

基于 FPGA 的自适应光伏发电系统 MPPT 控制方法

吴胜阳^{1, 2}

(1. 武汉大学 软件工程国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 新乡学院 物理系, 河南 新乡 453003)

摘 要: 针对光伏电池输出功率随环境温度和日照强度变化而变化的特点, 提出了一种采用遗传算法优化模糊逻辑控制器控制规则的智能控制方法, 利用 FPGA 设计了控制系统。实验结果表明, 控制系统实现了在线快速演化, 能够准确、快速地跟踪光伏电池的最大功率点, 且具有自适应性。

关键词: 最大功率点跟踪; 可编程逻辑门阵列; 模糊逻辑; 遗传算法; 光伏发电系统

中图分类号: TP273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3326(2010)02-0025-03

A Self-Adaptive MPPT Method for Photovoltaic Power Systems

Based on FPGA

WU Sheng-yang^{1, 2}

(1. State Key Lab of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Physics Department, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Based on the property that the output power of photovoltaic cell varies with temperature of environment and intensity of sunlight, this paper puts forward an intelligent control method which adopts genetic algorithms to optimize control rules of fuzzy logic controller, and the control system is designed based on field programmable gate array (FPGA). The experiment results show that the control system realizes rapid on-line evolution, tracks the maximum power point of photovoltaic cells in a quick and accurate way, and is self-adaptive.

Key words: maximum power point tracking (MPPT); field programmable gate array (FPGA); fuzzy logic; genetic algorithm (GA); photovoltaic (PV) power system

0 引言

光伏发电存在的主要问题是光伏电池的输出功率随日照强度和环境温度改变而改变, 因此, 为了实现功率输出的最大化, 光伏发电系统必须采用最大功率点跟踪(简称 MPPT)控制装置。目前, MPPT 控制方法有增量法^[1]、爬山法^[2]、模糊逻辑法等^[3-5]。对于受外界环境因素影响显著的系统而言, 固定不变的模糊控制规则难以获得最好的控制效果。遗传算法(GA)是一种全局优化算法, 它借用了生物遗传学的观点, 通过自然选择、遗传、变异等作用机制, 增强各个体的适应性。笔者将控制规则作为遗传算法的个体, 运用遗传算法编制控制程序控制模糊控制器, 使之通过一段时间的进化学习, 系统可以找到适合所处环境的最优控制规则, 以此规则来控制光伏发电系统, 有效地跟踪最大输出功率点。为了提高系统的演化速度, 将遗传算法部署在 FPGA 中, 同时, 对控制系统采用软硬件协同处理的方法, 使系统达到最优控制状态。

1 光伏发电最大功率跟踪控制系统的设计

1.1 光伏发电系统最大功率跟踪系统基本原理

1.1.1 光伏电池特性

光伏电池是一种非线性电源元件, 典型的光伏电池(P - V)特性如图 1、图 2 所示^[6]。图 1 表示相同温度条件下、不同日照强度变化时光伏电池输出功率与电压的变化规律, 图 2 表示相同日照强度条件下, P - V

收稿日期: 2010-02-15

修回日期: 2010-04-05

作者简介: 吴胜阳(1981—), 男, 四川泸州人。硕士生, 研究方向: 演化计算。E-mail: ravrav@126.com。

随环境温度变化而变化的规律。由图可以看出光伏电池 $P-V$ 特性与日照强度、环境温度之间是高度非线性的, 且存在唯一的最大输出功率点。

1.1.2 最大功率点追踪控制

光伏发电系统最大输出功率点追踪是一个寻优过程, 通过调整系统参数使其达到可获得最大输出功率的最佳工作点, 但光伏发电系统的最佳工作点往往随着周围环境条件的变化而改变。如果将太阳能电池输出电压、电流固定, 则无法持续地产生最大输出功率, 因此, 需要动态调节

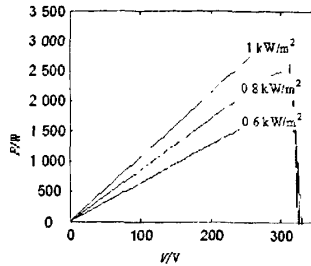


图1 不同日照强度条件下光伏电池的 $P-V$ 曲线
Fig 1 $P-V$ curves of the PV array for different insolation

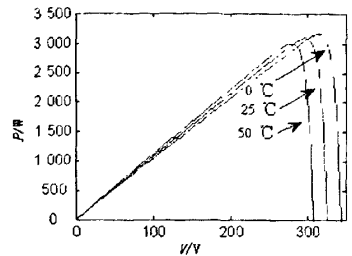


图2 不同温度条件下光伏电池的 $P-V$ 曲线
Fig 2 $P-V$ curves of the PV array for different temperature

输出电压、电流, 使输出功率达到最大值。在光伏发电系统中, 一般都是通过 DC/DC 或者 DC/AC 连接光伏阵列和负载, 通过调节 PWM 的占空比, 从而实现最优阻抗匹配, 使输出功率最大。文献[7]提出了一种基于占空比扰动的 MPPT 控制方法, 只需控制占空比一个参数, 控制方法简单。输出功率 P 与占空比 D 的关系如图 3 所示。当 $\Delta P(n)/\Delta D(n)=0$ 时, 系统输出功率达到最大。

1.2 整体设计

在本系统的设计过程中, 将遗传算法和模糊控制器相结合, 系统可以进行自学习, 使系统具有自修复、自主动态配置、自主控制和管理等功能, 能快速演化得到当前环境下最好的模糊控制规则, 实现控制的智能化。在设计中, 运用了软硬件一体化的思想, 利用软硬件的协同进化构建了本系统。

系统主要包括遗传算法模块、模糊控制器、光伏发电最大功率跟踪模型模拟模块等 3 个核心模块和图形显示模块与运行模拟模块 2 个辅助实现模块。在运行过程中, 系统使用遗传算法对模糊控制器的规则表进行自主优化, 以收到最佳控制效果。

遗传算法模块的核心部分重用了遗传算法软硬件协同 IP 和子系统内的交叉及变异模块。

模糊逻辑控制器模块: 随机地从种群中选择一个个体进行系统控制, 根据遗传算法原理进行系统控制规则的替换, 如果该个体较好则替换; 否则, 进行控制规则的替换。

光伏发电系统最大功率跟踪模拟模块: 利用文献[7]的仿真模型, 建立环境温度和日照强度动态改变的光伏发电模型, 按照模糊逻辑控制器的当前控制规则, 动态调整输出功率 P 与占空比 D 的关系, 进行光伏电池最大功率跟踪。

图形显示模块: 显示运行过程中的功率跟踪曲线和一些参数信息, 本模块主要是由 VGA 的 IP 实现的。

通过运行模拟运行模块来调控其他各个模块, 其整体设计如图 4 所示。

本系统采用了宏观和微观调控控制机制, 模拟光伏发电模型, 实现了模糊逻辑光伏发电控制器的在线演化。2 种控制机制的合理利用, 提高了控制效率, 也提高了光伏发电的转换效率。

1.3 模糊逻辑控制器的设计

选用功率变化量 $\Delta P(n)$ 和占空比变化量 $\Delta D(n)$ 作为模糊逻辑控制器输入, $n+1$ 时刻的占空比改变量 $\Delta D(n+1)$ 为输出, 其中功率变化量 $\Delta P(n)=P(n)-P(n-1)$, 占空比变化量 $\Delta D(n)=D(n)-D(n-1)$ 。

1) 确定输入、输出量模糊子集及论域。 $\Delta P(n)$ 的模糊集为 E , $\Delta D(n)$ 的模糊集为 D , $\Delta D(n+1)$ 的模糊

集为 U 。将语言变量 E 定义为 7 个模糊子集, D 定义为 8 个模糊子集, U 定义为 7 个模糊子集, 即 $D=\{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$, $E=\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, $U=\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 其中 NB 、 NM 、 NS 、 $N0$ 、 $Z0$ 、 $P0$ 、 PS 、 PM 、 PB 分别表示负大、负中、负小、负零、零、正零、正小、正中、正大等模糊概念。将 D 的论域规定为 14 个等级, 将 E 和 U 的论域规定为 13 个等级, 即 $D=\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$, $E=\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$, $U=\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ 。2) 确定隶属函数。笔者选择三角形作为

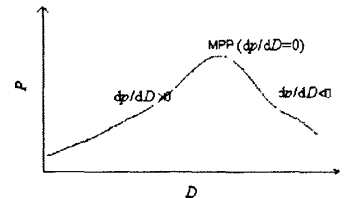


图3 $P-D$ 关系图
Fig 3 $P-D$ curve

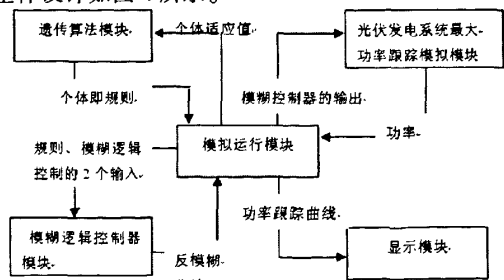


图4 整体设计图
Fig 4 The overall design diagram

隶属函数的形状。3)确定模糊控制规则。考虑外界环境条件和光伏电池输出功率 P 与占空比 D 之间的特性曲线, 分析得到以下原则: 若输出功率增加, 则继续原来调整方向, 否则, 取相反方向; 在离最大功率点较远处, 采用较大改变量以提高跟踪速度; 在离最大功率点较近处, 采用较小改变量进行调节; 当达到以最大功率点为中心的、极小的 Z 零区域时, 系统稳定下来, 直至外界环境再次发生明显变化; 当温度、日照强度等因素发生变化导致光伏电池输出功率发生明显变化时, 系统能够快速反应, 再次寻优。控制规则如表 1 所示。4)解模糊方法采用重心法。

2 系统实现及仿真

为了实现控制目标, 利用软件灵活性和硬件运算速度快的优点, 有效地解决了由于环境温度变化控制器控制不精准的问题, 对于控制“消耗”比较高、比较费时的系统, 本系统优势更明显。

2.1 开发平台

本模块使用的 FPGA 是 Xilinx 公司生产的、XC2VP30 开发板的 EDK 开发软件, 在 Virtex-II Pro 系列芯片上, 可以方便地搭建自己需要的硬件系统, 可以使用 C 语言在 XILINX 公司的 SDK 软件中编写应用程序。SDK 提供了丰富的库函数供用户使用, 通过 EDK 软件可以实现软硬件协同设计。

2.2 设计目标的实现

实现设计目标的软件模块主要包括模糊控制器模块、光伏发电最大功率跟踪模型模拟模块和运行模拟模块。在 Xilinx 开发板上, 由于只能运行 C 语言编写的程序, 因此, 这些模块都是采用 Xilinx 开发板支持的 C 语言编写的; 实现设计目标的硬件模块主要有遗传算法的核心模块—杂交和变异模块、图形显示模块。采用 Verilog HDL 硬件表述语言表述。使用 EDK 开发软件, 将硬件模块以 IP 核的形式添加到系统中, 再将 IP 核链接到相应的总线上, 最后为其分配物理地址。在软件方面, 只要通过该 IP 核基地址和相应的函数就可以使用该 IP 核, 实现软硬件协同工作。

2.3 仿真结果及分析

为了验证本系统的可靠性和实用性, 选择温度范围 $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 变化、日照强度范围 $0.4 \sim 0.8 \text{ kW/m}^2$ 的一组数据进行测试, 仿真曲线如图 5 所示, 虚线对应的坐标值为理论值。

从实验结果可以看出, 本系统在较短时间内可以迅速地到达当前外界状况下的最大功率点附近, 宏调结束。进入微调阶段, 本系统的控制调控向着最大功率点调节, 直到稳定状态。当外界状况(温度、日照)变化后, 系统对当前的状况进行再调节, 直到达到稳定状态。

3 结束语

利用遗传算法来优化设计模糊逻辑控制器, 增强模糊控制规则的自学习能力和规则的自适应能力; 本系统提高了跟踪精度, 有效提高了光伏电池的光电转化率, 为 MPPT 控制方法提供了一种可资借鉴的方法。

参考文献:

- [1] LEE J H, BAE H, CHO B H. Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size [J]. 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPEPMC2006), 2006: 603-607.
- [2] Nicola Femia, Giovanni Peotone Giovanni Spagnuola etc. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [3] ALTASA I H, SHARAF A M. A Novel Maximum Power Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic Solar Energy Systems[J]. Renewable Energy, 2008, 33: 388-399.
- [4] LI Chun-hua, ZHU Xin-jian, CAO Guang-yi, et al. A Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Energy Systems Based on Fuzzy Neural Networks[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, 10(2): 263-270.
- [5] 乔兴宏, 吴必军, 邓赞高, 等. 模糊/PID 双模控制在光伏发电 MPPT 中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 92-95.
- [6] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [7] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, Nicholas C. Development of a Microcontroller-based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54.

【责任编辑 邢怀民】