

数据驱动的风能转换系统最优控制

徐莉莉 纪志成

(江南大学电气自动化研究所, 无锡, 214122)

摘要:风能转换系统具有很强的非线性,为了解决风能转换系统的建模困难问题,实现额定风速以下风能捕获率的最大化,根据数据驱动控制理论,在风能转换系统中采用数据驱动的最优控制方法。利用风能转换系统的输入输出数据获取马尔可夫参数,并构造一个数据驱动的控制状态观测器,通过差分Riccati方程的闭合解设计出最优反馈控制器。仿真结果表明,采用数据驱动的最优控制方法,功率系数和叶尖速比都可以维持在最优值附近,有效地实现额定风速以下风能转换系统的最大风能捕获。

关键词:风能转换系统;数据驱动;最优控制;马尔可夫参数

中图分类号: TM341

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)01-0129-05

Data-Based Optimal Control for Wind Energy Conversion System

Xu Lili, Ji Zhicheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi, 214122, China)

Abstract: Wind energy conversion system (WECS) is nonlinear. In order to deal with the difficulties in modeling of WECS and maximize the wind energy capture ratio below the rated wind speed, the data-based optimal control is adopted in WECS based on data-driven control theory. The Markov parameters are obtained and a data-driven controller state observer is constructed by using input and output data of WECS. Then an optimal feedback controller is designed through the closed form of difference Riccati equation. Simulation results indicate that under the rated wind, the data-driven optimal control can effectively implement maximum energy capture by maintaining the power coefficient and the tip speed ratio around their optimal values.

Key words: wind energy conversion system; data-driven; optimal control; Markov parameters

风能是一种清洁的可再生能源,全球范围内分布广泛。风力发电不依赖矿物能源,没有燃料价格风险,发电成本稳定,也没有包括碳排放等环境成本。在能源短缺和环境恶化的今天,风力发电发展迅速,并逐渐成为许多国家可持续发展战略的重要组成部分^[1]。

随着现代控制理论的飞速发展,许多先进的控制方法如滑模控制、反馈线性化控制、模糊控制、非线性 H_∞ 鲁棒控制等^[2-4]已经被相继用于风能转换系统的控制中,并获得了令人满意的控制效果;但

是现有的控制方法都是在建立模型基础上的控制策略,模型的质量直接影响控制算法的优劣。由于空气动力学的不确定性以及风能转换系统本身的非线性、时变特性,使得建立精确的风能转换系统数学模型非常困难,既消耗大量的时间,又不可避免地存在未建模动态、固有误差和不确定因素。因此,数据驱动的控制技术研究应运而生,在不需要已知系统模型的情况下仅仅在线利用系统的输入输出数据进行控制器的设计,可以解决建模困难的复杂不确定系统的实际控制问题^[5]。

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域)(20110093130001)资助项目;教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0437)资助项目。

收稿日期: 2011-05-03; **修订日期:** 2011-07-08

通讯作者: 纪志成,男,教授,博士生导师,1959年生, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn。

目前,数据驱动控制技术^[5-7]已经得到国内外控制界的高度重视,取得了丰硕的研究成果,成功运用于化工、电力、轻工等领域,但还尚未应用到风力发电系统中。因此本文运用数据驱动的最优控制方法,在数学模型未知的情况下实现风能转换系统的优化控制目标。

本文以6 kW的变速恒频双馈风力发电机组为对象,应用数据驱动的最优控制方法实现额定风速以下风能捕获率的最大化。该方法利用风能转换系统的输入和输出数据获取马尔可夫参数,代入差分Riccati方程的闭合解,得到数据驱动的最优控制增益;同时利用输入输出数据构造状态观测器估计控制器的状态向量,设计出最优反馈控制器。仿真结果验证了该控制算法的有效性。

1 问题描述

1.1 风能转换系统的基本结构和原理

风能转换系统主要由3部分组成:气动传动子系统,电磁子系统,电网连接子系统。系统基本结构如图1所示。气动子系统通过风轮机捕捉风能,将风能转化为机械能;风轮机转动,经传动系统传递至发电机;电磁子系统在发电机轴上实现机械能转化为电能;经过电网连接子系统整流逆变后并入电网^[3]。

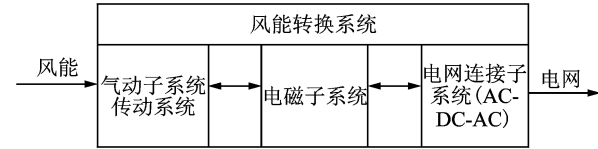


图1 风能转换系统结构图

1.2 最优控制问题

在额定风速以下,风机桨叶节距角 $\beta=0^\circ$;根据贝兹理论,风轮捕捉的风能功率为

$$P_{wt} = 0.5\pi\rho R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad (1)$$

式中: P_{wt} 为风轮捕捉的风能功率; ρ 为空气密度; R 为风轮机叶片半径; v 为风速; $C_p(\lambda)$ 为功率系数,它表示风能的功率转换效率,与叶尖速比 λ 存在一定的非线性关系。而叶尖速比为风轮叶尖线速度与风速之比,即

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_l}{v} \quad (2)$$

式中 Ω_l 为风轮机的机械角速度。

机械能由传动系统传递至发电机转子,发电机转子转速 $\Omega_h = i \cdot \Omega_l$, i 表示齿轮变速比,因此叶尖速比和发电机转速存在如下关系

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_h}{i \cdot v} \quad (3)$$

当风速小于额定风速时,风能转换系统吸收的风能小于发电机的额定功率,发电机的功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化。发电机的电磁转矩通过传动系统会影响风轮机的转速,即影响叶尖速比的大小。因此通过控制电磁转矩参考值 Γ_G^* 来跟踪最佳的功率系数曲线以获得最大的风能。

风能的捕获率最大,即功率系数 C_p 达到最大值,此时叶尖速比 λ 达到最佳值 λ_{opt} ,控制目标的数学指标表述为

$$J = \varepsilon \left\{ \int_0^\infty (\lambda(t) - \lambda_{opt})^2 dt \right\} \rightarrow \min \quad (4)$$

2 数据驱动的最优控制方法

2.1 数据驱动的最优控制描述

根据风能转换系统的优化控制目标,为了实现风能的捕获,采用数据驱动的最优控制方法,选择系统的控制输入和测量输出为

$$u = \Gamma_G^* \quad y = \lambda_{err} = \lambda - \lambda_{opt} \quad (5)$$

数据驱动的风能转换系统的LQ最优控制为求解控制函数

$$u(k) = f[\{M_i\}_1^N, Q, R, u(k-1), y(k-1)] \quad (6)$$

使得性能指标函数

$$J = \varepsilon \{ y(N)^T Q y(N) + \sum_{k=0}^{N-1} (y(k)^T Q y(k) + u(k)^T R u(k)) \} \quad (7)$$

达到最小值。即通过叶尖速比 λ 与最佳值 λ_{opt} 之间的差值 λ_{err} 准确逼近零,实现额定风速以下风能捕获率的最大化。其中 Q 为半正定对称权矩阵, R 为正定对称权矩阵, $M_i = CA^{(i-1)}B$, $i=1,2,\dots,N$ 为风能转换系统的马尔可夫参数。

2.2 马尔可夫参数的获取

在风能转换系统的参数 A, B, C 未知时,本文利用在线的输入输出数据来获取马尔可夫参数 M_i , $i=1,2,\dots,N$ 。将从 $\Gamma_G^*(k)$ 和 $\lambda_{err}(k)$ 开始的 p 步输入和输出数据构成列向量 $u_p(k)$ 与 $y_p(k)$

$$u_p(k) = [\Gamma_G^*(k) \quad \dots \quad \Gamma_G^*(k+p-1)]^T \quad (8)$$

$$y_p(k) = [\lambda_{err}(k) \quad \dots \quad \lambda_{err}(k+p-1)]^T \quad (9)$$

将输入输出数据列向量按式(10,11)的形式构成矩阵 Y 和 V ,并且可得到输入输出数据之间的关系方程(12)^[8]

$$Y = [y_p(k+p) \quad y_p(k+p+1) \quad \dots \quad y_p(k+p+L)] \quad (10)$$

$$V = \begin{bmatrix} u_p(k) & u_p(k+1) & \cdots & u_p(k+L) \\ u_p(k+p) & u_p(k+p+1) & \cdots & u_p(k+p+L) \\ y_p(k) & y_p(k+1) & \cdots & y_p(k+L) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[P_1 \quad T_p \quad P_2] = YV^T(VV^T)^+ \quad (12)$$

式中:

$$P_1 = O_p(B_p + MT_p) \quad P_2 = -O_pM \quad M = -A^pO_p^+$$

$$B_p = [A^{p-1}B \quad \cdots \quad AB \quad B]$$

$$O_p = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{p-1} \end{bmatrix}$$

$$T_p = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ CB & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ CAB & CB & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-2}B & CA^{p-3}B & \cdots & CB & 0 \end{bmatrix}$$

通过解式(12)可求出 P_1 、 P_2 和矩阵 T_p ,当 $p=N+1$ 时,风能转换系统的马尔可夫参数 $M_i = CA^{(i-1)}B, i=1,2,\dots,N$ 可从 T_p 中提取出来。

2.3 数据驱动的最优控制律

对于给定马尔可夫参数的风能转换系统,引入差分 Riccati 方程的闭合解,则符合性能指标函数式(7)的数据驱动的最优控制器为^[9]

$$u(k) = G(k)x_c(k) \quad (13)$$

式中: $G(k)$ 为数据驱动的最优控制增益; $x_c(k)$ 为数据驱动的最优控制器的状态向量。

$$G(k) = - (R + \theta(k+1))^T \Omega(k+1) \cdot \theta(k+1)^{-1} \theta(k+1)^T \Omega(k+1) \quad (14)$$

$$x_c(k) = C(k+1)Ax(k) = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N-k} \end{bmatrix} x(k) \quad (15)$$

式中

$$\theta(k+1) = [M_1 \quad M_2 \quad \cdots \quad M_{N-k}]^T$$

$$\Omega(k+1) = Q(k+1) - Q(k+1)S(k+1)(R(k+1) + S(k+1)^T Q(k+1)S(k+1))^{-1} S(k+1)^T Q(k+1)$$

$$S(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ M_1 & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_2 & M_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ M_{N-k-1} & M_{N-k-2} & \cdots & M_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(S(N) = 0, \quad k = N - 1)$$

$R(k+1) = \text{diag}(R, R, \dots, R)$ 和 $Q(k+1) = \text{diag}(Q, Q, \dots, Q)$ 均为 $N-k$ 维对角矩阵。

在未知风能转换系统模型的情况下, A, B, C 和状态向量 $x(k)$ 均未知,最优控制增益通过马尔可夫参数代入差分 Riccati 方程的闭合解来获得;状态向量 $x_c(k)$ 的估计则采用新的方法仅利用输入输出数据构造状态观测器。

状态向量可利用输入输出向量来估计

$$x(k) = (B_p + MT_p)u_p(k-p) - My_p(k) \quad (16)$$

当 $p=N+1$ 时,将式(16)代入式(15)整理后得

$$\hat{x}_c(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{N-k} \\ 0_k \end{bmatrix} O_p x(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{N-k} \\ 0_k \end{bmatrix} (P_1 u_p(k-p) + P_2 y_p(k-p)) \quad (17)$$

$x_c(k)$ 则是 $\hat{x}_c(k)$ 中第2行到第 $N-k+1$ 行的列向量。因此通过输入输出向量及 P_1, P_2 就可以估计出数据驱动的最优控制器的状态向量。

3 仿 真

本文提出的最优控制方法是在未知风能转换系统模型的情况下,直接利用在线的输入输出数据获取系统的马尔可夫参数,并构造数据驱动的状态观测器,设计出最优反馈控制器,使得叶尖速比 λ 准确追踪最佳值 λ_{opt} ,实现额定风速以下风能的最大捕获。数据驱动的风能转换系统的最优控制结构如图2所示。

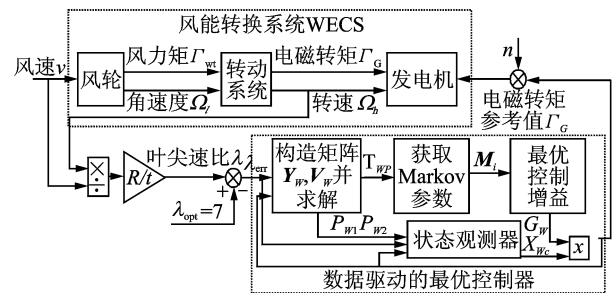


图2 数据驱动的最优控制结构图

在仿真研究系统性能时需要风能转换系统的模型产生输入输出数据。在MATLAB/Simulink中搭建功率为6 kW的变速恒频双馈风力发电机组模型,模型的主要仿真参数选取如下:桨叶半径2.5 m,空气密度1.25 kg/m³,额定风速10.5 m/s,

传动比 6.25, 能量转换效率 0.95, 传动系统转动惯量 3.6 kg/m^2 , 电磁转矩最大值 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$, 功率因素 $C_p(\lambda)$ 由下列多项式形式给出

$$C_p(\lambda) = -4.54 \times 10^{-7} \times \lambda^7 + 1.3027 \times 10^{-5} \times \lambda^6 - 6.5416 \times 10^{-5} \times \lambda^5 - 9.7477 \times 10^{-4} \times \lambda^4 + 0.0081 \times \lambda^3 - 0.0013 \times \lambda^2 + 0.0061 \times \lambda \quad (18)$$

当 $\lambda = \lambda_{\text{opt}} = 7$ 时, $C_p(\lambda)$ 达到最大值 0.476^[10]。

用 S-Function 编制数据驱动的最优控制器。在控制器加入风能转换系统运行之前, 先采集输入输出数据构成 Y 和 V 。采集数据阶段, 数据驱动的控制器输出禁止, 系统处于开环条件。

开环阶段参数选取: 采样时间 $T = 0.005 \text{ s}$, 控制输入端通入幅值 ± 20 的随机噪声信号 n , 在每个采样时刻采集输入输出数据, 采样 0.5 s 存取数据。

控制器运行阶段参数选取: 采样时间 $T = 0.005 \text{ s}$, $N = 8$, $p = N + 1 = 9$, $L = 3p + 10 = 37$, $Q = 1$, $R = 0.0001$ 。

根据本文提出的控制器算法可以得出首层马尔可夫参数为

$$\{M_i\}_1^8 = \{-0.0007, -0.0019, -0.0029, -0.0036, -0.0042, -0.0046, -0.0050, -0.0053\}$$

由输入输出向量及 P_1, P_2 估计状态向量参与计算求得控制量, 得到新的输入输出作为已知更新马尔可夫参数和状态向量, 获取新的输入输出序列, 依次循环。通过该控制方法使得系统输出 λ_{err} 由 -7 快速向零值靠近, 在 $t = 0.25 \text{ s}$ 后随着风速变化基本趋于稳定, 准确逼近零值, 如图 3 所示。

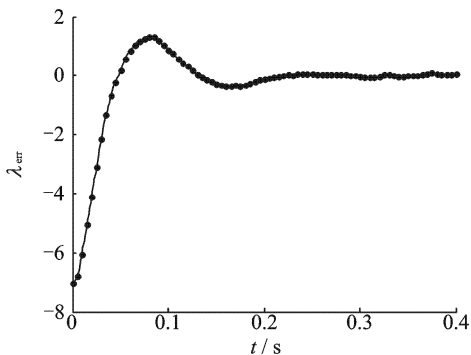


图3 系统输出 λ_{err} 仿真曲线

仿真 100 s 后风速、功率系数和叶尖速比的仿真波形分别如图 4~6 所示。分析仿真波形图可知: 在本文所采用的数据驱动的最优控制方法下, 功率系数最大值为 0.4763。当风速在 $5 \sim 8 \text{ m/s}$ 范围内随机波动时, 叶尖速比始终逼近最优值 7, 功率系数

在 $0.4745 \sim 0.4763$ 小范围波动, 达到了较好的控制效果。仿真结果表明: 在额定风速以下, 数据驱动的最优控制器能够有效地实现风能转换系统的最大风能捕获。

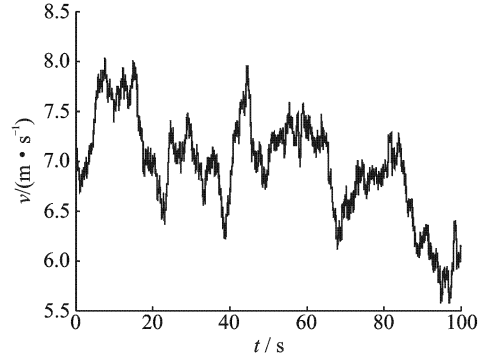


图4 风速 v 仿真曲线

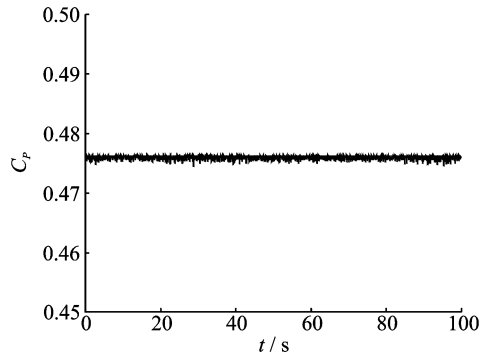


图5 功率系数 C_p 仿真曲线

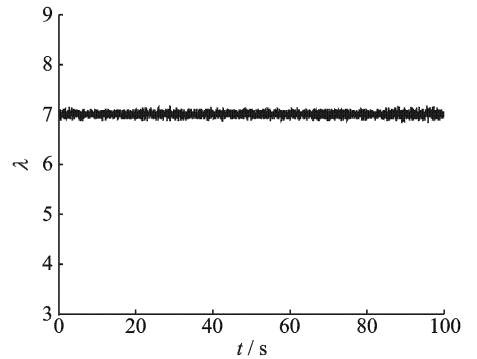


图6 叶尖速比 λ 仿真曲线

4 结束语

本文针对额定风速以下的风能转换系统的优化控制问题, 在未知系统模型的情况下仅仅利用系统的输入输出数据, 通过差分 Riccati 方程的闭合解设计出最优反馈控制器, 克服风能转换系统中模型参数变化和非线性等不确定因素的问题。仿真结果表明: 在额定风速以下, 数据驱动的最优控制能够获得逼近最优的功率系数, 有效地获取风能转换系统的最大风能。

参考文献:

- [1] 尹明, 葛旭波, 王成山, 等. 我国风电大规模开发相关问题探索[J]. 中国电力, 2010, 43(3): 59-62.
Yin Ming, Ge Xubo, Wang Chengshan, et al. Analysis of issues about China's large-scale wind power development [J]. Electric Power, 2010, 43(3): 59-62.
- [2] Bianchi F D, Battista H D, Mantz R J. Wind turbine control systems[M]. London: Springer, 2007: 65-72.
- [3] Tang C Y, Guo Y, Jiang J N. Nonlinear dual-mode control of variable-speed wind turbines with doubly fed induction generators[J]. Control System Technology, 2010, 18(6): 1-13.
- [4] 张先勇, 吴捷, 杨金明, 等. 额定风速以上风力发电机组的恒功率 H_∞ 鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 321-328.
Zhang Xianyong, Wu Jie, Yang Jinming, et al. H-infinity robust control of constant power output for the wind energy conversion system above rated wind [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 321-328.
- [5] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.
Hou Zhongsheng, Xu Jianxin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.
- [6] Barlow J S. Data-based predictive control with multiple prediction step[C]//American Control Conference, New York: IEEE, 2010: 5513-5519.
- [7] Markovsky I, Rapisarda P. Data-driven simulation and control [J]. International Journal of Control, 2008, 81(12): 1946-1956
- [8] Aangenent W, de Jager B, Steinbuch M. Data-based optimal control[C]//American Control Conference. New York: IEEE, 2005: 1460-1465.
- [9] Li Pingkang, Li Bei, Du Xiuxi. A nonparametric model-based LQG control algorithm [C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, New York: IEEE, 2006: 596-600.
- [10] Munteanu I, Brarcu A I, Antonic C N, et al. Optimal control of wind energy systems[M]. London: Springer, 2008: 140-157.