

基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法

苏海滨, 王光政, 王继东

(华北水利水电学院电力学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 根据光伏阵列非线性伏安特性, 提出了基于模糊逻辑双环控制光伏阵列最大功率跟踪算法, 使得光伏阵列输出功率接近于理论最大值。系统主要由单相逆变器、控制器和交流水泵机组组成, 主控制环实现光伏阵列最大功率跟踪初级模糊控制算法, 输出为最大功率点处电压。该电压作为逆变控制器参考输入电压, 内环模糊控制用于控制变频器输出频率, 进一步控制交流水泵机组的输出功率, 实现了更高精度的跟踪光伏阵列最大功率点跟踪。实验结果表明, 所提出算法能有效提高光伏阵列的输出效率。

关键词: 模糊逻辑; 光伏发电; 最大功率点

The maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power system based on fuzzy logic double loop control

SU Hai-bin, WANG Guang-zheng, WANG Ji-dong

(Electric Power School, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: According to non-linear characteristic of photovoltaic array, this paper proposes a method of maximum power point tracking algorithm based on fuzzy logic double loop control for photovoltaic power systems, which makes the output power of photovoltaic array approach to the theoretical maximum value. The system is composed of a simple phase inverter, controller and AC pump unit. Main controller loop implements primary fuzzy logic control algorithm of maximum power point tracking, and it exports a voltage at the maximum power point. This voltage is imported to inverter controller. The inner loop fuzzy controller is used in controlling inverter frequency to further control the output power of AC motor pump and higher precision of maximum power point tracking is realized. Simulation and experimental results show that the proposed algorithm can effectively improve the efficiency of photovoltaic array output.

Key words: fuzzy logic; photovoltaic power; maximum power point tracking

中图分类号: TM762 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0215-04

0 引言

近十年来, 我国经济的快速发展对能源产生巨大的需求, 目前的能源结构主要以煤碳、石油等化石能源为主, 大量的开发和利用对环境产生严重影响, 为保护人类生存环境, 低碳经济越来越受到各国重视, 发达国家投入大量资金开发绿色环保的能源技术。光伏电能转换技术由于无污染、零排放, 近年来得到快速发展, 光伏阵列输出的电能与输出电流之间呈非线性关系, 如图1所示, 输出功率随着输出电压的变化而变化, 也就说光伏阵列输出功

率存在最大功率点。另外, 最大功率点也随太阳照度及光伏板温度而变化。因此能否最大效率地利用光伏电能转换, 关键是如何控制光伏阵列始终运行在最大功率点上。目前对这一问题的解决出现多种方法, 如观测干扰法^[1-2]、增加电导法^[3]、恒定电压法^[4]、虚拟磁链法^[5]、神经网络法^[6-8]、模糊逻辑法^[9-10]等, 这些方法或多或少存在某些缺陷, 如代价高、实现困难、复杂度高、容易不稳定等。

光伏电能转换最大功率点跟踪方法总体要求是简单、低价、在外部条件变化时(太阳照度和环境温度)能够快速响应跟踪、较小的控制能量消耗。因此有必要研究更有效的最大功率点跟踪算法, 以使光伏电能转换高效运行。本文提出了基于模糊逻辑双环控制的光伏最大功率点跟踪算法, 光伏阵列输

基金项目: 华北水利水电学院高层次人才科研启动基金项目 (001285)

出电能直接驱动交流电机水泵机组, 光伏水泵系统在我国广大农村具有广阔应用市场, 对于改善农村饮水质量及农作物抗旱将发挥积极的作用。

1 PV 阵列特性

在恒定温度下, 光伏电池板单元电压-电流特性曲线如图 1 所示, 图中同时给出了光伏电池板单元输出功率曲线以及最大功率点与输出电压的关系, 所使用光伏电池板单元为 BP Solar BP SX 150S 模块, 最大功率 (P_{max}) 为 150 W, 最大功率点输出电压 (V_{mp}) 为 34.5 V, 电流 (I_{mp}) 为 4.35 A, 开路电压 (V_{oc}) 为 43.5 V, 短路电流 (I_{sc}) 为 4.75 A, I_{sc} 温度系数为 $0.065 \pm 0.015 \%/^{\circ}C$, V_{oc} 温度系数为 $-160 \pm 20 \text{ mV}/^{\circ}C$, 功率温度系数为 $-0.5 \pm 0.05 \%/^{\circ}C$, 共有 8 块光伏电池板单元串联, 最大功率为 1.2 kW。

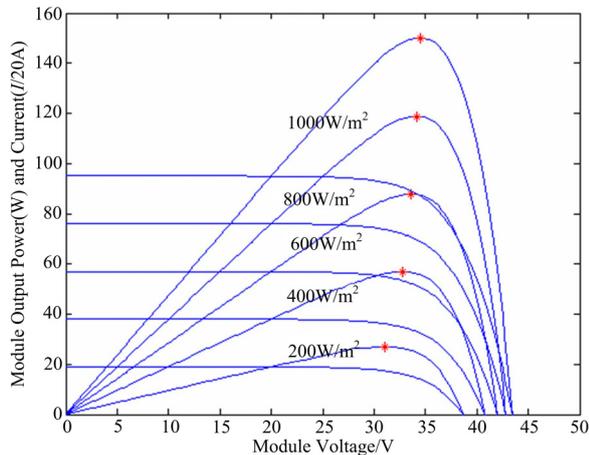


图 1 光伏电池板单元电压-电流特性 (25°C)
Fig.1 I-V and P-V characteristics of PV array

从图 1 可看出光伏电池板单元特性受日光照度和环境温度的影响, 当日光照度增加时, 最大功率点沿圆点表示曲线上升, 输出电流快速增长, 而电压变化相对较小, 为了使光伏电池板单元工作在最大功率点上, 此时应增加光伏电池板单元输出电流; 当环境温度增加时, 光伏电池板单元输出电压有明显减小, 而电流几乎保持不变, 环境温度越高, 电压减小越多, 因此光伏电池板单元输出电压也是随着外部条件变化而变化。通常情况下, 日光照度的变化快速而剧烈, 温度变化较小而且缓慢。因此通过在小范围改变光伏电池板单元输出直流电压以及交流电机转速, 完全可以实现最大功率跟踪。

2 系统结构

如图 2 所示为所研究系统结构框图, 系统主要

有光伏阵列、单相逆变器桥、交流水泵机组、外环模糊控制 MPPT 算法、内环模糊控制器及 PWM 控制器组成, 其中外环模糊 MPPT 算法、内环模糊控制器及 PWM 控制器可由 DSP 实现。水泵的功率输出 P_{out} 特性是转速 ω_n 的函数, 可用下式表示:

$$P_{out} = k\omega_n^3 \quad (1)$$

增加单相逆变器频率, 交流电机转速升高, 水泵的输出功率增大, 从而通过调节交流电机转速来调节光伏阵列的输出功率。水泵正常工作转速对应于光伏阵列最大功率点上, 如果偏离 MPP 点, 则由外环模糊 MPP 算法计算出光伏阵列 MPP 点处的电压 V_{ref} , 该电压作为内环模糊控制器的输入参考电压, 内环模糊控制器输出电压 V_f 用于控制 PWM 输出频率, 从而控制交流电机转速来调节水泵输出功率。内环模糊控制器反馈电压来自于光伏阵列的输出电压 V_{PV} , 控制的结果使得 $V_{PV} = V_{ref}$, 光伏阵列工作在 MPP 点上。

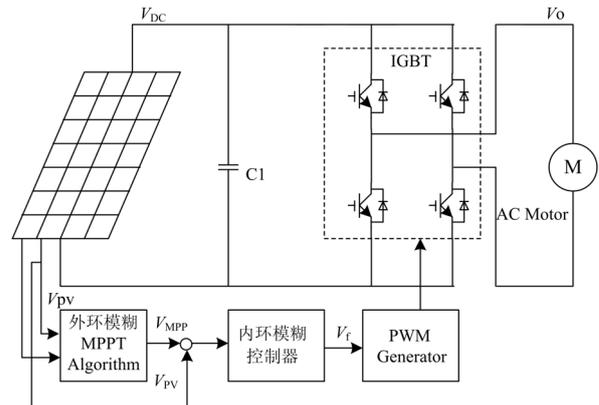


图 2 系统结构原理图

Fig.2 Block diagram of PV system

3 最大功率跟踪算法

如图 3 所示为光伏模块 P-V 变化曲线, 最大功率点跟踪的最终任务是用来控制交流感应电机运行频率, 以使光伏阵工作在最大功率点上, 光伏阵列输出功率通过测量光伏阵列输出电压和电流来计算, 如下式所示:

$$P_{PV} = I_{PV} \times U_{PV} \quad (2)$$

由 P_{PV} 与 U_{PV} 关系曲线可知, 光伏阵列输出功率对输出电压导数由式 (3) 表示:

$$S = \Delta P_{PV} / \Delta V_{PV} \quad (3)$$

S 为功率点切线斜率, 在不同的功率点上有不同的切线斜率。

从图 3 可以看出, 当斜率 S 是负值或较大时, 光伏阵列输出的功率较小, 此时应控制 ΔP 向峰点移

动; 当斜率 S 为 0 时, 光伏阵列运行在最大功率点上。

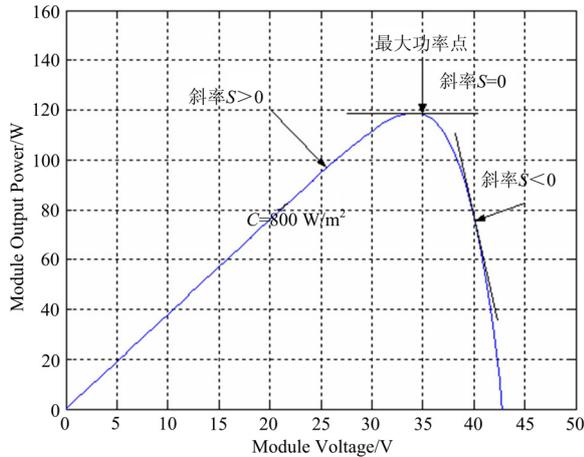


图 3 P-V 曲线不同点斜率特征

Fig.3 The slope at different points on the P-V curve

3.1 外环模糊控制最大功率跟踪

该模糊控制器输入变量是斜率 $S(\Delta P_{PV}/\Delta V_{PV})$ 和功率变化量 ΔP_{PV} , 模糊控制器输出变量是光伏阵列最大功率点参考电压 V_{ref} 增量。输入变量隶属函数如图 4、图 5 所示, 所使用的控制规则如表 1 所示。

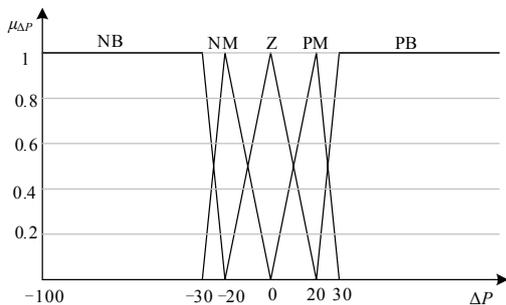


图 4 输入变量 $\Delta P_{PV}/\Delta V_{PV}$ 隶属函数及模糊化
Fig.4 Fuzzification of $\Delta P_{PV}/\Delta V_{PV}$ input

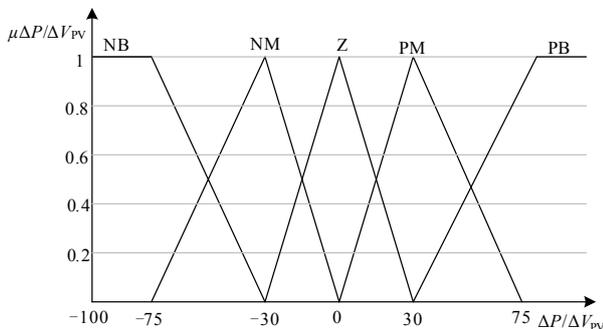


图 5 输入变量 ΔP_{PV} 隶属函数及模糊化
Fig.5 Fuzzification of ΔP_{PV} input

为了提高最大功率点跟踪的鲁棒性, 则模糊控

制器输出的隶属函数限制在较窄响应范围内, 如图 6 所示。

表 1 模糊输入/输出规则库

Tab.1 Rulebase for inference of fuzzy input values

	NB	NM	Z	PM	PB
NB	PB	PM	Z	PM	PM
BM	PM	PM	Z	PM	PM
Z	NM	NM	Z	Z	Z
PM	NB	NB	NB	NB	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB

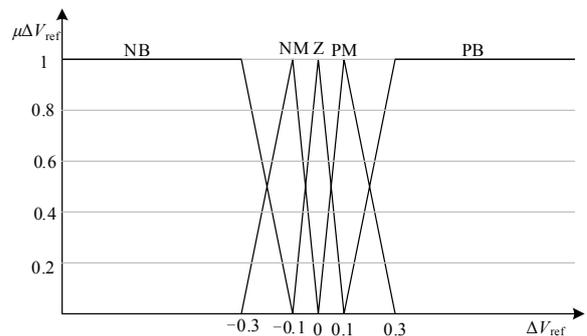


图 6 输出变量 ΔV_{ref} 隶属函数及模糊化

Fig.6 Membership functions for defuzzification of ΔV_{ref}

输出解模糊采用重心法, 解模糊后输出变量对应于参考电压的增量 ΔV_{ref} , 通过下式来计算得出。

$$\Delta V_{ref} = \frac{\sum(DV_i * DV \mu_i)}{\sum DV \mu_i} \quad (4)$$

新的参考电压值可由式 (5) 计算得到。

$$V_{ref_new} = V_{ref} + \Delta V_{ref} \quad (5)$$

3.2 内环模糊控制变频

为了进一步提高最大功率跟踪控制精度, 设置了内环模糊控制器, 内环模糊控制器输入量来自于外环控制器输出参考电压 V_{ref} 与光伏阵列输出电压 V_{PV} 误差及误差的变化率, 该模糊控制设计与常规模糊设计相似, 模糊控制器的输出量用于控制 PWM 的输出频率, 完成功率控制。经多次试验及参数选择, 该控制器的控制误差可达到 5% 以内。

3.3 特殊情况下控制规则选择

由于光伏阵列受环境影响很大, 有时变化非常剧烈, 模糊控制在这种情况下很难输出满意的结果, 甚至使系统不能正常工作。根据实验结果总结出了 4 种特殊情况, 并给出了特殊的控制规则。

规则 1: 如果光伏阵列输出电压不是很小, 而系统处于停止状态, 则启动逆变系统, 同时给出参考电压为光伏阵列输出电压的 0.7 倍。

规则 2: 如果光伏阵列输出电压很小, 而且电流也很小, 则参考电压为 0, 系统停止。

规则 3: 如果光伏阵列输出电压的变化很小, 则给参考电压增加一个小的扰动量 (δ)。

规则 4: 如果光伏阵列输出电压很小, 而且电流也不是很小, 则给参考电压减小一个小的扰动量 (δ)。

3.4 仿真结果分析

仿真实验如图 7 所示, PWM 设定为 10 kHz, 初始照度为 1 000 W/m², 逆变器输出频率为 48.5 Hz, 在 $t=0.05$ s 时, 照度从 1 000 W/m² 下降到 800 W/m², 频率下降到 45.3 Hz。由图 8 可知光伏阵列输出电压 275.3 V 基本保持不变。

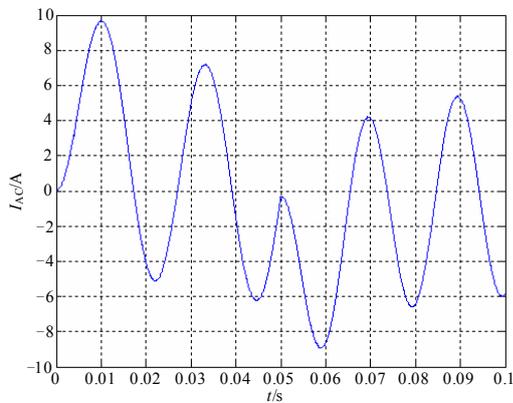


图 7 不同照度下频率变化 ($t=0.05$ s)

Fig.7 Frequency change at different insolation

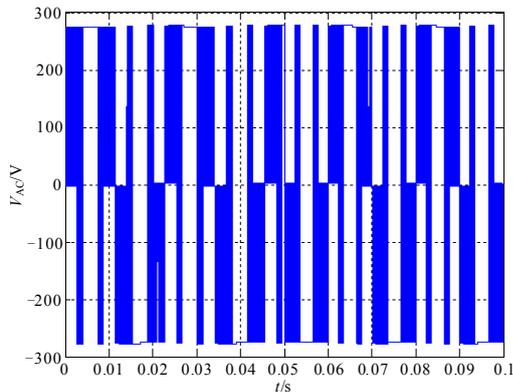


图 8 不同照度下的电压变化 ($t=0.05$ s)

Fig.8 Voltage change at different insolation

图 9 所示为传统单环模糊控制和双环模糊控制的光伏阵列运行在最大功率点比较, 从图可以看出双环模糊控制光伏阵列运行工作点非常接近于理论的最大功率点, 照度越高越接近; 而传统单环模糊控制工作点远离理论最大功率, 照度越低离开越远。因此双环控制的光伏阵列转换效率要大于传统单环

模糊控制。表 2 计算出了几种不同控制作用同一光伏阵列输出能量及效率。

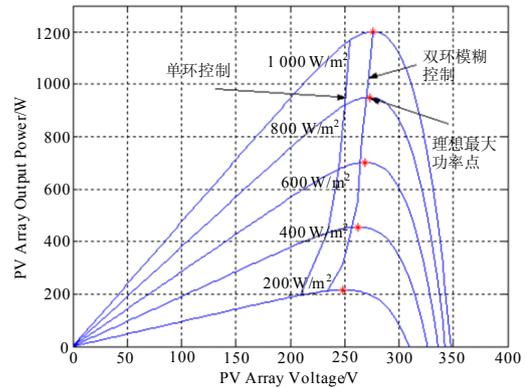


图 9 单环模糊控制与双环模糊性能比较

Fig.9 MPP comparison using different controllers

表 2 不同控制作用光伏阵列电能及效率

Tab.2 Energy and efficiency comparison at different controller

	双环模糊控制	单环模糊控制	直接输出
仿真输出电能	8.4 kWh	8.069 kWh	4.165 kWh
理论输出电能	8.48 kWh	8.48 kWh	8.48 kWh
效率	99.05%	95.15%	54.42%

从表 1 可看出, 如果光伏阵列没有最大功率跟踪控制, 其转换效率非常低, 大约只有一半电能转换; 双环控制作用下光伏阵列转换效率可达 99%(仿真输出), 而传统单环模糊控制作用下光伏阵列转换效率可达 95.15% (仿真输出), 双环控制作用下光伏阵列转换效率提高了 4%。

4 结论

光伏技术不断进步, 对光伏电能转换需求将会大幅提高, 同时对光伏阵列电能转换效率提出了更高的要求, 本文提出了基于模糊逻辑双环控制的光伏阵列最大功率点跟踪算法, 该算法使得光伏阵列输出功率接近于理论最大值, 仿真实验结果表明在不同的日光照射强度下, 该算法比传统单环模糊控制算法具有更高的最大功率点跟踪精度和更大的电能输出效率。

参考文献

[1] Hua C, Shen C. Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system[C]. //IEEE Appl Power Electron Conf Exposition Proc. 1998: 679-683.

(下转第226页 continued on page 226)

- ZHANG Bo-ming, ZHANG Hai-bo. Research on decomposition and coordination calculation for control centers in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (22) : 1-5.
- [12] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24) : 1-5.
ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. A decomposition and cooperation dynamic power flow calculation for multi-area interconnected system based on asynchronous iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24) : 1-5.
- [13] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 分布式潮流计算异步迭代模式的补充和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (2) : 12-16.
ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. Supplement and improvement of asynchronous iteration mode for distributed power flow between multi control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (2) : 12-16.
- [14] 颜伟, 何宁. 基于Ward等值的分布式潮流计算[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29 (11) : 36-40.
YAN Wei, HE Ning. Distributed power flow method based on Ward equivalent[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29 (11) : 36-40.
- [15] 赵维兴. 大型互联电力系统无功优化分解协调算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
ZHAO Wei-xing. Research on decomposition and coordination algorithm of reactive power optimization for large in connected power systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2008.
- [16] 赵维兴, 刘明波, 孙斌. 基于诺顿等值的多区域系统无功优化分解协调算法[J]. 电网技术, 2009, 33 (11) : 44-48.
ZHAO Wei-xing, LIU Ming-bo, SUN Bin. A Norton equivalence based decomposition and coordination algorithm of reactive power optimization for multi-regional power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33 (11) : 44-48.
- [17] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2009-11-16; 修回日期: 2010-02-08

作者简介:

刘志文(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: lzw32347@126.com

刘明波(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。

(上接第 218 页 continued from page 218)

- [2] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEEE Proc Generation, Transmission, and Distribution, 1995, 142 (1) : 59-64.
- [3] Brambilla A. New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking[C]. //Proc 30th IEEE Power Electron Specialists Conf. 1998: 632-637.
- [4] Hohm D P, Ropp M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithm using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed[C]. // Proc 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conf 2000: 1699-1702.
- [5] 王继东, 苏海滨, 王玲花. 基于虚拟磁链直接功率控制的光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11) : 70-73.
WANG Ji-dong, SU Hai-bin, WANG Ling-hua. Study of grid-connected inverter used in PV generation system based on virtual flux-linkage direct power control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (11) : 70-73.
- [6] Hiyama T, Kitabayashi K. Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environment information[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12 (3) : 36-40.
- [7] Hiyama T, Kouzuma S, Imakubo T, et al. Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 10 (3) : 543-548.
- [8] Torres A M, Antunes FLM. An artificial neural network-based real time maximum power tracking controller for connecting a PV system to the grid[C]. //Proc IEEE Annu Conf Ind Electron Soc. 1998: 554-558.
- [9] Simoes M G, Franceschetti N N. Fuzzy optimisation based control of a solar array system[J]. IEEE Proc Electric Power Appl, 1999, 146 (5) : 552-558.
- [10] Mahmoud A M A, Mashaly H M, Kandil S A, et al. Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking[C]. //Proc 9th IEEE Int Workshop Robot Human Interactive Commun. 2000: 155-160.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

苏海滨(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术及智能控制; E-mail: suhaibin2000@yahoo.com.cn

王光政(1965-), 男, 教授级高工, 电力系统控制优化决策与仿真;

王继东(1969-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向新能源发电并网技术。