

矩阵变换器励磁控制的无刷双馈风力发电系统

杨俊华¹, 邹 兵¹, 王孝洪², 王海兵¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 应用在双馈风力发电系统中的功率变换器必须具有功率双向流动的能力, 交直交循环变流器和交交矩阵变换器都可满足功率的双向流动要求. 而矩阵变换器能同时提供正弦的输入电流和输出电压, 输入电流可调节为超前、滞后或同相于输入电压, 输出电压可实现幅值、频率和网侧功率因数的独立控制. 利用矩阵变换器, 通过控制无刷双馈电机控制绕组的电压幅值、频率, 为风力发电系统提供励磁. 压频比控制器采用模型参考模糊自适应控制策略, 对电机的转速和功率因数进行控制. 采用DSP、CPLD构建了基于四步换流方案的矩阵变换器实验励磁系统, 仿真和实验结果验证了系统设计的正确性、可行性和稳定性, 为矩阵式变换器的实际应用提供了实验基础.

关键词: 矩阵式变换器; DSP控制; CPLD控制; 无刷双馈风力发电机; 模型参考模糊自适应控制

中图分类号: TM46 文献标识码: A

Application of matrix converter to brushless doubly-fed wind generator system

YANG Jun-hua¹, ZOU Bing¹, WANG Xiao-hong², WANG Hai-bing¹

(1. Automation College, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Power converter used in doubly-fed wind generator system must possess the capability of bi-directional power flow. Both AC/DC/AC converter and AC/AC Matrix converter(MC) possess this capability, but MC can provide sinusoidal input current and output voltage simultaneously, and the phase of input current can be adjusted to lead, to lag or to coincide with the phase of the input voltage. The magnitude and frequency of the output voltage and the input power factor can be independently adjusted in MC. MC is used to control the voltage magnitude and frequency in the control winding of brushless doubly-fed machine(BDFM), in order to supply excitation for wind generator system. The model reference fuzzy adaptive control strategy is used to control the ratio of voltage versus frequency to regulate the machine rotor speed and power factor. Digital signal processor(DSP) and complex programmable logic device(CPLD) are used to construct a MC experiment excitation system based on four-step commutation strategy. The validity, feasibility and stability of the system design are proved by simulation and experimental research. MC is advantageous to practical applications in the future.

Key words: matrix converter; digital signal processor(DSP) control; complex programmable logic device(CPLD) control; brushless doubly-fed machine(BDFM); model reference fuzzy adaptive control

1 引言(Introduction)

无刷双馈风力发电机具有较为特殊的结构形式, 定子铁心槽中嵌放有功率绕组和控制绕组, 转子可采用类鼠笼型或磁阻式结构, 通过控制控制绕组中电流的幅值、相位、相序以及频率, 可实现亚同步及超同步速运行, 实现变速恒频发电及最大风能捕获. 与控制绕组相连的频率变换器必须具有功率双向流通的能力, 采用矩阵变换器励磁的无刷双馈风力发电系统是一类较理想的变速恒频方案. 矩阵变换器具有简单的拓扑结构和一系列理想的电气特性, 是

电力电子领域研究的热点^[1].

矩阵变换器主要有两项关键技术: 一是换流技术, 在矩阵变换器输入不能短路, 输出不能开路的限制下, 换流技术成为矩阵变换器的瓶颈, 4步换流技术的提出较好地解决了换流问题, 两步换流技术也是目前研究的热点; 二是调制策略, 调制策略是矩阵变换器的核心问题, 其性能直接影响矩阵变换器的工作状况, 引入输出电压的闭环控制和先进的智能控制有助于提高整个系统的稳定性^[2~4].

系统的整体框架如图1所示.

2 系统硬件设计(Hardware design of system)

2.1 DSP 2407设计(Design of DSP 2407)

DSP具有程序和数据分开的哈佛结构, 流水线操作功能, 单周期完成乘法的硬件, 有两个事件管理器模块: 两个16位通用定时器, 12个16位PWM通道, 3个对外部信号实现捕获的单元, 片内光电编码盘接口电路, 在电力电子控制和电机控制中占有重要的地位.

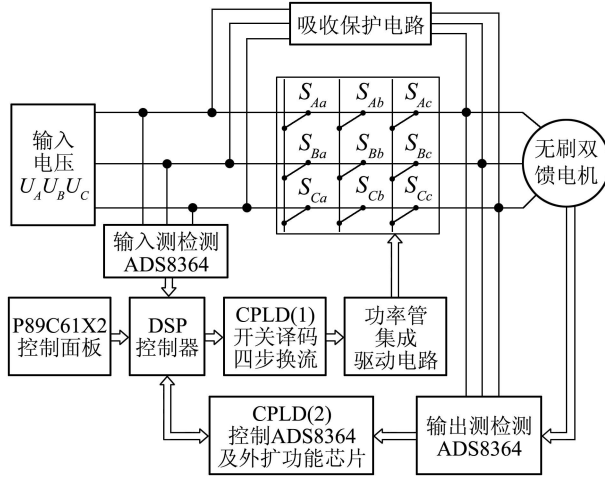


图1 系统的整体框架

Fig. 1 General design of system

2.2 CPLD设计(Design of CPLD)

四步换流策略是解决矩阵变换器换流问题的有效措施, 本系统采用CPLD来实现换流控制, 需检测

矩阵变换器输出电流的方向. CPLD完成译码换流, 减轻DSP运算负担, 提高DSP工作速度. 将脉宽调制模块输出的控制信号送入CPLD经过逻辑处理后再输出至功率开关管的驱动芯片. 驱动芯片本身具有过电压保护功能, 可以实现驱动芯片级的保护系统的要求. 驱动芯片检测到的过流故障信号经过光耦输入CPLD, 经CPLD逻辑电路以封锁CPLD输出的控制信号, 实现CPLD级保护系统的要求. CPLD将过流、过热故障信号逻辑综合后反馈到DSP, 进行功率驱动保护中断, 切断DSP的PWM脉冲输出, 实现DSP级保护系统的要求.

2.3 ADS8364设计(Design of ADS8364)

为实现基于矩阵变换器驱动的无刷双馈风力发电系统的闭环控制, 需采集系统实验装置的输入侧、输出侧的电压电流信号, 采用2片6通道的ADS8364芯片. ADS8364有硬件控制和软件控制两种工作方式, 为在使用时灵活处理, 本系统采用CPLD进行控制, 将DSP的地址线、数据线和存储器控制信号, 以及外部中断控制信号全部连接至CPLD进行控制.

3 算法理论分析(Theoretical analysis of algorithm)

3.1 无刷双馈电机的建模(The model of BDFM)

无刷双馈电机定子侧有两套绕组, 直接与工频电源相连的一套称为功率绕组, 通过变频器与电源相连的称为控制绕组. 通过控制绕组的作用, 无刷双馈发电机既可运行于亚同步速也可以运行在超同步速, 易于实现风力机组的变速运行以获得风能最大捕获. 在 $d-q$ 轴转子坐标系中无刷双馈电机的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{qp} \\ u_{dp} \\ u_{qc} \\ u_{dc} \\ u_{qr} \\ u_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + pL_{sp} & p\omega_r L_{sp} & 0 & 0 & pM_p & p\omega_r M_p \\ -p\omega_r L_{sp} & r_p + pL_{sp} & 0 & 0 & -p\omega_r M_p & pM_p \\ 0 & 0 & r_c + pL_{sc} & p\omega_r L_{sc} & -pM_c & p\omega_r M_c \\ 0 & 0 & -p\omega_r L_{sc} & r_c + pL_{sc} & p\omega_r M_c & pM_c \\ pM_p & 0 & -pM_c & 0 & r_r + pL_r & 0 \\ 0 & pM_p & 0 & pM_c & 0 & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qp} \\ i_{dp} \\ i_{qc} \\ i_{dc} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: r_p, L_{sp}, M_p 为功率控制绕组的电阻、自感和功率绕组与转子的互感; r_c, L_{sc}, M_c 为控制绕组的电阻、自感和控制绕组与转子的互感; r_r, L_r, ω_r 为转子电阻、自感和电机的机械角速度; $u_{qp}, u_{dp}, u_{qc}, u_{dc}, u_{qr}, u_{dr}, i_{qp}, i_{dp}, i_{qc}, i_{dc}, i_{qr}, i_{dr}$ 均表示电压电流的瞬态值; 下标 p, c, r 分别表示功率绕组、控制绕组、定子侧、转子侧; d, q 表示 $d-q$ 坐标系下的分量; p 为微分算子.

无刷双馈电机稳态运行时, 其转速为

$$n_r = 60 \cdot \frac{f_p \pm f_c}{p_p + p_c}. \quad (2)$$

其中: n_r 为电机转速, 亚同步速时, f_c 前取

“ $-$ ”号; 超同步速时, 取“ $+$ ”号. 由式(2)可知, 由于无刷双馈电机功率绕组直接与电网相连, 所以 f_p 为定值, 如果均匀地改变控制绕组频率 f_c , 就可以平滑地调节电机的转速, 实现变频调速, 从而使调速系统具有优良的机械特性. 由于功率绕组直接与电网相连, 功率绕组电压几乎不变, 只能改变控制绕组电压. 一种方法是控制控制绕组的供电电压频比恒定, 以维持气隙磁通为额定值^[5~7].

本文采用模型参考模糊自适应控制, 以提高系统的稳定性, 加快转速平滑调节. 控制绕组压频比控制器是对无刷双馈电机转速和功率因数进行控

制, 以保证控制绕组供电电压频比恒定. 图2为模型参考模糊自适应控制系统.

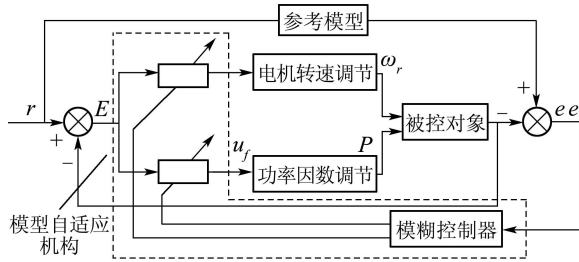


图2 模型参考模糊自适应控制系统

Fig. 2 Model reference fuzzy adaptive control system

当被控对象结构发生变化或参数偏离时, 测得的功率因数 P 与参考功率因数 P_{ref} 存在误差 e_p , 被控对象表示为

$$x^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}) + bu, y = x. \quad (3)$$

其中: f 为未知函数, b 为未知的正常数, f 和 b 的值可以通过辨识得出. u 和 y 分别为系统的输入和输出. 需要做的是基于模糊系统设计一个反馈控制器 $u = u(x|\theta)$ 和一个调整参数向量 θ 的自适应律, 通过对参数不断进行修正, 进而调节电机转速和桨距角, 直到 e 趋向于零.

用若干条If-Then规则语句来构造模糊控制系统 $f = f(x|\theta)$: 如果 x_1 是 $B_1^{l_1}$ 且 $\dots$, x_n 是 $B_n^{l_n}$, 则 f 是 E^i , 假设系统所有语句共有 $\prod_{i=1}^n p_i$ 条模糊规则, $l_i = 1, 2, \dots, p_i; i = 1, 2, \dots, n; B_n^{l_n}, E^i$ 均为某个模糊集, 使用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器可得

$$f(x|\theta) = \frac{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_n=1}^{p_n} k^{l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{B_i}^{l_i}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_n=1}^{p_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{B_i}^{l_i}(x_i) \right)}. \quad (4)$$

其中: k 是自由参数, 放在集合 $\theta \in \mathbb{R}^{\prod_{i=1}^n p_i}$ 中. 根据被控对象知识和控制知识可以设计出模糊控制器以及自适应律的算法^[8].

设控制系统中的参考模型、被控系统、模糊自适应机构分别为 $G_m(s) = \frac{Z_m(s)}{N_m(s)}$, $G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)}$ 和 $G_f(s)$, 模糊自适应机构的输出 u_f 可以表示为 $u_f = f(e, e) K_0 e$, 其中: k_0 为比例因子, 则系统的传递函数为

$$G_e(s) = \frac{N(s) Z_m(s) - Z(s) N_m(s)}{N_m [N(s) + f(e, e) K_0 Z(s)]}. \quad (5)$$

可得出, 在参考模型和被控系统稳定条件

下, 只要比例因子 $K_0 \leq K_0^*$, K_0^* 为方程 $N(s) + K_0 Z(s) = 0$ 根轨迹图的临界稳定值, 则控制系统稳定.

3.2 矩阵变换器的理论分析(Theoretical analysis of matrix converter)

Venturini直接控制法基于高频合成原理, 从数学的角度出发, 根据输入和输出电压直接求出占空比矩阵, 占空比矩阵由一个连续函数或分段连续函数来表示, 利用精确的数学表达式来确定开关的具体动作. 经过不断的尝试, 终得出占空比 D 的一个解, 其解可表示为

$$D = D_1 + D_2. \quad (6)$$

其中:

$$D_1 = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 \\ d_3 & d_1 & d_2 \\ d_2 & d_3 & d_1 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_2 & h_3 & h_1 \\ h_3 & h_1 & h_2 \end{bmatrix},$$

$$d_k = \frac{1}{3} p_1 \{1 + 2q \cos[\omega_1 t + (k-1)\alpha]\},$$

$$h_k = \frac{1}{3} p_2 \{1 + 2q \cos[\omega_2 t - (k-1)\alpha]\},$$

$$k = 1, 2, 3,$$

$$\omega_1 = \omega_o - \omega_i, \omega_2 = \omega_o + \omega_i,$$

p_1, p_2 和 q 是控制变量, 满足: $p_1 + p_2 = 1$, $p_1, p_2 \geq 0, 0 \leq q \leq 0.5$ ^[9~12].

4 软件及算法设计(Design of software and algorithm)

4.1 DSP软件(DSP software)

DSP软件采用C语言和汇编语言混合编程方式, 其软件设计主要为矩阵变换器的M.Venturini控制算法的实现, 通过DSP产生多路的PWM脉冲输入至CPLD. DSP通过定时器控制A/D转换进行电压采样, 实现矩阵变换器的闭环控制, 提高实验装置的抗干扰性, 使整个系统能够稳定运行. 图3为DSP程序流程图.

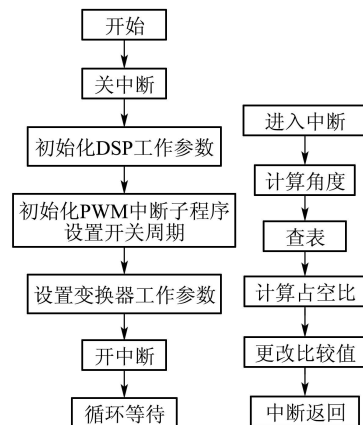


图3 DSP程序流程图

Fig. 3 The flow chart of DSP program

4.2 CPLD软件(CPLD software)

CPLD程序的编写采用电路图编程和VHDL语言编程结合的方式, 其主要包括对DSP的PWM脉冲的译码程序、四步换流程序、功率管驱动芯片的过流保护程序、外界故障处理程序、ADS8364工作的控制程序以及外扩一些功能芯片的设置。

5 仿真与实验结果(Simulation and experimental results)

应用MATLAB/SIMULINK对矩阵变换器控制无刷双馈电机进行仿真。矩阵变换器的参数设置: 输入侧相电压为220 V/50 Hz; 输出侧线电压为110 V/25 Hz; 载波频率为6 kHz; 电机的参数设置: $r_p = 0.81$, $r_c = 0.81 \Omega$, $r_r = 1.57 \Omega$, $L_{sp} = 80 \text{ mH}$, $L_{sc} = 630 \text{ mH}$, $L_r = 0.04 \text{ mH}$, $M_p = 0.89 \text{ mH}$, $M_c = 4.3 \text{ mH}$, $f_p = 50 \text{ Hz}$, $p_p = 3$, $p_c = 1$ 。图4为矩阵变换器输出电压 U_a 的仿真波形和无刷双馈电机在负载转矩突变时转速 ω_r 和功率因数 P 的仿真波形, 图5为矩阵变换器输出电压 U_a 的实验波形。

通过观察矩阵变换器的仿真和实验波形, 可以发现矩阵变换器输出侧电压的实验波形, 干扰较为明显, 需要进一步研究矩阵变换器的调制算法和换流过程以及整个系统的实验装置, 提高其鲁棒性, 增强适应实验环境的能力^[13,14]。

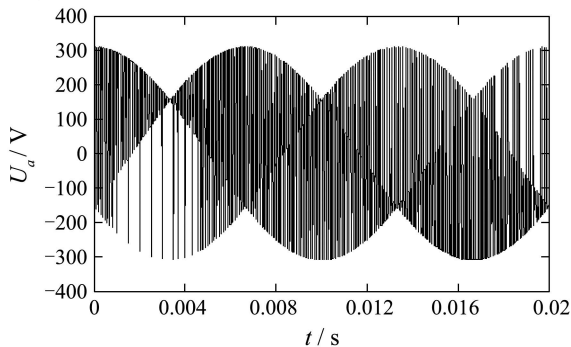


图 4(a) 矩阵变换器输出电压 U_a 的仿真波形

Fig. 4(a) The simulation wave form of the MC output voltage U_a

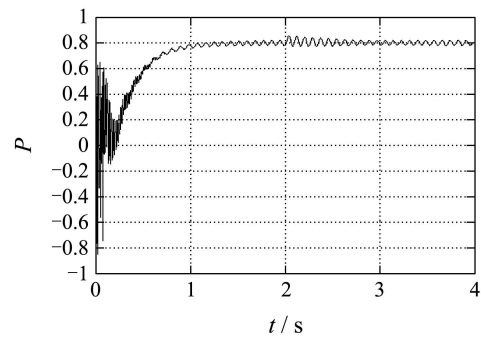
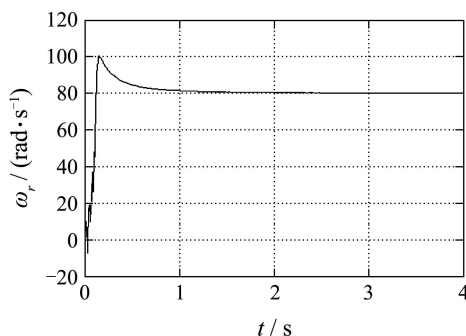


图 4(b) 无刷双馈电机转速 ω_r 和功率因数 P

Fig. 4(b) The wave form of the BDFM rotor speed ω_r and the power factor P

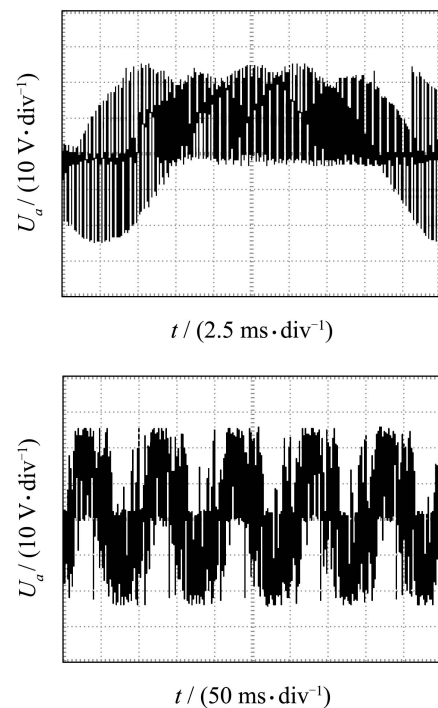


图 5 矩阵变换器输出电压 U_a 的实验波形

Fig. 5 The experiment wave form of the MC output voltage U_a

6 结束语(Conclusion)

采用快速、高效DSP进行数据处理, 算法运算, 并配合CPLD进行PWM脉冲扩展和四步换流, 应用16位的ADS8364进行采样, 通过实验研究, 证明基于DSP和CPLD的矩阵变换器实验平台各单元工作可靠, 设计具有通用性, 需进一步提高整个系统的工作性能。无刷双馈电机控制绕组压频比控制器采用模型参考模糊自适应控制, 提高系统的稳定性, 加快转速平滑调节, 使调速系统具有优良的机械特性, 实现整个风力发电系统的稳定运行。

参考文献(References):

- [1] 杨俊华. 无刷双馈风力发电系统及其控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.

- (YANG Junhua. *Research on wind energy conversion system and control with brushless doubly-fed generator*[D]. Guang Zhou: South China University of Technology, 2006.)
- [2] ALESINA A. The generalized transformer: a new bi-directional sinusoidal waveform frequency converter with continuous variable adjustable input power factor[C]//*Proceedings of Power Electronics Specialist Conference(PESC)'80*. Bologna, Italy: [s.n.], 1980.
- [3] VENTURINI M. A new sine wave in, sine wave out conversion technique eliminates reactive elements[C]//*Proceeding of Powercon 7*. 1980: E3/1-E3/15.
- [4] ALESINA A, VENTURINI M. Solid-state power conversion: A fourier analysis approach to generalized transformer synthesis[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1981, 28(4): 319 – 330.
- [5] ROBERTS P C, MCMAHON R A. Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification[J]. *IEEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2005, 152(4): 933 – 942.
- [6] HUANG Shoudao, WAMG Yaonan. A study of active and reactive power control for brushless doubly-fed machine[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(4): 87 – 93.
- [7] MCMAHON R A, ROBERTS P C. Performance of BDFM as generator and motor[J]. *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 2006, 153(2): 289 – 299.
- [8] WANG Lixin. *A Course in fuzzy System and Control*[M]. USA: Prentice-Hall, Inc, 1997: 233 – 253.
- [9] ALESINA A, VENTURINI M. Intrinsic amplitude limits and optimum design of 9-switches direct PWM AC-AC converters[C]//*Proceeding of PESC'88*. 1988: 1284 – 1290.
- [10] ALESINA A, VENTURINI M. Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Elec*, 1989, 4(1): 101 – 112.
- [11] HUBER L. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Application*, 1995, 31(6): 1234 – 1246.
- [12] ZHANG L. Switch sequencer circuit for safe commutation of a matrix converter[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(18): 1530 – 1532.
- [13] CASADEI D. A general approach for the analysis for the input power quality in matrix converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, 13(5): 882 – 891.
- [14] MUTSCHLER P, MARCKS M. A direct control method for matrix converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 49(2): 362 – 369.

(上接第368页)

7 结论(Conclusion)

本文通过对弱光下光伏组件输出特性的分析,提出了一种弱光下基于组态优化的间歇脉冲充电法. 通过对硬件实验现场采集的波形图的分析,验证了该方法能有效地对蓄电池进行充电.

参考文献(References):

- [1] SHMILOVITZ D. Photovoltaic maximum power point tracking employing loadparameters[J]. *Industrial Electronics*, 2005, 3(3): 1037 – 1042.
- [2] SHEN Yuliang. A photovoltaic array simulator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1997, 18(2): 448 – 451.
- [3] DAHER S. Photovoltaic system for supply public illumination in electrical energy demand peak[J]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2004, 3(3): 1501 – 1506.
- [4] HUA CHIHCHING, LIN JONGRONG, SHEN CHIHMING. Implementation of a ADSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking[J]. *Transactions on Industrial Electronic*, 1998, 45(1): 99 – 107.