

基于 Buck-Boost 拓扑的新量子遗传算法 在 MPPT 技术中的应用

姬伟超, 殷时蓉, 刘朝涛

(重庆交通大学机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘要: 非线性的光伏电池要求在不同光照和温度等工况条件下实时变更电压、电流等负载特性实现 MPPT 追踪光伏电池最大功率点。针对一般遗传算法用于 MPPT 最大功率点追踪过程中出现的早熟、收敛慢等不足, 提出一种改进的量子遗传算法与扰动法相结合的算法。在电路拓扑结构上采用 Buck-Boost 电路替代传统的 Buck 电路或 Boost 电路, 并在 Matlab/Simulink 下进行了建模仿真。实验结果表明, 该算法具有良好的最优搜索能力和跟踪能力, 且控制精度高, 同时有效抑制了最大功率点附近的波动, 证明了该控制方法的准确性和有效性。

关键词: 光伏电池; 量子遗传算法; Buck-Boost 拓扑电路; 最大功率点追踪

Maximum power point tracking based on Buck-Boost topology with new quantum genetic algorithm

Ji Weichao, Yin Shirong, Liu Chaotao

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: It is essential to change the load characteristic under different light and temperature conditions in order to track the maximum power point of solar cell rapidly and accurately, according to the non-linear characteristics of photovoltaic cells. For general genetic algorithm in the process of maximum power point tracking MPPT, there are disadvantages such as premature and slow convergence insufficiency, in this paper, a new quantum genetic algorithm combined with perturbation method, based on the Buck-Boost circuit, is used on the circuit topology of alternatives instead of traditional buck circuit or boost circuit, and this method is established and simulated under Matlab/Simulink. Experimental results show that the algorithm has better advantage searching and tracking ability, good control precision, and effectively restrain the fluctuation near the maximum power point, to prove the accuracy and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: photovoltaic cells; quantum genetic algorithm; Buck-Boost circuit; maximum power point tracking

中图分类号: TM914.4

文章编号: 1674-3415(2016)01-0092-05

0 引言

光伏电池在不同的光照、温度等条件下, 可输出不同直流电压, 但是仅在某一个特定输出电压值时, 才能获取其最大输出功率。因此, 常通过改变功率开关管的占空比获取最佳输出电压, 实现实时变更系统的负载特性达到系统最大功率点。

工程实践中常以干扰法、电导增量法等进行 MPPT 控制, 但精度和跟踪特性都不够理想。其中智能算法的 MPPT 控制研究中, 部分研究者在 Cuk 变换器或 Boost 变换器的基础上, 提出了基于遗传

算法和扰动观察法的 MPPT 算法, 但一般遗传算法具有易早熟、局部搜索能力差、速度慢、稳态时波动幅度大等不足^[1-2]。本文在查阅相关研究资料基础上, 提出一种改进的在球面坐标系内分析计算的量子遗传算法与扰动干扰法相结合的算法, 同时采用一种 Buck-Boost 拓扑替代传统的 Buck 或 Boost 等变换器作为改变负载特性追踪 MPPT 的手段, 从而获得在稳态性能、动态性能、超调幅值、调节时间等性能指标上具有显著优势的 MPPT 控制算法。

1 光伏电池模型^[3]

本文建立光伏电池的单二极管形式的等效电路模型, 等效电路图如图 1 所示。

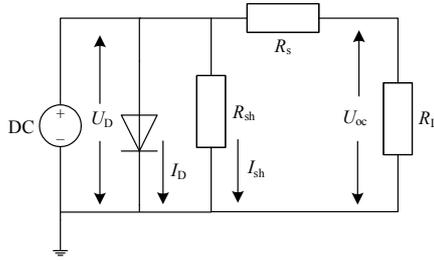


图 1 光伏电池等效模型图

Fig. 1 Photovoltaic cells equal model

分析电路特性后获得光伏电池的电流、电压特性数学模型，且理想条件下设 $R_s \approx 0$, $R_{sh} \approx 0$ 。

$$\begin{aligned} I_L &= I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_{OC}}{AkT}\right) - 1 \right] \\ P &= U_L I_{ph} - U_L I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_L}{AkT}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中： I_{ph} 为电池内光生电流； I_L 为负载电流； P 为输出功率； I_0 为二极管反向饱和电流； U_{OC} 为电池开路电压； U_L 为输出端电压； P 为输出功率； q 为电子电荷； A 为 P-N 常数； T 为绝对温度； k 为玻尔兹曼常量。

2 Buck-Boost 变换器模型^[4]

Buck 或 Boost 电路为常用于光伏电池 MPPT 的两种电路拓扑。Buck 或 Boost 拓扑仅能实现升压或降压单一的变换，而 Buck-Boost 电路不仅能够接受较宽范围内输入电压，而且可以在不改变硬件电路的基础上实现升降压，适用场合广，具有成本低和灵活性高等显著优势。图 2 所示为含有驱动控制模块的 Buck-Boost 变换器的电路原理图。

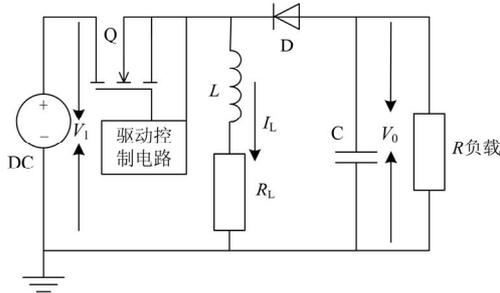


图 2 Buck-Boost 电路原理图

Fig. 2 Buck-Boost circuit schematic

功率开关 Q 是一个金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET)，输出二极管是 D。电感 L 和电容 C 组成了有效的输出滤波器。在分析过程中，考虑了电容 ESR(等效串联电阻) R_c 和电感的阻抗 R_L 。电阻 R 代表了在功率输出端的负载。

根据每个工作周期中电感是否存在零电流工作状态，Buck-Boost 电路有间断或非间断两种工作模式。依据伏秒平衡分析可知，对于断续工作模式，输出电压是开关管占空比、输入电压、工作频率和负载等多个参数的多变量方程；而对于连续导通模式，电压转换关系只是取决于输入电压和占空比。因此，本文设计该拓扑电路工作在连续导通模式以简化控制，并推知占空比-输出电压的传输函数如式(2)。

$$V_0 = -[(V_1 - V_{DS}) \times \frac{D}{1-D} - V_d - \frac{I_L \times R_L}{1-D}] \quad (2)$$

式中： V_1 为输入电压； V_0 为输出电压； V_d 为二极管正向导通压降； V_{DS} 为开关管导通压降。

3 基于 Bloch 球面量子遗传算法

本文提出一种基于 Bloch 球面建立搜索机制的改进的量子遗传算法，在缩小种群规模的基础上，又增加了种群多样性，进而增强了最优值搜索能力和速度。遗传算法个体采用量子位表述，用量子比特的球面坐标组组成个体的基因位，建立对应最优个体的旋转轴，通过其在球面上的绕轴旋转进化，并对个体上量子位循环更新；利用 Hadamard 门算子实现个体变异；达到使当前量子位沿着 Bloch 球面上的大圆逼近目标量子位的目的^[5-6]。

3.1 编码

量子计算中，最小信息单位采用量子位(比特)表示。任何量子位都与 Bloch 球面上一点对应^[5-6]。本文采用 Bloch 球面坐标描述的量子比特作为编码。编码方案如式(3)。

$$P_i = [|\mathcal{G}_{i1}\rangle, \dots, |\mathcal{G}_{im}\rangle] \quad (3)$$

式中： $|\mathcal{G}_{ij}\rangle = [\cos(\theta_{ij}/2), e^{i\varphi_{ij}} \sin(\theta_{ij}/2)]^T$ ； $i=1\sim m$ ； $j=1\sim n$ ， m 为种群规模， n 为优化空间维数。

3.2 量子测量

根据量子理论，每一量子比特信息的 Bloch 坐标 (x, y, z) 可以通过在球面坐标内投影测取，处于第 i 个位置的第 j 位 $|\mathcal{G}_{ij}\rangle$ ，其投影到各坐标面后测量式为

$$\begin{aligned} x_{ij} &= |\mathcal{G}_{ij}\rangle \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} |\mathcal{G}_{ij}\rangle \\ y_{ij} &= |\mathcal{G}_{ij}\rangle \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} |\mathcal{G}_{ij}\rangle \\ z_{ij} &= |\mathcal{G}_{ij}\rangle \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} |\mathcal{G}_{ij}\rangle \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 解空间变换

球面坐标空间中，X/Y/Z 组三组坐标每组均表

示一个对应优化解, 设问题的第 j 个变量为 $X_j \in (a_j, b_j)$, 个体 P_i 的第 j 个比特为 $[X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]$, 则对应空间变换为

$$\begin{aligned} X_{ij} &= [a_j(1-x_{ij}) + b_j(1+x_{ij})]/2 \\ Y_{ij} &= [a_j(1-x_{ij}) + b_j(1+x_{ij})]/2 \\ Z_{ij} &= [a_j(1-x_{ij}) + b_j(1+x_{ij})]/2 \end{aligned} \quad (5)$$

3.4 适应度函数的确定和最优解更新^[7]

选择适应度函数的依据是确保目标函数的优化趋势对应适应值加大的趋势, 结合本文中求 MPPT 控制的问题, 适应度函数 $f(x)$, 目标函数 $g(x)$, 二者映射关系为

$$f(x) = \begin{cases} R_{\max} - g(x), & R_{\max} > g(x) \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

式中, R_{\max} 为当前所有代中目标函数的最大值。

将解空间变换中个体对应的三组解分别代入适应度函数, 记 CF_{best} 为当前最佳适应度, P_{best} 为相应最佳个体, 则

$$F_{\text{best}} = \max_{1 \leq i \leq m} (f(X_i), f(Y_i), f(Z_i))$$

若有 $CF_{\text{best}} < F_{\text{best}}$, 则更新当前适应度以及所标记的个体, 使量子位的状态向着最优目标值演化。

3.5 进化处理^[8]

对于种群中各个个体以及各个体上的量子位, 选取当前代全局最优个体的量子位作为旋转轴, 以选取的角度步长进行绕轴旋转, 完成个体更新, 依次可完成种群更新。

设当前一代最优个体 P_{best} 上的第 j 个量子位为 $|\partial_{\text{best},j}\rangle$, 当前一代种群中第 i 个个体 P_i 上的第 j 个量子位为 $|\partial_{i,j}\rangle$ 。基于 Bloch 球面空间内, 当前量子位 $|\partial_{i,j}\rangle$ 以 $q = p_{i,j} \times p_{\text{best},j}$ 矢量为旋转轴向着 $|\partial_{\text{best},j}\rangle$ 进行旋转, 旋转角度为 Δ 时旋转矩阵为

$$R_n(\Delta) = \cos \frac{\Delta}{2} I - j \sin \frac{\Delta}{2} \left(\frac{q\sigma}{\|q\|} \right) \quad (7)$$

式中: I 为单位矩阵; 矩阵 σ 为

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

旋转方法为

$$|\partial_{i,j}\rangle \gg R_n(\Delta) |\partial_{i,j}\rangle$$

旋转角度过大或过小均不易逼近目标量子位, 经分析比较此处取 0.03π 为宜。

3.6 变异处理

本文采用基于 Hadamard 门的量子位变异方法,

此算子定义如下:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

该算子具有的一个重要性质是: Hadamard 算子可以在 Bloch 球面维度内绕旋转轴矢量 n 进行角度为 $\Delta = \pi$ 的旋转。

$$n = (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$$

此处采用忽略目标量子位且步幅较大的对换 X/Y 轴位置旋转, 利于增加所确定各群体的多样性。

4 量子遗传算法与扰动干扰法的协同控制^[9]

量子遗传算法使用概率搜索技术, 特别是在恶劣环境中仍能有效地搜索到最大功率点, 因此, 工作于最大功率点附近时波动剧烈^[10]。为此, 本文采用扰动观察法与遗传算法协同控制。控制系统在初始工作时或外部环境剧烈变化时, 采用基于 Bloch 球坐标的量子遗传算法; 在即将接近最大功率点时采用微步幅的扰动法渐进最优。流程图如图 3 所示。

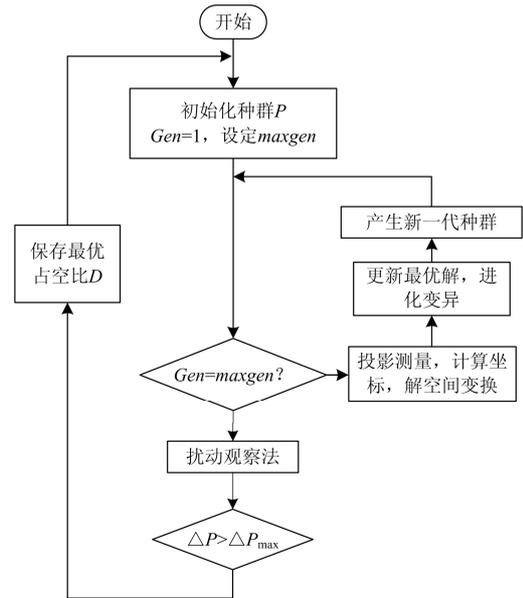


图 3 MPPT 控制流程图

Fig. 3 MPPT control flow graph

基于以上分析建立的 MPPT 控制模型如图 4 所示, 其中量子遗传算法与扰动法协同控制算法子系统如图 5 所示。

本文中各个参量: 种群量 $m=15$, 代数 $GEN=30$, 量子位 $n=8$, 常量 $R_{\max}=2800$, 进化处理时转角步长 $\Delta=0.03\pi$, 占空比步长取 $D\%=0.2\%$ 。

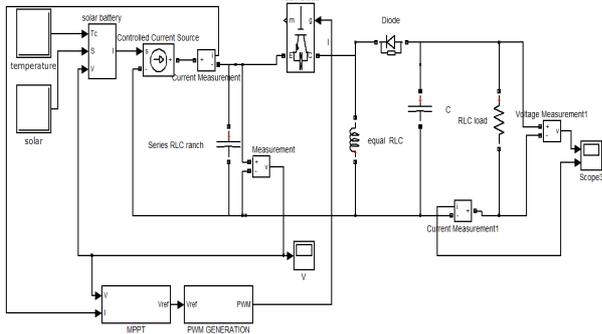


图 4 MPPT 控制 Matlab 仿真模型

Fig. 4 MPPT control Matlab simulation model

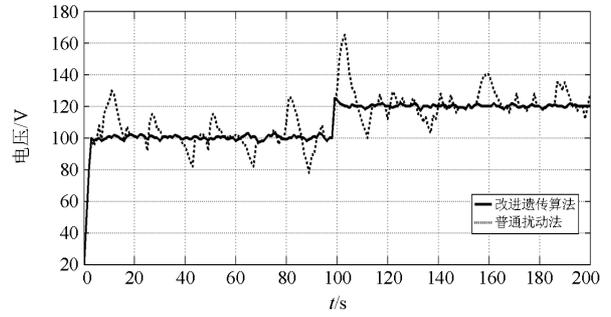


图 6 改进的量子遗传法和普通扰动法电压波形比较

Fig. 6 Comparison of voltage waveforms of improved quantum genetic algorithm and traditional disturbance algorithm

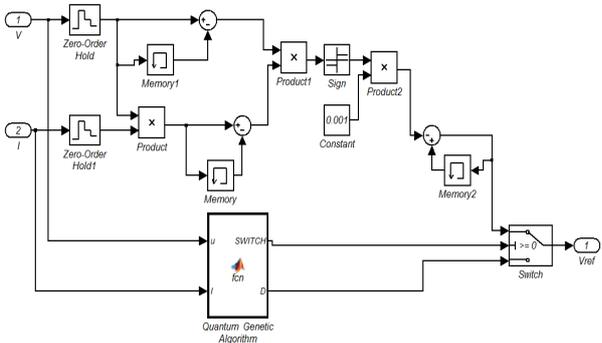


图 5 MPPT 控制遗传算法与扰动法子系统

Fig. 5 MPPT control genetic algorithm and perturbation method subsystem

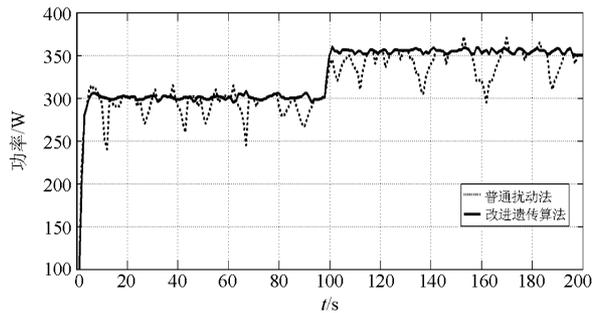


图 7 改进的量子遗传法和普通扰动法功率波形比较

Fig. 7 Comparison of power waveforms of improved quantum genetic algorithm and common disturbance algorithm

5 仿真结果及分析

在光照强度在 100 s 从 500 W/m^3 阶跃变化到 800 W/m^3 且保持外部其他条件不变的工况条件下, 图 6 与图 7 分别为单独干扰法和改进的量子遗传法对 MPPT 控制的电压波形比较与功率波形比较。由图分析可知: 外部光照条件跃变时, 普通扰动法电压和功率的最大超调分别为 33% 和 12% 以内, 改进遗传法电压和功率超调量分别为 8% 和 5% 以内, 且调节时间具有明显时间优势, 此时跟踪性能比单纯的扰动法表现更好。

在外部条件趋于稳定时, 最大功率点在 350 W 左右, 输出电压为 120 V, 普通扰动法的电压量和功率静态误差最大分别为 16% 和 15%, 改进遗传法电压和功率超调量分别为 5% 和 3% 以内, 同时由图可知, 普通扰动法功率波动剧烈, 抗干扰能力差。因此, 改进的遗传法与干扰法相结合的协同控制在跟踪速度、动态响应特性、稳态特性方面具有明显优势。

6 结论

本文提出的基于 Buck-Boost 电路为实时变更负载特性的手段, 采用改进的基于 Bloch 球面量子遗传算法与扰动法相结合的控制算法, 通过对功率管占空比调节实现光伏电池负载特性变更, 进而达到光伏电池最大功率点跟踪的目的。通过仿真实验验证了本文提出的方法具有最优点搜索能力强、静态稳定性好、动态响应快、对外界条件变化的抗扰能力强、能够实现快速稳定跟踪最大功率点的目的等优势, 说明本文提出方法的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 肖俊明, 王东云, 李燕斌, 等. 基于遗传算法的占空比扰动法在 MPPT 中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 43-46.
XIAO Junming, WANG Dongyun, LI Yanbin, et al. Research on a maximum power point tracking with DRP based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 43-46.
- [2] 何龙, 程树英. 基于遗传算法和扰动观察法的 MPPT

- 算法[J]. 现代电子技术, 2009, 32(24): 199-202.
- HE Long, CHENG Shuying. MPPT algorithm based on genetic algorithm and disturbance observation[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(24): 199-202.
- [3] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
- WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [4] HAN K H, KIM J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem[C] // Proc of Congress on Evolutionary Computation. New York, USA: IEEE Press, 2000.
- [5] 李盼池. 基于量子位 Bloch 坐标的量子遗传算法及其应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 985-989.
- LI Panchi. Quantum genetic algorithm based on Bloch coordinates of qubits and its application[J]. Control Theory & Application, 2008, 25(6): 985-989.
- [6] 刘立群, 王志新, 顾临峰. 基于改进模糊法的分布式风光互补发电系统 MPPT 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 70-74.
- LIU Liqun, WANG Zhixin, GU Linfeng. MPPT control based on improved fuzzy method for distributed hybrid wind-solar power generating systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 70-74.
- [7] WILLIAMS C P. Explorations in quantum computing[M]. Second Edition. London, UK: Springer-Verlag, 2011.
- [8] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
- ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [9] 葛虎, 毕锐, 徐志成, 等. 大型光伏电站无功电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 45-51.
- GE Hu, BI Rui, XU Zhicheng, et al. Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 45-51.
- [10] 王冕, 田野, 李铁民, 等. 应用于储能系统的双向 DC-DC 变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
- WANG Mian, TIAN Ye, LI Tiemin, et al. Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.

收稿日期: 2015-03-22; 修回日期: 2015-07-27

作者简介:

姬伟超(1988-), 男, 通信作者, 硕士, 当前研究课题及研究方向为新能源发电及其控制; E-mail: jicaolong@163.com

殷时蓉(1974-), 女, 博士, 副教授, 当前研究课题及研究方向为新能源发电及其控制, 电动汽车控制策略; E-mail: yinsr@126.com

刘朝涛(1968-), 男, 博士, 副教授, 当前研究课题及研究方向为新能源技术, 自动控制工程。

(编辑 魏小丽)