

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.03.008

# 应用 Stateflow 技术的风电机组主控系统仿真

韩贝贝, 刘斌, 吴文

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了简化风电机组主控系统的仿真流程, 通过对风电机组各运行状态下控制策略的理论分析, 结合 Simulink/Stateflow 技术的仿真原理, 建立了风电机组主控系统的仿真模型。该模型可以根据输入数据做出判断, 输出相应的控制信号到 Simulink 中, 实现了主控系统在不同状态对象间运行状态的转换。仿真结果表明: 该模型可以根据给定的输入数据, 输出与风电机组控制策略相一致的控制信号, 验证了该仿真方法的有效性与合理性。

**关键词:** 风力发电; 主控系统; Stateflow 仿真

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)03-0041-05

## Simulation of Master Control System of Wind Turbine Generator with Stateflow Technology

Han Beibei, Liu Bin, Wu Wen

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In order to simplify the simulation process of wind turbine master control system, the simulation model of control system was established with Simulink/Stateflow technology based on the theoretical analysis of control strategy of the operating state of the wind turbine. The model can make a judgment according to the input data, output control signals into Simulink and achieve the master control system operating state transformation among the different states. Simulation shows that with given input data, the model output control signals consistent with those of wind turbine control strategy, and verifies the effectiveness and reasonableness of the simulation method.

**Keywords:** wind power generation; master control system; Stateflow simulation

## 0 引言

随着世界经济的高速发展, 人们对传统的煤炭、石油、天然气等不可再生资源的消耗日益增加, 随之造成的环境问题也越来越严重。为了缓解世界能源匮乏、能源利用与环境保护之间的矛盾, 世界各国都鼓励开发新能源, 如太阳能、风能、海洋能等, 并相应地制定了一系列促进新能源发展和保护的政策。

风能是一种安全、无污染、可再生的自然能源, 对生态无破坏, 环保效益和生态效益良好, 对人类社

会可持续发展具有重要意义, 是未来重要的清洁能源之一。它取之不尽、用之不竭, 对于缓解能源匮乏问题具有非常重要的意义。近年来, 随着我国大力推广利用新能源, 特别是风能开发利用给予了高度重视, 风力发电技术不断成熟, 风电机组单机容量正朝着大功率等级发展。目前, 已出现单机容量为 3 MW 左右的风电机组, 并得到广泛使用<sup>[1]</sup>。

由于风力发电受所处环境影响较大, 其输出功率随温度、风速、季节等自然条件变化而变化, 因

收稿日期: 2015-03-06

作者简介: 韩贝贝(1989-), 男, 河南洛阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力网络自动化技术及其应用,

E-mail: 1181292438@qq.com

此,如何充分利用风能以及保障风电机组与系统间的稳定运行是风力发电中需解决的重要问题。而风电机组主控系统是解决风力发电稳定运行的重要环节,也是风力发电系统的核心部件。风电机组主控系统常采用可编程控制器,但对于大规模、逻辑控制关系复杂的控制系统而言,该方法编程难度大,准确性不高,难以满足控制系统的安全性要求。因此,本文将 Stateflow 模块化应用到风电机组控制系统设计中,通过将状态对象和事件的结合,来实现风电机组主控系统在不同状态下的转换。

## 1 风电机组控制系统结构及其控制策略介绍

### 1.1 系统结构

不同厂家生产的风电机组结构不同。但从实现功能的角度,风电机组控制系统包括:人机界面、主控系统、交流控制系统、变桨距控制系统、偏航控制系统等,如图1所示。主控系统可以连接到每个子控制系统,并对其进行调节,相当于整个系统的“大脑”。通过人机界面可以监控系统关键设备的运行状态,该状态经过信息处理后,送至主控系统。当风电机组出现故障时,主控系统下发控制指令,送至底层,底层的各种控制系统接受操作指令,进而完成主控系统对风电机组的控制,最后将其状态和数据反馈给人机交互界面。该控制过程经过光纤、以太网等通讯介质完成<sup>[2]</sup>。

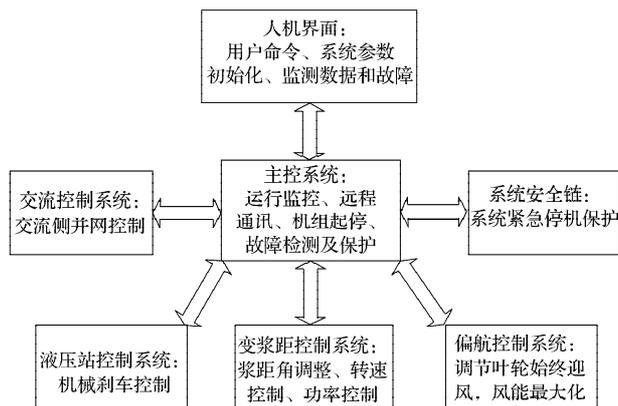


图1 风电机组控制系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of wind turbine control system

### 1.2 控制策略

风电机组中的风力发电机组是将风能转化为电能的设备,即利用风力带动风机叶片旋转,将风能转换为轮毂上的机械能,再通过齿轮箱增速驱动发电机,将机械能转化为电能,从而实现风力发电。

一般风力发电机的数学模型<sup>[3]</sup>为:

$$\begin{cases} c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\lambda_i} - c_3 \beta - \frac{c_4}{\lambda} \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \\ P_\omega = \frac{1}{2} \rho c_p(\lambda, \beta) A_R v^3, \\ \lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta - \frac{0.035}{1 + \beta^3}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_\omega$  为风轮捕获的风能;

$\rho$  为空气密度;

$A_R$  为风轮扫过的面积;

$v$  为风速;

$\lambda$  为叶尖速比;

$\beta$  为叶片桨距角;

$c_p$  为风机转换效率系数;

$c_1 \sim c_6$  为不同类型风力发电机的使用系数;

$\lambda_i$  为过程变量。

由式(1)可知,当风速  $v$  保持在一定值时,风轮捕获的风能  $P_\omega$  的大小取决于风机转换效率系数  $c_p$ 。而  $c_p$  是包含叶片桨距角  $\beta$  的非线性函数,故可以通过控制风力机叶片的桨距角  $\beta$  来实现输出功率的恒定<sup>[4-5]</sup>。

根据风速和发电机转速的不同,风力发电机组从待机到发电的过程经过若干区域。通常可将机组最佳运行状态分为待机区、启动区、转速恒定区以及切除区<sup>[6]</sup>。由于各区域的作用不同,因此各区域的控制策略也不同。下面将分别介绍风电机组不同区域的最佳运行状态,并对其控制策略予以说明。

1) 待机区。此区域内,控制系统的监测部分和执行部分均正常工作,且保证所有监测信号和执行信号均处于正常状态。

2) 启动区。当风速达到切入风速时,风电机组开始启动。此时,风电机组的主控系统策略是通过改变轮毂叶片的叶尖速比,使风电机组运行在最大的风机转换效率系数  $c_p$  处,以实现捕获最大风能。

3) 转速恒定区。随着风速的增大,机械转矩也不断增大,使发电机转速达到最大值,并保持该状态。当风速继续增大时,机组的输出功率因为发电机转速的增大而增加。此时,为了风电机组的稳定运行,系统通过控制变桨距,实现输出功率的恒定。

4) 切出保护区。当风速继续增大,超过切出风速时,从风电机组稳定安全运行的角度出发,主控系统将通过相应系统的调节,将风力发电机组切出电网,从而实现安全停机。

以上不同区域运行状态的数学表达式如下:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{cut\_in}; \\ P_r \frac{v - v_{cut\_in}}{v_r - v_{cut\_in}}, & v_{cut\_in} \leq v < v_r; \\ P_r, & v_r \leq v < v_{cut\_off}; \\ 0, & v \geq v_{cut\_off}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P$  为风电机组的输出功率;

$P_r$  为风电机组的额定功率;

$v_{cut\_in}$ ,  $v_{cut\_off}$  分别为切入风速与切出风速;

$v_r$  为额定风速。

## 2 Stateflow 仿真设计与分析

### 2.1 Stateflow 仿真设计

在风电机组主控系统的设计上, 大部分厂家采用 PLC 编程。对于大规模、控制逻辑关系复杂的控制系统而言, PLC 编程的工作量太大。因此, 本文采用 Matlab/Simulink 中的 Stateflow 图形化设计工具来构建风电机组主控系统。Stateflow 是基于有限状态理论的仿真环境, 可通过状态流程和事件触发来实现对事件系统的仿真<sup>[7]</sup>。

Stateflow 的基本结构如图 2 所示。Stateflow 图包括状态对象 (state)、转移 (transition)、事件 (event) 等<sup>[8-11]</sup>。系统的不同状态对象在 Stateflow 中用圆角矩形表示。状态对象的转移是由事件来驱动。Stateflow 可自主判断事件是否被触发, 从而实现状态对象间的转换。当状态对象采集的数据达到事件触发的要求时, 事件被触发, 该状态被激活, 即实现状态对象间的转换 (见图 2 中的逻辑信号线)。整个状态转换的仿真过程可以直观地通过 Stateflow 中的 Chart 模块观察。当仿真出现错误时, 可以直观地进行调试。

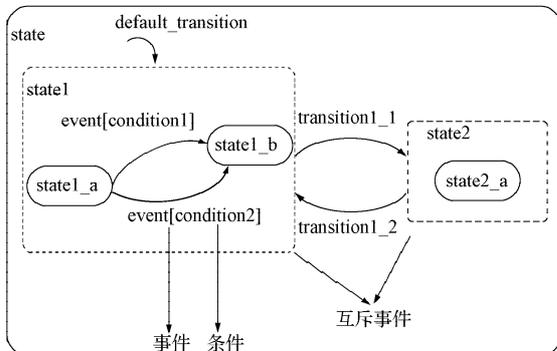


图2 Stateflow 的基本结构图

Fig. 2 Basic structure of Stateflow

本文将风力发电机组设置为待机 (hold)、暂停 (stop)、运行 (working)、急停 (parking) 4 种状态对象。系统状态对象间的转换过程如下图 3 所示。

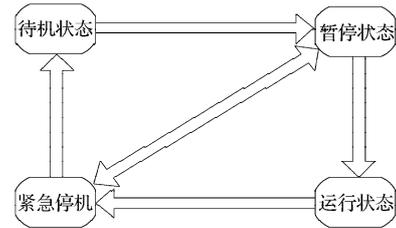


图3 风电机组主控系统的运行状态图

Fig. 3 The operating state diagram of wind turbine master control system

图 3 中, 实现各状态对象间转换的事件因素为风速和发电机转速。因此定义风速  $v$  事件的条件为:

$$v - v_{cut\_in} < 0; \quad (3)$$

$$\begin{cases} v - v_{cut\_in} \geq 0, \\ v - v_r < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v - v_r \geq 0, \\ v - v_{cut\_off} < 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$v - v_{cut\_off} \geq 0. \quad (6)$$

式 (3) ~ (6) 中: 切入风速  $v_{cut\_in}$  为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 额定风速  $v_r$  为  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 切出风速  $v_{cut\_off}$  为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

发电机转速  $v'$  事件的条件为

$$v' - v'_{cut\_in} \geq 0, \quad (7)$$

式中发电机切入转速  $v'_{cut\_in}$  为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

当风速达到切出风速时, 由于受到机械强度、设计等条件的约束, 主控系统会自动切出风力发电机, 故未设置发电机的切出转速。

### 2.2 仿真分析

根据以上分析, 构建如图 4 所示的风电机组主控系统仿真模型。

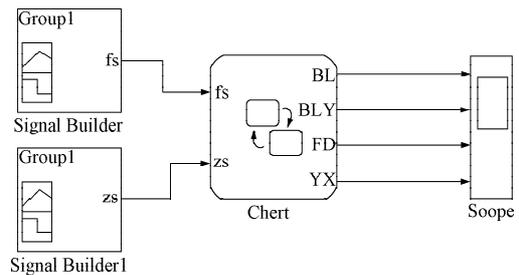


图4 风电机组主控系统仿真模型

Fig. 4 The simulation model of wind turbine master control system

仿真模型的参数设置如下:

1) 输入信号。风速  $v$  的最大值为  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 发电机转速  $v'$  的最大值  $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 最小值为  $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2) 输出信号。模型的输出信号为风电机组的状态、风速与机组并网情况、风速与机组运行情况、风电机组输出功率情况。

3) 仿真时间。仿真时间设置为  $10 \text{ s}$ 。

仿真输出信号的波形如图 5~8 所示。

图5为风电机组的状态图。由图可知,在2.6 s之前,风电机组默认处于待机状态,输出其运行状态值0;在2.6 s时,风速大于切入风速,风速切入事件被触发,但由于发电机转速事件未触发,故此时风电机组由待机状态转为暂停状态,输出其运行状态值1;由于风速继续增大,轮毂上的机械转矩不断增加,同时带动发电机的转速也逐渐增加,在3.6 s时,发电机的转速达到其切入转速,该事件被触发,风电机组由暂停状态转为工作运行状态,输出其运行状态值2;发电机转速随着风速的增大而增加,为了发电机组的安全运行,当风速切出事件被触发时,系统自动切出,发电机组由工作运行状态转为急停状态,在5.8 s时,输出其运行状态值3。

图6为风速与机组并联情况。由图可知,当风速小于切入速度或者风速大于切出速度时,风电机组处于待机或急停状态;只有当风电机组的风速介于风速的切入风速和切出风速之间时,风速与机组才可以并联,通过风能带动风机叶片转动,使发电机转速增加;当发电机转速达到切入转速后,风电机组开始输出功率。

图7为风电机组风速与机组运行情况。由图可知,当风速小于切入风速时,风电机组处于待机状态;当发电机转速达到切入转速且风速小于切出风速时,风电机组运转,系统开始对外输出功率;当风速大于切出风速时,在系统保护机制的作用下,风电机组进入急停状态,但风电机组在进入急停状态时,发电机不能立即实现停转,所以在风速达到切出速度后,风电机组的风速与机组运行有部分时间的延迟。

图8为风电机组发电状况。由图可知,只有当风速和发电机转速均在适合区域时,风电机组才能发电输出功率。

由图5~8可以看出风电机组各运行状态之间的关系。相对于人工编程为主的PLC控制系统,运用Stateflow图形化工具来建模仿真更加直观、简便。

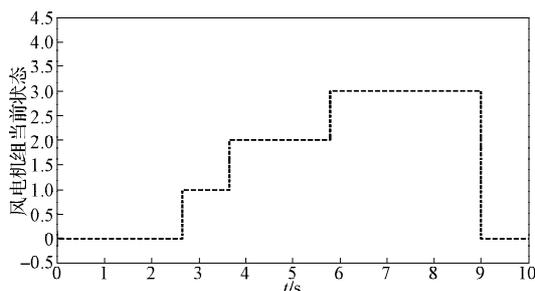


图5 风电机组的状态图

Fig. 5 The state diagram of wind turbine

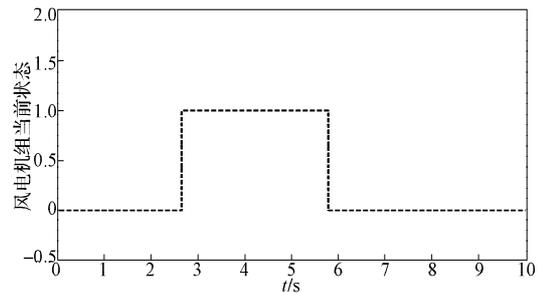


图6 风速与机组并联情况(并联:1)

Fig. 6 The parallel situation of wind speed and wind turbine (parallel: 1)

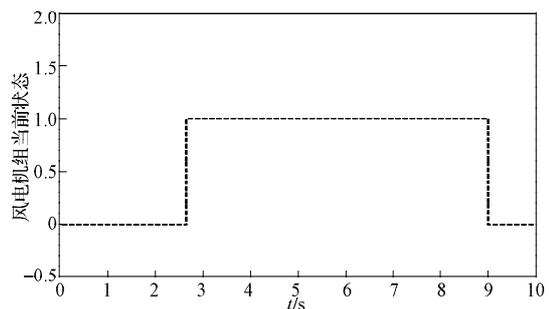


图7 风速与机组运行情况(运行:1)

Fig. 7 The operating situation of wind speed and wind turbine (working: 1)

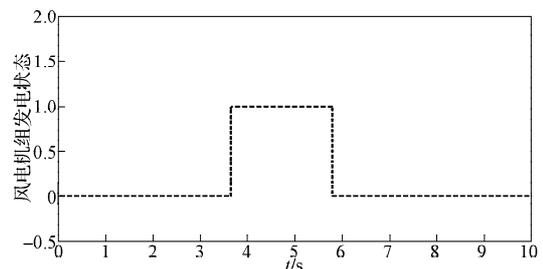


图8 风电机组发电状况(发电:1)

Fig. 8 The power generation of wind turbine (output: 1)

### 3 结语

本文基于Matlab/Simulink仿真平台,运用Stateflow图形化工具建立风电机组主控系统仿真模型。该模型包含4种简单的状态对象,将风速和发电机转速作为状态对象转换事件。仿真结果表明风电机组主控系统可根据事件自主选择运行方式。这说明Stateflow模块能够更简便、快捷地对系统进行建模仿真。

#### 参考文献:

- [1] 张伟波,潘宇超,崔志强,等.我国新能源发电发展思路探析[J].中国能源,2012,34(4):26-28,41.  
Zhang Weibo, Pan Yuchao, Cui Zhiqiang, et al. Research on the Development of New Energy Power Generation in China[J]. Energy of China, 2012, 34(4): 26-28, 41.

- [2] 薛蕾. 风电机组控制系统概述[J]. 机电信息, 2012(18): 20-21.  
Xue Lei. Overview of Wind Turbine Control System[J]. Mechanical and Electrical Information, 2012(18): 20-21.
- [3] 刘志勇. 微电网建模仿真研究及平台开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
Liu Zhiyong. Modeling and Simulation of Microgrid and Platform Development[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [4] 胡文. 双馈风力发电机系统及并网研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2013.  
Hu Wen. A Research for Double-Fed Wind Turbine System and Grid[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2013.
- [5] 郭百顺, 秦斌, 邵军, 等. 风电机组独立变桨距控制策略研究[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(2): 42-45.  
Guo Baishun, Qin Bin, Shao Jun, et al. Research on the Control Strategy of Independent Variable Pitch of Wind Turbine[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 42-45.
- [6] 徐健. 大型风电机组控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.  
Xu Jian. Research on Control Strategy of Large Wind Turbine [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [7] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.  
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum Power Point Tracking Control of the Wind Energy Generation System with Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [8] 施嵘. Simulink/Stateflow仿真原理和实现的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
Shi Rong. The Simulation Principle and Implement Research of Simulink/Stateflow[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [9] 王明东, 贾德峰, 吕蒙琦. 基于Stateflow的风电机组主控系统设计与仿真[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(2): 114-116.  
Wang Mingdong, Jia Defeng, Lü Mengqi. Stateflow-Based Design and Simulation for Master Control System of Wind Generating Set[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2011, 32(2): 114-116.
- [10] 邹晖, 陈万春, 殷兴良. Stateflow在巡航导弹仿真中的应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1854-1856, 1860.  
Zou Hui, Chen Wanchun, Yin Xingliang. Simulation of a Cruise Missile with Stateflow[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1854-1856, 1860.
- [11] 潘虎. Simulink/Stateflow组态开发和仿真原理的分析与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
Pan Hu. Analysis and Research of Configuration Development and Simulation Based on Simulink/Stateflow Platform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.

(责任编辑: 邓彬)