

有载分接开关驱动轴转动位置的 闭环反馈抗扰控制策略

南凯刚¹, 杨帆², 汪可², 成海炎¹, 张进华¹, 洪军¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 100192, 北京)

摘要: 针对有载分接开关在实现切换工作时驱动轴存在传动不稳定、转动位置不精确的问题, 提出了一种以有载分接开关驱动轴转动位置为被控量的闭环反馈抗扰控制策略。首先, 根据在电动机作用下有载分接开关工作状态对驱动轴的转动位置需求, 建立了驱动轴期望位置的误差动态控制系统; 其次, 设计了两个跟踪微分器以计算驱动轴位置信号的光滑跟踪信号, 进而可通过调节参数来控制驱动轴位置轨迹的过渡过程; 然后, 设计了两个扩张状态观测器去估计误差动态控制系统中的状态值及由于有载分接开关在工作中受负载变化、切换方向改变等因素引起的总和扰动值; 最后, 利用驱动轴位置误差信号及误差动态控制系统的状态估计值设计非线性反馈控制器, 并在控制器中补偿扩张状态观测器估计的总和扰动值来实现抗扰控制效果。应用 Matlab 仿真软件对所提控制策略进行了验证, 仿真结果表明, 所提控制策略可实现有载分接开关驱动轴的期望位置控制, 与传统 PID 控制策略相比, 所提抗扰控制策略将有载分接开关驱动轴闭环反馈控制下位置误差减少了 85%。

关键词: 有载分接开关; 误差动态控制系统; 自抗扰控制; 扩张状态观测器; 闭环反馈控制

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202206008 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0058-09



OSID 码

Closed Loop Feedback Disturbance Rejection Control Strategy for Drive Shaft Rotational Position of on-Load Tap-Changer

NAN Kaigang¹, YANG Fan², WANG Ke², CHENG Haiyan¹, ZHANG Jinhua¹, HONG Jun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In terms of problems of unstable transmission and inaccurate rotational position for a drive shaft when an on-load tap-changer realizes switching operations, a closed-loop feedback disturbance rejection control strategy is proposed with the rotational position for the drive shaft of the on-load tap-changer taken as the controlled variable. Firstly, according to rotational position requirements of the drive shaft for the on-load tap-changer under actions of an electric mechanism, an error dynamic control system is established for the desired position of the drive shaft. Secondly, two tracking differentiators are designed to calculate smooth tracking signals of drive shaft position signals, and then transition processes of the drive shaft position trajectory can be controlled by adjusting parameters in tracking differentiators. Then, two extended state observers are designed to estimate state values in the error dynamic control system and the total disturbance

收稿日期: 2021-11-11。 作者简介: 南凯刚(1985—),男,工程师;张进华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5500-202055351A-0-0-00)。

网络出版时间: 2022-03-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220305.1955.004.html>

caused by load change, switching direction change and other factors for the on-load tap-changer during operation. Finally, a nonlinear feedback controller is designed by using the position error signal of the drive shaft and state estimation values of the error dynamic control system, and the total disturbance value estimated by the extended state observer is compensated in the nonlinear feedback controller to achieve effects of disturbance rejection control. The Matlab simulation software is used to verify the proposed control strategy. Simulation results show that the proposed control strategy can realize the desired position control of the drive shaft for the on-load tap-changer. Compared with the traditional PID control strategy, the proposed disturbance rejection control strategy reduces the position error of the drive shaft for the on-load tap-changer under closed-loop feedback control by 85%.

Keywords: on-load tap-changer; error dynamic control system; active disturbance rejection control; extended state observer; closed loop feedback control

有载分接开关是特高压直流输电工程最关键、最核心的设备特高压换流变中的关键组件之一^[1]。通过有载分接开关的调整,换流变可以维持运行中阀侧直流电压恒定不变,保证直流系统的安全经济运行,也可以实现特高压直流输电系统降压运行^[2-3]。国内外企业、科研单位也研发出了机械式、电力电子式、混合式等形式的有载分接开关^[4]。各类有载分接开关主要由切换芯子、分接选择器、电动机、油室和安全保护装置等部件组成^[5]。有载分接开关遵循先选择后切换的基本原则完成每次工作,由分接选择器选择好要切换的挡位,再由切换芯子完成不中断负载电流的情况下切换电流,分接选择器和切换芯子的完成这一切换动作是由基于电动机构的驱动系统来进行驱动控制的,并且需要实现双向的驱动控制^[6]。电动机构的输出轴通过联轴器、换向齿轮、减速器等结构连接至有载分接开关的输入驱动轴。有关有载分接开关故障分析的工作表明电动机是较容易产生故障的主要部件之一^[7]。有载分接开关是特高压换流变中经常动作部件,因此驱动系统的平稳、准确的驱动控制也是特高压直流输电工程稳定安全运转的前提。

电动机构包括电动机、传动换向齿轮盒、传动轴和手动操作机构等控制和传动机构,其共同组成了有载分接开关的驱动系统,驱动系统的操作机构一般安装在变压器油箱侧壁上,通过电动、手动、遥控和自动调压装置控制电动机,借助传动换向齿轮盒和传动轴可实现将电动机的转矩传至分接选择器和切换芯子^[8]。虽然目前的有载分接开关电动机构通过微处理器技术、单片机技术、控制电路设计等方法已经向着智能化、模块化发展,但是其仍是一种开环控制方法,即电动机收到控制信号后,在不受外界任

何干扰和中断情况下完成指定动作后停止^[9]。随着现代控制理论的发展,研究人员开发设计了多种闭环反馈控制策略并成功应用在各类电动机操作中,达到了更好的控制效果^[10]。因此本文考虑针对有载分接开关电动机构工作特点,设计适合的驱动系统闭环反馈控制方法,来使其能够实现更为平稳、准确的驱动控制。

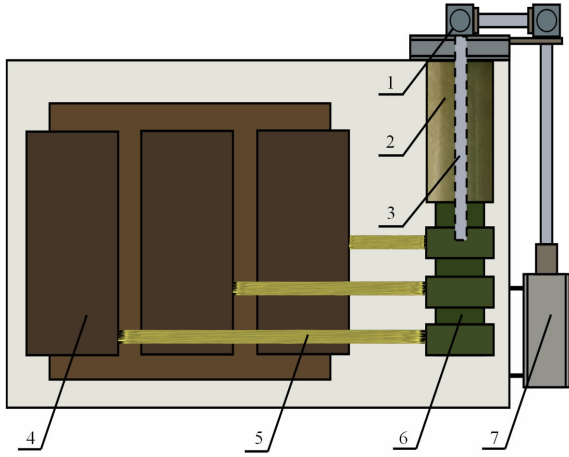
设计有载分接开关驱动电机的闭环反馈控制需要考虑到电机驱动切换芯子和分接选择器时的扭矩变化、切换芯子释能时的负载冲击、齿轮正反转间隙误差等非线性因素,这些非线性因素会造成驱动电机控制系统的数学模型不精确。Han 设计并提出了跟踪微分器、扩张状态观测器,并考虑两者产生信号的非线性反馈组合,最终整合提出的一种不依赖被控对象具体精确数学模型控制算法^[11]。该算法在液压控制系统^[12]、气动控制系统^[13]、机器人控制系统^[14]等多种应用中得到成功的验证,尤其是该算法已经在多种电机控制问题中展现出较强的优势^[15]。因此自抗扰控制算法可以作为有载分接开关驱动电机的理论基础,但是仍需针对有载分接开关自身运动的特点进行算法上设计研究。

本文针对有载分接开关电动机构作用下驱动系统的闭环反馈控制问题,梳理了驱动系统通过闭环反馈期望得到的控制效果,进行了驱动系统轨迹跟踪误差的动态系统建模,利用跟踪微分器对有载分接开关驱动系统输出的期望值进行了期望轨迹计算,基于动态系统模型设计了扩张状态观测器和误差反馈控制器。最后通过仿真验证了所提控制算法的有效性,这为有载分接开关驱动系统闭环反馈控制提供了理论基础。

1 驱动系统控制问题描述

1.1 有载分接开关控制需求

图1展示了有载分接开关在变压器中的一个应用示意简图。如图1所示,有载分接开关的电机控制箱一般安装在变压器箱壁上,通过控制电机经垂直和水平传动轴、齿轮减速换向箱等结构来将电机转矩传递到有载分接开关驱动切换芯子和分接选择器的驱动轴^[16]。切换芯子和分接选择器是由同一根驱动轴来实现驱动的,驱动轴同时驱动切换芯子的快速机构和分接选择器的极性选择^[17]。



1—齿轮箱;2—切换芯子;3—驱动轴;4—变压器;
5—分接引线;6—分接选择器;7—电机控制箱。

图1 有载分接开关变压器中应用示意简图

Fig.1 Application diagram of on-load tap-changer in transformer

根据国内外主要有载分接开关生成设备的实际工作情况,在有载分接开关在电动机构的驱动下实现一次电压调节动作可以分为4个阶段:首先电机和驱动轴均从初始时刻和初始位置开始旋转进行切换芯子储能动作和分接选择器极性选择动作;在选择器选择动作完成后通过间歇机构使其保持所需极性选择,并且切换芯子继续储能直到释能开始;切换芯子储能机构短时间内完成释能带动切换开关实现变压器有载切换,在切换芯子释能期间,电机和驱动轴在持续运动;驱动轴在电机作用下继续驱动切换芯子储能机构直到预定的终止位置,也是下次切换的起始位置。

在有载分接开关实现一次切换运动中,驱动轴需要在设定的时间内平稳、准确的驱动切换芯子和分接选择器中的机构达到期望的角度。在运动中,驱动轴会受到切换芯子和分接选择器在不同动作顺

序下的变化负载,而且在切换芯子释能动作时驱动轴会受到冲击载荷的影响。此外,根据变压器调压需求,有载分接开关会有不同方向的动作要求,在换向时由于齿轮间隙等因素会造成电机期望驱动角度和驱动轴实际运动角度不一致,进而导致起始或终止位置存在误差。为了有载分接开关安全稳定的工作,考虑其控制工程中的动作时序和需求,本文拟对分接开关驱动动态系统进行建模,将驱动轴的旋转角度进行反馈调节电机的控制量,实现驱动轴的平稳准确运动,为有载分接开关驱动系统提供一种闭环反馈控制方法的理论基础。

1.2 驱动系统动态系统建模

有载分接开关的驱动电机安装在变压器外壁的电机箱中,根据现有国内外有载分接开关电动机构专利,目前电动机构中应用的是步进电机^[18-19]。因此本文以二相混合式步进电机为例,对有载分接开关驱动系统进行动态系统建模。基于研究者对步进电机的数模型的推导^[20],二相混合式步进电机数学表达式为

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = \frac{K_m}{J} i_b(t) - \frac{F}{J} \omega(t) - \frac{\tau(t)}{J} \\ \dot{i}_a(t) = \frac{v_a(t)}{L} - \frac{R}{L} i_a(t) + P\omega(t) i_b(t) \\ \dot{i}_b(t) = \frac{v_b(t)}{L} - \frac{R}{L} i_b(t) - P\omega(t) i_a(t) - \frac{K_m}{L} \omega(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta(t)$ 、 $\omega(t)$ 为电机轴的角位移和角速度; $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 为电机的两相线圈电流; J 为电机转子系统的转动惯量; K_m 为扭矩常数; F 为电机的黏滞摩擦系数; $\tau(t)$ 为负载转矩; $v_a(t)$ 、 $v_b(t)$ 为电机的两相输入电压; R 、 L 为各相绕组的电阻和电感; P 为电机转子齿数。

设有载分接开关在电机作用下的驱动轴的转动角度及角速度为 $\varphi(t)$ 、 $\dot{\varphi}(t)$,由于电机输出到驱动轴运动间存在各种干扰,驱动轴转动角速度与电机输出轴的角速度间存在如下关系

$$\dot{\varphi}(t) = \dot{\omega}(t) + D(t) \quad (2)$$

式中 $D(t)$ 为时变的各类未知干扰力。

针对有载分接开关驱动系统,定义误差变量

$$\begin{cases} e_1(t) = i_a(t) - i_{ad}(t) \\ e_2(t) = i_b(t) - i_{bd}(t) \\ e_3(t) = \varphi(t) - \varphi_d(t) \\ e_4(t) = \dot{\varphi}(t) - \dot{\varphi}_d(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{ad}(t)$ 、 $i_{bd}(t)$ 、 $\varphi_d(t)$ 和 $\varphi_d(t)$ 为期望变量运动轨迹。通过微分平坦理论^[21], 在光滑的电流期望轨迹 $i_{ad}(t)$ 和位置期望轨迹 $\varphi_d(t)$ 确定时, 可以得到其他期望变量的轨迹, 即

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_d(t) = \dot{\varphi}_d(t) \\ i_{bd}(t) = \frac{J\ddot{\varphi}_d(t) + F\dot{\varphi}_d(t)}{K_m} \end{cases} \quad (4)$$

根据误差变量可以进一步得到分接开关驱动系统的误差动态控制系统

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = \frac{1}{L}(v_a(t) - v_{ad}(t)) - \frac{R}{L}e_1(t) + \\ P(e_2(t)e_3(t) + e_3(t)i_{bd}(t) + e_2(t)\varphi_d(t)) \\ \dot{e}_2(t) = \frac{1}{L}(v_b(t) - v_{bd}(t)) - \frac{R}{L}e_2(t) - \\ \frac{K_m}{J}e_3(t) - P(e_1(t)e_3(t) + e_3(t)i_{ad}(t) + \\ e_1(t)\varphi_d(t)) \\ \dot{e}_3(t) = \frac{K_m}{J}e_2(t) - \frac{F}{J}e_3(t) - \frac{\tau(t)}{J} + D(t) \\ \dot{e}_4(t) = e_3(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $v_{ad}(t)$ 、 $v_{bd}(t)$ 为分接开关电动机构的期望控制变量轨迹, 其表达式可由期望轨迹 $i_{ad}(t)$ 、 $\varphi_d(t)$ 表示

$$\begin{cases} v_{ad}(t) = Li_{ad}(t) + Ri_{ad}(t) - \\ \frac{PL}{K_m}\dot{\varphi}_d(t)(J\ddot{\varphi}_d(t) + F\dot{\varphi}_d(t)) \\ v_{bd}(t) = \frac{JL}{K_m}\varphi_d(t) + \frac{LF + RJ}{K_m}\ddot{\varphi}_d(t) + \\ \left(\frac{RF}{K_m} + K_m + PLi_{ad}(t)\right)\varphi_d(t) \end{cases} \quad (6)$$

通过微分平坦性^[22], 设置误差动态控制系统(5)的两个平坦输出为误差变量 $e_1(t)$ 和 $e_4(t)$, 即电流 $i_a(t)$ 和驱动轴转动角度 $\varphi(t)$ 的跟踪误差。通过表达式(1)~(6), 分接开关驱动误差动态系统可进一步表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = b_a v_a(t) + f_a(t) \\ \dot{e}_4(t) = \dot{e}_3(t) = b_b v_b(t) + f_b(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$b_a = \frac{1}{L}; \quad b_b = \frac{K_m}{JL} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_a(t) = & P(e_2(t)e_3(t) + e_3(t)i_{bd}(t) + \\ & e_2(t)\varphi_d(t)) - \frac{1}{L}v_{ad}(t) - \frac{R}{L}e_1(t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_b(t) = \frac{F\tau(t)}{J^2} - \frac{K_m}{JL}v_{bd}(t) - \frac{\dot{\tau}(t)}{J} -$$

$$\frac{K_m}{JL}(Re_2(t) + K_m e_3(t)) + \dot{D}(t) - \frac{F}{J^2}(K_m e_2(t) -$$

$$\begin{aligned} & Fe_3(t)) - \frac{FD(t)}{J} - \frac{K_m P}{L}(e_1(t)e_3(t) + \\ & e_3(t)i_{ad}(t) + e_1(t)\varphi_d(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

虽然分接开关驱动误差动态系统两个控制量增益 b_a 和 b_b 为两个常值参数, 但是控制算法设计中会存在参数不准确或参数未知等问题, 设 $\hat{b}_a$ 和 $\hat{b}_b$ 为分接开关驱动误差动态系统两个控制量增益的可调参数, 可调增益与实际增益之间的误差为

$$\tilde{b}_a = \hat{b}_a - b_a; \quad \tilde{b}_b = \hat{b}_b - b_b \quad (11)$$

基于自抗扰控制算法中的内扰和外扰动和并成总和扰动进行估计和补偿控制的思想^[23], 将分接开关驱动误差动态系统(7)中的函数项 $f_a(t) - \tilde{b}_a v_a(t)$ 和 $f_b(t) - \tilde{b}_b v_b(t)$ 看作系统中的总和扰动, 并且将其扩张成新的状态量

$$\begin{cases} s_2(t) = f_a(t) - \tilde{b}_a v_a(t) \\ s_6(t) = f_b(t) - \tilde{b}_b v_b(t) \end{cases} \quad (12)$$

此外, 将分接开关驱动误差动态系统中的变量设为状态量 $s_1(t) = e_1(t)$ 、 $s_3(t) = e_4(t)$ 、 $s_4(t) = e_4(t)$ 和 $s_5(t) = e_4(t)$, 得到分接开关驱动误差动态扩张系统

$$\begin{cases} \dot{s}_1(t) = s_2(t) + \hat{b}_a v_a(t) \\ \dot{s}_2(t) = h_a(t) \\ \dot{s}_3(t) = s_4(t) \\ \dot{s}_4(t) = s_5(t) \\ \dot{s}_5(t) = s_6(t) + \hat{b}_b v_b(t) \\ \dot{s}_6(t) = h_b(t) \end{cases} \quad (13)$$

2 闭环反馈控制算法设计

针对有载分接开关驱动轴的驱动误差动态扩张系统, 本文提出了基于跟踪微分器和线性扩张状态观测器的非线性误差反馈抗扰控制策略。本文设计的闭环反馈抗扰控制算法的示意图如图2所示。

本文以有载分接开关驱动系统驱动轴的转动角度 φ_t 和驱动电机的线圈电流 i_{at} 为被控量, 设计双跟踪微分器, 得到期望被控量的跟踪信号 $\varphi_d(t)$ 和 $i_{ad}(t)$ 及其微分信号。两个被控量的跟踪信号与实际输出的载分接开关驱动系统驱动轴的转动角度 $\varphi(t)$ 和驱动电机的线圈电流 $i_a(t)$ 间的误差分别为 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$, 针对这两个误差变量设计了两个扩张状态观测器来估计相应动态系统中的未知非线性项, 所得到的估计变量为 $\hat{s}_2(t)$ 、 $\hat{s}_4(t)$ 、 $\hat{s}_5(t)$ 和 $\hat{s}_6(t)$, 利用误差及估计值设计非线性误差反馈控制器实现对有载分接开关驱动系统中电动机构的控制, 产生控制信号 $v_a(t)$ 和 $v_b(t)$ 。

法^[24],针对本文所应用的二阶和四阶扩张状态观测器,所对应的特征方程为

$$\begin{cases} f_{\lambda,1}(\lambda_1) = \lambda_1^2 + \beta_1\lambda_1 + \beta_2 \\ f_{\lambda,2}(\lambda_2) = \lambda_2^4 + \beta_3\lambda_2^3 + \beta_4\lambda_2^2 + \beta_5\lambda_2 + \beta_6 \end{cases} \quad (18)$$

为得到扩张状态观测器稳定的估计效果,可将两个特征方程配置为 $(\lambda_1 + w_1)^2$ 和 $(\lambda_2 + w_2)^2$,其中 w_1 和 w_2 是有载分接开关驱动误差系统(13)的系统带宽。在特征方程的配置下,两个扩张状态观测器的 6 个可调参数可设置为

$$\begin{cases} \beta_1 = 2w_1; \beta_2 = w_1^2 \\ \beta_3 = 4w_2; \beta_4 = 6w_2^2; \beta_5 = 4w_2^3; \beta_6 = w_2^4 \end{cases} \quad (19)$$

根据式(19),本文所应用的扩张状态观测器可以通过调整参数 w_1 和 w_2 实现状态估计。

2.3 误差反馈控制器

本文针对分接开关驱动误差动态扩张系统(13),在两个跟踪微分器和两个扩张状态观测器的基础上,可以得到分接开关驱动系统的期望值和实际值间的误差值,通过误差值间的线性或非线性的组合反馈可以得到不同的控制效果^[14],这在自抗扰控制算法的一些应用文章中也得到了广泛的验证,本文针对所得到的误差值,设计误差反馈控制器

$$\begin{cases} v_a(t) = \frac{-c_1 \text{fal}(s_1(t), \alpha_1, \delta_1) - s_2(t)}{\hat{b}_a} \\ v_b(t) = \frac{-c_3 \text{fal}(s_3(t), \alpha_3, \delta_3) - \frac{c_4 \text{fal}(s_4(t), \alpha_4, \delta_4)}{\hat{b}_b} - \frac{c_5 \text{fal}(s_5(t), \alpha_5, \delta_5) + s_6(t)}{\hat{b}_b}}{\hat{b}_b} \end{cases} \quad (20)$$

式中: c_1 、 c_3 、 c_4 和 c_5 为大于 0 的可调误差反馈控制器参数;非线性反馈调节函数 $\text{fal}(s(t), \alpha, \delta)$ 可以通过调节函数中的参数 α 和 δ 使其发挥“大误差,小增益;小误差,大增益”的特点,更利于有载分接开关的工程应用,起到更佳的控制效果^[25]。非线性反馈调节函数 $\text{fal}(s(t), \alpha, \delta)$ 的函数表达式为

$$\begin{aligned} \text{fal}(s(t), \alpha, \delta) = & \\ \begin{cases} \frac{s(t)}{\delta^{1-\alpha}}, & |s(t)| \leq \delta \\ |s(t)|^\alpha \text{sgn}(s(t)), & |s(t)| > \delta \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $0 < \alpha < 1$ 为非线性函数中的调节参数,通过调节可实现不同程度的“大误差,小增益;小误差,大增益”特性; $\delta > 0$ 表示非线性函数中的线性段,具有线性段的目的是避免在“小误差,大增益”产生高频的抖振影响控制效果。

3 仿真验证

为了验证本文所提的闭环反馈控制方法对有载分接开关驱动系统控制的有效性,本文利用 Matlab 仿真软件,通过对有载分接开关驱动系统模型参数设置、控制算法参数调整对所提闭环反馈控制算法进行了仿真验证。

3.1 仿真设置

以文献[22]中给定的步进电机模型参数为参考,本文对有载分接开关驱动系统的主要参数设置如表 1 所示。

表 1 有载分接开关驱动系统模型参数设置

Table 1 Model parameter setting of on-load tap-changer drive system

参数	数值	参数	数值
$J/(\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$	5	$K_m/(\text{N} \cdot \text{cm} \cdot \text{A}^{-1})$	40
P	50	R/Ω	3
L/mH	8	$F/(\text{N} \cdot \text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	1.8

根据前文有载分接开关控制需求所述,有载分接开关驱动系统在实现一次切换任务时,会存在 4 个阶段,有载分接开关驱动系统中的负载转矩 $\tau(t)$ 也是随着驱动轴在这 4 个阶段中的转动角度而变化的,并且会存在负载转矩突然减小的情况,针对有载分接开关驱动系统所面临的实际工况条件,本文在仿真中设置负载转矩函数为

$$\tau(t) = \begin{cases} \varphi(t), & \varphi(t) < 110^\circ \\ 22 + 0.8\varphi(t), & \varphi(t) < 160^\circ \\ 3\,990 - 24\varphi(t), & \varphi(t) < 165^\circ \\ 360 - 2\varphi(t), & \varphi(t) < 180^\circ \end{cases} \quad (22)$$

此外,值得注意的是,实际有载分接开关驱动系统在运行时的工况较为复杂,动态系统中的未知干扰也较为复杂,在本小节中,为验证所提控制算法的有效性,有载分接开关驱动系统中的未知干扰 $D(t)$ 假设设置为

$$D(t) = 0.5\sin(t) \quad (23)$$

在有载分接开关驱动系统模型参数设置下,本文所设计闭环反馈控制算法中的控制参数调整如表 2 所示。

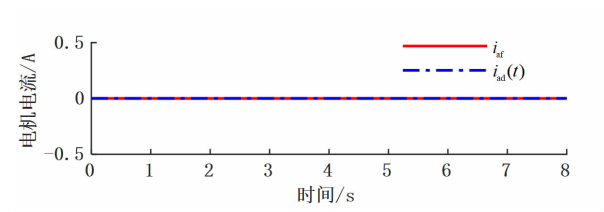
3.2 仿真结果

根据文献[22]和[26],为了使焦耳损耗最小化和电机转矩最大化,选择电流期望值为 $i_{af} = 0$ 。根据有载分接开关选择和储能切换需求,设置驱动轴的期望转动角度为 $\varphi_t = 180^\circ$ 。通过跟踪微分器式

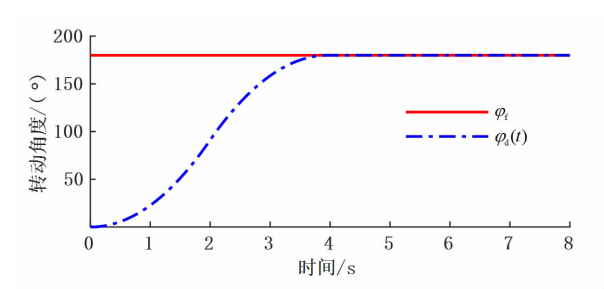
(14),得到如图 3 所示设定时间段内光滑的电流期望轨迹 $i_{ad}(t)$ 和驱动轴位置期望轨迹 $\varphi_d(t)$ 。

表 2 所提闭环反馈控制策略参数设置

Table 2 Parameter setting of the proposed closed-loop feedback control method		
闭环反馈控制策略	参数	数值
跟踪微分器	h_1	0.01
	h_2	0.01
	r_1	0.8
	r_2	0.8
扩张状态观测器	ω_1	80
	ω_2	80
误差反馈控制器	c_1	10
	c_3	70
	c_4	80
	c_5	10
	α_1	0.75
	α_3	0.75
	α_4	0.85
	α_5	0.95
	$\hat{b}_a$	100
	$\hat{b}_b$	1 000



(a)驱动电机电流期望轨迹



(b)驱动轴转动角度期望轨迹

图 3 有载分接开关驱动系统期望轨迹

Fig. 3 Desired trajectory of the on-load tap-changer drive system

在所设计控制方法及参数设置下,有载分接开关驱动轴的转动角度对期望轨迹的跟踪效果如图 4 所示。根据仿真结果可以看出,在所提控制方法下,

有载分接开关驱动轴可以快速、光滑、无超调的跟踪上所计算得到的期望轨迹。

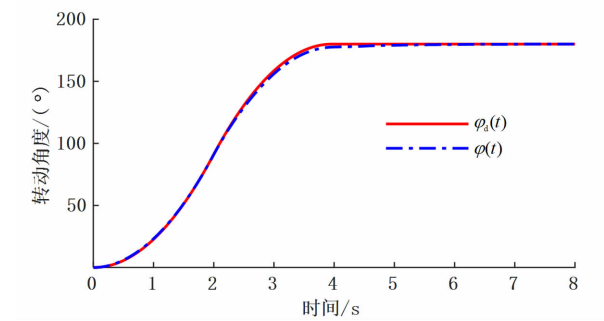
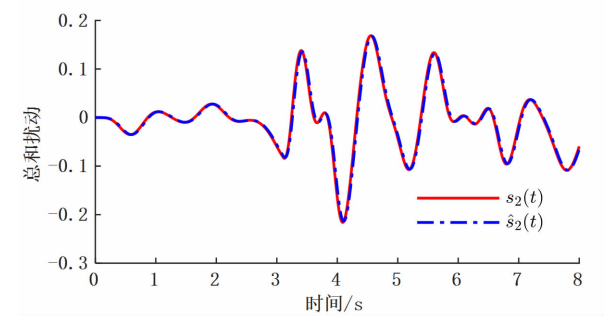


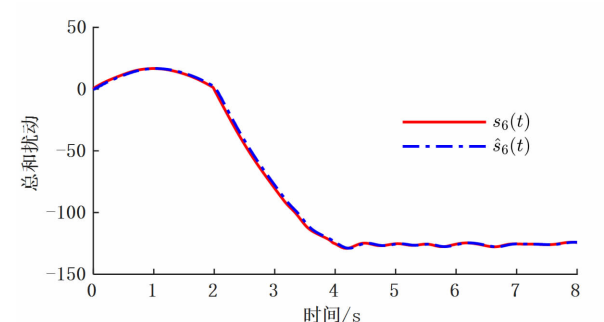
图 4 有载分接开关驱动轴运动轨迹

Fig. 4 Motion track of drive shaft for the on-load tap-changer

本文所应用扩张状态观测器对总和扰动的观测效果如图 5 所示,根据图 5 所示的仿真估计结果,本文所设计的二阶和四阶扩张状态观测器均能有效的跟踪上总和扰动,因此所估计的总和扰动也可以有效在误差反馈控制器中进行补偿。



(a)总和扰动 $s_2(t)$ 观测效果



(b)总和扰动 $s_6(t)$ 观测效果

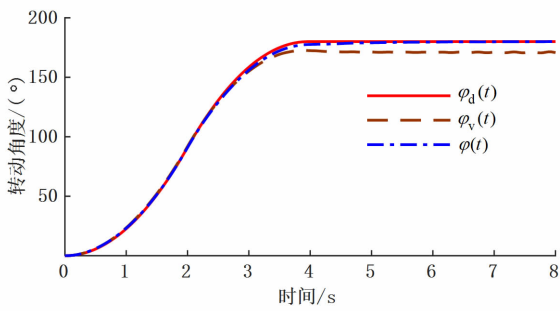
图 5 扩张状态观测器观测效果

Fig. 5 Observation effect of the extended state observer

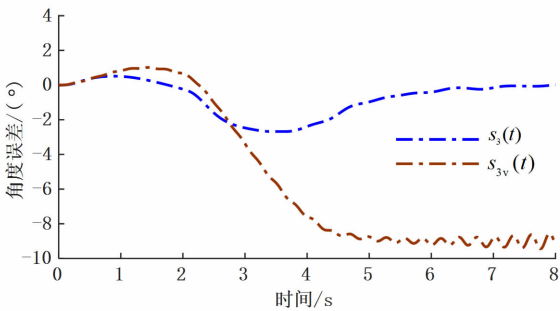
为对比本文所提控制算法对有载分接开关驱动系统驱动轴的闭环反馈控制效果,与传统 PID 控制算法进行了对比仿真。即在本文所设计的跟踪微分器安排的过渡过程下,针对分接开关驱动误差动态扩张系统(9),设计的 PID 反馈控制器为

$$\begin{cases} u_{av}(t) = K_{pa}s_1(t) + K_{da}\dot{s}_1(t) + K_{ia}\int_0^t s_1(t)dt \\ u_{bv}(t) = K_{pb}s_3(t) + K_{db}\dot{s}_3(t) + K_{ib}\int_0^t s_3(t)dt \end{cases} \quad (24)$$

式中 K_{pa} 、 K_{ia} 、 K_{da} 、 K_{pb} 、 K_{ib} 和 K_{db} 为控制器增益,在仿真对比中设置为 $K_{pa} = -0.1$ 、 $K_{ia} = -0.1$ 、 $K_{da} = -0.1$ 、 $K_{pb} = -40$ 、 $K_{ib} = -0.8$ 和 $K_{db} = -100$ 。对比仿真结果如图6所示,其中 $\varphi_v(t)$ 和 $s_{3v}(t)$ 分别为PID控制算法下的有载分接开关驱动轴的转动位置轨迹和跟踪误差,与传统PID控制策略相比,本文所提控制方法将有载分接开关驱动轴闭环反馈控制下位置误差减小了85%。



(a)驱动轴转动角度轨迹对比



(b)驱动轴转动角度误差对比

图6 与PID控制算法对比仿真结果

Fig.6 Simulation results compared with PID control algorithm

4 结 论

本文针对有载分接开关在实现切换工作时驱动轴的实际应用需求,在步进电机数学模型基础上推导了有载分接开关驱动轴的位置误差动态系统,通过动态系统设计了跟踪微分器、扩张状态观测器和误差反馈控制器所组成的闭环反馈控制策略。得到以下结论:

(1)跟踪微分器的设计可计算分接开关驱动轴

位置信号的光滑跟踪信号,进而可通过调节参数来控制驱动轴位置轨迹的过渡过程;

(2)扩张状态观测器的设计可以有效估计出分接开关驱动轴期望位置误差动态系统中的未知状态及运动中受到的总和扰动值;

(3)仿真结果表明本文所提的控制策略可实现有载分接开关驱动轴的期望位置控制,与传统PID控制策略相比,有载分接开关驱动轴闭环反馈控制下转动位置误差减小了85%。

参考文献:

- [1] 官澜,李光范,李博,等.我国特高压电力变压器研制技术及发展[J].变压器,2014,51(8):28-33.
GUAN Lan, LI Guangfan, LI Bo, et al. Manufacture technology and development of UHV power transformer in China [J]. Transformer, 2014, 51(8): 28-33.
- [2] 刘雪丽,李金忠,高飞,等.±800 kV换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5350-5356.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ±800 kV direct current convertor transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.
- [3] 张磊,陈梁远,余长厅,等.变压器有载分接开关运行分析及探讨[J].广西电力,2020,43(5):32-35.
ZHANG Lei, CHEN Liangyuan, YU Changting, et al. Analysis and discussion on operation of the transformer on-load tap-changer [J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(5): 32-35.
- [4] 高飞,李金忠,张书琦.新型变压器有载分接开关综述[J].电工电气,2013(10):1-5.
GAO Fei, LI Jinzhong, ZHANG Shuqi. Comprehensive description of new-type transformer on-load tap-changer [J]. Electrotechnics Electric, 2013(10): 1-5.
- [5] 梁贵书,晏阔,高飞,等.变压器混合式有载分接开关熄弧方法的仿真及试验研究[J].高电压技术,2014,40(10):3156-3163.
LIANG Guishu, YAN Kuo, GAO Fei, et al. Study on simulation and experiments of method of extinction hybrid on-load tap changer in transformers [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3156-3163.
- [6] 张小宝. MR M型有载分接开关连续调档故障分析与处理[J].冶金动力,2020(5):6-9,17.
ZHANG Xiaobao. Fault analysis and treatment of continuous shifting adjustment of MR M-type on-load tap changer [J]. Metallurgical Power, 2020(5): 6-9, 17.
- [7] 陆琳.变压器有载分接开关电动机构故障分析及处理

- 方法[J]. 电工技术, 2018(5): 94-96, 98.
- LU Lin. Fault analysis and treatment of motor-driving mechanism of on-load tap-changer in transformer [J]. Electric Engineering, 2018(5): 94-96, 98.
- [8] 张德明. 变压器有载分接开关[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998: 126-130.
- [9] 张姗, 张建辉, 郭晋伟. 新型智能有载分接开关控制器的设计[J]. 通信电源技术, 2019, 36(3): 173-174. ZHANG Shan, ZHANG Jianhui, GUO Jinwei. Design of new intelligent on-load tap switch controller [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(3): 173-174.
- [10] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 直线旋转永磁电机及其控制技术综述与新发展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1972-1984. XU Lei, ZHU Xiaoyong, ZHANG Chao, et al. Overview and new development of linear and rotary permanent magnet machines and control technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1972-1984.
- [11] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [12] 俞滨, 巴凯先, 刘雅梁, 等. 基于扩张观测器的液压驱动单元位置抗扰控制[J]. 液压与气动, 2018(1): 1-8. YU Bin, BA Kaixian, LIU Yaliang, et al. Research of anti-interference control method of hydraulic driving unit position control system based on external state observer [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(1): 1-8.
- [13] CHENG Haiyan, LI Dahai, ZHANG Jinhua, et al. Nonlinear error feedback positioning control for a pneumatic soft bionic fin via an extended state observer [J]. IEEE Access, 2020, 8: 12688-12696.
- [14] CHENG Haiyan, ZHANG Jinhua, LI Yuanjie, et al. Finite-time tracking control for a variable stiffness pneumatic soft bionic caudal fin [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107314.
- [15] DU Bochao, WU Shaopeng, HAN Shouliang, et al. Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3019-3027.
- [16] 张德明. 分接开关技术的发展特点[J]. 上海电器技术, 2005(3): 12-16. ZHANG Deming. The technology of tap changer develop characteristic [J]. Shanghai Electric Appliance Technology, 2005(3): 12-16.
- [17] 张德明. 真空分接开关技术的论述(7) [J]. 变压器, 2012, 49(2): 52-56. ZHANG Deming. Discussion on the technology of vacuum tap changer(7) [J]. Transformer, 2012, 49(2): 52-56.
- [18] 上海华明电力设备制造有限公司. 数控分接开关电动机: 中国, CN201320300019.9 [P]. 2013-11-06.
- [19] 上海华明电力设备制造有限公司. SHM-D 分接开关数控操作机构使用说明书 [EB/OL]. (2021-08-26) [2021-10-01]. <http://www.huaming.com/uploads/20210826/03bb6e29e3f4138057c0da2a7e8380f1.pdf>.
- [20] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Nonlinear adaptive control of permanent magnet step motors [J]. Automatica, 1995, 31(11): 1595-1604.
- [21] FLIESS M, LÉVINE L, MARTIN P, et al. Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples [J]. International Journal of Control, 1995, 61(6): 1327-1361.
- [22] DEFOORT M, NOLLET F, FLOQUET T, et al. A third-order sliding-mode controller for a stepper motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3337-3346.
- [23] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 183-197.
- [24] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]// Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [25] 刘春强, 骆光照, 涂文聪, 等. 基于自抗扰控制的双环伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7032-7039. LIU Chunqiang, LUO Guangzhao, TU Wencong, et al. Servo systems with double closed-loops based on active disturbance rejection controllers [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 7032-7039.
- [26] BODSON M, CHIASSON J N, NOVOTNAK R T, et al. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(1): 5-14.

(编辑 赵炜 刘杨)