

基于蚁群算法自整定 PID 的风电系统 最大风能追踪研究

孙 伟, 张明伟, 李 婷, 陈 扬, 亢国栋

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对风力发电系统处于欠功率阶段时, 风能利用系数须保持在最大值的问题, 以欠功率阶段的最大风能追踪为研究重点, 对风力机捕获风能的过程进行理论分析, 提出了一种基于蚁群算法自整定 PID 的最大风能追踪控制策略, 利用蚁群算法的全局优化能力优化 PID 的 3 个参数, 给出了该算法的基本思想以及具体实现步骤, 设计了蚁群算法自整定 PID 控制器, 搭建了系统仿真图, 并对其进行相应的仿真分析; 仿真结果表明, 与传统的 PID 控制策略相比, 该控制策略使控制系统具有良好的动态响应能力, 提高了风电系统的控制精度、风能利用率、输出功率, 实现了机组的优化运行。

关键词: 风力发电; 最大风能追踪; 蚁群算法; 自整定 PID

Study on Maximum Wind Energy Tracking Based on Ant Colony Optimization of Self-tuning PID

Sun Wei, Zhang Mingwei, Li Ting, Chen Yang, Kang Guodong

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mine and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of problem that power coefficient must keep maximum value when wind power system is in underpower stage, based on the maximum wind power tracking in under power stage as the research key, analysed the theory on the process of wind turbine to capture wind energy. The paper proposed a control strategy of maximum wind power tracking based on ant colony optimization of self-tuning PID, used global optimization capability of ant colony algorithm to optimize three parameters of PID. The basic idea of the algorithm and the specific implementation steps was given and self-tuning PID controller based on ant colony algorithm was designed. Build the system simulation diagram to do corresponding simulation analysis. The simulation results shows that the proposed control strategy made the control system has good dynamic performance, improved control accuracy, wind energy utilization rate and output power. Which realized optimal running of wind turbines.

Keywords: wind power generation; maximum wind energy tracking; ant colony algorithm; self-tuning PID

0 引言

大型风力机组运行过程大多分为 3 个阶段: 启动阶段、欠功率阶段(最大风能追踪阶段)和额定功率保持阶段。在欠功率阶段, 风速的大小在起动风速与额定风速之间, 其输出功率在一定的范围内而不会超出额定限度。这种情况下, 保持风机运行在最佳的叶尖速比状态, 使风机的输出功率最大化是我们更关心的问题^[1-3]。为此, 文章以欠功率状态下的最大风能追踪为研究重点, 提出了一种基于蚁群算法自整定 PID 的最大风能追踪控制策略, 以达到最大风能利用率、风轮输出功率最优化。

1 基于蚁群算法自整定 PID 的最大风能追踪控制策略

风能到电能的转换过程中, 首先是风的动能转换成风轮旋转的机械能, 经过齿轮箱增速后驱动发电机, 机械能再转换为电能。对于并网型风力发电机组来说, 其发出的电能还需要输入到电网^[4]。风能的转换过程可用数学公式描述。

风轮处的风功率(风能的大小) P_v 为:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中: v 是风速; R 为叶轮半径; ρ 为空气密度。

风轮从风中捕获的机械功率 P_m 可表示为:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2)$$

其中: $C_p(\lambda, \beta)$ 是风能利用系数, 是一个关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数, 但在最大风能追踪阶段, 桨距角一般不变, 因此 C_p 仅由叶尖速比 λ 决定。

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \pi n R / (30 v) \quad (3)$$

式中, n 为叶轮旋转速度; ω 为叶轮旋转角速度。

最大风能追踪方法有 3 种: ①功率反馈控制。该方法控制原理简单, 但最大功率曲线需要事先通过实验或计算确定下来, 本身就存在一定误差, 同时随着风力发电机组运行时间的延长, 基于各种部件的磨损等不确定的因素会改变机组的运行特性, 严重影响控制精度。②登山搜索控制。登山搜索控制也是根据保持风力发电系统运行在最大功率点的思想, 但无需检测实时风速, 克服了一般算法中风速检测误差较大的缺点, 但该方法也需要依赖于系统的最大功率曲线且其对小惯性风力发电机组的控制效果较好, 对大惯性风力发电机组的控制效果一

般, 甚至会出现失效的现象。③最佳叶尖速比控制。其控制目的是随着风速的变化始终保持风力机运行在最佳最佳叶尖速比, 该方法实时性良好, 在风速变化时风电机组能够快速响应; 控制原理简单, 比较容易实现, 同时需要处理的数据量也相对较少。

在叶尖速比控制的思想下, 对于一台确定的风力机组, 在定桨距情况下, 由于存在最佳叶尖速比 λ_{opt} , 则必然存在一个最佳的风能利用系数 C_{pmax} 。

故本文将基于蚁群算法自整定 PID 的最大风能追踪控制策略定为风能的利用率控制, 为了便于仿真实现, 并且以验证控制策略为主要目的, 仅从风力机控制部分出发, 以叶轮角速度直接调节的方式改变风能最大利用系数^[5]。

2 基于蚁群算法自整定 PID 控制器设计

基于蚁群算法的 PID 参数优化的基本思想为: 首先将 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 组合在一起作为蚁群中的一只蚂蚁, 在搜索空间内, 每一只蚂蚁根据其他蚂蚁释放出来的信息素, 不断地调整方向和路径, 一步步向目标逼近, 直到找到最优的目标路径, 最优的目标即为 PID 控制器的最优参数^[6]。

蚁群算法自整定 PID 控制器 (简称 ACO-PID 控制器) 的实质是利用蚁群算法参数寻优特性, 结合 PID 的特性, 形成一个具有高灵敏度和稳定的控制系统^[7-8]。

ACO-PID 控制器的控制量为风能利用系数 C_p , 输出为风轮的角速度 ω 。控制系统结构如图 1。

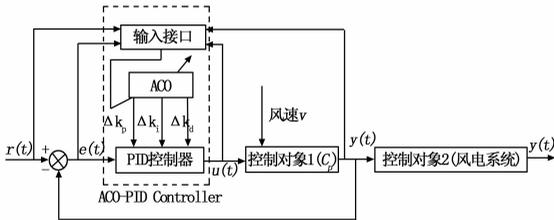


图 1 ACO-PID 控制系统结构图

图 1 中, $r(t)$ 为系统的给定值; $y(t)$ 为系统的输出值; e 为 C_p 给定值与被控对象输出值之间的差值; 蚁群优化算法作为系统的辨识器, 通过计算每只蚂蚁在寻优过程中所对应的 K_p 、 K_i 、 K_d 的值, 并根据这些值与系统的输出响应值, 计算出系统的目标函数值 (动态性能综合评价函数), 选择目标函数值最优的一组 K_p 、 K_i 、 K_d , 并及时更新调整 PID 控制器的参数, 不断反复, 最终得到最优的 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。

ACO-PID 控制的算法步骤如下^[9]。

1) 生成节点:

首先定义一个平面 XOY, 横坐标 $X_1 \sim X_5$ 、 $X_6 \sim X_{10}$ 、 $X_{11} \sim X_{15}$ 分别表示 PID 控制器的待优化参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的位数, 纵坐标表示每一位数对应的系数, 范围为 $0 \sim 9$ 。

2) 表示参数:

定义一个数组 $Path_k(k, :)$, 该数组表示蚂蚁 k 的爬行路径, 设蚂蚁数目为 $m, k = 1, 2, \dots, m$ 。

$$Path_k(k, :) = [y_{1,k} \dots y_{j,k} \dots y_{15,k}] \quad (4)$$

式中, $y_{j,k}$ 表示蚂蚁 k 在爬行路径中对应横坐标 j 的纵坐标值, $j = 1, 2, \dots, 15$, 图 2 为蚂蚁 k 的爬行节点路径示意图。

可将参数 K_p 、 K_i 、 K_d 表示为:

$$\begin{cases} K_p = 10y_{k,1} + y_{k,2} + 0.1y_{k,3} + 0.01y_{k,4} + 0.001y_{k,5} \\ K_i = y_{k,6} + 0.1y_{k,7} + 0.01y_{k,8} + 0.001y_{k,9} + 0.0001y_{k,10} \\ K_d = y_{k,11} + 0.1y_{k,12} + 0.01y_{k,13} + 0.001y_{k,14} + 0.0001y_{k,15} \end{cases} \quad (5)$$

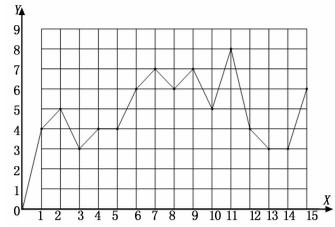


图 2 蚂蚁 k 爬行节点路径示意图

3) 初始化:

从时间 $t = 0$ 时刻释放蚂蚁, 蚂蚁便开始寻优, 设定循环变量 $N = 0$, 最大循环次数为 N_{max} 。

4) 路径选择:

在 $t(t = 1, 2, \dots, 4n)$ 时刻, 蚂蚁 k 从节点 i 移动到节点 j 的概率为^[10]:

$$p_{ji}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in allowed \\ 0 & else \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻节点 (i, j) 上的信息素; $allowed$ 为蚂蚁 k 在下一刻允许选择的路径节点; $\eta_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 (i, j) 上的启发函数, 其表达式如下。

$$\eta_{ij}(t) = \frac{9 - |y_{(i,j)} - y_{(i,j)}^*|}{n} \quad (7)$$

式中, $y_{(i,j)}$ 为节点 (i, j) 的纵坐标值; $y_{(i,j)}^*$ 为上一次循环最优路径的纵坐标值^[9]。

5) 计算目标函数:

根据蚂蚁 k 在循环中走过的路径, 可计算出对应的参数 K_p 、 K_i 、 K_d , 根据计算结果对系统进行仿真, 设定系统 e_{min} 允差为 2%, 再根据仿真的结果计算系统的动态性能综合评价函数 (即目标函数值), 表达式为:

$$F_k = \tau \cdot \sigma + (1 - \tau) \cdot t_s \quad (8)$$

式中, σ 表示系统的超调量; τ 表示加权系数, 其取值范围为 $[0, 1]$; t_s 表示系统的稳定时间; 如果目标函数值越小, 则表示系统的性能越好。设目标函数 F 的加权系数 τ 为 0.6。在 ACO-PID 控制器设计中, 选择被控对象为风能利用系数 C_p , 系统的超调与稳定时间都按 C_p 的变化来取值。

通过对蚂蚁寻优后的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 对系统仿真, 在蚂蚁所爬行的路径中, 对应最小目标函数值 $\min[F_k(N_{max})]$ 的路径作为本次循环的最优爬行路径, 并且将最优 K_p 、 K_i 、 K_d 的值存入 $y_{(i,j)}^*$ 。

6) 更新信息素:

$$\tau_{ij}(N) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(N - 1) + \Delta\tau_{ij}(N) \quad (9)$$

$$\Delta\tau_{ij}(N) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(N) \quad (10)$$

式中, ρ 表示信息素挥发系数; $\Delta\tau_{ij}^k(N)$ 表示第 k 只蚂蚁本次循环中在节点 (i, j) 上的信息素增量, 由式 (11) 表示。

$$\Delta\tau_{ij}^k(N) = \begin{cases} \frac{Q}{E_k(N)}, & \text{若蚂蚁 } k \text{ 在 } t \text{ 时刻循环经过点 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

按照式 (9)、(10)、(11) 计算并调整各路径节点上的信息素含量。

7) 循环过程 $N \leftarrow N + 1$:

如果循环次数 $N < N_{max}$ ，返回步骤 4)。其流程图如图 3。

3 仿真结果分析

在 Matlab/Simulink 环境下搭建基于 ACO-PID 控制器的风力发电机组模型，并与常规 PID 模型进行比较。如图 4。

主要参数设置如下：蚂蚁数量 $m = 50$ ，信息素强度 $Q = 10$ ，信息启发因子 $\alpha = 2.5$ 、期望启发因子 $\beta = 10$ 、信息素挥发系数 $\rho = 3$ 。

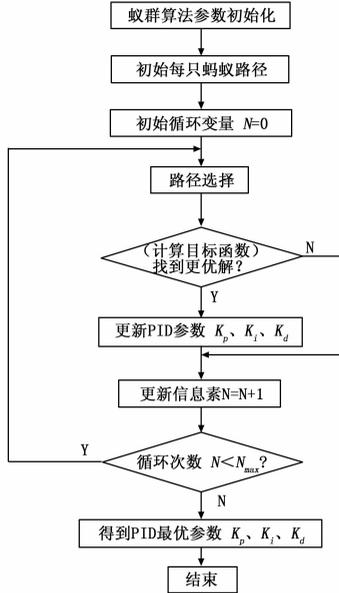


图 3 蚁群算法优化 PID 参数流程图

循环次数 $N = 20$ ，系统采样时间 0.001 s ，系统期望允差为 2% 。考虑具体的控制量为具有非线性风能利用系数 C_p ，本文对其在阶跃风速和随机风速情况下进行仿真。

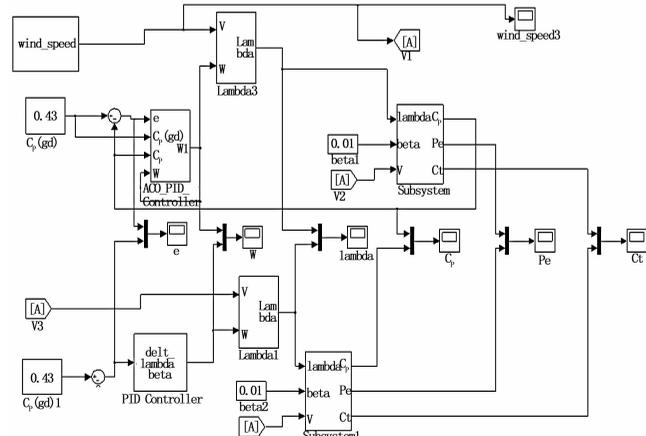


图 4 ACO-PID 与 PID 控制策略的比较仿真图

1) 阶跃风速下：

设定初始风速为 6.5 m/s ，在 6 s 处阶跃至 8.5 m/s ，并给定风能利用系数初值为 0.43 ，风能利用系数输出响应曲线如图 5。

由图 5 分析可知，经过蚂蚁 k 多次循环后，基于蚁群整定下的 PID 控制与常规 PID 控制相比，两者的输出风能利用率误差都很小，但是在 ACO-PID 控制下，系统响应的上升时间有所减小，这说明通过 ACO-PID 控制下的系统比常规 PID 控

制系统具有更加良好的动态响应能力。另外在调节时间内基于 ACO-PID 控制下的最大风能利用率明显高于常规的 PID 控制，在 6 s 处风速变化时，可以看出在 ACO-PID 控制下的风能利用率也明显高于常规 PID 控制，这有利于风能的充分吸收。

2) 随机风速下：

对于实际中的风力发电系统，风速一般都是变化不定的，为此，再次设定输入风速为随机风，系统的输入输出曲线如图 6。

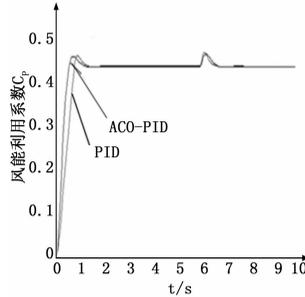


图 5 风能利用系数曲线

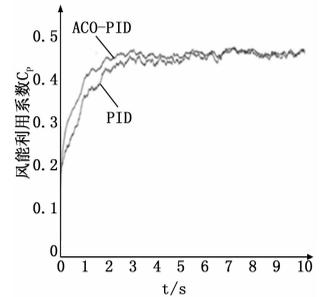


图 6 ACO-PID 与 PID 风能利用系数仿真结果

再次对图 6 所示的 ACO-PID 控制策略和常规 PID 控制策略的仿真结果进行比较分析可知，在同样的风速下，ACO-PID 控制策略的风能利用率 C_p 要大于常规的 PID 控制策略，这有利于风能的吸收利用。

4 结语

针对风电机组在欠功率状态下的运行特性，设计了基于蚁群算法的 PID 控制器，运用蚁群算法对 PID 控制器的 3 个参数进行在线修正，仿真结果表明，这种控制策略在风能的吸收能力上要优于常规的 PID 控制策略。

参考文献：

- [1] 胡丽萍. 变速恒频风电系统最大风能追踪控制研究 [D]. 北京：华北电力大学，2010.
- [2] 李明光，李鹏远，谢雯洁，等. MPPT 算法与输入输出反馈线性化控制在光伏发电系统中的应用 [J]. 工矿自动化，2013，39 (1)：78-83.
- [3] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制 [J]. 电力系统自动化，2003，27 (20)：62-67.
- [4] 刘其辉，贺康益，卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制 [J]. 中国电机工程学报，2004，30 (3)：6-11.
- [5] 刘杰，杨海群. 小波神经网络 PID 在风电系统最大功率点跟踪中的应用研究 [J]. 工矿自动化，2013，39 (12)：73-76.
- [6] Lu Hung Ching, Liu Hsi Kuang, Yang Lian Fue. PID controller parameter estimator using ant colony system [J]. IEEE. 2013, 319-324.
- [7] 杨金明. 基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制 [J]. 太阳能学报，2004，25 (4)：525-529.
- [8] 周建新. 基于蚁群算法 PID 神经网络的热连轧活套系统自适应解耦控制 [J]. 四川大学学报，2010，47 (2)：322-326.
- [9] 郭玉，李士勇. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 计算机测量与控制，2009，17 (1)：187-189.
- [10] 叶立伟，郑葆葆. 蚁群算法中参数 α, β, ρ 设置的研究——以 TSP 问题为例 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版)，2004，29 (7)：597-601.