

光伏发电最大功率跟踪系统的研究

何薇薇¹, 杨金明¹, 张 淼²

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

摘要: 针对光伏发电系统最大功率跟踪问题, 提出了一种新的自适应模糊控制器方案. 理论证明, 利用在线调整算法改变模糊规则使光伏发电系统达到了全局稳定, 基于这种结构动态性能好, 鲁棒性强, 最后采用MATLAB7.0的Simulink工具对光伏发电最大功率跟踪系统进行仿真, 结果证明了其有效性.

关键词: 光伏发电系统; 模糊控制; 自适应控制; 仿真

中图分类号: TK514 **文献标识码:** B

Photovoltaic maximum power point tracking system

HE Wei-wei¹, YANG Jin-ming¹, ZHANG Miao²

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Automation College, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

Abstract: A new adaptive fuzzy controlling scheme is proposed for the photovoltaic maximum power point tracking. The theory proves that the algorithm of on-line self-adjusting used to alter the fuzzy rule bases makes the photovoltaic system stable globally. Based on such a scheme, good dynamic function and high robustness are achieved. The performance of the system is evaluated by the simulation conducted with Simulink tools in MATLAB7.0 and satisfied results are obtained.

Key words: photovoltaic system; fuzzy control; adaptive control; simulation

1 引言(Introduction)

公认的技术含量最高、最有发展前途的新能源是太阳能. 因其无污染、无噪声、不用燃料发电、运行成本很小, 因此是理想的清洁能源, 已广泛用于诸如蓄电池充电系统、水泵、家用电器、卫星能源及光伏并网发电等领域, 但是太阳能发电与气候条件有关, 通常需要配备储能装置, 而且其成本费用高, 发电效率较低, 已成为限制其发展的主要因素之一.

通过电力电子技术和控制技术实现太阳能光伏发电的最大功率跟踪(MPPT), 是提高光伏发电系统的发电量、降低发电成本, 进而广泛推广光伏发电技术的有效措施. 目前, 国内外已研究出多种方法, 常用的有扰动观察法(P&O)^[1]和电导增量法(INC)^[2]. 这些算法结构简单, 但在最大功率点附近, 其扰动较大, 且受环境影响, 鲁棒性较差.

本文针对具有强非线性的光伏发电系统设计模糊控制器^[3~5], 并采用自适应算法对其进行优化, 实现了模糊控制器参数自适应调整, 控制效果通过

仿真和试验加以证实.

2 光伏发电最大功率跟踪系统设计(Design of MPPT system)

2.1 光伏电池的工作特性(V module characteristics)

光伏电池的输出特性方程为

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (V + IR_S) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (1)$$

式中: I, V 分别为分别为光伏电池的输出电压和输出电流, A 为电池板特性常数, I_{LG} 为光电流, I_{OS} 为暗饱和电流, T 为光伏电池的表面温度, K 为玻尔兹曼常数, R_{Sh} 为电池的并联电阻, R_S 为电池的串联电阻, q 为单位电荷.

图 1 为一定温度和光强下太阳能电池的 $I-V$ 曲线, 实直线为负载电阻线, 虚曲线为等功率线, P_m 为光伏电池的最大功率点. V_m, I_m 分别为光伏电池在

最大功率点运行时对应的电压和电流。

若将太阳能电池通过变换器与负载连接, 光伏电池的工作点 $P_m(V_m, I_m)$ 则由负载限定. 当负载不可调节时, 太阳能电池运行在 A 点, A 点的输出功率小于在最大功率点的输出功率. 当负载可调节, 通过检测光伏电池输出电压 U_{pv} 及电流 I_{pv} , 计算 P_{pv} , ΔP_{pv} 确定模糊控制律, 调整DC/DC变换器的占空比, 将负载电压调节至 V_r 处, 使负载上的功率从 A 点移动到与太阳能电池的最大功率点在同一条等功率线上 B 点. 同时引入自适应机制, 自动调整模糊控制器参数, 以适应外界环境变化.

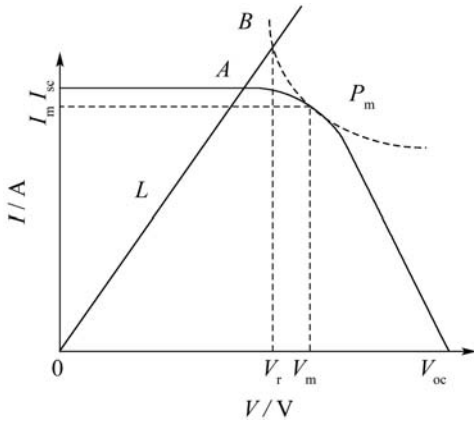


图1 一定温度和光强下 I - V 曲线

Fig. 1 I - V characteristics in constant temperature and irradiation

2.2 光伏发电最大功率跟踪系统控制方案(Scheme of MPPT system)

定义光伏阵列实际输出功率与由太阳辐射决定的理想输出功率的偏差为

$$e = P_m - P_{pv}. \quad (2)$$

控制系统结构如图2所示, 图中 D 为控制信号(开关器件的占空比). 模糊控制器(FLC)的输入变量为功率变化量 e 和上一时刻的占空比变化量 ΔD_k , 通过开关器件的占空比 D 控制DC/DC变换器, 实现输出电压调节, 从而实现光伏阵列输出功率调节. 变换器采用三重Boost电路. 自适应结构根据偏差 e 实现模糊控制器参数的调整.

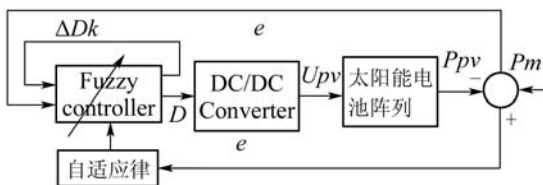


图2 控制系统结构图

Fig. 2 The control system block diagram

3 模糊控制器的设计(Design of fuzzy controller)

考虑如下仿射非线性系统^[6]:

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

$$P_{pv} = x. \quad (4)$$

式中: f 为未知函数, b 为未知的正常数.

取状态变量为

$$x = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (5)$$

控制的目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, 使得系统输出 P_{pv} 跟踪参考输出 P_m . 用如下模糊If-Then:

$$R_u^{(r)}: \text{ If } x_1 \text{ is } P_1^r \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } P_n^r, \\ \text{ Then } u \text{ is } Q^r. \quad (6)$$

P_i^r, Q^r 为 R 中模糊集合, $i = 1, 2, \dots, n, r = 1, 2, \dots, Ln$.

模糊控制器为:

$$u = u_F(x|\theta). \quad (7)$$

模糊系统 $u_F(x|\theta)$ 由以下两步构造:

步骤1 对变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 定义 m_i 个模糊集合 $A_i^{l_i} (l_i = 1, 2, \dots, L_n)$.

步骤2 有以下 $\prod_{i=1}^n m_i$ 条模糊规则来构造模糊系统 $u_F(x|\theta)$, 即

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1^{l_1} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^{l_n}, \\ \text{Then } u_F \text{ is } S^{l_1 \dots l_n}. \quad (8)$$

式中: $l_1 = 1, 2, \dots, m_i, i = 1, 2, \dots, n$.

采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器来设计模糊控制器, 即

$$u_F(x|\theta) = \frac{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} \bar{y}_u^{l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^{l_i}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^{l_i}(x_i) \right)}. \quad (9)$$

选择 $\bar{y}_u^{l_1 \dots l_n}$ 为可调节的参数, 把这些参数放在集合 $\theta \in R \prod_{i=1}^n m_i$ 中, 这时模糊控制器为

$$u_F(x|\theta) = \theta^T \xi(x), \quad (10)$$

式中: θ 是 $\prod_{i=1}^n m_i$ 维向量; $\xi(x)$ 为模糊基函数, 其第 $l_1 \dots l_n$ 个元素为

$$\xi_{l_1 \dots l_n}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^{l_i}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^{l_i}(x_i) \right)}, \quad (11)$$

θ 中的一些参数初值按规则(6)选取, 其余的参数可随机选取. 控制规则(6)通过设置其初始参数被嵌入到模糊控制器中.

4 自适应律的设计(Design of adaptive rule)

定义跟踪误差向量为

$$e = (e, \dot{e}, \dots, e^{n-1})^T \in \mathbb{R}^n, \quad (12)$$

若函数 $f(x)$ 已知, 控制增益 b 已知, 取控制律为

$$u^* = \frac{1}{b}[-f(x) + p_m^{(n)} + K^T e]. \quad (13)$$

将式(13)和式(2)代入式(3), 可得误差状态方程

$$\dot{e} = \Lambda e + b[u^* - u_F(x|\theta)], \quad (14)$$

式中:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{bmatrix}.$$

适当选择增益向量 $K = (k_1, \dots, k_n)^T \in \mathbb{R}^n$, 使闭环控制系统的特征多项式

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (15)$$

的特征根都在复平面左半平面上, 实现渐近稳定跟踪, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

定义最优参数及最小逼近误差:

$$\theta = \arg \min_{\theta \in R} \left[\sup_{x \in \mathbb{R}^n} |u_D(x|\theta) - u^*| \right], \quad (16)$$

$$\omega = u_D(x|\theta^*) - u^*. \quad (17)$$

由式(10)和式(17), 误差方程可写为

$$\dot{e} = \Lambda e + b(\theta^* - \theta)^T \xi(x) - b\omega, \quad (18)$$

对误差动态定义Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b}{2\gamma} (\theta^* - \theta)^T (\theta^* - \theta), \quad (19)$$

P 是一个 $n \times n$ 维正定阵, 且满足如下Lyapunov方程:

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q, \quad (20)$$

Q 是一个任意的 $n \times n$ 正定矩阵, γ, b 是正的常数.

对 V 沿误差轨迹求时间微分, 并考虑(20), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b [(\theta^* - \theta)^T \xi(x) - \omega] - \frac{b}{\gamma} (\theta^* - \theta)^T \dot{\theta} = \\ & -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{b}{\gamma} (\theta^* - \theta)^T [\gamma e^T p_n \xi(x) - \dot{\theta}] - e^T p_n b \omega, \end{aligned} \quad (21)$$

式中 p_n 为矩阵 P 的最后一列.

取自适应律

$$\dot{\theta} = \gamma e^T p_n \xi(x), \quad (22)$$

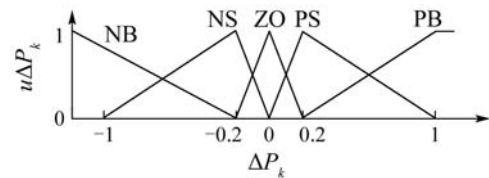
则

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T p_n b \omega, \quad (23)$$

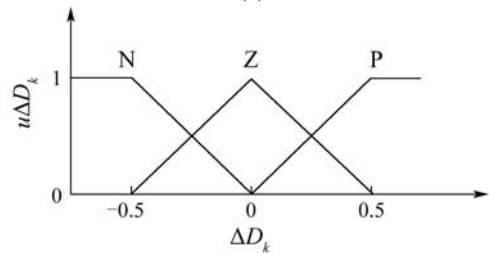
ω 是最小逼近误差, 可通过嵌入足够多规则的模糊系统 $u_F(x|\theta)$, 使 ω 充分小, 并满足 $|e^T p_n b \omega| < \frac{1}{2} e^T Q e$, 从而使 $\dot{V} < 0$, 保证控制系统的全局稳定.

5 仿真研究(Simulation research)

模糊控制器的输入变量为功率变化量 $\Delta P_k(e)$ 和上一时刻的占空比变化量 ΔD_k , 输出变量为下一时刻的占空比变化量 $\Delta D_k + 1$, ΔD_k 分为5个模糊集: 负大(NB), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正大(PB), ΔD_k 分为3个模糊集: 负(N), 零(Z), 正(P), $\Delta D_k + 1$ 分为7个模糊集: 负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB). 输入变量的隶属度函数如图3所示.



(a)



(b)

图 3 输入变量的隶属函数

Fig. 3 Membership functions of input variables

根据研究, 获得如下光伏发电最大功率跟踪系统模糊控制规则库, 见表1.

表 1 模糊控制规则库

Table 1 Fuzzy rule table

| ΔD_k | ΔP_k | | | | |
|--------------|--------------|----|----|----|----|
| | NB | NS | ZO | PS | PB |
| N | PB | PM | NS | NM | NB |
| Z | NM | NS | ZO | PS | PM |
| P | NB | NM | PS | PB | PB |

根据表1, 用如下模糊规则If-Then规则来描述控制知识:

1) 如果上一时刻的占空比 D 引起功率 P 增加,则下一时刻的 D 将按同样的方向变化;反之,则按相反的方向变化:

- If ΔD_k is P and ΔP_k is PB
Then ΔD_{k+1} is PB
- If ΔD_k is P and ΔP_k is PS
Then ΔD_{k+1} is PM
- If ΔD_k is N and ΔP_k is PB
Then ΔD_{k+1} is NB
- If ΔD_k is N and ΔP_k is PS
Then ΔD_{k+1} is NM
- If ΔD_k is P and ΔP_k is NB
Then ΔD_{k+1} is NB
- If ΔD_k is P and ΔP_k is NS
Then ΔD_{k+1} is NM
- If ΔD_k is N and ΔP_k is NB
Then ΔD_{k+1} is PB
- If ΔD_k is N and ΔP_k is NS
Then ΔD_{k+1} is PM

2) 若温度和日照发生变化,引起最大功率点发生变化,为了跟踪到最大功率点则要遵循以下规则:

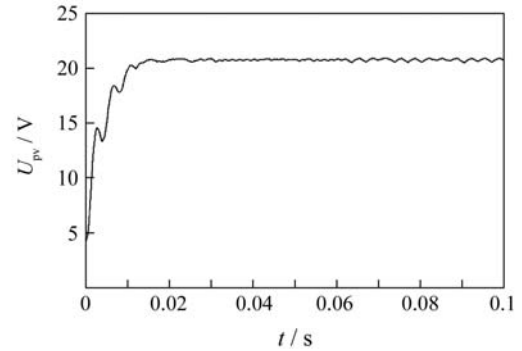
- If ΔD_k is Z and ΔP_k is PB
Then ΔD_{k+1} is PM
- If ΔD_k is Z and ΔP_k is PS
Then ΔD_{k+1} is PS
- If ΔD_k is Z and ΔP_k is NB
Then ΔD_{k+1} is NM
- If ΔD_k is Z and ΔP_k is NS
Then ΔD_{k+1} is NS

3) 当 $\frac{\partial P}{\partial D} = 0$, 为了防止输出功率在最大功率点振荡,找到真正的最大功率则要遵循以下规则:

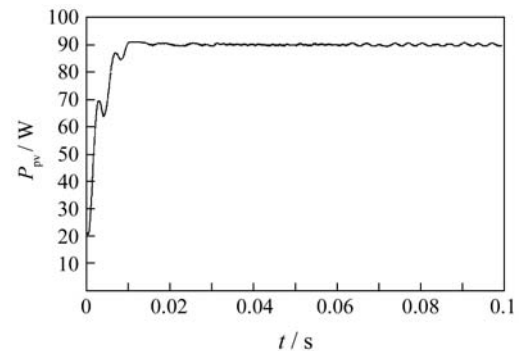
- If ΔD_k is P and ΔP_k is ZO
Then ΔD_{k+1} is PS
- If ΔD_k is N and ΔP_k is ZO
Then ΔD_{k+1} is NS
- If ΔD_k is Z and ΔP_k is ZO
Then ΔD_{k+1} is ZO

根据光伏电池的数学模型^[7],在MATLAB/Simulink环境中建立了介于自适应模糊控制的光伏发电最大功率跟踪系统的仿真模型.为了显示文中提出方法的控制效果,仿真中把结果和单独采用模糊控制做比较.仿真结果如图4所示.图中的(a)和(b)为系统采用模糊控制的 U_{pv} 及 P_{pv} 随时间 t 变化的曲线,(c)和(d)为系统采用自适应模糊控制的 U_{pv} 及 P_{pv} 随时间 t 变化的曲线.可以看到:采用前一种方法响应

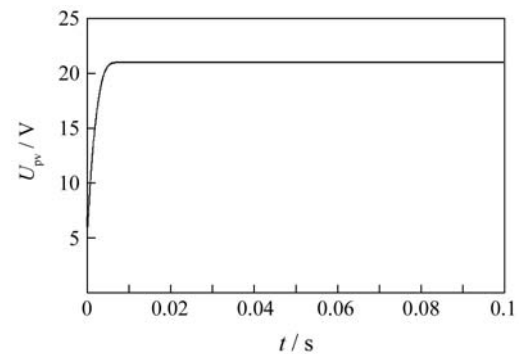
速度慢,且在最大功率输出点摆动.采用后一种方法系统在小于0.01 s的时间内克服了扰动,找到最大功率点,响应速度快,在搜索到最大功率点时基本保持不变,具有较好的动态性能和精度.



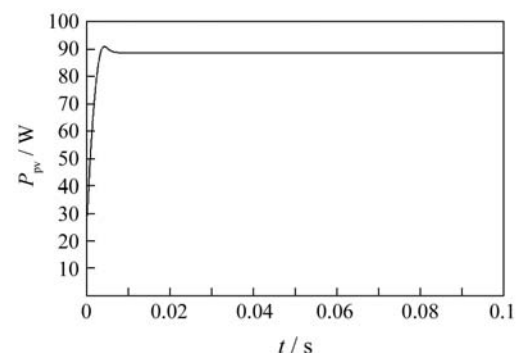
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 仿真结果

Fig. 4 Results of simulation

6 结论(Conclusion)

针对光伏发电系统的最大功率跟踪问题, 采用自适应模糊控制方法构建了新的控制系统和结构, 并设计了适合光伏发电系统特点的自适应模糊控制器, 提高了控制精度. 理论及仿真表明, 利用在线调整算法改变模糊规则使控制系统达到了全局稳定, 该系统的控制方案是可行的.

参考文献(References):

- [1] CHIANG S J, CHANG K T, YEN C Y. Residential photovoltaic energy storage system[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1998, 45(3): 385 – 394.

- [2] ARAB A H, DRISS B A, AMINEUR R. Photovoltaic system sizing for Algeria[J]. *Solar Energy*, 1995, 54(2): 99 – 104.
- [3] WU T F, CHANG C H, CHEN Y H. A fuzzy-log Ic-controlled single-state converter for PV-powered lighting system applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2000, 47(2): 287 – 296.
- [4] TANAKA K, SUGENO M. Stability analysis and design of fuzzy control systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 135 – 156.
- [5] LEE C. Fuzzy logic in control systems[J]. *IEEE Trans System, Man and Cybernetics*, 1990, 20(2): 404 – 435.
- [6] ALTAS I H, SHARAF A M. A novel on-line MPPT search algorithm for PV arrays[J]. *IEEE Trans on Energy Conves*, 1996, 11(4): 748 – 754.
- [7] JABOORI M G, SAIED M M. A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems[J]. *IEEE Trans on Energy Conves*, 1987: 227 – 231.

(上接第166页)

为一个网络监测系统对风电场的多台风机进行同步监测记录. 通过对监测结果的分析, 可以为风机制造厂家的技术改进提供必要的依据.

参考文献(References):

- [1] 胡其颖. 全球主要风机生产厂家发展历程和产品介绍[J]. *太阳能*, 2002, 112(2): 39 – 43.
(HU Qiying. Development and products of the main wind turbine manufactories in the world[J]. *Solar Energy*, 2002, 112(2): 39 – 43.)
- [2] 吴捷, 杨俊华. 绿色能源与生态环境控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(6): 864 – 869.
(WU Jie, YANG Junhua. Control on green energy source and ecologic environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 864 – 869.)
- [3] MONTEIRO M E, MOURA E S, DRAGO A B, et al. An internet-based power quality monitoring system[C]//2003 *IEEE Int Sympo-*

sium(ISIE '03). Universidad Fed: IEEE Press, 2003: 333 – 336.

- [4] ZHOU H L. GPRS based power quality monitoring system[C]//2005 *IEEE Networking, Sensing and Control*. Tucson: IEEE Press, 2005: 496 – 501.
- [5] LEOU R C, TSAI W R, CHANG Y N. A power quality monitoring system based on J2EE architecture[C]//2004 *IEEE Region 10 Conf: Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering IEEE*. Chiang Mai: IEEE Press, 2004: 291 – 294.
- [6] Working Group 36.05. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network[J]. *CIGRE, Electra*, 1981, (77): 35 – 54.
- [7] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19(3): 63 – 66.
(ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. *Proc of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1999, 19(3): 63 – 66.)