

基于改进粒子群优化模糊控制的 MPPT 算法研究

徐偲喆, 查晓锐

(1. 常州博瑞电力自动化设备有限公司, 江苏 常州 213025;

2. 安徽省马鞍山市花山区花园路 588 号, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 在光照强度和温度变化时, 常规的最大功率点跟踪 (MPPT) 算法难以快速准确地跟踪光伏系统最大功率点。针对此问题, 设计了一种改进粒子群优化算法 (PSO) 的模糊控制器。首先, 依据常规 MPPT 特性, 设计了一种带调整因子的模糊控制算法以快速收敛到最大功率点; 然后, 采用参数自适应 PSO 对设计的模糊控制器调整因子进行动态优化。仿真结果表明: 所设计的参数自适应 PSO 优化模糊控制器能快速准确地跟踪最大功率点, 保证了 MPPT 的动态响应速度和稳态精度, 提高了光伏系统的工作效率。

关键词: 光伏系统; 最大功率点跟踪; 模糊控制; 粒子群优化算法; 参数自适应

中图分类号: TN 702 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0035-05

Research on MPPT Algorithm Based on Improved Particle Swarm Optimization Fuzzy Control

XU Sizhe¹, ZHA Xiaorui²

(1. NR Electric Power Electronics Co., Ltd., Changzhou 213025, China;

2. No.588 Huayuan Road, Huashan District, Ma'anshan 243000, China)

Abstract: When the light intensity and temperature change in photovoltaic system, the conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithm was difficult to track the maximum power point quickly and accurately. Aiming at this problem, a fuzzy controller based on improved particle swarm optimization (PSO) was designed. Firstly, according to the characteristics of conventional MPPT algorithm, a fuzzy control algorithm with adjusting factor was designed to rapidly converge to the maximum power point. Then, parameters adaptive PSO was used to dynamically optimize the adjusting factors of the designed fuzzy controller. The simulation results showed that the designed parameters adaptive PSO optimized fuzzy controller could track the maximum power point quickly and accurately, which ensured the dynamic response speed and steady-state accuracy of MPPT and improved the work efficiency of photovoltaic system.

Key words: photovoltaic system; maximum power point tracking (MPPT); fuzzy control; particle swarm optimization (PSO) algorithm; parameters adaptive

0 引言

随着化石能源供应的日益紧张以及人们对气候变化等全球性环境问题的关注, 通过发展新能源和可再生能源促进能源可持续发展已成为世界各国的共识。光伏发电技术具有环保、安全、寿命长等优点, 在国内外得到了广泛应用。但是, 光伏电池具有明显的非线性输出特性且受光照、温度

等外界环境影响较大。为了提高光伏系统的能源利用率, 需采用最大功率点跟踪 (MPPT) 技术。传统 MPPT 方法有恒定电压法、扰动观察法和电导增量法等, 文献[1-3]对这些方法进行了详细的理论分析和试验研究。结果表明传统 MPPT 方法存在响应速度慢、跟踪精度不够、实现困难或系统工作点在最大功率点附近振荡导致功率损失等缺点。

光伏发电系统含有多个不确定量且数学模型难以描述,根据智能控制的自学习性、自适应性、自组织性、优化能力等特性,设计了一种应用智能控制算法的 MPPT 算法。智能控制的主要分支为专家控制、模糊控制、神经网络控制、粒子群优化算法(PSO)和遗传算法等^[4]。文献[5-6]将模糊控制技术和神经网络法相结合,借助人工神经网络法,由实测数据生成模糊控制规则,准确高效地实现了光伏发电 MPPT。文献[7]利用 PSO 优化 BP 神经网络各节点之间的连接权值和阈值,取得了较为理想的预测效果。文献[8-9]采用 PSO 优化模糊控制的隶属度函数,保证了系统在光照强度和温度变化时有较快的动态响应速度和较高的稳态精度。

通过对光伏电池等效电路及 MPPT 原理的分析,本文结合 PSO 优异的优化性能和模糊控制的简便性,提出了一种基于改进 PSO 模糊控制器的 MPPT 算法。首先,对模糊控制在光伏系统 MPPT 中的应用进行研究,并对应用效果进行分析;然后,结合 PSO 和模糊控制的特性,提出一种带调整因子的模糊控制器,并应用参数自适应 PSO 对调整因子进行实时优化,进一步提高了整个最大功率跟踪控制系统的动态和稳态性能。

1 光伏系统的最大功率跟踪原理

光伏电池等效电路如图 1 所示。

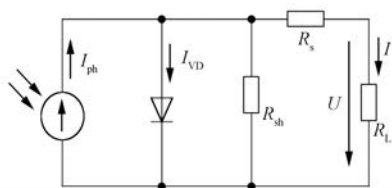


图 1 光伏电池等效电路

图 1 中, I_{ph} 为光伏电池电流源; I_{VD} 为二极管工作电流; I 为光伏电池输出电流; R_{sh} 为光伏电池旁路电阻; R_s 为光伏电池串联电阻; R_L 为等效负载; U 为光伏电池输出电压。

与图 1 对应的光伏电池输出特性方程^[10]为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_0 = I_{D0} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{S}{1\,000} + C_T (T - T_{ref}) \quad (3)$$

式中: q ——电荷电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

n, I_{D0} ——二极管理想因子、反向饱和电流;

k ——波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T ——环境温度;

T_{ref} ——参考温度, 取 298 K;

E_g ——表征半导体禁带宽度的常量;

I_{sc} ——光伏电池短路电流;

S ——光照强度;

C_T ——温度系数。

按照光伏电池输出特性,在 Simulink 中建立光伏电池仿真模型。输出电压和功率随光照强度、温度变化的输出特性曲线如图 2 所示。

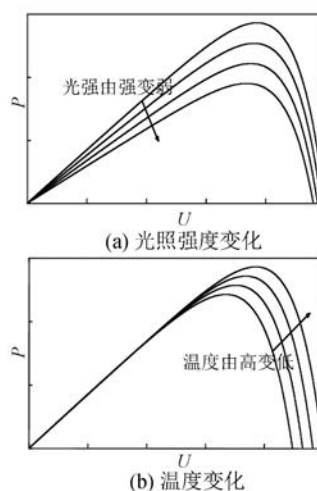


图 2 光伏电池输出特性曲线

由式(1)~式(3)和图 2 可知,光伏电池的输特性受温度和光照强度等因素的影响,即使在外部环境稳定的情况下,其输出功率也会随着负载的变化而变化,只有当负载与光伏器件达到阻抗匹配时光伏器件才会输出最大功率^[11]。为了使光伏电池在不同光照强度和温度下,并在带任意负载的时候均能工作在最大功率点,需在负载和光伏电池之间加入一个阻抗变换器。采用 Boost 变换电路,通过调节变换器开关管的占空比来实现光伏电池的 MPPT。

2 基于 PSO 模糊控制的 MPPT 算法设计

光伏发电最大功率跟踪系统原理图如图 3 所

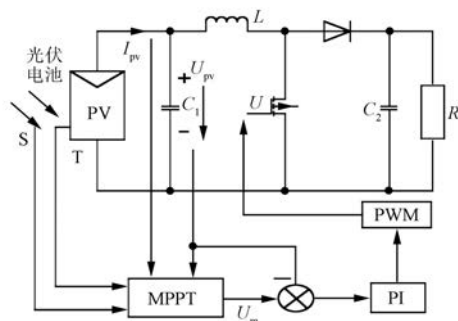


图3 光伏发电最大功率跟踪系统原理图

示。根据图3可知,光伏发电系统最大功率跟踪因前级光伏电池的非线性特性,常规扰动观察法、电导增量法等将使光伏电池模型线性化推导出的MPPT算法存在最大功率点附近振荡、响应速度慢等特点。由此,根据光伏系统的变量多、难以精确建立模型等特性,且光照强度和温度是时变的,考虑模糊控制对系统模型变量不敏感、对扰动具有一定鲁棒性等特点,将模糊控制应用于MPPT。

2.1 模糊控制器

模糊控制是应用模糊集合理论的控制方法,提供一种实现基于知识(规则)的,甚至语言描述的控制规律的新机理^[12]。模糊控制器的实现主要包括:模糊化和模糊规则的建立。

2.1.1 模糊化

模糊化的过程即模糊变量、模糊论域和隶属度函数的确定。定义模糊控制器的输出变量为光伏电池输出电压的校正量 dU ,输入变量则分别为光伏电池功率电压曲线上连续采样两点连线的斜率值 e 及单位时间斜率的变化值 ec ,即:

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \quad (4)$$

$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \quad (5)$$

式中: $P(k)$ 、 $U(k)$ ——光伏电池输出功率及输出电压的第 k 次采样值。

将 e 、 ec 和 dU 分别用量化因子和比例因子映射到模糊集合论域 $[-6, 6]$ 区间,对应的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。为了简化模糊化算法,提高控制的实时性,模糊集合的隶属度函数选为三角形。在误差较小时均采用较高分辨率的隶属度函数,以提高控制精度。

2.1.2 模糊规则的建立

规则是模糊控制器的核心,直接影响控制器

的性能和输出结果。应用“IF A AND B THEN C”模糊规则,得到模糊控制规则表。

模糊控制算法实现简单、鲁棒性强,但需要依靠专家主观经验制定模糊规则,控制参数无法自适应调整,对于光照强度和温度变化的情况,收敛至最大功率点的速度不够快且易陷入局部最优解,稳态精度较低。

2.2 带调整因子的模糊控制器

在光伏系统的MPPT控制中,因为光伏电池的非线性特性和外界环境的不稳定性,常规模糊控制器所依赖的控制规则存在着不足,所以控制器参数缺乏自调整能力。为了使模糊控制规则或参数在运行过程中可以自动地调整、修改和完善,采用一种带调整因子的模糊控制器^[13],即:

$$u = -[\alpha E + (1 - \alpha) E_c] \quad (6)$$

式中: α ——调整因子, $\alpha \in (0, 1)$;

E 、 E_c 、 u ——模糊论域内的误差、误差变化率和控制量。

该控制器可通过改变调整因子改变控制规则,再用优化的控制规则进行控制,即通过对模糊规则的调整从根本上提高模糊控制器的性能。控制器结构如图4所示。

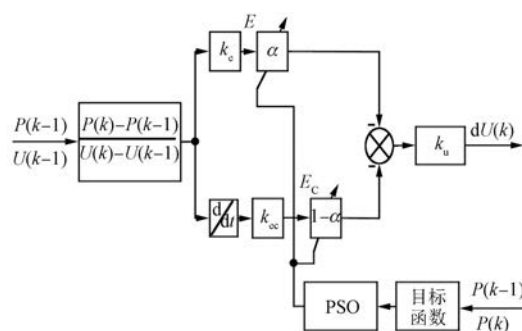


图4 带调整因子的模糊控制器结构

应用PSO对调整因子进行优化,采用相邻采样时刻的功率变化率作为PSO的目标函数,当 $J < 0.0001$ 时,PSO停止迭代。定义目标函数如下:

$$J = \frac{|P(k) - P(k-1)|}{P(k-1)} \quad (7)$$

式中: $P(k)$ ——光伏电池输出功率第 k 次采样值;

$P(k-1)$ ——光伏电池输出功率第 $k-1$ 次采样值。

PSO对调整因子进行优化能够提高控制器的

性能,但需要进行大量的迭代运算,将增加算法计算时间,影响 MPPT 的动态响应速度。为此,需对 PSO 进行改进,提高收敛速度,降低算法消耗时间。

2.3 参数自适应 PSO

PSO 是一种基于群体智能的算法,通过模拟鸟群的社会性行为,实现对问题的优化。基于惯性权重的标准 PSO,主要计算步骤如下^[14]:

(1) 初始化。设定加速常数 $c_1=2$ 、 $c_2=2$,惯性权重 $\omega=0.5$,最大进化代数 $t_{\max}=100$ 。在定义空间 R^1 中随机产生 30 个粒子,位置范围 $[0, 120]$,代表光伏电池工作电压,组成初始种群 $X(t)$;随机产生各粒子初始速度,范围 $[-1, 1]$,组成速度矩阵 $V(t)$ 。

(2) 评价种群的适应度。计算每个粒子的适应度值。适应函数取系统最大功率计算函数:

$$P = I_{ph}U - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] U \quad (8)$$

(3) 寻找个体历史最优位置。对于每个粒子,将其适应值与其经历过的最好位置作比较,保留较好的一个。

(4) 寻找全局最优位置。对于每个粒子,将其适应值与全局所经历的最好位置作比较,保留较好的一个。

(5) 更新粒子的速度和位置,产生新种群,计算式为

$$v_j^t = \omega v_j^t + c_1 r_1 (p_j^t - x_j^t) + c_2 r_2 (p_g^t - x_j^t) \quad (9)$$

$$x_j^t = x_j^t + v_j^t \quad (10)$$

式中: r_1, r_2 ——0~1 的随机数;

p_j^t ——到第 t 次迭代为止,第 j 个粒子本身找到的最优位置;

p_g^t ——到第 t 次迭代为止,全种群找到的最优位置。

(6) 检查结束条件。若满足条件,则结束寻优;否则, $t=t+1$,转至步骤(2)。结束条件为相邻 2 次迭代计算的最优适应度值之差 $|\Delta P_m| < 0.0001$ 或寻优达到最大进化代数。

其中,参数 c_1 、 c_2 和 ω 的选择对算法的计算过程影响很大。惯性权重 ω 表示原来的速度在下一步迭代中所占的比重,一般设置 ω 随着计算的进行而不断减小,以使得算法在运行初期有较好的全局搜索能力,而在末期有比较好的局部搜索能力。对于自身认知因子 c_1 和社会认知因子 c_2 ,开始阶段,

c_1 较大、 c_2 较小,保持粒子较强的自我认知能力;随着优化过程的进行, c_1 逐渐减小而 c_2 逐渐加大,使粒子之间进行信息交互的意识逐渐增强。基于此,采用一种抛物线型的参数变化策略^[15-16]:

$$\omega^t = (\omega_s - \omega_e) \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2 - 2(\omega_s - \omega_e) \frac{t}{t_{\max}} + \omega_s \quad (11)$$

$$c_1^t = (c_{1s} - c_{1e}) \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2 - 2(c_{1s} - c_{1e}) \frac{t}{t_{\max}} + c_{1s} \quad (12)$$

$$c_2^t = (c_{2e} - c_{2s}) \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2 - 2(c_{2e} - c_{2s}) \frac{t}{t_{\max}} + c_{2s} \quad (13)$$

式中: ω_s, ω_e ——初始惯性权值和进化到最大允许迭代次数的取值;

$c_{1s}, c_{2s}, c_{1e}, c_{2e}$ ——初始 c_1, c_2 的取值和进化到最大允许迭代次数时 c_1, c_2 的取值。

3 仿真分析

针对设计参数自适应优化的模糊控制器,初始化粒子个数为 30,迭代结束条件为 2 次迭代计算的最优适应度值之差 $|\Delta P_m| < 0.0001$, $\omega_s = 0.9$, $\omega_e = 0.4$, $c_{1s} = 3$, $c_{1e} = 1$, $c_{2s} = 1$, $c_{2e} = 3$ 。根据宁夏太阳山光伏电站的数据,选取光照强度和温度变化较为频繁的某天数据,对应用广泛的常规模糊控制、标准 PSO 优化模糊控制和本文设计的参数自适应 PSO 优化模糊控制 3 种方法在相同情况下进行仿真。系统响应曲线如图 5 所示。

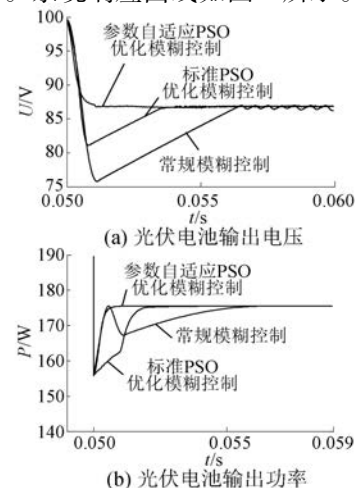


图5 带粒子群优化的模糊控制 MPPT 与常规 MPPT 控制效果的比较

由图 5 可见,针对光照强度和温度变化的情况,相对应用广泛的常规 MPPT 算法,本文所设计的算法在最大功率点附近几乎不存在振荡,避免了陷入局部最优解,动态响应速度更快,稳态精度也更高。同时,带调整因子的模糊控制器省略了隶属度函数和控制规则表环节,结构简单;参数自适应 PSO 没有涉及新的概念,复杂性没有明显增加;其适应度函数不再依赖于光伏电池的数学模型,鲁棒性得到保障。

4 结 语

本文分析了光伏发电系统的特性和常规 MPPT 算法的优缺点。针对光伏系统的光照强度和温度变化频繁的情况,设计了一种参数自适应优化调整因子的模糊控制器。首先,将模糊控制应用于 MPPT 中,并进行分析;然后,针对常规模糊控制方法的不足,加入调整因子,提高了算法实时性;最后,利用参数自适应 PSO 优化调整因子,对调整因子进行在线优化,实现自适应控制。根据光伏电站提供的数据,通过仿真分析表明,与常规 MPPT 算法相比,本文所设计的参数自适应 PSO 优化模糊控制器在跟踪精度和鲁棒性方面具有显著优势。

【参 考 文 献】

- [1] 吴登盛,王立地,刘通,等.基于神经网络的光伏阵列多峰 MPPT 的研究[J].电测与仪表,2019,56(7): 69.
- [2] 刘玉林,齐静静,李家宁.基于改进神经网络的一种新型光伏发电 MPPT 预测方法[J].电子测试,2019,32(4): 49.
- [3] 吴登盛,王立地,刘通,等.基于自寻优+PI 算法的最大功率点跟踪[J].电源技术,2018,42(1): 75.
- [4] 邵世芬,张开生,张鲁子.智能控制的最新应用及现

状的研究[J].青岛大学学报(自然科学版),2018,31(4): 110.

- [5] 徐凯,王湘萍.光伏发电最大功率点跟踪的智能集成控制[J].太阳能学报,2018,39(2): 536.
- [6] 陆畅,智勇军,周志峰.基于模糊神经网络的光伏发电系统功率控制方法[J].电测与仪表,2017,54(2): 46.
- [7] 方伟忠,郭军.基于粒子群优化神经网络光伏并网最大功率点跟踪技术研究[J].可再生能源,2018,36(8): 1181.
- [8] 游国栋,李继生,侯勇,等.光伏系统多目标粒子群优化模糊 MPPT 控制[J].天津科技大学学报,2016,31(1): 73.
- [9] 赵兴勇,张慧生,王凯武,等.考虑局部阴影的光伏阵列 MPPT 优化控制策略[J].电网与清洁能源,2016,32(11): 114.
- [10] 孔祥雨,徐永海,曾雅文,等.一种求解光伏电池 5 参数模型的方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(22): 46.
- [11] 鞠昌斌,王环,孟姗姗,等.大功率、高变比光伏高压直流并网变换器[J].太阳能学报,2018,39(2): 572.
- [12] 翟立唯,王琚,肖远逸,等.基于 Matlab/Simulink 的混合 MPPT 方法的研究[J].电力学报,2016,31(4): 308.
- [13] 王苏洲,舒志兵,李照.变论域模糊控制器在光伏系统 MPPT 中的应用研究[J].电子器件,2017,40(4): 912.
- [14] 王向红,钱文姝.基于改进 PSO 算法的微电网调度方法[J].电网与清洁能源,2017,33(7): 53.
- [15] 王一蒙.直流集成光伏模块输出功率优化与并网[D].杭州:浙江大学,2017.
- [16] 康健,靳斌,段秀娟,等.基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行[J].电力系统保护与控制,2018,46(12): 32.

收稿日期: 2019-07-11

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部