

负荷扰动互联电力系统模糊自适应输出跟踪与干扰抗御

金 鹏¹, 马 倩^{1†}, 周国鹏²

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 湖北科技学院 工程技术研究院, 湖北 咸宁 437100)

摘要: 风电、光伏等新型发电设备并入传统大电网后, 使互联电力系统日益复杂, 给电力系统建模和运行控制带来了新挑战. 基于此问题, 本文提出基于模糊自适应控制的互联电力系统输出跟踪与干扰抗御算法. 首先利用模糊控制理论对系统进行建模, 然后利用非线性输出调节思想解决带有扰动的跟踪问题. 但模糊逼近不可避免的存在逼近误差, 为减小逼近误差与外部扰动对于控制系统的影响, 利用Backstepping法设计自适应输出调节控制器. 最后, 仿真结果验证了该算法有效, 实现了系统输出跟踪与干扰抗御.

关键词: 互联电力系统; 模糊控制; 输出调节; 自适应反步法

引用格式: 金鹏, 马倩, 周国鹏. 负荷扰动互联电力系统模糊自适应输出跟踪与干扰抗御. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 571 – 577

DOI: 10.7641/CTA.2020.00448

Fuzzy adaptive output tracking and disturbance rejection for interconnected power systems with load disturbance

JIN Peng¹, MA Qian^{1†}, ZHOU Guo-peng²

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Institute of Engineering & Technology, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei 437100, China)

Abstract: With the integration of new power generation equipment such as wind and photovoltaics power, the interconnected power system has become increasingly complex, which has brought new challenges to power system modeling and operation control. In this paper, a fuzzy adaptive control algorithm for output tracking and disturbance rejection of interconnected power systems is proposed. In order to reduce the influence of approximation error and external disturbance on the control system, an adaptive output regulation controller is designed by using backstepping approach. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: interconnected power system; fuzzy control; output regulation; adaptive backstepping

Citation: JIN Peng, MA Qian, ZHOU Guopeng. Fuzzy adaptive output tracking and disturbance rejection for interconnected power systems with load disturbance. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(5): 571 – 577

1 引言

电力系统作为典型非线性系统, 具有强耦合, 高度非线性, 多参数等特性, 其稳定性问题一直以来备受关注^[1-3]. 在化石能源的匮乏以及环境日益恶化的双重压力下, 北卡莱罗纳州立大学黄勤教授和普渡大学Lefteri H. Tsoukalas教授率先提出能源互联网的概念, 将太阳能、风能等新兴的清洁能源并入传统大电网中, 并依托互联电网实现了可再生能源的广域大规模共享. 风电、光伏等新型发电设备并入传统大电网后, 一方面扩大了互联电力系统可控区域内的发电容

量, 缓解了一定的用电需求, 但不可避免地造成了发电设备种类及负荷类型的日益复杂化, 使得建立精确的数学模型和抑制外部扰动变得更加困难^[4-6]. 若采用传统方式进行建模, 则在模型简化和参数测量过程中均会带来误差, 导致系统具有不确定性, 这类不确定性称为未建模动态. 在设计控制过程中如不考虑未建模动态, 则设计的控制器难以实现预期的性能指标. 外部负荷扰动作为影响互联电力系统稳定性的另一个关键因素, 同样可能会给系统带来不利影响. 例如, 在周期性负载扰动下, 互联电力系统会发生混沌振荡,

收稿日期: 2020-07-14; 录用日期: 2020-11-10.

†通信作者. E-mail: qma@njust.edu.cn; Tel.: +86 13451091867.

本文责任编辑: 梅生伟.

国家自然科学基金项目(61773207), 江苏省杰出青年基金项目(BK20190020), 湖北省科技计划项目(2018ABA076)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61773207), the Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of Jiangsu Province (BK20190020) and the Science and Technology Program of Hubei Province (2018ABA076).

实际工况中表现为无规则的机电震荡,严重时会导致系统失稳甚至解列,进而引发电网安全事故.因此,为克服未建模动态和外部扰动对于互联电力系统的影响,提升电能质量,许多研究人员进行了大量研究.文献[7]针对含有不确定因素和负荷扰动的多区域互联电力系统提出了一种基于线性矩阵不等式参数可调节的鲁棒分布式预测控制算法.文献[8]针对电力系统中普遍存在的系统非线性和参数不确定性等问题,提出了一种基于径向基函数神经网络的分布式自适应控制器,以提高多机电力系统的暂态稳定性.文献[9]在研究高度非线性以及互联的电力网络时延对系统稳定性的影响时,利用 Takagi-Sugeno(T-S)模型表示网络中的非线性电源子系统,并利用补偿技术减轻时延对电网稳定性的影响.

Backstepping法作为设计非线性控制器的典型算法,它利用递推原理将高阶反馈系统转换为多个一阶系统,并引入虚拟控制器简化非线性控制器设计过程,该算法因其简单有效,已被广泛应用于各个控制领域.文献[10]利用非线性阻尼算法改进传统反步法,并与自适应控制与滑模控制相结合,解决了含有静止同步串联补偿器的多区域互联电力系统渐近稳定问题.文献[11]考虑发电机阻尼系数的不确定性,利用自适应反步法设计储能的有功和无功控制器,利用协调无源性方法设计发电机励磁的控制器,使得整个闭环系统达到反馈无源.输出调节理论作为处理非线性系统的另一种有力工具,在20世纪70年代被提出,其创新之处在于将被跟踪系统与动态干扰组合形成外部系统,并与原系统一起称为复合系统,通过设计复合系统的动态控制器完成相应控制,它能很好地实现系统的渐近跟踪与干扰的完全抗御.经过近40年的发展,输出调节理论由线性系统发展到非线性系统,并与自适应、鲁棒控制、模糊控制、神经网络等算法结合,取得了很多有意义的成果^[12-14].

然而,上述关于互联电力系统的研究成果均假设系统模型已知或者仅局限于探讨系统稳定性,鲜有研究模型未知和外部扰动共同存在条件下的跟踪问题,即非线性输出调节问题.因此,本文以此为切入点,重点研究含有未建模动态的互联电力系统在周期负荷扰动条件下如何实现自适应输出跟踪与干扰抗御.本文贡献主要包括如下3点:1)为解决模型未知问题,本文利用模糊控制理论对系统进行建模;2)引入非线性输出调节思想,解决周期负荷扰动下模糊近似互联电力系统的跟踪问题;3)模糊逼近不可避免的存在逼近误差,为减小逼近误差与外部扰动对于控制系统的影响,利用Backstepping法设计自适应输出调节控制器,减小模糊逼近误差和外部扰动对于系统性能的影响.

本文结构安排如下:第1部分为引言,阐述了互联电力系统的研究现状、存在的问题以及本文的主要贡献;第2部分将给出系统模型及坐标转换,从而将模糊

自适应输出调节问题转化为模糊自适应镇定问题;控制器的设计等主要结果将于第3部分给出;第4部分和第5部分分别为仿真分析及结论.

2 系统模型与坐标转换

简单互联电力系统结构^[15]如图1所示.

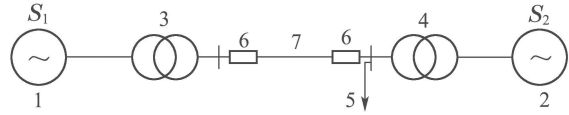


图1 简单互联电力系统

Fig. 1 Simple interconnected power system

图中:1为系统 S_1 等值发电机,2为系统 S_2 的等值发电机,3为系统 S_1 的等值主变压器,4为系统 S_2 的等值主变压器,5为负荷,6为断路器,7为系统联络线.

具有周期负荷扰动的简单互联电力系统的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= w(t), \\ \dot{w}(t) &= f(\delta(t), w(t)) + d(t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\delta(t) = \delta_1(t) - \delta_2(t)$ 为系统 S_1 与系统 S_2 等值发电机 q 轴之间的相对角度; $w(t) = w_1(t) - w_2(t)$ 为两系统的相对角速度; $f(\delta(t), w(t))$ 为未知的系统模型, $d(t)$ 为外部负荷扰动.

风电、光伏等发电设备的引入使得电网遭受外部负荷扰动越来越频繁,而这类负荷的存在使系统更加难以稳定.为验证外部负荷对于系统稳定性的影响,假设系统模型选取典型标称值,即 $f(\delta(t), w(t)) = (1/H) \times (-P_s \sin \delta(t) - Dw(t) + P_m)$,其中: H, D 分别为等值转动惯量和等值阻尼系数; P_s, P_m 分别表示电磁功率和机械功率;外部负荷扰动取周期信号,即 $d(t) = (P_e/H) \cos \sigma_e t$,其中 P_e, σ_e 分别为负荷幅值和频率.此类扰动信号广泛存在于电力系统中,因此研究此类信号对于系统性能的影响具有重要意义.

为验证周期负荷扰动信号 $d(t)$ 对于系统稳定性的影响,在不同幅值和频率的外部负荷作用下进行仿真,得到系统响应曲线如图2所示.

图2给出了不同幅值和频率的周期负荷扰动信号下的系统相图以及相对角度响应曲线,结果表明周期负荷扰动信号可能导致系统产生混沌震荡,甚至失稳.

为使系统在周期负荷扰动下的能渐近跟踪参考信号,则必须在系统(1)中引入控制量,得到如下系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + d(t) + u(t), \\ e = x_1 - r(t), \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\delta(t) = x_1, w(t) = x_2$ 为状态量, $u(t)$ 为控制量, $f(x_1, x_2)$ 为未知的系统模型, $r(t)$ 为被跟踪的参考信号, e 为系统跟踪误差, $d(t)$ 为周期负荷扰动信号.

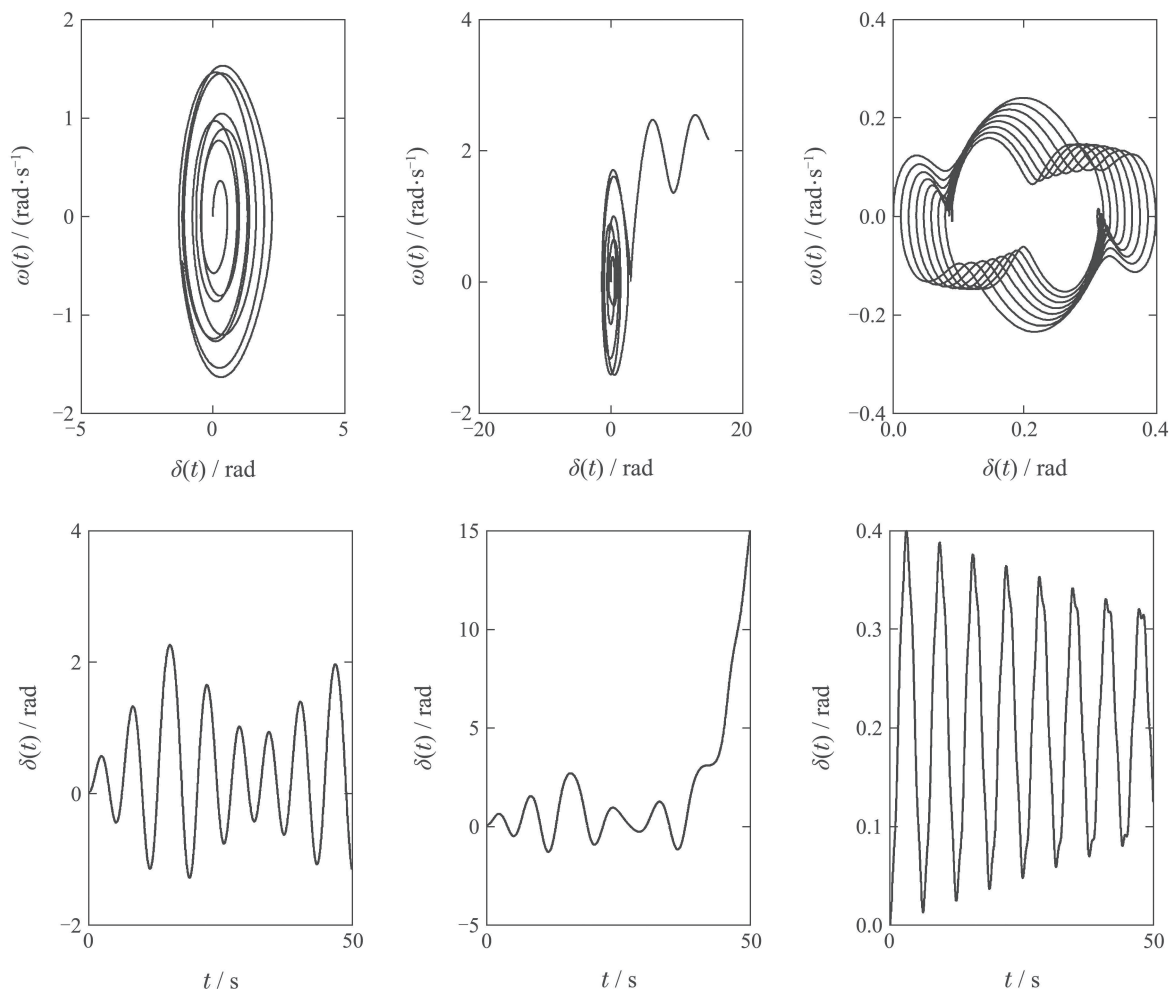


图 2 不同幅值和频率的扰动负载作用下系统特性

Fig. 2 System characteristics under perturbation load with different amplitude and frequency

假设负荷扰动信号和参考输入均由外部系统产生, 且令 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$, $\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$, 其中 $v_1 = d(t)$, $v_3 = r(t)$, 对原系统和外系统进行合并, 得复合系统如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, u), \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{v}, \\ e = x_1 - v_3, \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, u) = \begin{bmatrix} x_2 \\ f(x_1, x_2) + v_1 + u \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1e} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{1r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_e & 0 & 0 \\ \sigma_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_r \\ 0 & 0 & -\sigma_r & 0 \end{bmatrix}.$$

控制目标: 在系统模型 $f(x_1, x_2)$ 未知情况下, 设计自适应控制器 $u(t)$, 使得系统(3)抑制周期负荷扰动 $d(t)$ 作用下渐近跟踪参考系统输出 $r(t)$. 在分析中给出如下假设和引理:

假设 1 参考系统输出 $r(t)$ 及其 2 阶导数存在且有界.

假设 2 未知负载扰动项 $d(t)$ 有界, 但界未知, 即 $|d(t)| < \delta$.

引理 1(La Salle's 不变集原理)^[16] 对于一个动态系统 $\dot{x} = f(x)$, 其中 $f(x)$ 为连续函数, 若存在一个具有一阶连续偏导的连续函数 $V(x)$, 且满足如下条件:

- 1) 当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时, $V(x) \rightarrow \infty$;
- 2) 对于任意的 $x \in \mathbb{R}^n$, 有 $\dot{V}(x) \leq 0$.

定义集合

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n : \dot{V}(x) = 0\},$$

M 是 S 中的最大不变集, 则对于 $\forall x_0 \in \mathbb{R}^n$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x(t)$ 趋于不变集 M .

由输出调节理论^[17-18]可知, 模型未知的互联电力系统(3)的输出调节方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{V}} \times \mathbf{A}_1 \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_2 \\ f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) + v_1 + \mathbf{U} \end{bmatrix}, \\ 0 = \mathbf{X}_1 - v_3. \end{cases} \quad (4)$$

求解上述输出调节方程,得

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1(v) = v_3, \\ \mathbf{X}_2(v) = \sigma_r v_4, \\ \mathbf{U}(v) = -f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) - \sigma_r^2 v_3 - v_1. \end{cases} \quad (5)$$

上述输出调节方程的解,也称为零动态中心流形,是所期望的理想状态,该流形形式如下:

$$\mathbf{M} = \{(x, v) \in \mathbb{R}^n \times V | (x_1, x_2) = (\mathbf{X}_1(v), \mathbf{X}_2(v))\}. \quad (6)$$

因此,非线性输出调节的问题被进一步转化,问题转变为找到合适控制信号 $u(t)$,使得系统轨迹无限趋于零动态中心流形,即

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - \mathbf{X}(v(t))) &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (u(t) - \mathbf{U}(v(t))) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

为实现上述目的,设 \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 和 \tilde{u} 分别为实际状态和控制输入与零稳态之间的差值,对原系统(3)进行坐标转换,得

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = x_1 - \mathbf{X}_1(v), \\ \tilde{x}_2 = x_2 - \mathbf{X}_2(v), \\ \tilde{u} = u - \mathbf{U}(v). \end{cases} \quad (8)$$

因此,控制目标转换为设计控制器 u ,使得系统的状态误差满足 $\tilde{x}_1 \rightarrow 0, \tilde{x}_2 \rightarrow 0$,当 $t \rightarrow \infty$.对式(8)求导,得

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = f(x_1, x_2) + v_1 + \tilde{u} + \mathbf{U}(v) + \sigma_r^2 v_3, \\ \dot{\tilde{u}} = u - \mathbf{U}(v). \end{cases} \quad (9)$$

自此,模糊自适应输出调节问题被转化为模糊自适应镇定问题,下文将基于系统(9)设计镇定控制器.

3 模糊自适应输出调节控制器设计

3.1 基于Mamdani法的模糊逼近

为解决系统(9)的镇定问题,首先得获取未建模部分 $f(x_1, x_2)$ 的表达式,根据模糊控制中的万能逼近原理^[19],可得 $f(x_1, x_2)$ 的近似表达式如下:

$$\hat{f}((x_1, x_2)|\theta) = \hat{\theta}^T \xi(x_1, x_2), \quad (10)$$

其中: $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值, $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^n$ 为自适应参数,具体定义见后文; n 为模糊规则数; $\xi(x_1, x_2)$ 为模糊基相量,其定义如下所示:

$$\xi_{l_1 l_2}(x) = \frac{\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^5 \sum_{l_2=1}^2 (\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i))}. \quad (11)$$

设 θ^* 为自适应参数 $\hat{\theta}$ 的最优参数,其表达式如下所示:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in \Omega} [\sup_{x \in \mathbb{R}^2} |\hat{f}((x_1, x_2)|\theta) - f(x_1, x_2)|], \quad (12)$$

其中 Ω 为 θ 的集合,则有

$$f(x_1, x_2) = \theta^{*T} \xi(x_1, x_2) + \varepsilon, \quad (13)$$

其中 ε 为模糊系统逼近误差,其值未知但有界,则

$$f(x_1, x_2) - \hat{f}((x_1, x_2)|\theta) = \tilde{\theta}^T \xi(x_1, x_2) + \varepsilon, \quad (14)$$

其中 $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$ 为参数误差.

由式(14)可知,由于引入模糊逼近项,系统建模误差与参数误差 $\tilde{\theta}$ 有关.因此,若要使系统精确跟踪参考信号,除了考虑状态误差之外,在设计控制器时逼近误差也必须考虑在内.

将式(13)代入式(9),系统方程可被进一步转换为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \theta^{*T} (\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \tilde{u}, \\ \dot{\tilde{u}} = u - \mathbf{U}(v). \end{cases} \quad (15)$$

综上,通过模糊控制中的万能逼近公式获得了未建模部分 $f(x_1, x_2)$ 的近似表达式,下文将基于系统(15)进行模糊自适应输出调节控制器设计.

3.2 基于Backstepping的自适应输出调节控制器设计

实际控制器输出由两部分构成,如图3所示.

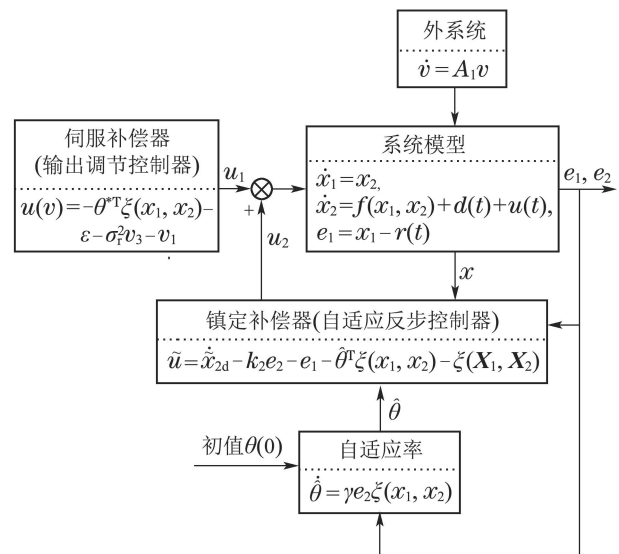


图3 控制系统结构图

Fig. 3 Control system structure diagram

由图3可知,系统控制器由“伺服补偿器+镇定补偿器”构成,即

$$u = \tilde{u} + \mathbf{U}(v). \quad (16)$$

输出调节方程的解作为前馈控制项 $\mathbf{U}(v)$,其作用

是补偿跟踪误差; 而反馈控制项 \tilde{u} , 其作用是镇定系统, 并减小逼近误差对于控制系统性能的影响。

由于系统方程(15)为标准反馈系统, 因此采用Backstepping法即可解决系统镇定问题, 即求解 \tilde{u} , 具体步骤如下:

步骤1 定义辅助变量 $e_1 = \tilde{x}_1$, 并对其进行求导, 得

$$\dot{e}_1 = \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2. \quad (17)$$

取

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2, \quad (18)$$

对其进行求导, 有

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1\tilde{x}_2. \quad (19)$$

为保证 \dot{V}_1 负定, 则可令 $\tilde{x}_2 = -k_1e_1$ ($k_1 > 0$), 即 $\tilde{x}_{2d} = -k_1e_1$. 现在任务转变为设计控制器 \tilde{u} , 使得 $\tilde{x}_2 \rightarrow \tilde{x}_{2d}$, 当 $t \rightarrow \infty$.

步骤2 定义辅助变量 $e_2 = \tilde{x}_2 - \tilde{x}_{2d}$, 并对其进行求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_{2d} = \\ &\theta^{*T}(\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \tilde{u} - \dot{\tilde{x}}_{2d}. \end{aligned} \quad (20)$$

同理, 构造新的李雅普诺夫函数, 其形式如下:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2, \quad (21)$$

对其进行求导, 有

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2. \quad (22)$$

此时

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1\tilde{x}_2 = e_1(e_2 + \tilde{x}_{2d}),$$

又因为 $\tilde{x}_{2d} = -k_1e_1$, 所以

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1e_2 - k_1e_1^2,$$

将其代入式(22), 得

$$\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 + e_2(e_1 + \dot{e}_2). \quad (23)$$

为保证 \dot{V}_2 负定, 则可令 $e_1 + \dot{e}_2 = -k_2e_2$ ($k_2 > 0$). 将 $\dot{e}_2 = \theta^{*T}(\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \tilde{u} - \dot{\tilde{x}}_{2d}$ 代入可得

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \dot{\tilde{x}}_{2d} - k_2e_2 - e_1 - \hat{\theta}^T(\xi(x_1, x_2) - \\ &\xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)), \end{aligned} \quad (24)$$

则

$$\begin{aligned} u &= \tilde{u} + \mathbf{u}(v) = \\ &\dot{\tilde{x}}_{2d} - k_2e_2 - e_1 - \hat{\theta}^T(\xi(x_1, x_2) - \\ &\xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) - f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) - \sigma_r^2v_3 - v_1. \end{aligned} \quad (25)$$

将式(13)代入上式, 得

$$\begin{aligned} u &= \dot{\tilde{x}}_{2d} - k_2e_2 - e_1 - \hat{\theta}^T\xi(x_1, x_2) - \\ &(\theta^{*T}\xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) + \varepsilon - \hat{\theta}^T\xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) - \\ &\sigma_r^2v_3 - v_1. \end{aligned} \quad (26)$$

进一步化简, 得

$$\begin{aligned} u &= \dot{\tilde{x}}_{2d} - k_2e_2 - e_1 - \hat{\theta}^T\xi(x_1, x_2) - \\ &\varepsilon - \sigma_r^2v_3 - v_1. \end{aligned} \quad (27)$$

步骤3 定义辅助变量 $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$, 并对其进行求导, 由于 θ^* 为常数, 则

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}}. \quad (28)$$

同理, 构造新的李雅普诺夫函数, 其形式如下:

$$V = V_2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^T\tilde{\theta}, \quad (29)$$

对其进行求导, 有

$$\dot{V} = \dot{V}_2 - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} = -k_1e_1^2 + e_1e_2 + e_2\dot{e}_2 - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}. \quad (30)$$

将式(20)代入上式, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1e_1^2 + e_1e_2 + \\ &e_2[\theta^{*T}(\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \\ &\tilde{u} - \dot{\tilde{x}}_{2d}] - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}. \end{aligned} \quad (31)$$

又因为 $\theta^* = \tilde{\theta} + \hat{\theta}$, 将其代入上式, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1e_1^2 + e_1e_2 + \\ &e_2[\hat{\theta}^T(\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \\ &\tilde{u} - \dot{\tilde{x}}_{2d}] + e_2\tilde{\theta}^T\xi(x_1, x_2) - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}. \end{aligned} \quad (32)$$

整理上式, 得

$$\dot{V} = \dot{V}_2 + \tilde{\theta}(e_2\xi(x_1, x_2) - \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\theta}}). \quad (33)$$

为保证 \dot{V} 负定, 则可令

$$e_2\xi(x_1, x_2) - \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\theta}} = 0, \quad (34)$$

因此, 自适应率 $\hat{\theta}$ 可由下式确定:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma e_2 \xi(x_1, x_2). \quad (35)$$

基于上述分析, 下面给出本文的主要结果和证明。

定理1 对于由系统(1)描述的模型未知且受周期负荷扰动的互联电力系统, 在控制器(27)及自适应率(35)作用下, 选择合适的参数 $k_1, k_2, \varepsilon, \gamma$, 系统输出能够渐近跟踪参考信号并完全抗御周期负荷扰动。

证 构造如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^T\tilde{\theta}. \quad (36)$$

对式(36)进行求导,得

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\theta}. \quad (37)$$

将式(17)(20)(28)代入式(37),得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + \\ & e_2 [\hat{\theta}^T (\xi(x_1, x_2) - \xi(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)) + \\ & \tilde{u} - \dot{x}_{2d}] + e_2 \tilde{\theta} \xi(x_1, x_2) - \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\theta}. \end{aligned} \quad (38)$$

将式(24)和式(35)代入式(38),得

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2. \quad (39)$$

因为原点为系统最大不变集,所以根据La Salle's 不变集原理可知,闭环系统在原点处渐近稳定,证明了本文算法的收敛性. 证毕.

4 仿真与结果分析

为验证算法有效性,本节将通过MATLAB仿真测试所设计控制器性能. 整个仿真过程中,系统参数取

$$H = 100, D = 2, P_s = 100, P_m = 20;$$

模糊控制器采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器,隶属度选用高斯函数,模糊规则数为25条;控制器参数取

$$k_1 = 1, k_2 = 3, \gamma = 5000, \epsilon = 0.01;$$

外部周期扰动信号取

$$d(t) = 1/H \times P_e \times \cos(\sigma_e \times t),$$

其中扰动幅值和频率分别取 $P_e = 29.7, \sigma_e = 1$; 期望被跟踪的信号取 $r(t) = \sin t$.

仿真结果如图4-7所示. 图4给出了系统 S_1 与系统 S_2 等值发电机 q 轴之间相对角度 $\delta(t)$ 和相对角速度 $w(t)$ 的跟踪轨迹, 图5给出了标称模型与实际模型输出曲线, 图6给出了相对角度和相对角速度的跟踪误差, 图7给出了控制器输出量.

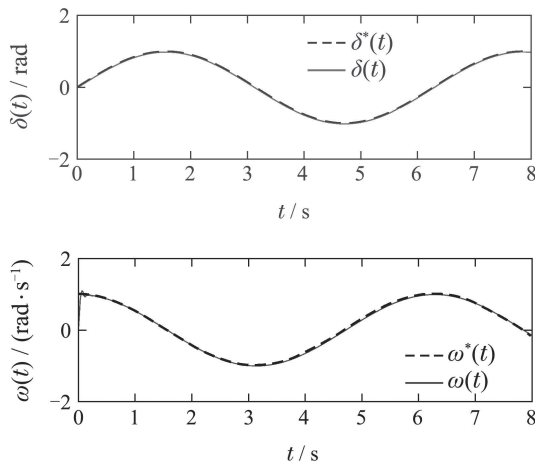


图4 相对角度和角速度跟踪轨迹

Fig. 4 Relative angle and angular velocity tracking trajectory

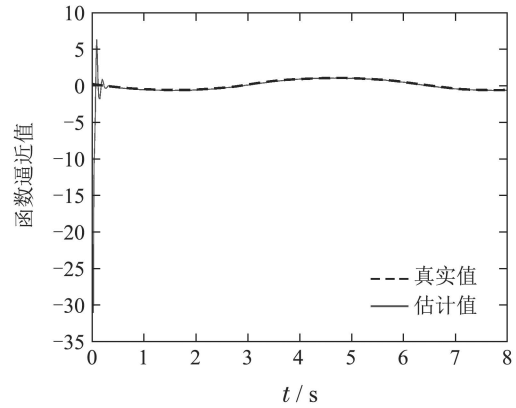


图5 标称模型与实际模型

Fig. 5 Nominal model and actual model

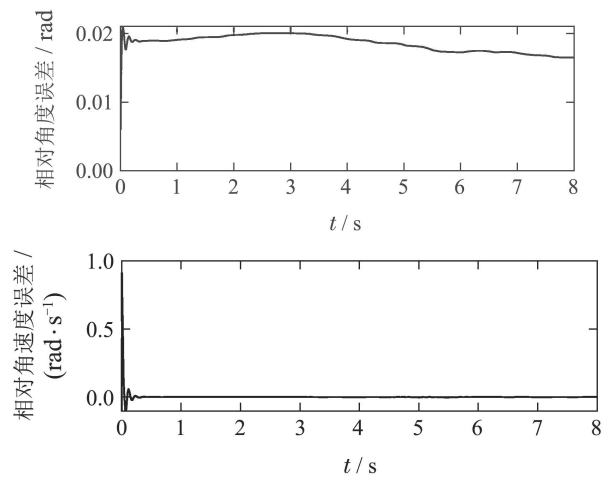


图6 相对角度和角速度跟踪误差

Fig. 6 Relative angle and angular velocity tracking error

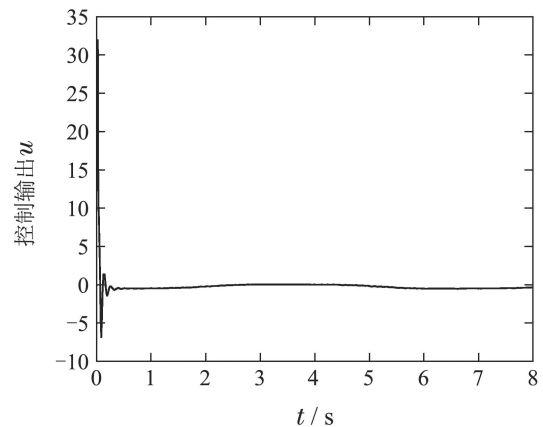


图7 控制器输出量

Fig. 7 Controller output

由图4可知,所设计的控制器在扰动存在下,能快速准确跟踪参考信号,证明所设计的控制器能使系统抵御干扰并快速精准跟踪参考信号.

由图5可知,虽然在前期有波动,但模糊逼近系统能在较短时间内逼近实际系统模型,且逼近误差较小.

由图6可知, 所设计的控制器在扰动存在下, 能快速精准地将位置和速度的误差控制在较小范围内, 证明所设计控制器具有很好的稳态特性。

由图7可知, 在0.5 s之前, 由于位置误差较大, 此时控制器增益较大, 能很快镇定系统, 使得实际输出跟随参考输入; 在0.5 s之后, 位置误差减小后, 控制器增益随之减小, 利用较少的能量便可镇定系统, 证明了所设计的控制器具有很好的动态特性。

5 结论

本文以互联电力系统为研究对象, 考虑了模型未知与扰动并存的非线性复杂受控系统的渐近跟踪与扰动抑制问题, 利用模糊逼近理论完成了系统建模, 利用输出调节解决了扰动存在条件下的渐近跟踪问题, 并通过Lyapunov理论分析证明了所设计的控制器能使闭环系统渐近稳定。但本文仅考虑负载扰动为已知的周期信号且通信网络无时滞情形下的跟踪问题, 后期可考虑采用扰动观测器预估扰动值, 并通过构造含有时滞项的输出调节方程求解系统零稳态, 解决通信时滞对于系统的影响, 此类系统虽然研究难度大, 但更符合实际情况, 且具有较大研究价值。

参考文献:

- [1] BILLINTON R, ALLAN R N. *Reliability Evaluation of Power Systems*. Boston: Springer, 1984.
- [2] MIN Yong, CHEN Lei, JIANG Qirong. *Power System Stability*. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
(闵勇, 陈磊, 姜齐荣. 电力系统稳定分析. 北京: 清华大学出版社, 2016.)
- [3] LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(12): 53 – 56.
(梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53 – 56.)
- [4] SHEN Xin, SHU Hongchun, CAO Min, et al. Risk assessment and research of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1): 230 – 238.
(沈鑫, 束洪春, 曹敏, 等. 大区互联电网的动态稳定风险评估研究与应用. 电工技术学报, 2016, 31(S1): 230 – 238.)
- [5] AZARBAHRAM A, AMINI A, SOJOODI M. Resilient fixed-order distributed dynamic output feedback load frequency control design for interconnected multi-area power systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(5): 1139 – 1151.
- [6] REN Jianwen, XU Yingqiang, DONG Shengxiao. A decentralized scheduling model with energy storage participation for interconnected power system with high wind power penetration. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1079 – 1086.
(任建文, 许英强, 董圣孝. 考虑储能参与的含高比例风电互联电力系统分散式调度模型. 电网技术, 2018, 42(4): 1079 – 1086.)
- [7] ZHANG Yi, LIU Xiangjie. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(5): 621 – 630.
(张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 621 – 630.)
- [8] CHEN Shiming, LU Jiasheng, GAO Yanli. Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability. *Control and Decision*: 1 – 9, <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>.
(陈世明, 卢家胜, 高彦丽. 基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制. 控制与决策: 1 – 9, <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>.)
- [9] ZHONG Z, ZHU Y, LIN C, et al. A fuzzy control framework for interconnected nonlinear power networks under TDS attack: Estimation and compensation. *Journal of The Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics*, 2019, 7(8): 1 – 15.
- [10] CHEN Dengyi, LI Xiacong, LIU Song. Adaptive backstepping sliding mode controller design for multi-region interconnected power system with SSSC. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 200 – 205.
(陈登义, 李啸骢, 刘松. 多区域互联电力系统静止同步串联补偿器自适应反步滑模控制器设计. 电网技术, 2019, 43(1): 200 – 205.)
- [11] WANG Shu. *Research on coordinated control of energy storage technology applied to power system*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
(王姝. 储能技术应用于电力系统时的协调控制研究. 武汉: 华中科技大学, 2015.)
- [12] ISIDORI A, BYRNES C I. Output regulation of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 35(2): 131 – 140.
- [13] HUANG J. *Nonlinear Output Regulation: Robust and Adaptive Approach*. Jinan, China: IEEE, 2007.
- [14] ZHOU G P, CHENG S J, HUANG J H, et al. Energy storage based adaptive control of disturbed load interconnected power systems. *Advanced Materials Research*, 2013, 732/733: 981 – 987.
- [15] LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power System (2nd Edition)*. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
(卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制(第2版). 北京: 清华大学出版社, 2008.)
- [16] LASALLE J P. Stability theory for ordinary differential equations. *Journal of Differential Equations*, 1968, 4(1): 57 – 65.
- [17] HUANG J. *Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications*. Philadelphia, PA: SIAM, 2004.
- [18] HUANG J, CHEN Z Y. A general framework for tackling the output regulation problem. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2004, 49(12): 2203 – 2218.
- [19] WANG Lixin. *Fuzzy System and Fuzzy Control Tutorial*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
(王立新. 模糊系统与模糊控制教程. 北京: 清华大学出版社, 2003.)

作者简介:

金鹏 博士研究生, 目前研究方向为非线性系统控制、输出调节, E-mail: jinpeng_kd@163.com;

马倩 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性系统的镇定与控制、时滞系统的稳定性分析及鲁棒控制、多智能体系统协调控制, E-mail: qma@njust.edu.cn;

周国鹏 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为非线性控制、电力系统分析, E-mail: zhgpeng@hbust.edu.cn.