

# 具有 TM PPT 功能的数字式光伏水泵系统的设计

郑诗程, 苏建徽, 沈玉梁, 余世杰

(合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 合肥 230009)

**摘 要:** 设计了一种基于 16 位微处理器结构的简单全数字式光伏水泵系统。系统采用频率微分逼近法实现了太阳电池的真正最大功率跟踪(TM PPT)功能, 运行结果证明系统运行稳定可靠, 效率高于传统恒压跟踪(CV T)方式; 系统具有完善的保护功能, 可以实现无人值守工作。

**关键词:** 光伏水泵系统; 真正最大功率跟踪(TM PPT); 恒压跟踪(CV T); 频率微分

**中图分类号:** TK51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)05-0270-05

## 0 引言

目前, 在中国西北、西藏和内蒙古等远离电网的偏远农村地区, 生活用水和农业用水比较困难, 而这些地区同时又是太阳能资源非常丰富的地区, 因此, 在这些地区利用丰富的太阳能资源, 发展光伏水泵技术以解决生活用水和农业用水问题, 是提高西部贫困地区人民的生活水平, 加速西部农业开发, 实现沙漠绿洲化的有效途径。光伏水泵技术的核心是专用变频器的控制, 然而, 目前市场上所售的多为普通变频器, 不能直接和太阳电池阵列相匹配, 更不具备太阳电池的最大功率点跟踪以及光伏水泵系统特有的各种保护功能。

由于太阳电池价格较高, 在整个系统成本中所占份额较大, 因此, 在太阳电池容量一定的情况下, 尽可能提高光伏阵列的效率对提高整个系统的性能价格比具有重要的经济意义。为了提高光伏阵列的效率, 在太阳电池效率没有根本性突破的条件下, 一个有效的方法就是采用太阳电池的最大功率跟踪技术。其中, CV T 方式即恒压跟踪控制方式(Constant Voltage Tracking)是最常采用的方式<sup>[1-4]</sup>, 它是根据光伏阵列在不同日照强度下最大功率点电压基本不变的原理, 采用 PI 调节使光伏阵列的工作电压稳定在最大功率点电压处, 近似实现太阳电池的最大功率跟踪。然而, 即使在同一天, 日照强度和太阳电池温度也是时刻变化的, 因而光伏阵列的最大功率点电压并不非恒定不变, 因此, 采用 CV T 方式的光伏阵列并不是时刻工作在最大功率点处, 造成了太阳电池容量的浪费。基于此, 本文采用了 16 位微处理器 80C196MC<sup>[5]</sup> 构成了一种简单的数字式光伏变频调速系统; 同时, 根据太阳电池的功率- 伏特 ( $P - V$ ) 特性曲线以及负载的工作特性, 采用频率微分逼近法实现了太阳电池真正的最大功率跟踪(TM PPT)功能, 提高了系统的性价比; 因此在负载一定时, 可以减少太阳电池的数量, 从而降低整个系统的成本。

## 1 系统组成及工作原理

### 1.1 光伏水泵系统结构图

由图 1 可知, 系统利用太阳电池阵列将太阳能直接

转变成电能, 通过具有 TM PPT 功能的光伏水泵系统专用逆变器输出三相交流电压驱动交流异步电机和水泵负载, 其中主要包括三部分: 太阳电池阵列、具有 TM PPT 功能的逆变器和机泵负载。

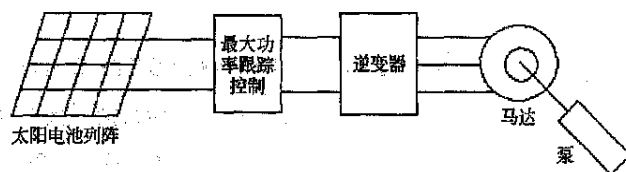


图 1 系统结构图

Fig 1 Block diagram of the system composition

### 1.2 逆变器主电路及硬件构成

本系统所采用的主电路及硬件控制框图如图 2 所示, 主电路采用三相桥式逆变电路, 主功率器件采用智能功率模块 IPM 75RSA060, 由 16 位微处理器 80C196MC 构成系统控制核心, 外围控制电路包括阵列母线电压检测和母线短路电流检测、两相交流电流检测及键盘监控与显示电路等, 系统首先通过键盘显示部分设置工作方式和 PI 参数, 然后由 TM PPT 子程序实时

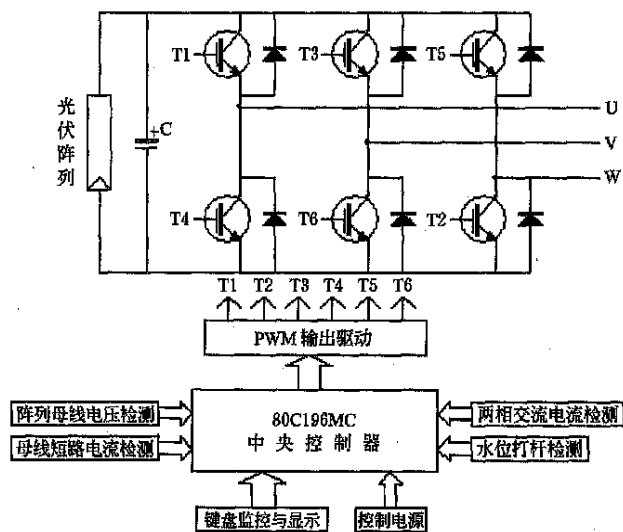


图 2 主电路及硬件结构

Fig 2 Block diagram of main circuit and hardware

收稿日期: 2003-10-09 修订日期: 2004-04-20

作者简介: 郑诗程(1972-), 男, 安徽合肥人, 博士生, 从事光伏系统技术研究。合肥 合肥工业大学能源研究所, 230009

搜索出的电压值作为内环 CVT 的给定值, 通过 PI 调节得到工作频率值, 最后从 E2ROM 28C64 中取出预先存入的正弦值, 计算出 PWM 信号的占空比, 实现光伏阵列的真正最大功率跟踪(TM PPT)并保持异步电机的  $v/f$  比为恒值。系统将 MPPT 和逆变器相结合, 结构简单, 控制方便。

### 1.3 逆变器 SPWM 控制策略

普通的 SPWM 方式其直流电压最大利用率仅为 0.866, 因而在输出电压一定的情况下, 就需要更多组太阳电池串联, 增加了系统成本, 本系统采用了三次谐波注入方式即 THIPWM, 在普通 SPWM 基础上叠加三次谐波分量以提高直流电压利用率。由于系统无中线, 三次谐波电流互相抵消, 故叠加后不会增加系统的谐波含量, 系统相电压波形为马鞍型, 线电流波形为正弦型。叠加后波形最大值(取正半周)为 60 和 120 两点处的值, 即

$$\sin 60^\circ \cong \sin 120^\circ \cong 0.866$$

设波形叠加前的调制深度  $M = 1$ , 则由

$$M_1 \cdot \sin 60^\circ \cong 1$$

可得  $M_1 = 1/0.866 = 1.15$

即采用 3 次谐波注入方式后, 系统的调制深度提高了约 15%, 增加了直流电压的利用率, 在输出电压上限值一定的情况下, 就可以减少太阳电池串联数; 系统光伏阵列在一定的情况下, 能够使  $v/f$  比值在更宽的直流母线电压范围内保持为恒值。

设直流侧电压值为  $U_d$ , 当调制深度为  $M$  时, 则逆变器输出电压的基波有效值为

$$v = \frac{M \cdot U_d}{\sqrt{2}} \tag{1}$$

又设  $v/f = c$ , 则由式(1)可得

$$\frac{M \cdot U_d}{\sqrt{2}} = c \cdot f \tag{2}$$

即

$$M = \sqrt{2} \frac{c \cdot f}{U_d} \tag{3}$$

式中  $c$ ——常数;  $f$ ——电机的工作频率。

在光伏水泵系统控制中, 为了保持交流异步电机气隙磁通  $\Phi_m$  不变, 充分利用电机铁芯, 最大限度发挥电机产生转矩的能力<sup>[6,7]</sup>, 应在改变定子工作频率的同时, 相

应改变定子电压, 即保持  $v/f$  值恒定。由于系统工作时的直流侧电压值  $U_d$  会随太阳电池最大功率点电压的搜索时刻变化, 并非始终为恒值, 因此由式(3)计算出的值并不能保证  $v/f = c$ , 应进行实时补偿。系统通过实时检测直流侧电压值  $U_d$  进行在线补偿, 则由补偿算法可得补偿后的调制深度为

$$M = \sqrt{2} \frac{c \cdot f}{U_d} U_{ref} \tag{4}$$

式中  $U_{ref}$ ——参考电压值。

## 2 太阳电池阵列的 MPPT 原理及实现

### 2.1 CVT 方式的 MPPT 原理及实现

由太阳电池的 P-V 特性曲线(图 3)可知<sup>[8]</sup>, 在一定的温度和不同日照下, 太阳电池的最大功率点所对应的电压值变化不是很大, 可以采用简单的恒压跟踪控制方式(Constant Voltage Tracking)即 CVT 方式近似获得太阳电池的最大功率输出, 其跟踪控制框图见图 4。

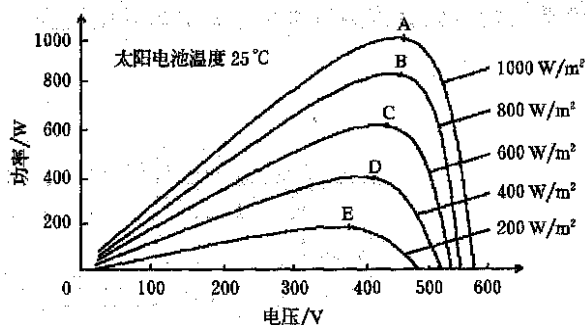


图 3 太阳电池的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of solar cell

图 4 中  $U_{SP}^*$  为太阳电池阵列工作的指令电压,  $U_{SP}$  为太阳电池阵列工作的实际反馈电压。在 CVT 方式的 MPPT 控制中,  $U_{SP}^*$  给定值可以根据太阳电池阵列的特性和日照条件现场确定, PI 调节器根据给定和反馈之间的误差计算出相应的电机工作频率 ( $f$ ), 再由式(4)求出调制深度 ( $M$ ), 调节逆变器的输出电压, 维持  $v/f = c$ , 系统通过对  $U_{SP}$  电压的负反馈闭环控制, 使得太阳电池稳定工作在给定电压处, 这样即可近似获得太阳电池的最大功率输出。

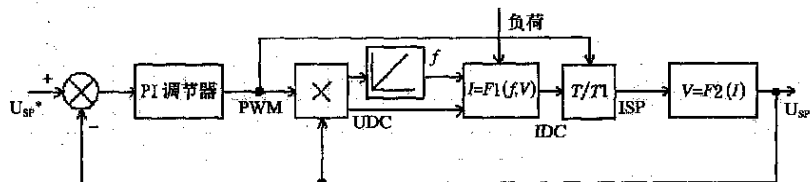


图 4 CVT 型最大功率点跟踪控制框图

Fig. 4 CVT type maximum power point tracking control diagram

### 2.2 TM PPT 原理

虽然在日照强度和温度变化范围不大的情况下, 采用 CVT 方式可以近似获得太阳电池的最大功率输出。然而, 实际上日照强度和温度是时刻变化的, 尤其是在

是西部地区, 不同季节甚至是一天中的不同时段, 温度变化都相当大, 日照强度变化有时也比较剧烈, 这些都会引起太阳电池阵列最大功率点电压的偏移, 其中尤以温度的变化影响最大。理论分析和实地运行数据均表

明: 当环境温度从- 20 变化到+ 40 时, 其最大功率点处电压的偏移可达  $V_{oc}$  (太阳电池开路电压) 值的 30%, 甚至更多。在这种情况下采用 CVT 电压闭环控制方式以实现太阳电池阵列的 MPPT 跟踪, 无论如何折衷选择太阳电池阵列给定工作电压  $U_{SP}^*$  值, 太阳电池阵列输出功率的损失仍将会超过 20% [9]。为克服这一弊端, 通常只能在特定时间现场调整  $U_{SP}^*$  值, 这很不方便。而 TM PPT (True Maximum Power Point Tracking) 与 CVT 型的 MPPT 概念不同 [10], 其意思是“真正的最大功率跟踪”控制, 即保证系统不论在何种日照及温度条件下, 始终使太阳电池工作在最大功率点处。由于逆变器采用恒  $v/f$  控制, 故水泵电机的转速与其输入电压成正比, 而采用的离心式水泵其输出功率和转速三次方成正比, 因此, 调节逆变器的输出电压, 就等于调节了负载电机的输出功率。

本系统中水泵电机的调速采用 SPWM 方式, 直流母线输入电压为太阳电池阵列电压。太阳电池阵列的输出负荷匹配可以直接通过水泵电机的转速变化来调整,

亦即可以凭借 SPWM 控制技术直接调整太阳电池阵列的输出负荷, 并使太阳电池阵列的输出功率始终跟踪当前日照和环境温度变化而时刻达到其最大输出值, 此时, 太阳电池阵列的工作电压始终处在最大功率点处。

由太阳电池阵列的  $P-V$  特性曲线(图 3)可知, 在最大功率点处,  $dP/dV = 0$ , 在最大功率点的左侧, 当  $dP/dV > 0$  时,  $P$  呈增加趋势,  $dP/dV < 0$  时,  $P$  呈减少趋势; 但在最大功率点的右侧, 当  $dP/dV > 0$  时,  $P$  呈减少趋势,  $dP/dV < 0$  时,  $P$  呈增加趋势。据此可在实际运行时根据  $P-V$  的变化关系确定最大功率点。图 5 为基于  $dP/dV$  反馈的 TM PPT 型最大功率跟踪控制框图, 其工作原理如下: 系统的输入指令值为 0, 反馈值为  $dP/dV$ , 假定  $Z_3$  状态为 + 1, 则  $U_{SP}^*$  指令电压增加, 经 CVT 环节调整, 系统输出电压  $V$  跟踪  $U_{SP}^*$  增加, 采样输出电流  $I$ , 经功率运算和功率微分环节, 获得  $dP/dV$  值, 如  $dP/dV > 0$ , 则  $Z_1$  为 + 1,  $Z_2$  为 + 1,  $Z_3$  为 + 1,  $U_{SP}^*$  指令电压继续增加。如  $dP/dV < 0$ , 则  $Z_1$  为 - 1,  $Z_2$  为 - 1,  $Z_3$  为 - 1,  $U_{SP}^*$  指令电压开始减小。

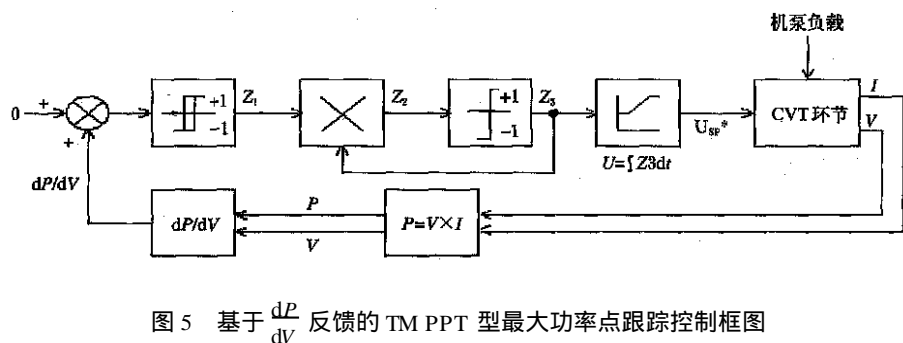


图 5 基于  $\frac{dP}{dV}$  反馈的 TM PPT 型最大功率点跟踪控制框图

Fig 5 Diagram of true maximum power point tracking control based on positive feedback of  $\frac{dP}{dV}$

2 3 TM PPT 的工程实现

从图 3 可以看出, 太阳电池在不同日照度下, 均有一个最大输出功率点(A、B、C、D、E 点), 因此, 只要设法使负载的特性曲线和太阳电池的特性曲线交于此点, 就可以使太阳电池输出最大功率。换言之, 在一定日照度下, 负载要获得最大输入功率, 只有工作于此点处。

在光伏水泵系统中, 机泵的转速与轴功率的关系是

单调非线性的。对于离心式水泵, 机泵轴功率与转速的三次方成正比; 对于容积式水泵, 机泵轴功率大致与转速的一次方成正比。因此, 转速的变化趋势可以反映出轴功率的变化趋势, 通过判断转速的变化趋势同样可以搜索出最大功率点相应的电压。本文正是按照此控制思想, 利用频率微分反馈实现太阳电池阵列的真正最大功率点跟踪即 TM PPT, 图 6 为其控制框图。

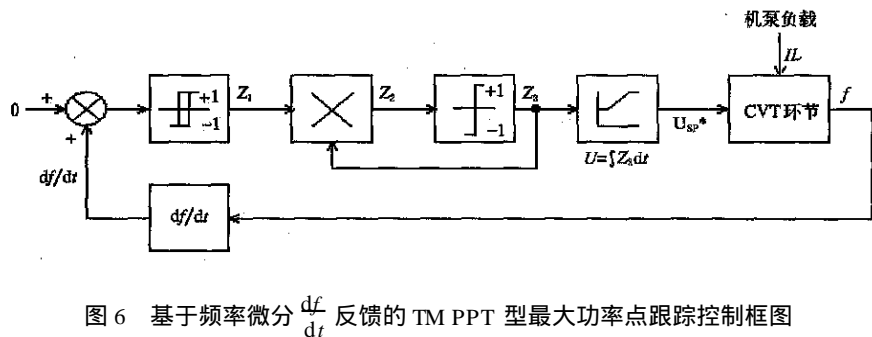


图 6 基于频率微分  $\frac{df}{dt}$  反馈的 TM PPT 型最大功率点跟踪控制框图

Fig 6 Diagram of true maximum power point tracking control based on positive feedback of  $\frac{df}{dt}$  (frequency differential)



按照此思想设计的光伏水泵系统在硬件上可节省一个霍尔传感器和一个电流检测通道。省却了功率  $P$  的检测和运算, 控制搜索实现方便。最大功率搜索部分实时搜索出在当前日照和温度下最大功率点处的电压值  $U_{SP}^*$  以作为 CVT 环节的给定电压, CVT 环节构成系统电压内环, 通过 PI 调节使太阳电池的工作电压始终跟踪给定电压  $U_{SP}^*$ , 系统反馈量取  $df/dt$ , 其工作原理如下:

在固定时间  $\Delta t$  内, 读取当前频率  $f_1$ , 并减去上次值  $f_0$ , 如果差值大于给定上限值, 则滞环比较器输出  $Z1 = +1$ , 此时,  $Z3 = +1$ , 系统继续按原方向搜索, 并置  $f_1 = f_0$ ; 如果差值小于给定下限值, 则  $Z1 = -1$ , 此时,  $Z3 = -1$ , 系统按反方向搜索, 并置  $f_1 = f_0$ ; 如果差值在上下限值之间, 则系统仍按原方向搜索, 但舍去  $f_1$  值。

图 7 为 TM PPT 的最大功率点跟踪控制过程, 在最大功率点搜索开始时, 其搜索起始点应在接近阵列开路电压处, 首先不断减小  $U_{SP}^*$  以确定  $df/dt$  的极性,  $U_{SP}^*$  一直变化搜索到  $V_{PMAX}$  附近, 当  $U_{SP}^*$  减小至处于  $V_{PMAX}$  左侧时,  $df/dt$  极性发生变化,  $U_{SP}^*$  开始反方向搜索。

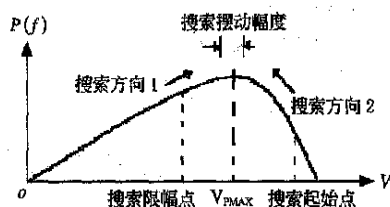


图 7 TM PPT 最大功率点跟踪控制过程

Fig 7 Control process of true maximum power point tracking

根据上述 TM PPT 的控制原理和结构分析可知, 该控制系统是一个非线性控制系统, 在稳定工作时, 光伏阵列的工作电压应在最大功率点电压处摆动, 摆动的幅度越小, 系统 TM PPT 的跟踪精度就越高; 然而, 为了保证 TM PPT 控制系统的稳定性, 要在控制策略上有效地识别  $df/dt$ , 摆动的幅度又不能太小, 综合以上分析, 本文采取了逐次累加方式, 通过累加前后几次搜索的频率变化结果, 有效解决了  $df/dt$  识别和搜索步长之间的矛盾。同时, 软件中设置了搜索限幅值, 使系统的工作可靠性进一步提高, 长时间运行实践证明, 即使日照变化如何剧烈, 系统也不会因为误判而崩溃。

### 3 系统的保护功能设计

系统除了具有普通变频器所有的保护功能如短路、过热、过载、欠压等以外, 还具有光伏水泵系统特有的低频、日照低、打干(自动和手动打干)等保护功能。对于泵类负载, 当转速低于下限值时, 光伏阵列所提供的能量并不能实现有效的提水, 长期低速运行, 由于机械磨损会影响水泵的使用寿命, 低频保护具体值 ( $f_{min}$ ) 在实际运行时可根据负载特性在线设置, 系统通过实时比较当前频率  $f$  和  $f_{min}$ , 进行软件处理; 另外, 对水泵来说, 当

液面低于水泵进水口时, 水泵则处于空载状态, 若不立即采取措施, 会很快损坏水泵。而本系统为户外无人值守工作方式, 故系统为了增加检测可靠性, 采用了自动打干和手动打干两种识别方式, 其中, 自动打干是根据系统输出功率和电机工作频率来进行判别; 手动打干则是通过水位传感器识别当前水位高低来实现的。实际运行证明, 系统保护动作可靠。

### 4 试验结果

本文中设计的光伏水泵系统专用变频器, 负载用三相异步电机拖动离心式水泵, 电机额定电压为 220 V, 额定输出功率为 4 kW; 阵列用太阳电池组件开路电压  $V_{oc} = 21$  V, 相应于最大功率点的电压  $V_m = 17$  V, 额定功率  $P_M = 75$  W P, 由 19 个组件串联组成支路后, 再由 3 个支路并联构成阵列, 阵列总容量为 4275 W P。在太阳辐照度为  $900 \text{ W/m}^2$  的条件下, 分别采用 CVT 方式和 TM PPT 方式进行了试验。结果表明, 系统工作稳定可靠, 太阳电池阵列工作电压摆动幅度小; 通过对系统的扬程和流量对比分析可知: 在相同扬程和太阳辐照度条件下, TM PPT 方式可比 CVT 方式多扬水约 8%。图 8 为 TM PPT 方式下, 阵列电压和电流波形。

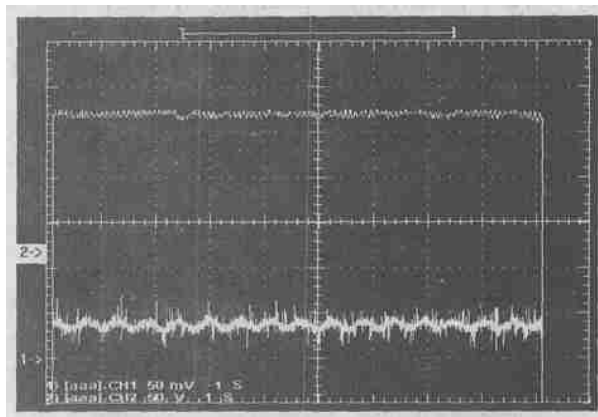


图 8 太阳电池阵列电压和电流波形

Fig 8 Voltage and current wave of solar cell array

### 5 结论

本文设计的具有 TM PPT 功能的数字式光伏水泵系统运行稳定可靠, 效率高于 CVT 方式。

#### [参考文献]

- [1] 余世杰, 战福忠, 沈维祥, 等. 光伏水泵系统的最大功率点跟踪器[J]. 太阳能学报, 1991, 12(3): 225-226
- [2] 沈玉梁, 蔡二南, 姜志东. 带有 M PPT 功能的光伏水泵专用逆变器[J]. 太阳能学报, 1994, 15(3): 222-223
- [3] Efticiaos Koutroulis, Kosta Kalatzakis, Nicholas C Volgariis. Development of a microcontroller based photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001, 10, 46-54
- [4] 余世杰, 何慧若. 光伏水泵系统中 CVT 及 TM PPT 控制比较[J]. 太阳能学报, 1998, 19(4): 394
- [5] 孙涵芳. Intel 16 位单片机[M]. 北京: 机械工业出版社,

- 2000, 1, 152
- [6] 韩安荣 通用变频器及其应用[M] 北京: 机械工业出版社, 2000, 1, 152
- [7] 陈伯时 电力拖动自动控制系统[M] 北京: 机械工业出版社, 1997, 197- 198
- [8] 京特·莱纳等著, 余世杰, 何慧若译 太阳能的光伏利用[M] 合肥: 合肥工业大学出版社, 1991, 8- 10
- [9] 苏建徽 光伏水泵系统及其控制的研究[D] 合肥: 合肥工业大学博士论文, 2003, 38
- [10] Johan H R Enslin, Mario S Wolf, Wernher Swiegers Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter[J] IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1997, 6, 769- 773

## Design of digital photovoltaic pumping system with the function of true maximum power point tracking

Zheng Shicheng, Su Jianhui, Shen Yuliang, Yu Shijie

(Education Ministry Engineering Research Center of Photovoltaic System, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract** A kind of digital photovoltaic pumping system was designed, which is simple in structure, based on 16 bits single-chip microprocessor. The system uses the method of frequency differential approximation to realize the true maximum power point tracking (TM PPT) function of solar cells. The result proves that the system runs very reliably, and the efficiency is higher than that of the traditional constant voltage tracking (CV T) method. In addition, the system has perfect protection functions, and it can run without operators.

**Key words:** photovoltaic pumping system; true maximum power point tracking (TM PPT); constant voltage tracking (CV T); frequency differential