，能用状态-空间平均法及线性技术表示为：

$$i_{Lf} = (D_1 V_d - v_{cf}) / L_f \quad (8)$$

$$\dot{v}_{cf} = (i_{Lf} + i_{Ld} - i_o) / C_f \quad (9)$$

$$v_o = v_{cf} \quad (10)$$

式中： D_1 为开关周期中开关 T_{A+} 和 T_{B-} 的占空比；占空比和功率增益可定义为： $D_1 = v_{con} / \hat{v}_{tri}$ 和 $k_{PWM} = V_d / \hat{v}_{tri}$ ；式中 v_{con} 为正弦控制信号，而 \hat{v}_{tri} 为三角形载波信号 (v_{tri}) 的幅值。

PWM 逆变器的动态方程则表示如下：

$$\ddot{v}_o = -\frac{1}{L_f C_f} v_o + \frac{K_{PWM}}{L_f C_f} v_{con} - \frac{1}{C_f} i_o + \frac{1}{C_f} i_{Ld} \quad (11)$$

通过式(11)的拉普拉斯变换，PWM 逆变器的等值动态模型如图 4 所示。图中的 S 是 Laplace 算符。

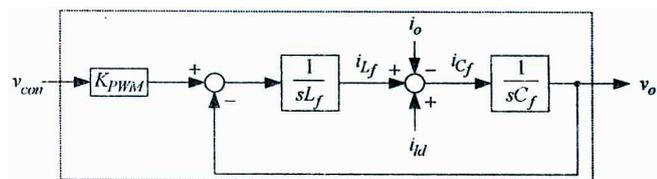


图 4 PWM 逆变器的等值动态模型

藉选择交流输出电压 (v_o) 作为系统状态，控制信号 (v_{con}) 为控制输入，式(11)可改写为：

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= a_p x(t) + b_p u(t) + c_p z(t) + m(t) \\ &= (a_{pn} + \Delta a_{pn}) x(t) + (b_{pn} + \Delta b_{pn}) u(t) + (c_{pn} + \Delta c_{pn}) z(t) + m(t) \\ &= a_{pn} x(t) + b_{pn} u(t) + c_{pn} z(t) + w(t) \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $x(t) = v_o$ ， $u(t) = v_{con}$ ， $a_p = -1 / (L_f C_f)$ ， $b_p = K_{PWM} / (L_f C_f)$ ， $c_p = -1 / C_f$ ， $z(t) = i_o$ 和 $m(t) = i_{Ld} / C_f$ ； a_{pn} ， b_{pn} ， c_{pn} 分别表示 a_p ， b_p ， c_p 的额定值； Δa_{pn} ， Δb_{pn} ， Δc_{pn} 表示系统参数的变化； $w(t)$ 称为集总不确定性，并定义为

$$w(t) = \Delta a_{pn} x(t) + \Delta b_{pn} u(t) + \Delta c_{pn} z(t) + m(t) \quad (13)$$

这里，集总不确定性的界限假定为： $|w(t)| \leq \rho$ (14)

式中： $|w(t)|$ 为绝对值，而 ρ 是给定的正常数。

4.2 ATSMC 系统

PWM 逆变器控制的目标是：在可能产生系统不确定性时，强迫系统状态 ($x_0 = v_0$) 跟踪参考值输出电压 ($x_d = v_{cmd}$)。图 5 所示 ATSMC 系统，被引入 PWM 逆变器的电压控制。这里的控制误差选定为 $e = x - x_d = v_o - v_{cmd}$ ，滑动表面(可调面)定义为：

$$S_1(t) = C(e) - C(e_0) - \int_0^t \frac{\partial C}{\partial e^T} A e d\tau \quad (15)$$

式中： $e = [e \quad e]^\top$ ； $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}$ ，式中的 k_1 和 k_2

为非零的正整数。函数 C 的设计应满足 $\frac{\partial C}{\partial e^T} = [0 \quad b_{pn}^{-1}]$ 的条件， e_0 为 $e(t)$ 的初始状态。ATSMC 系统分为 3 个主要部分：第一部分是性能设计的选址，目的是按指定的模型介定所需的性能，而这涉及到作为原始资料的模型设计 (u_b)；第二部分是，抑制控制器设计 (u_c)，旨在全部消除因参数变化和外部干扰导致的不可预测的干扰效应，以便确保原始资料的模型设计性能；最后，第三部分是自适应的观察设计 ($\hat{\rho}$)，以消除集总不确定性的上限，和在抑制控制器时，因保守的恒定控制增益选择不当而引起的振颤现象得以衰减。

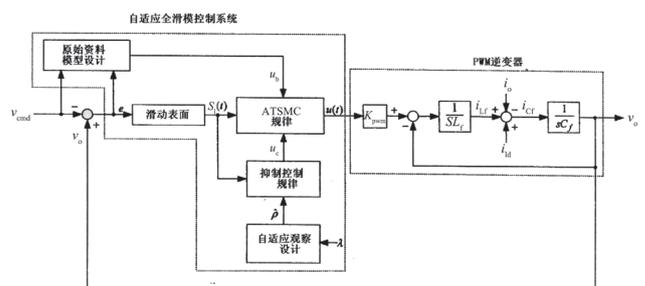


图 5 PWM 逆变器的 ATSMC 系统

ATSMC 系统的整个控制方法概括于下面的理论中。

如果式(12)表达的 PWM 逆变器系统，是带自适应观察设计[式(19)]的、由式(16)~(18)描述的 3 部分

ATSMC 系统所组成，能确保用于 PWM 逆变器电压控制的 ATSMC 系统的稳定性。

$$u = u_b + u_c \quad (16)$$

$$u_b = -b_{pn}^{-1}(a_{pn}x + c_{pn}z - \ddot{x}_d + k_1\dot{e} + k_2e) \quad (17)$$

$$u_c = -\hat{\rho}(t)b_{pn}^{-1} \operatorname{sgn}[s_1(t)] \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\rho}}(t) = \frac{1}{\lambda} b_{pn}^{-1} [s_1(t)] \quad (19)$$

式中 λ 为正常数

5 有效的太阳跟踪系统

因为太阳的运动是缓慢而单调的，倾角变化范围在 $\pm 10^\circ$ 以内。为了简化机械结构，勿需去调节 PV 板的倾角，利用单轴方向的控制，PV 板能即时达到集中最大光照的目的。文献 [2] 中的 PV 发电自动跟踪系统，利用装在太阳能电池方阵上的传感器，光线方向一旦发生细微改变，则传感器失衡，系统输出信号产生偏差，当偏差达到一定幅度时，传感器输出相应的信号，执行机构开始进行纠偏，使光电传感器重新达到平衡——即由传感器输出信号控制的太阳能电池方阵平面与光线成 90° 角时停止转动，完成一次调整周期。如此不断调整，时刻沿着太阳的运行轨迹追随太阳，构成一个闭环反馈系统，实现自动跟踪。本文推出的太阳跟踪系统，则是以 PV 模块的开路电压信息实现对太阳的跟踪。借助 1 个同步电动控制作有效太阳跟踪器。该有效太阳跟踪器的相应控制流程图（程序图）示于图 6。图 6 中， $V_{oc}[n]$ 和 $V_{oc}[n-1]$ ，代表现在和原先的开路电压； ΔV_{oc} 为开路电压的变化。因为太阳仅由东向西运动，PV 板在时间 t_r ，从控制过程开始顺时针旋转 1 个单位角度，以干扰相应的开路电压。这样一来，通过观测开路电压的变化趋势，可调节旋转方向，以捕获更多的光辐射量，因 PV 模块的开路电压正比于相应的光辐射量（辐照度）。如果 $\Delta V_{oc} < 0$ 时，PV 板在时间 t_r 内反时针旋转 1 个单位角度，也即，它又返回到原来的位置。此后，控制过程将等待一段时间 t_w ，以进一步确定 ΔV_{oc} 是否减小、消失。如果在 $\Delta V_{oc} = 0$ 情况下，控制过程还要等 1 段时间 t_w ，再接着下一轮的顺时针旋转。注意，等待时间的作用是有利于减少向前、向后运动中的功率消耗。按照上述的作用原理，可实现有效太阳跟踪系统的控制目的。

6 实验结果

通过以下实验结果，验证了高效性能独立光伏（PV）发电系统中的高效率升压变换器、PWM 逆变器控制及有效太阳跟踪器的有效性和可靠性。

6.1 高效率升压变换器的实验结果

为了证实高效升压变换器的有效性，由 6 个 75W 的 PV 模块组成的输入阵列，并联连接作为低压电源。PV 模块是由 MOTECH 公司制造的（F-MSN-75w-R-02），单个 PV 模块在标准情况下（ $1\text{kw}/\text{m}^2, 25^\circ\text{C}$ ）的技术条件是：额定功率 = 76.78w，额定电压 = 17.228V，额定电流 = 4.4567A，开路电压 = 21.61V，短路电流 = 4.9649A 及 PV 效率 = 11.92%。

试验中，所设计的高效升压变换器，开始由 PV 模块可变的直流输入到提供恒定的直流输出， $V_d = 200\text{V}$ 。假定开关电压的最大值箝位在 34V，按照式（7），匝数比 $n = [V_d/V_{DS(\max)}] - 2 \cong 4$ 。在实际应用中，如最小输入电压假定为 10V，则由式（6），相关的占空比 $D \cong 0.7$ 是合理的。为了解决 PV 模块的输出电压随负荷而变化的问题，利用这一带电压反馈控制的变换器，以确保系统的稳定性。而为了实现这一反馈控制目的，采用了 PWM 控制 IC（集成电路），介绍具有以下技术参数的样机，并说明第 3 节给出的设计程序。

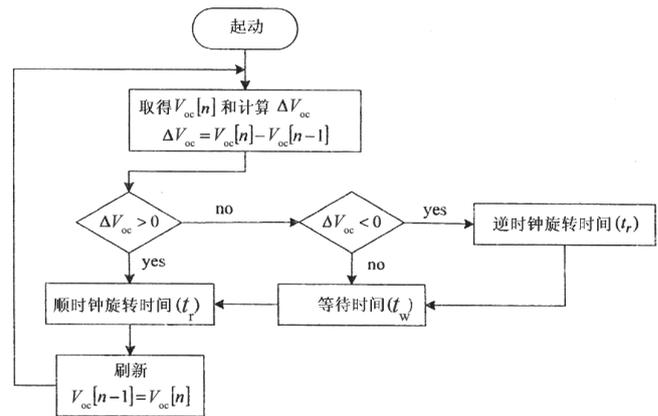
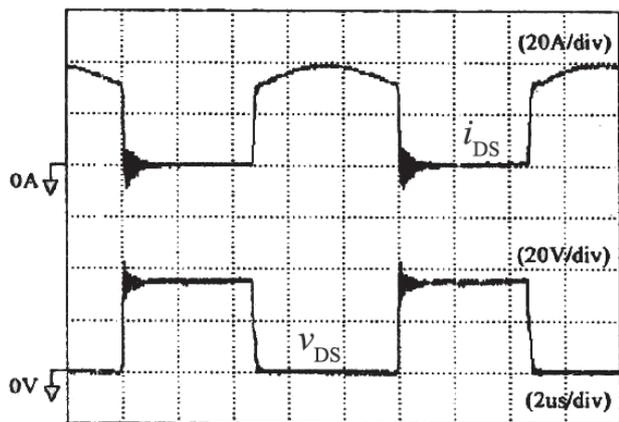


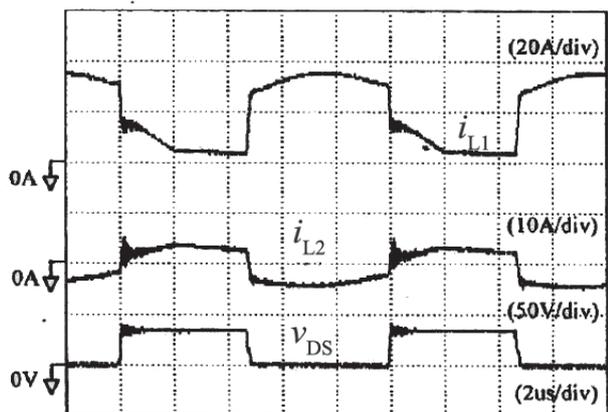
图 6 有效太阳跟踪器的控制流程图

开关频率： $f_{CS} = 100\text{kHz}$ ；耦合电感器： $L_1 = 9\mu\text{H}$ ， $L_2 = 143\mu\text{H}$ ； $N_1:N_2 = 3:12$ ， $k = 0.97$ ，EE-55 铁芯；电容器： $C_{IN} = 3300\mu\text{F}/50\text{V}$ ， $C_1 = 6.8\mu\text{F}/100\text{V}$ ， $C_2 = 1\mu\text{F}/250\text{V}$ ， $C_0 = 680\mu\text{F}/450\text{V}$ ；开关（Q）：IRFP2907（75V/209A）；二极管： D_1 -肖特基二极管 SR2060，TO-220AC（60V/20A）， D_2 、 D_0 为肖特基二极管 SB20200CT，TO-220AC（200V/20A）。320W 输出功率的高效升压变换器，其试验电压和电流的响应特性示于图 7。由图 7（a），开关电压（ v_{DS} ）被箝位在 34V，这比输出电压 $V_d = 200\text{V}$ 小得多。而开关电流（ i_{DS} ）曲线近似于方波。因此能进一步减小开关（Q）的传导损耗。观察图 7（b）和（c），原边电流（ i_{L1} ）停留在 30A 左右，这样，对 $L_1 = 9\mu\text{H}$ 仅需要 1 个较小的铁芯容量。按照图 7（d）~（j），所有二极管（ D_0 、 D_1 和 D_2 ）的逆向回复电流均能有效地衰减；而箝位电容器（ C_1 ）和高压电容器（ C_2 ）的电压，均接近恒定值。因而，这能衰减逆向回复问题和展现箝位电压的效果，

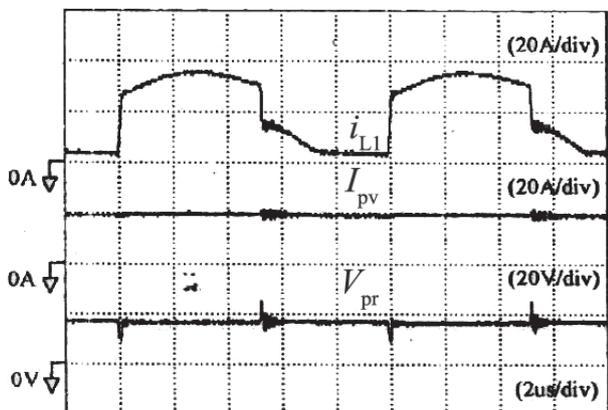
以进一步提高转换效率。图 8 所示，概括了不同输出功率下，高效升压变换器的转换效率试验值。从该图中能看到，小功率时的转换效率在 95% 以上，最大效率超过 96.5%，这比常规变换器的效率更高。



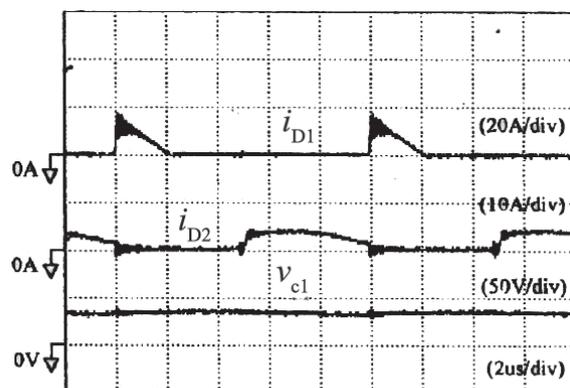
(a)



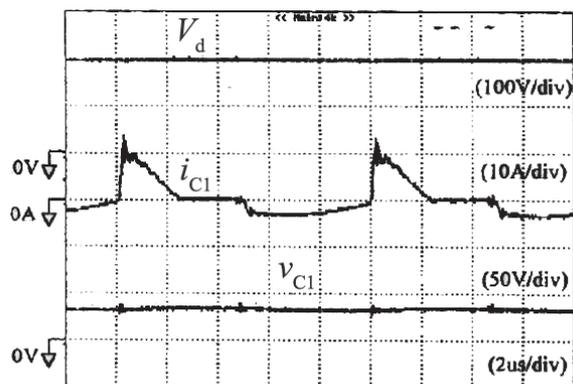
(b)



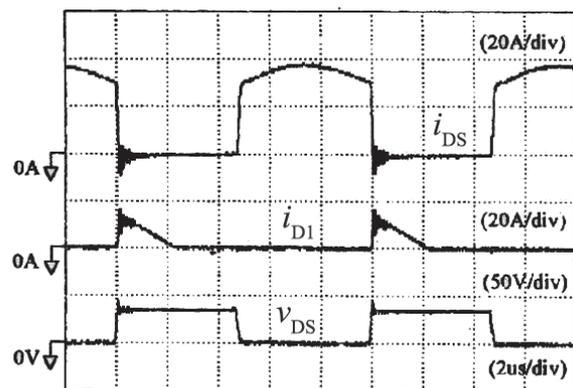
(c)



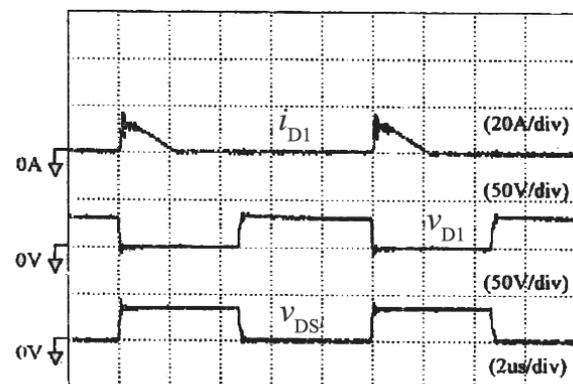
(d)



(e)



(f)



(g)

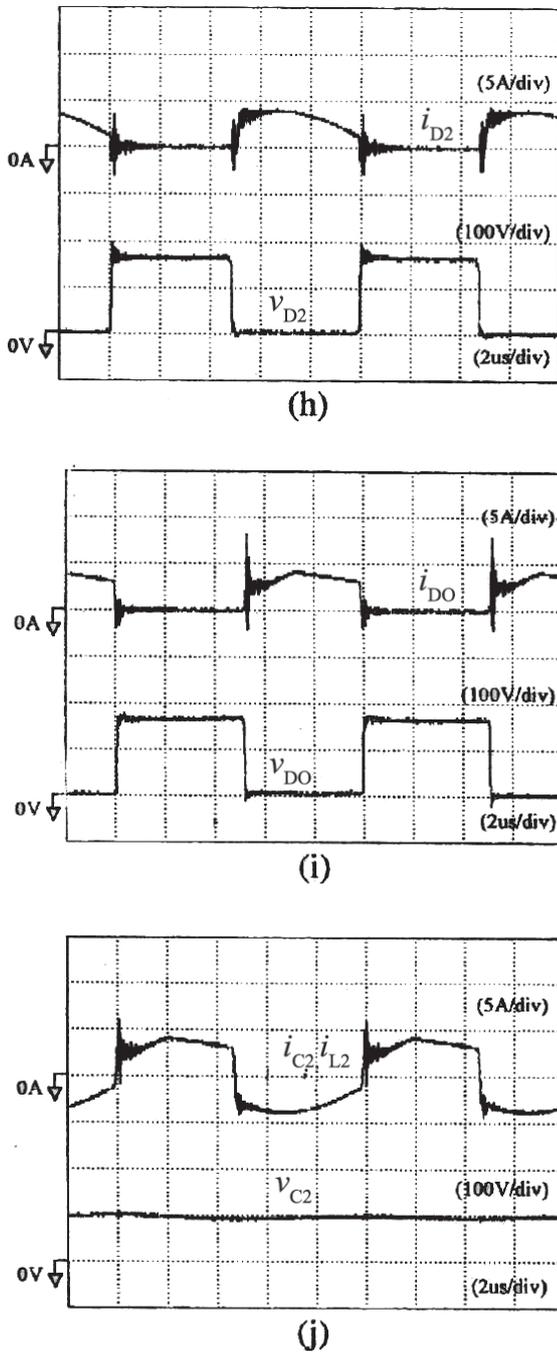


图7 高效升压变换器 ($P_d=320w$, $V_o=200V$) 的试验电压和试验电流的响应特性

6.2 PWM 逆变器控制的试验结果

PWM 逆变器设计的电路元件由: (T_{A+} , T_{A-} , T_{B+} , T_{B-}) IRFP460 (500V/20A); $L_f=7.5mH$ 和 $C_f=26.8\mu F/250V$; 参考输出电压 ($x_d=V_{cmd}$) 整定为交流 $110V_{rms}$, 60Hz; 开关频率为 $f_{is}=20kHz$; PWM 逆变器设计中 ATSMC 系数的参数是:

$$k_1=2.49, k_2=830, \lambda=1.66. \quad (20)$$

ATSMC 系统全部参数的选取是考虑到稳定性要求, 以实

现最佳的瞬态控制性能。为了安全计, 因在 ATSMC 系统中仅控制电压, 故应将无源的或有源的电流限制, 引入 PWM 控制设计中。本文, 无源的电流限制元件 (也即, 带适当电流容量的保险丝), 装在 PWM 逆变器的输出端。为显示抑制控制器的必要性, 图 9 给出带固定电阻负载 ($R=100\Omega$) 的高性能独立光伏系统的实验结果。图 9 (a) 为 PWM 逆变器有 BMC (原始数据模式控制) 的结果; 图 9 (b) 为 PWM 逆变器有 ATSMC 系统的结果。

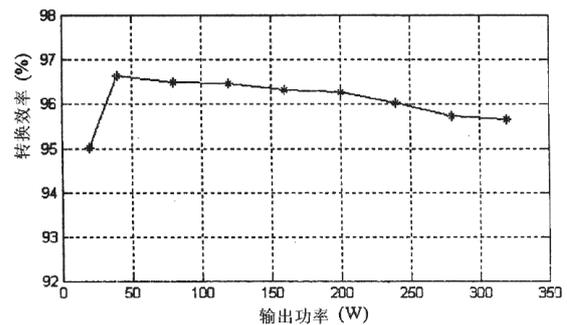
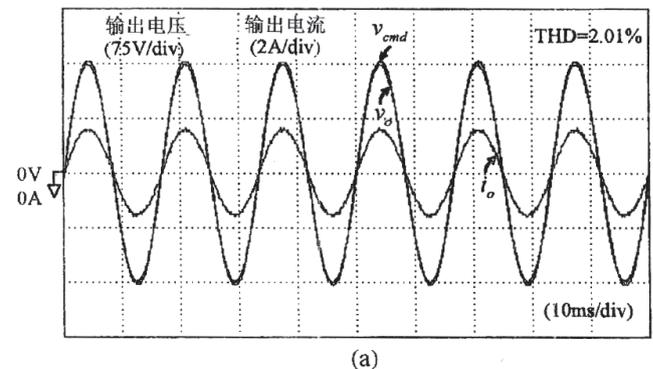


图8 不同输出功率下, 高效升压变换器 ($V_o=200V$) 的转换效率

很明显, THD 较小的 ATSMC 控制性能比 BMC 的控制性能更优。

在阶跃式负载变化情况下, 为检验负载变化的效果, 给出了 PWM 逆变器带 ATSMC 系统的高性能独立 PV 发电系统的试验结果。图 10 (a), 电阻负载由轻载 ($R=300\Omega$) 向重载 ($R=100\Omega$) 变化; 相反, 图 10 (b) 表示由重载 ($R=100\Omega$) 向轻载 ($R=300\Omega$) 变化。从图中可以看见, PWM 逆变器 ATSMC 系统的控制性能对突变的负载不是很敏感。为了进一步验证 PWM 逆变器 ATSMC 系统的有效性, 图 11 给出在不同负载性质的情况下的试验结果, 包括 RC 负载, RL 负载和带有 RC 负载的整流器。通过对图 11 的观察, 输出电压 (V_o) 几乎是紧随着参考的输出电压 (V_{cmd}), 且在不同负载下 PWM 逆变器的 THD 均小于 5%, 完全满足工业应用中谐波标准的要求。



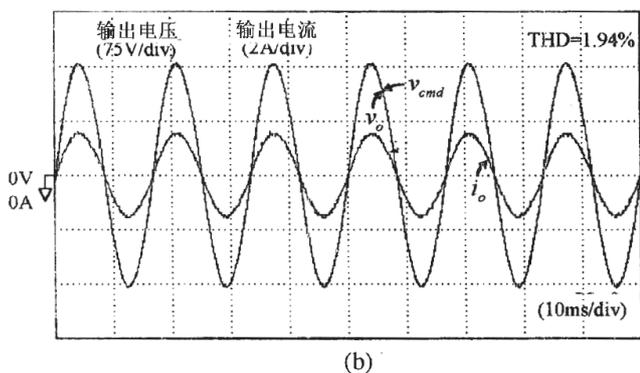


图 9 高性能独立 PV 发电系统的试验结果
(a) 对 PWM 逆变器的 BMC (b) 对 PWM 逆变器的 ATSMC (固定负载电阻 $R=100$)

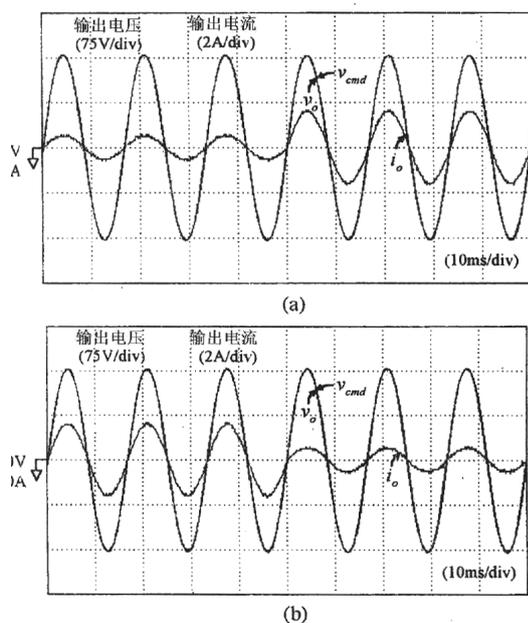


图 10 在阶跃式变化负载下,带 PWM 逆变器 ATSMC 的高性能独立 PV 发电系统的试验结果:(a)轻载 ($R=300\Omega$)到重载 ($R=100\Omega$) (b)重载 ($R=100\Omega$)到轻载 ($R=300\Omega$)

6.3 有效太阳跟踪器的试验结果

为通过实际的试验来验证太阳跟踪系统的有效性,由 TUSHING 公司制造的同步电动机控制的单一 PV 模块,形成有效的太阳跟踪器。相应的旋转角为 $3^\circ/s$ 。大气环境是:太阳的辐照度 $67\text{mw}/\text{cm}^2$,模块温度 30°C (2005 年 10 月 5 日,台湾当地时间下午 3:00 记录的数据)。利用 DSP 以 1ms 的采样间隔,执行图 6 所示的控制流程,有效太阳跟踪系统的参数如下:

$$T_f=2\text{s}, t_w=30\text{s} \quad (21)$$

这里,检验了两种光辐照度情况:一种为正常情况;另一种为在 PV 板上突然放一块塑料板的遮光情况。图 12 为带

有效太阳跟踪器的高性能独立 PV 发电系统,在上述两种情况下的试验结果。图 12 (a),当有效太阳跟踪器开始转动 PV 板时,开路电压由 $V_{oc}=18.5\text{V}$ 增加到 $V_{oc}=20\text{V}$,结果是输出功率增加。图 12 (b),因出现了 34s 的遮光,开路电压突然下降,结果是 PV 板又返回原来的位置,等候一段时间。当开始试验至 62s 时,遮光消除, PV 在等待时间以后再次旋转,以跟踪太阳光照方向,使开路电压升高至稳定状态。根据图 12 的试验结果,可完美的实现有效太阳跟踪器的预期目的。而且,这一简单的有效太阳跟踪机构能利用作为控制器,以便进一步对大规模 PV 发电系统的 PV 阵列提供可调节的指令。

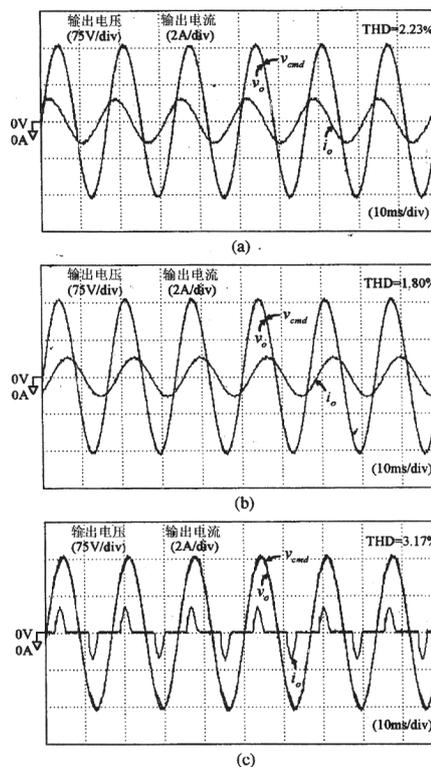


图 11 在不同负载下,带 PWM 逆变器 ATSMC 的高性能独立 PV 发电系统的试验结果:(a)RC 负载 ($R=300\Omega, C=30\mu\text{F}$); (b)RL 负载 ($R=300\Omega, L=245\text{mH}$); (c)RC 负载的整流器 ($R=500\Omega, C=47\mu\text{F}$) (固定负载电阻 $R=100$)

7 结论

本文阐述了一种高性能的独立光伏 (PV) 发电系统。该发电系统的高效升压变换器, PWM 逆变器控制和有效太阳跟踪器的效果,已通过实际的试验验证。按照试验结果,高效升压变换器的最大转换效率超过 96.5% ,比常规变换器的效率高;而且, PWM 逆变器的输出电压几乎保持着正弦波形,在不同负载下相应的 THD 值小于 3.2% ,满足工业应用中谐波标准的要求。此外,基于 PV 模块开路电压的有效太阳跟踪器的操作,改善了固定安装式 PV 模块的发电效率;节约了带光传

(下转第 60 页)