

DOI: 10.11992/tis.201710009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180330.0911.002.html>

基于 T-S 型模糊加权的多模软切换的风电机组 变桨控制

侯涛, 张强

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 变桨控制是确保风电机组在额定风速以上恒功率运行的一种有效的控制方式。变桨控制执行机构的动作频繁且幅度较大, 增加了风电机组各部分的机械疲劳载荷, 影响发电机的输出电能质量和机组的使用寿命; 现有的切换控制方法多数只在某一阈值进行切换, 导致切换振荡。针对上述问题, 提出了基于 T-S 型模糊加权的多模软切换变桨控制策略, 该方法将智能控制与传统控制相结合, 根据风电机组发电机的实时转速与其额定转速的偏差及其变化率, 利用 T-S 型模糊推理, 完成基于模糊控制、模糊自适应 PID 控制和 PI 控制的多模控制器输出的平滑过渡, 实现软切换, 其优点是兼顾 3 种控制方法的优势, 解决了切换振荡问题。搭建了永磁直驱风力发电机组变桨的多模软切换控制的仿真模型。仿真结果表明, 此方法展现了 3 种控制方法的优点, 克服了切换振荡, 减缓了执行机构的频繁动作, 使桨距角调节更加平滑, 输出功率精度更高, 脉动更小。

关键词: 风电机组; 电动变桨; T-S 型模糊加权; 多模切换控制; 软切换; 切换振荡; 多模态; 变桨控制

中图分类号: TP18; TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)04-0625-08

中文引用格式: 侯涛, 张强. 基于 T-S 型模糊加权的多模软切换的风电机组变桨控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 625-632.

英文引用格式: HOU Tao, ZHANG Qiang. Multi-mode soft-switch variable-pitch control of wind turbines based on T-S fuzzy weighting[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(4): 625-632.

Multi-mode soft-switch variable-pitch control of wind turbines based on T-S fuzzy weighting

HOU Tao, ZHANG Qiang

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Variable-pitch control is an effective technique for ensuring the constant-power operation of wind turbines over the range of rated wind speeds. The frequent and strong action of a pitch actuator increases the mechanical fatigue load of wind turbines, affects the output quality of the generator, and reduces the service life of wind turbines. Most current switching methods switch only at a certain threshold, which causes switch oscillation. To address these issues, we propose a multi-mode soft switching variable-pitch control strategy based on Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy weighting. In this method, intelligent and traditional controls are combined, based on the deviation of the real-time rotation speed of the generator from its rated rotation speed and the change rate of the real-time rotation speed. T-S fuzzy inference is also utilized to achieve a smooth transition in the output of the multi-mode controller by the use of fuzzy control, fuzzy adaptive proportional-integral-derivative control, and proportional-integral control to realize a soft switch. This method simultaneously employs the advantages of three kinds of control methods and solves the switch oscillation problem. In this study, we built a multi-mode soft-switch control model to address the variable pitch of permanent-magnet direct-drive wind turbines. The simulation results show that this method exhibits the advantages of the three control methods, overcomes switch oscillation, slows frequent action of the actuator, smooths the adjustment of the pitch angle, improves the precision of the output power, and reduces fluctuation.

Keywords: wind turbines; electric variable pitch; T-S fuzzy weighting; multi-mode switching control; soft switch; switch oscillation; multi-mode; pitch control

收稿日期: 2017-10-18. 网络出版日期: 2018-03-30.

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (1606RJZA002); 甘肃省高等学校科研项目 (2017A-026).

通信作者: 侯涛. E-mail: ht_houtao@163.com.

风的间歇性和随机性, 增加了风电机组的控制难度, 尤其是在额定风速以上, 对于主动变桨型风力发电机组需要更加安全可靠的变桨控制策

略。变桨系统作为变速恒频风电机组的重要一部分,通常用在中、大型的风力发电系统中,其主要的控制目标是保持额定风速以上的功率恒定,限制风电机组的气动转矩和额外的功率吸收,减轻机组各部件的疲劳载荷^[1-3]。目前变桨控制器广泛使用的仍然是 PI(D) 控制器,此类控制器存在一些明显的缺陷,如参数不能自动调整、参数依赖程度强、鲁棒性低等^[4-5]。国内、外专家学者在变桨控制中使用了一些更加先进的控制方法,如蜂群算法、滑模变结构、神经网络等。蜂群算法取得了良好的鲁棒性,但其稳定性差,当风电系统出现随机干扰时,系统易出现不稳定^[6];滑模变结构控制取得了良好的快速性和较强的鲁棒性,但其存在高频抖振问题,与神经网络和模糊控制等相结合的改进算法设计变桨控制器,达到了一定的控制效果,也无法从根本上消除这一问题^[7-8];RBF 神经网络变桨控制器取得了较强的适应性,较好的鲁棒性和动态性能,但其结构和参数确定较为复杂^[9-10];这些控制方法较为复杂且难以硬件实现。模糊控制器拥有优良快速性与鲁棒性,模糊自适应控制器可自动地在线调整参数,二者都是依据专家经验设计而成,已相对成熟且已硬件实现;多模态控制比单一控制有更好的抗干扰性能;本文将以上两种智能控制方式与传统的 PI 控制相结合于多模态控制中,提出了基于 T-S 型模糊加权的多模软切换变桨控制策略。将检测到的发电机的转速与其额定转速进行比较,大偏差时利用模糊控制的快速性优势迅速减小偏差、抑制偏差的快速变化;中等偏差时切换到模糊自适应 PID 控制,进行在线时时调整;小偏差时切换到 PI 控制,提高稳态精度。切换时根据发电机的转速与其额定转速的偏差大小及其变化率,利用 T-S 型模糊推理,使用加权平均法进行清晰化,输出 3 种模态的权值,使用加权求和法合成输出控制量。

1 风电系统数学模型

1.1 风速模型

风在流动的过程中具有很强的随机性和突变性,为了准确描述风速的变化特性,本文采用风速的四分量模型^[11-12],即将风速分解为基本风 v_b 、阵风 v_g 、渐变风 v_r 和随机风 v_n 。其组合风 v_w 可表示为

$$v_w = v_b + v_g + v_r + v_n \quad (1)$$

$$v_b = l \cdot \Gamma(1 + 1/s) \quad (2)$$

$$v_r = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_{1r}, t \geq t_{2r} + t_r \\ v_{r\max}(1 - \frac{t - t_{1r}}{t_{1r} - t_{2r}}), & t_{1r} \leq t < t_{2r} \\ v_{r\max}, & t_{2r} \leq t < t_{2r} + t_r \end{cases} \quad (3)$$

$$v_g = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_{1g}, t \geq t_{1g} + t_g \\ \frac{v_{g\max}}{2}[1 - \cos(2\pi \frac{t - t_{1g}}{t_{1g} - t_g})], & t_{1g} \leq t < t_{1g} + t_g \end{cases} \quad (4)$$

$$v_n = 2 \sum_{i=1}^n \sqrt{S_r(\omega_i) \Delta \omega_0} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (5)$$

式中: $\omega_i = (i - 1/2)\Delta\omega_0$, $S_r(\omega_i) = \frac{2\mu F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i/\pi v_b)^2]^{4/3}}$; l 和 s 分别为威布尔分布的比例参数与形状参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; t_{1r} 、 t_r 、 t_{2r} 分别为渐变风的起始时间、持续时间、终止时间; $v_{r\max}$ 为渐变风的最大值; t_{1g} 、 t_g 分别为阵风的起始时间与持续时间; $v_{g\max}$ 为阵风的最大值; ω_i 与 ϕ_i 分别为第 i 次频率分量的频率与初相角, ϕ_i 的取值为 $[0, 2\pi]$ 的随机数; μ 描述风场的粗糙程度; F 为影响范围; $\Delta\omega_0$ 为频率微元。

1.2 风力机数学模型

依据贝兹理论,风力机的数学模型^[13-14]可表示为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_p(\beta, \lambda) v^3 \\ T_m = P_m / \omega_f = \frac{1}{2} \pi C_p(\beta, \lambda) v^2 / \lambda \\ \lambda = R \omega_f / v \\ C_p = 0.5176(116\lambda_1 - 0.4\beta - 5)e^{-21/\lambda_1} + 0.0068\lambda_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\lambda_1 = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1}$; P_m 为风机的机械功率; T_m 为风机的机械转矩; ρ 为大气密度; R 为风轮半径; v 为风速; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; C_p 为风能的利用系数; ω_f 为风机的转速。

1.3 变桨执行机构数学模型

变桨的精度与灵敏度对功率有着很大的影响。其执行机构由伺服电机或液压装置驱动,可等效为一个一阶惯性环节:

$$G_{pitch}(s) = \frac{\beta(s)}{\beta_{ref}(s)} = \frac{1}{\tau_b s + 1} \quad (7)$$

式中: τ_b 为桨距角响应的时间常数; β 为实际的桨距角; β_{ref} 为桨距角控制的给定值。

2 基于 T-S 型模糊加权的多模变桨控制策略

变桨控制是一种确保风电机组恒功率输出的有效方法,减小额定风速以上风力发电机机组的过载,确保风电机组的最高效运行。通过控制桨距角限制风机的气动转矩,从而限制了额外功率的吸收,减轻了机组的疲劳载荷,使风电机组的机械功率保持恒定。在很多控制方案中,桨叶的转速根据测量的风速实时修正,由于风在桨叶表面的每一点是不同的,故这种控制方案是不精确的。转速与功率结合控制会造成转速在最优运行点的输出振荡,降低了风电机组运行的可靠性^[15-17]。

本文通过测量发电机的转速来对桨距角进行控制,限制风轮吸收的功率,以此来稳定机组的输出功率。整体的控制框图如图1所示, ω 为发电机的额定转速, ω_1 为实测转速。发电机的转速与其额定转速的偏差及其变化率经过T-S型模糊推理输出3种控制模式的权值,将3种权值加权到对应的模式控制来实现多模软切换,多模软切换控制的控制策略就是在大偏差时利用模糊控制的快速性优势迅速减小偏差、抑制偏差的快速变

化,中等偏差时利用模糊自适应PID控制在线实时调整,在小偏差时切换为PI控制,提高控制的稳态精度。为了保证3种控制器之间的切换不会造成输出量的振荡,三者的切换采用基于T-S型模糊推理环节来实现,模糊推理采用加权平均法输出各模式的权值,合成输出采用加权求和法输出控制量,确保3种控制之间的平滑过渡。合理的设置偏差的论域和模糊论域,能兼顾3种控制方法的优势。

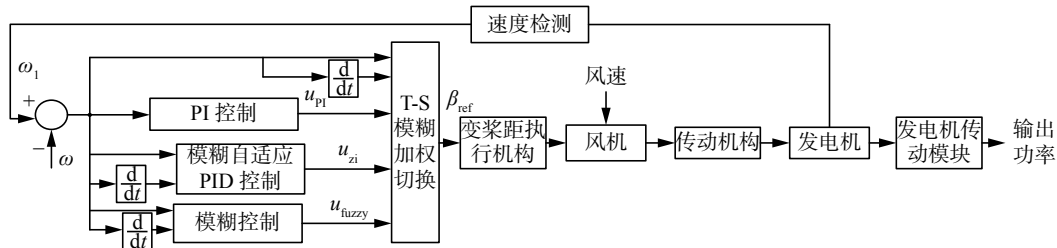


图1 T-S模糊加权变桨距控制框图

Fig. 1 Block diagram of T-S fuzzy weighted variable pitch control

2.1 模糊控制

模糊控制器采用二维模糊控制器。设发电机的转速与其额定转速的偏差为 E ,其变化率为 EC 。额定风速以上时,此时发电机的转速高于额定转速,偏差为正,采用单边模糊控制。又知发电机的额定转速为 $27.8 \text{ r/min}=2.91 \text{ rad/s}$, E 的基本论域为 $[0,8]$, EC 的基本论域为 $[-10,10]$,故设 E 的模糊论域为 $[0,4]$, EC 的模糊论域为 $[-6,6]$ 。工程应用中要求桨距角在 $0^\circ\sim 25^\circ$ 之间变化,且不考虑负值,设控制量 U 的基本论域为 $[0,30]$,其模糊论域为 $[0,5]$ 。 E 、 EC 和 U 的隶属函数类型均取为三角型,分别如图2~4所示。设 E 的模糊子集 $\{PB, PM, PS\}$, EC 模糊子集 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$,输出 U_{fuzzy} 的模糊子集 $\{PS, PM, PB\}$ 。 U_{fuzzy} 的模糊控制规则表如表1所示。

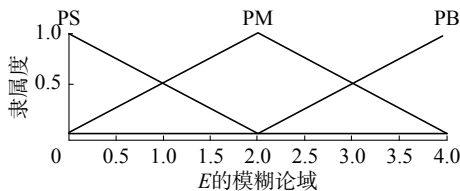


图2 E 的隶属函数

Fig. 2 The membership of E

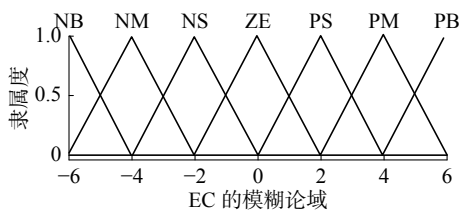


图3 EC 的隶属函数

Fig. 3 The membership of EC

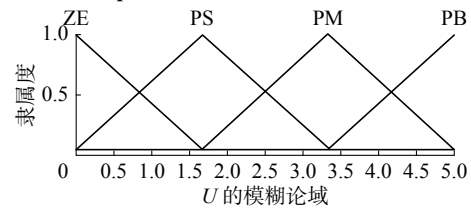


图4 U 的隶属函数

Fig. 4 The membership of U

表1 U_{fuzzy} 的模糊控制规则

Table 1 The fuzzy control rule of U_{fuzzy}

E	EC						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE
PM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
PS	PM	PM	PM	PS	ZE	ZE	ZE

2.2 模糊自适应PID控制

发电机的转速与其额定转速的偏差 E 及其变化率 EC 作为模糊自适应PID控制器的两个输入,利用模糊规则在线实时地调整PID的3个参数,实现对 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 参数的自整定。 E 和 EC 的基本论域与模糊论域同模糊控制的设置一样。 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊论域分别设置为 $[-6,6]$, $[-3,3]$, $[-6,6]$,设 E 的模糊子集 $\{PB, PM, PS\}$, EC 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊子集分别设置为 $\{NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, $\{NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, E 、 EC 、 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的隶属函数均为三角型, Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊控制规则表,如表2~4所示。

表2 Δk_p 的模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rule of Δk_p

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB	PB	PB

表3 Δk_i 的模糊控制规则
Table 3 Fuzzy control rule of Δk_i

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB	PB	PB

表4 Δk_D 的模糊控制规则
Table 4 Fuzzy control rule of Δk_D

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	PB	PM	PS	PS	PM	PB	PS
PM	ZE	NS	NM	ZE	PS	PM	PM
PB	NB	NB	NB	PS	PM	PB	PB

2.3 PI控制

PI控制是PID控制的一种特例,当系统的偏差较小时,采用PI控制可以使控制系统具有较好的稳态性能。

3 基于T-S型模糊加权的多模软切换设计

3.1 设计原理

T-S型是一种适于表达复杂系统的动态特性,其输出的隶属函数可以是线性的或者是单点常数^[18]。本文主要利用T-S型模糊推理的隶属函数为单点常数使得其输出为单点常数这一特点来实现软过渡。区别于传统的切换方法只在某一阈值进行切换,本文引入了偏差及其导数,在到达阈值的前几个时刻,此时偏差小于设定的阈值,若偏差的变化率较大,本文使用的方法就进行了模态切换;同样,在到达偏差的后几个时刻,此时偏差大于设定的阈值,若偏差的变化率较小,本文使用的方法就不进行模态切换;具体的切换时刻由T-S型模糊推理实现,这也充分利用了模糊

控制智能化的优势。T-S型模糊加权多模切换设计的目的是利用T-S型模糊推理平滑多种控制模态的输出,T-S型模糊加权切换的输出为模态的权值。其基本思想是根据系统的转速误差信息,需要在3个模态之间进行切换时,引入转速偏差和其导数进行模态切换判断,应用T-S型模糊推理方法,清晰化采用加权平均法,得到切换过程中3个模态的权值,使用加权求和法将3个模态的权值加权到3个模态的输出,从而平滑控制器的输出,实现T-S型模糊加权多模软切换。

令 MD_1 、 MD_2 和 MD_3 分别为模糊控制模态、模糊自适应PID控制模态和PI控制模态; w_a 、 w_b 和 w_c 分别为模糊控制模态的权值、模糊自适应PID控制模态的权值和PI控制模态的权值; U_{fuzzy} 、 U_{zi} 和 U_{PI} 分别为模糊控制、模糊自适应PID控制和PI控制的输出控制量, U_{sum} 为T-S型模糊加权多模切换的合成输出值。在大偏差时切换到模糊控制起主要控制作用,模糊自适应PID控制和PI控制起微小的控制作用,此时 w_a 为主导权值;在小偏差时系统将很快趋于稳态,切换到PI控制起主要控制作用,模糊控制和模糊自适应PID控制起微小的控制作用,此时 w_c 为主导权值;中等偏差时切换到模糊自适应PID控制,模糊控制和PI控制起微小的控制作用,此时 w_b 为主导权值。把 w_a 、 w_b 和 w_c 分别加权到 U_{fuzzy} 、 U_{zi} 和 U_{PI} ,即可实现多模加权软切换控制。T-S型模糊加权多模软切换设计包括4个步骤,分别为模糊化、模糊推理、去模糊化和合成输出量。

3.2 模糊化

T-S型模糊加权算法的模态划分取决于发电机的转速与其额定转速的偏差 E 及其变化率 EC ,利用这两个量来确定T-S型模糊推理各模态的权值。由于风速处于额定风速以上,此时转速高于额定转速,偏差为正,故采用单边模糊控制。选取发电机的转速与其额定转速的偏差 E 和偏差变化率 EC 的论域和模糊论域同前文模糊控制一样, E 的模糊子集为 $\{PS, PW, PM, PB\}$, EC 的模糊子集为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ 。

3.3 模糊推理

为了准确描述模糊推理的逻辑,用 MD_1 、 MD_2 和 MD_3 分别表示模糊控制时的模态、模糊自适应PID控制时的模态和PI控制时的模态。设模态 MD 的模糊子集 $\{MD_1, MD_2, MD_3\}$,3种模态的模糊规则描述如表5所示。

表5 模态模糊规则描述
Table 5 The description of modal fuzzy rule

E	EC				
	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	MD ₃	MD ₃	MD ₂	MD ₂	MD ₂
PW	MD ₃	MD ₃	MD ₂	MD ₂	MD ₂
PM	MD ₂	MD ₂	MD ₂	MD ₂	MD ₁
PB	MD ₂	MD ₂	MD ₂	MD ₁	MD ₁

3.4 去模糊化

T-S型模糊控制的去模糊化采用加权平均法, 设第*i*条规则输出的结果为 u_i , 它的权重为 w_i , m 为规则数, 则总输出为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m w_i u_i}{\sum_{i=1}^m w_i} = \frac{w_1 u_1 + w_2 u_2 + \cdots + w_m u_m}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} \quad (8)$$

3种模态的权值 w_a 、 w_b 和 w_c 由式(8)计算得出。设定T-S型模糊模型的3个模态输出隶属函数为单点值, 其值均为0和1, 合理的设置模糊规则, 使 w_a 、 w_b 和 w_c 根据偏差及其变化率经过模糊推理和清晰化后其输出都为[0,1]的精确值, 在任意时刻, w_a 、 w_b 和 w_c 的其中一个数值较大, 另外两个数值较小, 且满足:

$$w_a + w_b + w_c = 1 \quad (9)$$

3.5 T-S型模糊切换合成输出

在控制过程中, 把 w_a 、 w_b 和 w_c 分别加权到 U_{fuzzy} 、 U_{zi} 和 U_{PI} , 从而达到软切换控制的目的。合成的输出控制量 U_{sum} 采用加权求和法为

$$U_{sum} = w_a \times U_{fuzzy} + w_b \times U_{zi} + w_c \times U_{PI} \quad (10)$$

4 仿真分析与验证

为了验证所提方法的正确性及其控制性能, 在SIMULINK下搭建了直驱永磁同步发电系统在单独模糊控制、单独模糊自适应PID控制、单独PI控制以及基于T-S型模糊加权的多模软切换控制的4种变桨控制模型, 以阶跃风速和组合风速分别作为系统的输入, 并将4种控制方法的仿真结果进行对比。风机的额定风速为12 m/s, 等效的转动惯量 J 为54 894 kg·m², 叶片半径 R 为46.74 m, 空气密度 ρ 为1.225 kg/m³, 发电机的额定功率 P 为2 MW, 定子电阻 R_s 为0.006 65 Ω, 定子电感 L 为0.002 4 H, 永磁体的磁链 ϕ 为1.67 Wb, 极对数 n_p 为60, 转动惯量 J_m 为411 185 kg·m²。对于模糊控制, E 、 EC 、 U 对应的量化因子分别为

$k_e = \frac{4}{8} = \frac{1}{2}$ 、 $k_{ec} = \frac{6}{10} = \frac{3}{5}$ 、 $k_u = \frac{30}{5} = 6$; 对于模糊自适应PID控制, 取其初始参数为 $k_{p0} = 5$, $k_{i0} = 2$, $k_{d0} = 0$; 对于PI控制, 取 $k_p = 40$, $k_i = 20$ 。

利用SIMULINK中的模糊控制工具箱建立T-S型的模糊推理系统如图5所示。

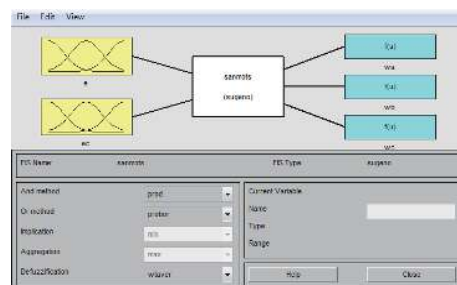


图5 T-S型模糊推理系统

Fig. 5 The T-S fuzzy inference system

经过模糊规则设定, 得到其输出权值在ruler viewer如图6所示。

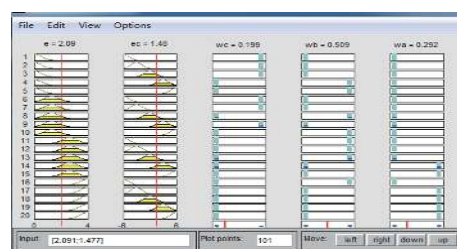


图6 ruler viewer 中的权值输出

Fig. 6 The weight outputs in ruler viewer

由图6可知, 其权值输出满足式(9)。此时为中等偏差, 偏差的变化率也中等, 故模糊自适应PID控制的权值较大, 模糊控制和PI控制的权值较小。

1) 阶跃风速

0~5 s 风速为13 m/s, 5 s 时跃变为18 m/s。风速如图7所示, 4种控制方法下转速对比曲线如图8所示, 桨距角对比曲线如图9所示, 功率对比曲线如图10所示, T-S型模糊推理的权值输出如图11所示。

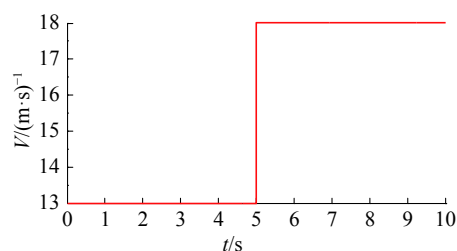


图7 风速

Fig. 7 The curve of wind speed

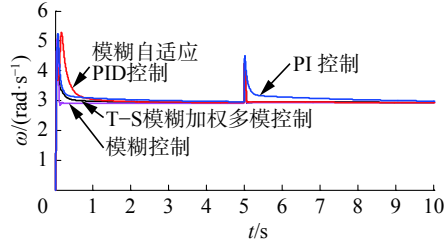


图8 转速对比

Fig. 8 The comparison of rotor speed

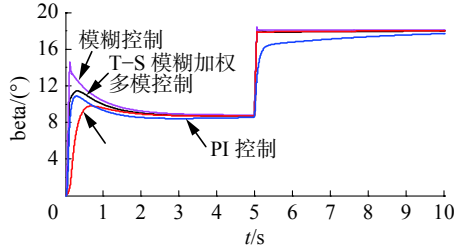


图9 桨距角对比图

Fig. 9 The comparison of pitch angle

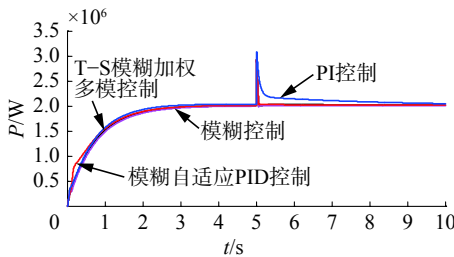


图10 输出功率对比

Fig. 10 The comparison of generator output power

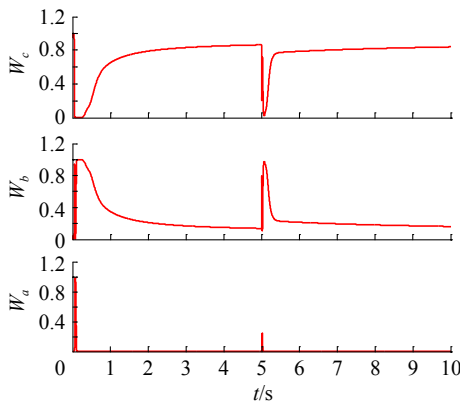


图11 T-S型模糊推理的权值输出

Fig. 11 The weight output of T-S fuzzy inference

2) 组合风速

采用组合风速模型时, v_n 用式 (11) 代替:

$$v_n = v_{n\max} \cdot R_{am} \cdot \cos(\omega_i + \phi_i) \quad (11)$$

式中: $v_{n\max}$ 为随机风的最大值, R_{am} 为 $[-1, 1]$ 的任意数, ω_i 和 ϕ_i 为 $[0, 2\pi]$ 的任意数。

仿真时, 组合风速的参数取 $l=15$, $s=1$, $v_{g\max}=4$ m/s, $t_{lg}=0$ s, $t_g=10$ s, $v_{r\max}=1$ m/s, $t_{lr}=0$ s, $t_r=10$ s, $t_{2r}=10$ s, $v_{n\max}=2$ m/s。组合风速模型如图 12 所示, 得: 4 种控制方法下, 其转速对比曲线如图 13 所示,

桨距角对比曲线如图 14 所示, 功率对比曲线如图 15 所示, T-S 型模糊推理的权值输出如图 16 所示。

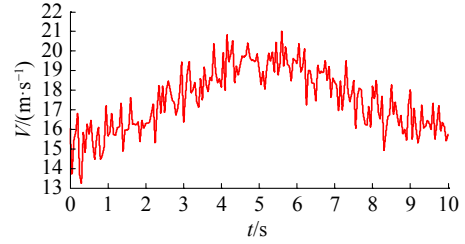


图12 风速

Fig. 12 The curve of wind speed

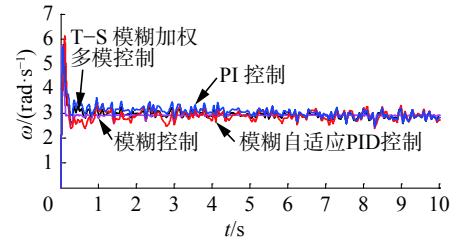


图13 转速对比

Fig. 13 The comparison of rotor speed

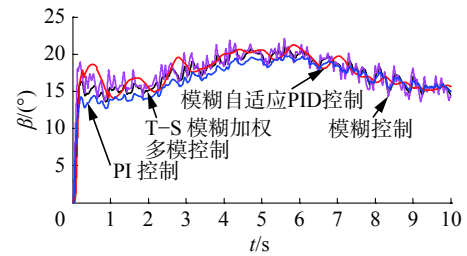


图14 桨距角对比

Fig. 14 The comparison of pitch angle

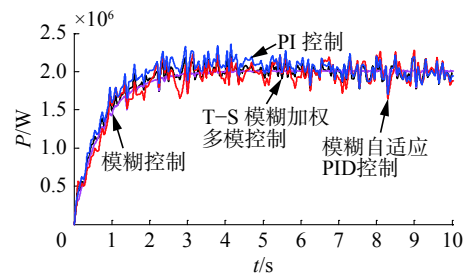


图15 输出功率对比

Fig. 15 The comparison of generator output power

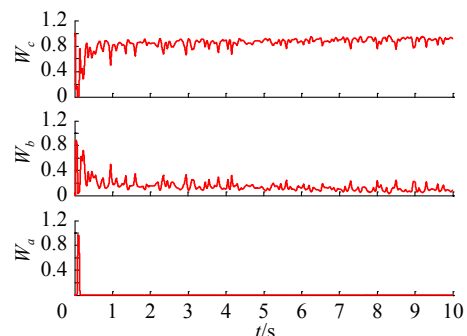


图16 T-S模糊推理的权值输出

Fig. 16 The weight output of T-S fuzzy inference

仿真结果表明:阶跃风速和组合风速下,4种控制方法都能使发电机的输出功率稳定在额定值附近。使用模糊控制时,输出的功率与转速波动更小,更加平稳,但当风速改变时,其桨距角响应过于迅速,超调量大且波动较大,导致桨距角执行机构的频繁动作,增加了桨距角执行机构及风电机组各部件的机械疲劳载荷。所提出方法的综合控制性能优于其他3种方法,通过改变桨距角可以使转速较快地趋于稳定,即可以快速跟踪发电机的额定转速,功率也能稳定在发电机输出的额定功率附近。与其他3种方法相比,调节桨距角更加地平滑、动作频率更低,幅度更小;与模糊自适应PID与PI控制相比,减小了转速的峰值,转速与功率的脉动更小。阶跃风速下,进入稳态后,在5s突加扰动时,又表现出良好的抗干扰性能。

5 结束语

本文针对现有的变桨控制策略存在风电机组额定风速以上恒功率运行时,桨距角执行机构的频繁动作增加了风机各部分的机械疲劳载荷,影响发电机的输出电能质量和机组的使用寿命等问题,研究了基于T-S型模糊加权的多模软切换变桨控制方法。该方法兼顾了模糊控制、模糊自适应PID控制和PI控制各自的控制优势,并利用T-S型模糊推理来进行平滑过渡,实现了软切换,克服了切换振荡。仿真结果表明,所提出的方法具有更加优良的综合控制性能,具有良好的动态性能、稳态性能和鲁棒性。在两种风速下,调节桨距角更加平滑,减缓了执行机构的频繁动作,桨距角执行机构的疲劳载荷有效的减小了,从而降低了机组其他部分的机械载荷,延长了机组的使用寿命。从对比研究易知,4种方法都能跟踪上发电机的转速并维持在额定转速,都能使发电机的输出功率稳定在额定值(2MW)附近,但所提出的方法转速的峰值更低,脉动更小,功率更加靠近额定值,功率脉动更小,更平稳。对于输出功率的脉动,风电机组在并网时加入背靠背变频器可以解决这一问题。此方法对于直驱变桨永磁同步风力发电系统,在额定风速以上的恒功率运行有一定的借鉴参考价值。

参考文献:

- [1] YIN Xiuxing, LIN Yonggang, LI Wei, et al. Adaptive sliding mode back-stepping pitch angle control of a variable-displacement pump controlled pitch system for wind turbines[J]. ISA transactions, 2015, 58: 629–634.
- [2] YUAN Yuan, TANG J. Adaptive pitch control of wind turbine for load mitigation under structural uncertainties[J]. Renewable energy, 2017, 105: 483–494.
- [3] SONG Dongran, YANG Jian, DONG Mi, et al. Model predictive control with finite control set for variable-speed wind turbines[J]. Energy, 2017, 126: 564–572.
- [4] 吴洁, 孟克其劳, 贾大江, 等. 1.5MW 永磁直驱风力发电机组变桨控制系统的改进[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2074–2079.
WU Jie, MENG Keqilao, JIA Dajiang, et al. Improved pitch control system of 1.5 MW permanent magnet direct drive wind turbine[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(8): 2074–2079.
- [5] MORADI H, VOSSOUGH G. Robust control of the variable speed wind turbines in the presence of uncertainties: a comparison between H_{∞} and PID controllers[J]. Energy, 2015, 90: 1508–1521.
- [6] 任丽娜, 吕明月, 王振臣. 改进蜂群算法在风机变桨距控制中的应用[J]. 机械设计与制造, 2015, 36(3): 43–46.
REN Lina, LV Mingyue, WANG Zhenchen. Improved bee colony algorithm on the wind turbine pitch control[J]. Machinery design and manufacture, 2015, 36(3): 43–46.
- [7] Yin Xiuxing, Lin Yonggang, Li Wei, et al. A novel fuzzy integral sliding mode current control strategy for maximizing wind power extraction and eliminating voltage harmonics[J]. Energy, 2015, 85: 677–686.
- [8] WANG Baohua, Qin Shengsheng. Backstepping sliding mode control of variable pitch wind power system[C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Chengdu, China, 2010: 1–3.
- [9] MEDJBER A, GUESSOUM A, BELMILI H, et al. New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system[J]. Energy, 2016, 106: 137–146.
- [10] QIN Bin, ZHOU Hao, DU Kang, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2013, 28(5): 37–41.
- [11] 周飞航, 刘军. 基于状态反馈的直驱风电系统模糊控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2758–2763.
ZHOU Feihang, LIU Jun. Fuzzy control strategy of direct-drive wind power system based on state feedback[J]. Power system technology, 2016, 40(9): 2758–2763.
- [12] ANDERSON P M, BOSE A. Stability simulation of wind turbine systems[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1983, PAS-102(12): 3791–3795.
- [13] BOUKHEZZAR B, LUPU L, SIGUERDIDJANE H, et al. Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines[J]. Renewable energy, 2007, 32(8):

- 1273–1287.
- [14] HUI J, BAKHSHAI A. A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems[C]//2008 PESC Proceedings of the Power Electronics Specialist Conference. Rhodes, Greece, 2008: 4003–4007.
- [15] DAHBI A, NAIT-SAID N, NAIT-SAID M-S. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(22): 9427–9442.
- [16] ZHANG Xinfang, XU Daping. Adaptive fuzzy control for variable speed variable pitch wind turbines[J]. IFAC power plants and power systems control, 2003, 36(20): 1031–1036.
- [17] BAGHERI P, Sun Qiao. Adaptive robust control of a class of non-affine variable-speed variable-pitch wind turbines with unmodeled dynamics[J]. ISA transactions, 2016, 63: 233–241.
- [18] 唐酿, 肖湘宁, 陈众. 基于 Sugeno 模糊推理的静止无功

补偿器多模态切换方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 140–143.

TANG Niang, XIAO Xiangning, CHEN Zhong. A method of multi-mode switching for SVC based on sugeno fuzzy inference[J]. Power system technology, 2011, 35(8): 140–143.

作者简介:



侯涛, 男, 1975 年生, 教授, 博士, 主要研究方向为智能信息处理与智能控制。



张强, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电与智能控制。

第三届机械、控制与计算机工程国际学术会议 (ICMCCE 2018) 2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE 2018)

The previous First International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE 2016) was successfully taken place on October 22-23, 2016 in Hangzhou, China. The second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE 2017) was successfully taken place on December 8-10, 2017 in Harbin, China. All accepted papers were published by Conference Publishing Services (CPS) and have been indexed by IEEE Xplore and submitted to Ei Compendex.

The 2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE2018) will be held on September 14-16, 2018 in Huhhot Inner Mongolia, China. ICMCCE 2018 is to bring together innovative academics and industrial experts in the field of mechanical, control and computer engineering to a common forum. The primary goal of the conference is to promote research and developmental activities in mechanical, control and computer engineering and another goal is to promote scientific information interchange between researchers, developers, engineers, students, and practitioners working all around the world. The conference will be held every year to make it an ideal platform for people to share views and experiences in mechanical, control and computer engineering and related areas.