

分类号: TM73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210330145



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 含光伏发电的时滞电力系统
负荷频率控制

论文作者 张佩娴
校内导师 张艳（副教授）
校外导师 李超
专业学位类别 电子信息
研究方向（领域） 控制工程与自动化

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: TM73

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210330145

题 目 含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制

题 目 Load Frequency Control of Time-delay Power System
with Photovoltaic Power Generation

学 生 姓 名: 张佩娴

校 内 导 师: 张艳

校 外 导 师: 李超

专业学位类别 : 电子信息

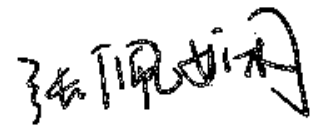
研究方向(领域): 控制工程与自动化技术

论文答辩日期: 2024 年 5 月 24 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期： 2024 年 5 月 31 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：张阳阳 指导教师签名：张艳

日期：2024 年 5 月 31 日

日期：2024 年 5 月 31 日

含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制

摘 要

随着智能电网的发展,风电、水电、光伏发电等新能源高比例接入电力系统,然而风电、水电、光伏发电等能源受到气候、地域、温度等外部环境的制约,其发电具有间歇性的特点。新能源持续高比例运行,以及大量电力电子装置的应用,电力系统呈现出了“双高”特性,降低了电力系统应对不平衡功率冲击时的系统频率支撑能力,恶化电力系统频率特性,影响电能输送质量。另一方面,电力通信网是电力系统的重要基础设施,是保证电力系统安全稳定运行的三大支柱之一,而通信系统不可避免的时滞问题,大规模的风光并网导致电力系统的震荡特性和控制方式变化显著,导致电网中与时滞强相关的震荡往往影响电力系统安全运行。鉴于此,本文对含光伏发电的电力系统负荷频率控制问题进行研究。

针对光伏发电并入电网产生的频率波动和电力通信网带来的传输时滞问题,本文基于含光伏发电的电力系统框图,以频率变化率,光伏发电的过度功率和输出功率、传统火力发电的汽门控制阀开度变化量以及原动机输出功率为状态变量,采用 PID 控制,建立含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制状态空间数学模型;基于 Lyapunov 稳定性理论,通过构建含多增广矩阵的 Lyapunov 函数对含光伏新能源的电力系统进行稳定性分析,提出基于广义自由权积分不等式的时滞相关稳定性判据;针对采用 PID 控制律导致时滞相关稳定性判据中

存在的非线性项，基于强化学习的思想，引入范围搜索因子和缩放因子作用于基于广义自由权积分不等式的时滞相关稳定性判据中，提出基于高斯分布的调节参数搜索算法用以寻优 PID 控制器参数，设计出含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制器。主要研究内容如下：

(1) 基于含光伏发电模块的单区域时滞电力系统负荷频率控制模型，通过分析时滞电力系统负荷频率控制各个模块的工作原理，基于各模块传递函数表达式，以含光伏发电模块的单区域时滞电力系统的频率变化率，光伏发电的过度功率和输出功率、传统火力发电的汽门控制阀开度变化量以及原动机输出功率为状态变量，建立含光伏发电模块的单区域时滞电力系统状态空间数学模型，采用 PID 控制律对含光伏发电的时滞电力系统进行负荷频率控制，给出基于 PID 控制的含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制闭环状态空间方程，为含光伏发电的时滞电力系统的时滞稳定性分析和控制器设计提供模型支撑。

(2) 针对含光伏发电的时滞电力系统的时滞稳定性分析问题，基于 Lyapunov 第二方法，构造包含所有时滞项的增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函，引入广义自由权积分不等式对增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函导数中积分项的上界进行估计，给出含光伏发电的时滞电力系统时滞相关稳定性判据，用以估计时滞电力系统的稳定性裕度。分别以典型二阶系统、单区域 LFC 系统和含光伏发电的单区域 LFC 系统为例，验证本文所提方法的优越性。

(3) 由于对含光伏发电的时滞电力系统稳定性分析过程中，增

广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函的引入，导致对基于 PID 控制的含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制闭环状态空间方程进行稳定性分析时，矩阵不等式中存在非线性项，锥补迭代算法不在适用。为了获得电力系统负荷频率控制器增益，用于稳定由负荷变化导致的频率波动，本文通过引入范围搜索因子和缩放因子，以电力系统时滞裕度为目标，提出一种基于高斯分布的搜索算法对控制器调节参数进行寻优，获得较为优化的控制器参数。最后仿真验证所提控制器设计方法的有效性和优越性。

关键词：含光伏发电的时滞电力系统；时滞相关稳定；负荷频率控制；基于高斯分布的搜索算法；线性矩阵不等式

Load Frequency Control of Time-delay Power System with Photovoltaic Power Generation

ABSTRACT

With the development of the smart grid, a high proportion of new energy sources such as wind power, hydropower, and photovoltaics power generation are connected to the power system. However, energy sources such as wind power, hydropower, and photovoltaics power generation are restricted by external environments such as climate, region, and temperature, and their power generation is intermittent. With the continuous high proportion of new energy and the application of numerous power electronic devices, the power system has shown a "double high" characteristic, which reduces the system frequency support ability of the power system to deal with unbalanced power shocks, deteriorates the frequency characteristics of the power system, and affects the power transmission quality. On the other hand, the power communication network is an important infrastructure of the power system and one of the three pillars to ensure the safe and stable operation of the power system. However, the unavoidable time lag problem of the communication system, large-scale wind, and solar grid connection lead to the shock characteristics and control methods of the power system change significantly, resulting in the shock related to the strong time lag in the power grid often affecting

the safe operation of the power system. In view of this, this paper studies the load frequency control problem of power systems with photovoltaic power generation.

Aiming at the frequency fluctuation caused by the integration of photovoltaic power generation into the grid and the transmission time delay caused by the power communication network, based on the block diagram of the power system with photovoltaic power generation, this paper takes the frequency change rate, the excessive power and output power of photovoltaic power generation, the change of the opening degree of the steam valve control valve of traditional thermal power generation and the output power of the prime mover as state variables, and adopts PID control to establish a state space mathematical model of load frequency control for the time-delay power system with photovoltaic power generation; Based on the Lyapunov stability theory, the stability analysis of the power system with photovoltaic new energy is carried out by constructing the Lyapunov function with multiple augmented matrices, and the delay-dependent stability criterion based on the generalized free-weight integral inequality is proposed; Aiming at the non-linearity of the delay-dependent stability criterion caused by the PID control law, based on the idea of reinforcement learning, a range search factor and a scaling factor are introduced to act on the delay-dependent stability criterion based on the generalized free-weight integral inequality, and a Gaussian distribution-based adjustment

parameter search algorithm is proposed to optimize the PID controller parameters. The design method of load-frequency controller for the time-delay power system with photovoltaic generation is proposed. The main research contents are as follows:

(1) Based on the load frequency control model of single-area time-delay power system with photovoltaic power generation module, through analyzing the working principle of each module of load frequency control of time-delay power system with photovoltaic power generation module, based on the expression of transfer function of each module, taking the frequency change rate of single-area time-delay power system with photovoltaic power generation module, the excessive power and output power of photovoltaic power generation, the change of valve opening degree of traditional thermal power generation and the output power of prime mover as state variables, the state space mathematical model of single-area time-delay power system with photovoltaic power generation module is established. The load frequency control of the time-delay power system with photovoltaic power generation is carried out by using PID control law, and the closed-loop state space equation of load frequency control of the time-delay power system with photovoltaic power generation based on PID control is given, which provides model support for the time-delay stability analysis and controller design of the time-delay power system with photovoltaic power generation.

(2) Based on the Lyapunov second method, an augmented Lyapunov-Krasovskii functional with all time-delay terms is constructed, and a generalized free-weight integral inequality is introduced to estimate the upper bound of the integral term in the derivative of the augmented Lyapunov-Krasovskii functional, and a delay-dependent stability criterion is given to estimate the stability margin of the delay power system with photovoltaic generation. A typical second-order system, a single-area LFC system, and a single-area LFC system with photovoltaic power generation are taken as examples to verify the superiority of the method proposed in this paper.

(3) Due to the introduction of the augmented Lyapunov-Krasovskii functional in the stability analysis of the time-delay power system with photovoltaic power generation, when the closed-loop state space equation of load frequency control with photovoltaic power generation with time-delay based on PID control is analyzed, there are nonlinear terms in the matrix inequality, and the cone complement iterative algorithm is not suitable. To obtain the gain of the load frequency controller in the power system and stabilize the frequency fluctuation caused by the load change, this paper introduces the range search factor and scaling factor, and takes the time delay margin of power system as the goal, proposes a search algorithm based on Gaussian distribution to optimize the controller adjustment parameters, and obtains the more optimized controller

parameters. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed controller design method are verified by simulation.

Key words: Time-delay power system with photovoltaic power generation; Delay-dependent stability; Load frequency control; Search lgorithm based on Gaussian distribution; Linear matrix inequality

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
目 录.....	IX
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 光伏发电发展现状.....	2
1.2.2 时滞电力系统研究现状.....	3
1.2.3 负荷频率控制研究现状.....	6
1.3 本文研究内容.....	8
第 2 章 含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制建模.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 负荷频率控制基本结构.....	10
2.3 含光伏发电模块的单区域时滞电力系统状态空间方程建模.....	13
2.4 基于 PID 控制的含光伏发电模块时滞电力系统 LFC 建模.....	15
2.5 本章小结.....	17
第 3 章 含光伏发电的时滞电力系统频率稳定性分析.....	18
3.1 引言.....	18
3.2 预备知识.....	18
3.3 基于广义自由权积分不等式的时滞电力系统负荷频率稳定分析.....	21
3.4 数值分析.....	25
3.4.1 典型二阶系统.....	25
3.4.2 不含光伏发电的单区域负荷频率控制系统.....	26
3.4.3 含光伏发电的负荷频率控制系统.....	29
3.5 本章小结.....	32
第 4 章 含光伏发电的时滞电力系统控制器设计.....	33
4.1 引言.....	33

4.2 基于高斯分布的调节参数搜索算法.....	35
4.3 控制器性能分析.....	37
4.4 本章小结.....	44
第 5 章 总结与展望.....	45
5.1 总结.....	45
5.2 展望.....	46
参考文献.....	47
攻读学位期间取得的学术成果.....	53
致谢.....	54

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

十四五提出的“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”能源战略^[1]，促使以传统火力发电为主的电力系统向绿色低碳的可再生能源发电方式转型。而太阳能作为主要可再生能源之一^[2]，具有资源丰富、分布广泛、无污染和可持续的特点。基于光生伏特效应的太阳能电池技术的发展推动了能源变革，国家能源局在《新型电力系统发展蓝皮书》中指出以光伏、风电等新能源将逐步从发电量增量主体向装机主体电源演变，最终成为发电量结构主体电源。然而光伏发电大规模并入传统电网且占比逐年增加^[3]，依赖光照和季节、海拔高度、气候、温度等自然条件的光伏发电，其间歇性、随机性、波动性特点会造成电网频率波动^[4]，导致电力系统的总惯量下降，增加发电系统的调节难度，甚至会影响输送的电能质量^[5]。

作为衡量电能质量的主要指标之一，电力系统的频率在正常运行状态下各处相等且稳定，从而保证电力系统有功功率的供需平衡^[6]。频率稳定是电力系统消纳新能源发电的重要前提，而传统的频率控制方式以及单一的电力系统模型不再适用含高比例可再生能源的电力系统对频率控制性能要求。如何在高比例可再生能源接入电力系统和电力电子装置比例增大情况下确保电力系统频率稳定^[7]，直接影响着电力产业的发展，是电力系统研究的热点问题之一。

另一方面，电力通信网中存在的时滞现象使得电力系统本质上是一个时滞系统，而时滞的存在往往会恶化系统性能，导致系统失稳，给电力系统分析和综合带来困难^[8]，特别是含高比例可再生能源的时滞电力系统，同时面对电源侧可再生能源发电存在的间歇性、随机性、波动性，以及负荷侧涌现出的多种新设施的负荷波动性^[9]，如何在这种电源和负荷的双重不确定性情况下，确保含高比例可再生能源的时滞电力系统频率稳定，既是保证电能质量合格的重要指标之一，也是推动可再生能源发电的重要环节之一^[10]。因此，研究含高比例可再生能源的时滞电力系统负荷频率控制问题正逐步成为近年来的学时研究热点。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 光伏发电发展现状

在低碳、环保、智能化的能源变革下，含高比例可再生能源的电力系统是电力系统发展的趋势所在，风力发电和光伏发电是目前发展地比较成熟的可再生能源发电技术。其中，光伏发电系统是由光电模块、蓄电池组、充放控制器、逆变器、交流配电柜、太阳跟踪控制系统等设备组成^[1]，其结构体如图 1-1 所示。



图 1-1 光伏发电系统基本结构图

光电模块作为太阳能电池的核心部件和关键部件，主要功能是利用光生伏特效应将太阳能转换成电能，存储在蓄电池组中。在这个过程中由于阳光照射的角度是不断变化的，只有将太阳能板朝向阳光，才能发挥出最大的作用。而光伏组件的输出随不同温度下光照强度会发生改变，导致功率点的电压就会波动，输出的电能质量就会下降。为提高输送到用户端的电能质量，国内外学者大部分研究最先进的最大功率追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)技术^[12]，它可以大幅度增加太阳能转换效率。

而充放控制器是一种可以避免蓄电池过充或过放的装置，而当有阳光照射时，它可以把太阳能电池板中的电能储存起来，然后在需要的时候再把它释放出去。

光伏逆变器是一种把光生直流电转化成交流电的设备，由于光电模块的输出电流和电压因光照强度和温度的不同而不同，光伏逆变器可以对变化的电流和电压进行最佳控制，从而提高转换效率。按运行方式可分为独立运行逆变器和并网逆变器^[13]。太阳跟踪控制系统是优化太阳光使用，提高光电转换效率的系统。国家能源局于 2024 年 1 月份召开的全国可再生能源开发建设形势分析会指出，截止 2023 年 12 月底，可再生能源发电总装机达 15.16 亿千瓦，占全国发电总装机

的 51.9%，在全球可再生能源发电总装机中的比重接近 40%。特别是 2023 年光伏新增装机规模达 216.88 吉瓦，同比增长 148.1%。我国新能源发电占比增长迅猛 2016-2023 年我国光伏并网装机容量见图 1-2 所示，由于发电系统的结构演变不是一蹴而就的，目前光伏发电不能完全取代火力发电，因此，我国仍然是以火力发电为主，新能源发电为辅的电力系统。

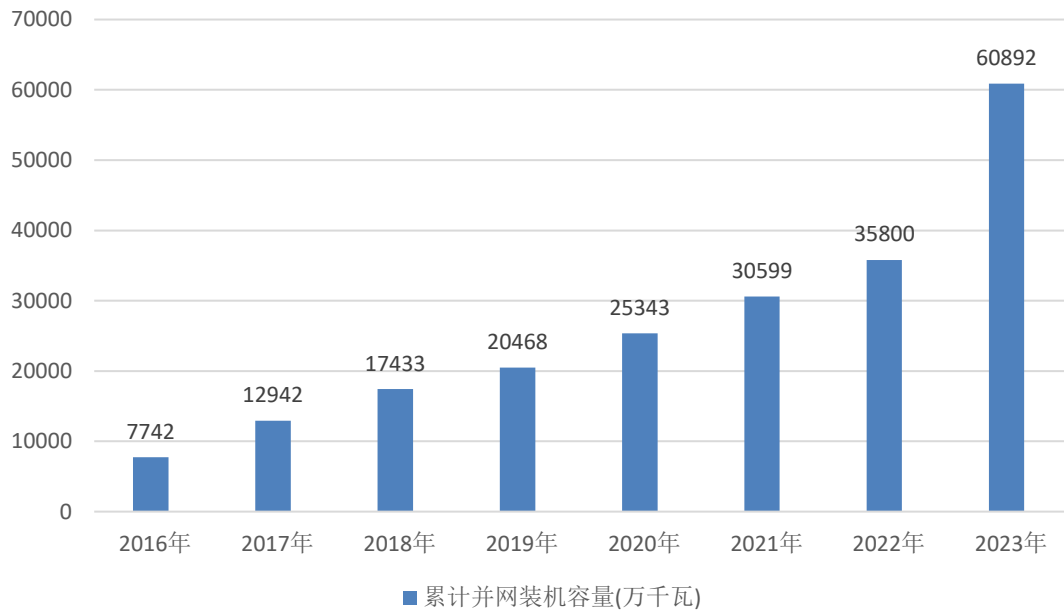


图 1-2 2016-2023 年我国历年光伏累计并网装机量

1.2.2 时滞电力系统研究现状

时间延迟在我们身边无处不在，在电力系统中，电网设备信息通信和控制器执行中普遍存在时间延迟的问题——时滞现象，网络通信会因为时滞而丢失数据，影响控制器的性能，导致电力系统不符合安全稳定运行的需求。文献[14]指出当电力系统的通信时延在 0.5-15s 的范围内，都有可能对整个电力系统稳定性产生重大影响，造成不可挽回的损失。因此，估计能保持电力系统稳定的最大允许时延——时滞稳定裕度至关重要^[15-17]。

多年来国内外控制领域的学者一直致力于时滞电力系统的研究，对如何确保时滞电力系统稳定进行了大量的研究。如文献[18]研究基于 PI 控制的单区域时滞电力系统稳定性问题，通过建立包含通信网络时延的时滞电力系统状态空间模型，构造增广 Lyapunov 泛函，提出基于 PI 控制的单区域时滞电力系统负荷频率稳定判据。文献[19]针对互联电力系统中源荷不确定以及通信延时导致系统频率偏差

过大的问题,基于含汽轮发电机、风机和储能等设备的两区域时滞互联电网模型,以区域控制偏差为依据,利用改进粒子群算法优化 PID 负荷频率控制器实现二次调频,从而提升了一定时滞区间内负荷频率控制(Load frequency control, LFC)系统的频率稳定性,提出了计及储能调节的两域时滞电力系统频率控制策略。

目前,关于时滞电力系统的研究主要围绕着稳定性分析和控制器设计。对于电力系统中时滞现象的稳定性分析,现阶段的研究主要是如何估计保证时滞电力系统在稳定运行时的时滞稳定裕度。而控制器设计的目的是通过对被控系统构造控制规律,使系统呈现出期望的状态。针对时滞电力系统,期望的状态就是在时滞影响存在的情况下,估计时滞裕度,确保电力系统在外部扰动下可以安全运行。

时滞电力系统稳定性分析方面,求解时滞稳定裕度主要有频域法和时域法。频域法,如劳斯判据、Nyquist 判据、Bode 图频域分析等是早期稳定性分析的主流方法^[20-21],主要是通过对时滞系统的特征方程进行变换,获得相应的特征值分布,依次对电力系统的稳定性加以判断。如文献[21]针对定常与时变通讯时延对微电网的影响建立电力系统物理模型,研究分布式发电微电网的控制策略。在常时滞情况下,将所提出的微电网模型的超越特征方程转化为多项式分析系统的时滞稳定性。对于时变时滞,给出了系统渐近稳定的充分条件从理论上得到不同微电网中央控制器增益集的时滞稳定裕度。然而,随着时代发展当电力系统的规模变大和维数变高以及控制理论的发展,时域法开始进入人们的视野。

关于时滞系统稳定性分析的时域法,其依据是 Lyapunov 稳定性理论,主要是通过构造 Razumikhin 函数^[22]和 Lyapunov-Krasovskii 泛函对时滞系统稳定性进行分析,这些方法可以不必求解系统状态方程而直接判定稳定性。由于稳定性问题的实质是考察系统由初始状态扰动引起的受扰运动能否趋近或返回到原平衡状态,而事实上,求解系统状态方程往往比较困难,而 Lyapunov 稳定性理论通过引入一个虚构的能量函数,即 Lyapunov 函数,根据这个标量函数的性质,判断系统的稳定性^[23]。该方法不必求解系统的微分方程,就可以直接判断其稳定性。

而基于 Lyapunov 稳定性理论的系统分析,其研究创新点主要集中 Lyapunov-Krasovskii 泛函的构造和对 Lyapunov-Krasovskii 泛函导数的界定两个方面。目前,在 Lyapunov-Krasovskii 泛函的构造方面,越来越趋于复杂,由最初的简单二次型

函数分析无时滞系统的稳定性问题,到含时滞信息的单积分项分析时滞系统的时滞相关稳定性问题,再到构造含时滞,时滞的上界等信息的双积分项,甚至三重积分项和四重积分项的 Lyapunov-Krasovskii 泛函分析时滞系统的时滞相关稳定性问题。相对于简单二次型函数,多重积分项的出现携带了更多的时滞信息,对估计时滞系统稳定的时滞上界非常有利,但是含多重积分项的 Lyapunov-Krasovskii 泛函,其矩阵变量较多,计算复杂度增加。自 2005 年,文献[24]提出增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函的概念以来,增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函因包含更多的关于时滞状态的信息,基于该泛函推导出来的稳定性判据保守性更低而被广泛关注。但是增广矩阵的增多给时滞系统的控制器设计带来困难,以至于很多控制器设计方法仍然采用非增广 Lyapunov-Krasovskii 函数^[25-26],即便是采用增广 Lyapunov-Krasovskii 函数进行控制器设计,也要引入调节参数分离矩阵不等式中的非线性项,如文献[27-29]在自由权矩阵 M_1 , M_2 和 M_3 中引入调节参数 a 和 b ,而使权矩阵建立线性约束关系 $M_2=aM_1$, $M_3=bM_1$ 导致所设计的控制器存在保守性。此外,如何选择调节参数也是一个问题,这是制约时滞系统由理论到实际应用的一个瓶颈问题。

而在 Lyapunov-Krasovskii 泛函导数的界定方面,如何处理导数中含有的积分项,成为降低稳定判据保守性的关键问题^[30]。关于导数中积分项的处理经历了模型转换方法^[31](主要采用基本不等式、Park 不等式^[32]、Moon 不等式^[33]进行模型变换), Jensen 的积分不等式^[34], 自由权矩阵方法, 基于 Wirtinger 积分不等式^[35]、辅助函数的积分不等式^[36]、改进的互凸矩阵不等式^[37]、Bessel-Legendre 积分不等式^[38], 基于自由矩阵的积分不等式^[39]、矩阵值多项式不等式法^[40]等阶段。使积分不等式法成为目前研究时滞相关系统的主要方法。如文献[41]通过构造含三重积分项的增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 并采用互凸不等式法估计增广型 Lyapunov-Krasovskii 泛函导数中的积分项上界, 提出具有较低保守性的时滞相关稳定性判据。针对 Bessel-Legendre 积分不等式应用于时变时滞系统稳定性分析时, 处理 Lyapunov-Krasovskii 泛函导数中的互凸项存在困难, 文献[42]提出一种 Bessel-Legendre 不等式的一种等价形式——仿射 Bessel-Legendre 不等式。基于所提出的不等式和新颖的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 推导出具有较低保守的时

滞相关稳定性判据。文献[43]对具有多时变时滞的电力系统 LFC 问题,通过分析电力系统多个区域时滞的不同,建立一种具有多时滞的多区域 LFC 系统新模型,通过构造了一个包含延迟积分项的 Lyapunov-Krasovskii 泛函,并利用基于辅助函数的积分不等式以及作者所提出的改进的互凸不等式处理 LKF 导数的积分项,以线性不等式的形式提出了具有低保守性的多时滞的多区域 LFC 系统稳定性判据,并采用 PI 型控制器提出时滞电力系统 LFC 的设计方法。

1.2.3 负荷频率控制研究现状

电力系统运行的基本要求是保证电网频率能够维持在某个固定值或在其附近很小范围内变化,负荷频率控制(Load frequency control, LFC)是实现这一目标的最常用方法之一^[44-45],它通过检测到电网中频率的变化,调整发电机组的发电输出,实现调频。

随着智能电网的发展,特别是风力、水力、太阳能等分布式能源接入电力系统,电动汽车和电动公交车等电力设备的使用,电力电子变流器的占有率增加,并网逆变器渗透率的飞速提升,电流器与电网之间的交互作用越来越复杂,对传统电力系统运行特性的改造也越来越明显,致使电力系统不可避免的存在各类扰动,如光伏、风电等新能源并入电网给发电侧带来大量的有功干扰,而负荷侧用电需求的不断变化,更加加剧了系统的有功不平衡,传统电源的调频能力逐渐弱化。同时,电力市场化的发展,LFC 的传输方式要借助于电力通信网进行信息传输,网络中的丢包和延迟不可避免地对电力系统正常运行产生影响。如何确保互联电力系统频率稳定,维持电网安全、稳定、高效的长期运行,是电力系统的一个关键问题。

近些年来,许多学者在时滞电力系统负荷频率稳定^[46-53]和控制器设计方面开展研究。如文献[46]针对含风力发电机组的时滞电力系统的小扰动稳定性问题,考虑时滞和系统参数的不确定性,建立包含轴系模型和异步发电机组的电力系统小干扰模型,给出含风力发电机组的时滞电力系统鲁棒稳定性判据。文献[47]针对具有时滞的电动汽车多区域负荷频率控制系统的稳定性问题,建立具有电动汽车和时滞的多区域 LFC 系统偏微分方程,以线性偏积分算子的内积形式构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函,提出保守性较低的稳定判据,并出了延迟裕量与控制

器参数之间的关系。另一方面,基于经典的 PID 控制、滑模控制^[54]、模型预测控制^[55]的电力系统负荷频率控制成果相继被提出,如文献[56]针对传统负荷频率控制模式反应不够灵敏的情况,在建立含可控负荷的多区域负荷频率响应模型及自动发电控制模型上,基于连续时域交替方向乘子法和分布式模型预测控制方法,提出了一种用户侧可控负荷资源主动参与的多区域互联电力系统分布式模型预测最优负荷频率控制策略。文献[57]针对含新能源的多区域电力系统频率问题,在充分考虑系统采样特性的基础上,建立基于控制信号更新与变动的采样控制的数据网络控制模型,通过构造包含全样本时间间隔信息的双边闭环李雅普诺夫泛函,提出含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制器设计方法。为解决电力系统调频存在的灵活性资源不足和调节特性欠佳问题,文献[58]为解决以风电和光伏为代表的可再生能源高比例并入电网导致的调频困难问题,基于含新能源发电的电力系统传递函数模型,引入虚拟惯量环节设计一种含滤波系数的 PI 控制器,并对差分进化算法进行改进用以 PI 控制器参数寻优,提出基于改进差分进化算法的两区域互联电力系统负荷频率控制。

然而,基于传递函数模型的电力系统负荷频率控制,关于时滞现象的描述,尽管可以用延迟环节去替代,但是延迟环节是一个非线性的超越函数,导致有延迟环节的系统很难分析和控制,特别是含时变时滞的系统。另一方面,受限于传递函数只能反映输入量和输出量之间的关系,系统内部变量无法在传递函数中反应。而基于状态空间方程的电力系统负荷频率控制,主要是针对传统电力系统进行状态空间方程建模,基于状态空间方程模型研究电力系统负荷频率控制^[59-60],如文献[61]针对具有时滞和需求响应的电力系统,通过建立连续时间状态空间方程,基于线性二次调节理论,以采样数据方式调节需求响应和发电机组的负荷频率控制和观测器设计方法被提出。

近些年,新能源发电的高比例渗透加剧了传统火力发电系统的有功不平衡,使得传统电力系统的调频能力逐渐弱化,基于状态空间方程模型的含新能源发电的电力系统负荷频率控制越来越受重视,如文献[62]针对抽水蓄能和电池储能并入多区域互联电网,据互联电力系统中各主要模块的特性,建立多区域互联电力系统频率响应状态空间模型,基于互联电力系统的各种约束条件,确定优化控制

目标, 对各区域的控制器进行设计, 提出一种基于分布式模型预测控制的负荷频率协调优化控制方法。文献[63]为了确保开放通信网络中多区域 LFC 电力系统的电网频率稳定, 在充分考虑数据传输中丢包和随机时延等负面因素的基础上, 建立了基于观测器的等待事件触发方案、随机通信时延和丢包信息统一结构的随机时延相关多区域 LFC 模型, 提出一种基于观测器随机等待事件触发控制的 LFC 调控策略用来处理频率波动, 延长控制设备的使用寿命。

1.3 本文研究内容

针对含光伏发电的电力系统运行过程中由负荷变化引起的频率波动和时滞现象, 本文通过构建含光伏发电模块的单区域电力系统时滞状态空间方程模型, 对含光伏发电的时滞电力系统进行时滞稳定性分析和基于 PID 控制律负荷频率控制。主要研究如下:

(1) 在含光伏发电模块的单区域时滞电力系统负荷频率控制模型基础上, 通过分析时滞电力系统负荷频率控制各个模块(调速器、原动机、发电机-负荷、PID 控制器、光伏发电模型)的工作原理, 基于各模块传递函数表达式, 以含光伏发电模块的单区域时滞电力系统的频率变化率, 光伏发电的过度功率和输出功率、传统火力发电的汽门控制阀开度变化量以及原动机输出功率为状态变量, 采用 PID 控制律对含光伏发电的时滞电力系统进行负荷频率控制, 为含光伏发电的时滞电力系统的时滞稳定性分析和控制器设计提供模型支撑;

(2) 针对含光伏发电的时滞电力系统的时滞稳定性分析问题, 基于 Lyapunov 控制理论, 首先构造一个包含所有状态变量的增广 Lyapunov 函数, 它能更好地加权系统状态间的关系, 并在系统中引入一些新的自由矩阵, 使用广义自由权积分不等式处理 Lyapunov 泛函的二次积分项, 并得到包含最大允许时滞上界的含光伏发电的单区域电力系统频率稳定性判据。分别以典型二阶系统、单区域 LFC 系统和含光伏发电的单区域 LFC 系统为例, 验证本文所提方法的优越性;

(3) 针对时滞电力系统的控制器设计问题, 考虑到在稳定性分析时, 由于状态空间模型以及时域分析方法使得控制器的求解矩阵不等式为非线性化, 无法

使用传统的锥补迭代算法求解。本文采用基于高斯分布的调节参数搜索算法进行控制器增益矩阵的寻优，获取较为优化的控制器增益用于电力系统进行负荷频率控制，最后通过仿真实验对比说明本文设计控制器的性能良好。

第 2 章 含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制建模

2.1 引言

随着光伏发电技术的日益成熟,光伏发电并入电网,成为电力系统的重要组成部分,而高比例的光伏发电渗透电网,改变了传统电网的动态特性。然而,光伏发电易受光照、温度、季节等外部环境因素制约,会导致电力系统的输出功率有较大波动,而用电需求的日益增强,电网的负荷压力不断增加,这些都影响输送到用户侧的电能质量^[64]。为了维持电网频率在额定值及附近小范围波动,负荷频率系统控制的设计问题尤其重要^[65]。

在实际的负荷频率控制系统中,控制信号可以在互联电网系统中借助开放的通信网络进行信息传递,实现大范围的数据交换,在交换传输过程中不可避免的会出现网络堵塞、数据丢失、传输时滞等问题^[66],降低系统稳定性使其控制效果大打折扣,严重时系统不能稳定安全运行甚至崩溃。因此本章针对含光伏发电的时滞电力系统中各个基本元件进行合理的建模,为后续章节研究做铺垫。

2.2 负荷频率控制基本结构

负荷频率控制作为自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)的重要功能,可调整发电机频率在 50HZ 左右运行并且保持区域间联络线交换功率在计划范围内。它的原理是:当负荷发生变化时,会引起电力系统的频率发生波动,而波动的频率信号,以频率偏差的形式经过一次调频回路,通过电力系统的静态特性改变机组的调速器,以匹配发电机组的实际功率需要,减小电力系统频率波动,然而一次调频只能减缓频率波动,而不能保证频率稳定,是一种有差调节;而频率偏差作为输入信号作用于负荷频率控制器的输入端,由控制器作用产生控制输出信号来调节调速器使频率回到稳定范围内。二次调频来消除频率偏差。电力系统负荷频率控制原理图 2-1 所示。

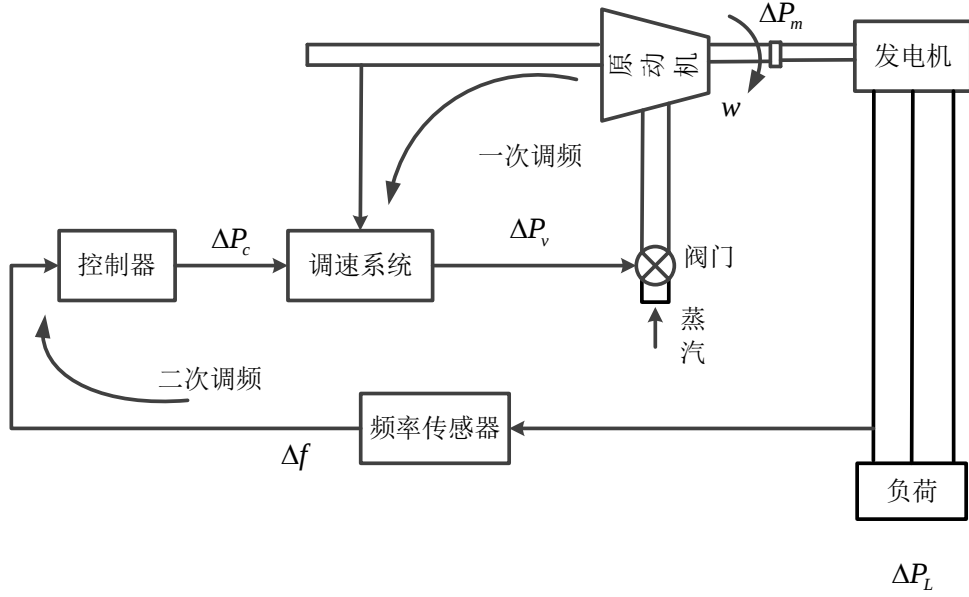


图 2-1 电力系统负荷频率控制原理图

考虑到光伏新能源的高比例渗透，本文研究的含光伏发电模块的单区域电力系统 LFC 结构框图如下：

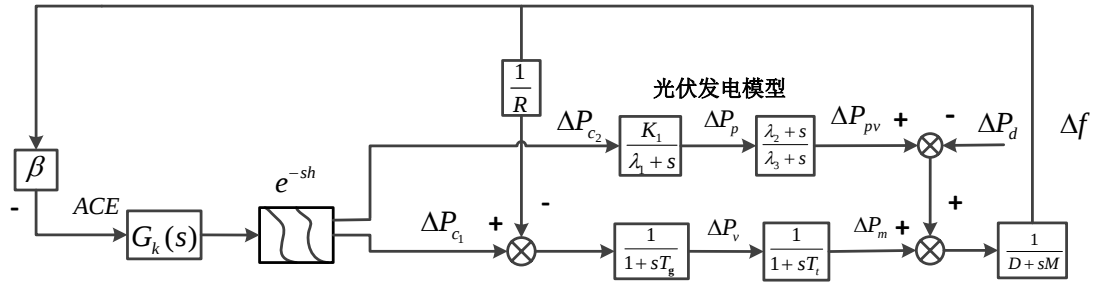


图 2-2 含光伏发电的单区域电力系统 LFC 框图

下面将根据图 2-2 所示的 LFC 结构框图介绍各个模型。

（1）调速器模型

发电机组原动机的调速器根据负荷波动引起的原动机转子转速的变化，调整汽门控制阀的开度，进而增加或减少进气量，其传递函数为：

$$\Delta P_v(s) = \frac{\Delta P_{c1}(s)}{1 + T_g s} - \frac{1}{1 + T_g s} \cdot \frac{\Delta f(s)}{R} \quad (2-1)$$

式中： ΔP_v 表示汽门控制阀开度变化量； T_g 表示调速器的惯性时间常数； ΔP_{c1} 表示动态控制器发出的控制信号； R 表示调速器的速度跌落系数。

（2）原动机模型

本文考虑的原动机为非再热式汽轮机，其传递函数为：

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{T_t s + 1} \quad (2-2)$$

式中： ΔP_m 表示汽轮机机械功率的变化量； T_t 表示汽轮机惯性时间常数。

(3) 光伏发电模型

由文献[67]可知，光伏组件等效成二阶传递函数模型为：

$$G_{pv}(s) = \frac{-as + b}{s^2 + cs + d} \quad (2-3)$$

由文献[68]可知，引入 ΔP_p 过度功率，式(2-3)可以分解为以下两个式子：

$$\Delta P_p(s) = \frac{K_1}{\lambda_1 + s} \cdot \Delta P_{c2}(s) \quad (2-4)$$

$$\Delta P_{pv}(s) = \frac{\lambda_2 + s}{\lambda_3 + s} \cdot \Delta P_p(s) \quad (2-5)$$

式中： ΔP_{pv} 为输出功率变化量； ΔP_{c2} 为系统控制信号； K_1 为增益常数； λ_1 和 λ_3 分别代表传递函数的极点横坐标的相反数； λ_2 为零点横坐标的相反数。

(4) 频率波动模型

当电力系统稳定运行时，系统处于有功功率平衡状态，此时系统运行方程式为：

$$\Delta P_m + \Delta P_{pv} = \Delta P_d = 0 \quad (2-6)$$

式中： ΔP_d 表示负荷功率变化量。

当负荷发生变化时，其负荷变化率用 ΔP_d 表示，此时，系统有功功率的平衡状态发生变化，系统的有功功率不平衡会引起频率波动，影响电能质量。为了让系统重新达到平衡状态，发电模块输出电功率(即原动机的输出机械功率和光伏发电功率)随之发生变化，那么 ΔP_m 、 ΔP_{pv} 和 ΔP_d 应满足：

$$\Delta P_m + \Delta P_{pv} = \Delta P_d \neq 0 \quad (2-7)$$

此时，电力系统的有功功率重新达到平衡状态。

然而，由于原动机存在机械惯性，导致发电机的电磁功率超前原动机的机械功率，从而系统出现频率偏差量，即：

$$\Delta f = \frac{1}{D + Ms} (\Delta P_m(s) + \Delta P_{pv} - \Delta P_d(s)) \quad (2-8)$$

式中：\$D\$ 表示发电机阻尼系数；\$M\$ 表示发动机转动惯量。

(5) 基于 PID 控制器的 LFC

一次调频只能调节由发电机转速引起的系统小幅度频率变化，虽然可以达到稳定状态，但是无法消除系统有功功率的偏差，这时就需要二次调频，本文采用 PID 控制器进行 LFC 的二次调频，其传递函数为：

$$G_K(s) = \frac{u(s)}{ACE(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2-9)$$

式中：\$K_p\$ 表示比例控制增益；\$K_I\$ 表示积分控制增益；\$K_D\$ 表示微分控制增益；\$u\$ 表示控制器输出；\$ACE\$ 表示区域误差控制(Area Control Error, ACE)。

在单区域 LFC 中，\$ACE\$ 可定义为^[45]：

$$ACE = \beta \Delta f(s) \quad (2-10)$$

式中：\$\beta = 1/R + D\$ 表示频率偏差因子。

(6) 传输时滞模型：在电力系统 LFC 中，时滞主要存在于控制中心和收集频率偏差信号的传输信道中。时滞环节的 \$s\$ 域表达式为^[69]：

$$G_{delay}(s) = e^{-sh} \quad (2-11)$$

式中：\$h\$ 表示时滞 \$\tau(t)\$ 的上界，即电力系统 LFC 的时滞稳定性裕度。

2.3 含光伏发电模块的单区域时滞电力系统状态空间方程建模

建立在负荷频率控制的新型时滞电力系统结构基础上，以往的负荷频率控制是对传递函数进行研究和分析，而传递函数并不能具体描述内部变量之间的关系。但是状态空间方法可克服这一缺陷，它可以完整地描述系统的内部状态变化，并且多用于非线性和线性系统、多输入和多输出系统、定常和时变系统的设计和稳定性分析中去，所以本文采用状态空间方程法来表达各个状态变量和输出变量的关系。

根据图 2-2，选择频率变化率，光伏发电的过度功率和输出功率、传统火力发电的汽门控制阀开度变化量和原动机输出功率为状态变量，区域误差控制为输

出变量:

$$x(t) = [\Delta f \quad \Delta P_m \quad \Delta P_v \quad \Delta P_{pv} \quad \Delta P_p] \quad (2-12)$$

$$y(t) = ACE(t) \quad (2-13)$$

可得到系统的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) + Fw(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2-14)$$

式中:

$$w(t) = \Delta P_d,$$

$$u(t - \tau(t)) = \begin{bmatrix} \Delta P_{c1}(t) \\ \Delta P_{c2}(t) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_r} & \frac{1}{T_r} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_G R} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 - \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 \end{bmatrix},$$

$$B = [B_1 \quad B_2],$$

$$B_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad K_1 \quad K_1],$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_G} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [\beta \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

另外时滞函数 $\tau(t)$ 也满足如下约束条件:

$$0 \leq \tau(t) \leq h \quad |\dot{\tau}(t)| \leq \mu \quad (2-15)$$

2.4 基于 PID 控制的含光伏发电模块时滞电力系统 LFC 建模

基于公式(2-9)，含光伏发电模块时滞电力系统 LFC 的 PID 控制律为：

$$u(t) = K_p ACE(t) + K_I \int ACE(t) dt + K_D \frac{dACE(t)}{dt} \quad (2-16)$$

假设如下虚拟输出变量和状态变量：

$$\begin{cases} \bar{x}(t) = [x^T(t) \quad \int y^T(t) dt]^T \\ \bar{y}(t) = [y^T(t) \quad \int y^T(t) dt \quad \frac{d}{dt} y^T(t)]^T \end{cases} \quad (2-17)$$

由于 $CB=0$ ，系统(2-17)和控制器(2-16)可以转化为静态输出反馈系统：

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}u(t - \tau(t)) + \bar{F}w(t) \\ \bar{y}(t) = \bar{C}\bar{x}(t) + \bar{D}_w w(t) \\ u(t) = -K\bar{y}(t) \end{cases} \quad (2-18)$$

式中：

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = [\bar{B}_1 \quad \bar{B}_2], \quad \bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 1 \\ CA & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{D}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ CF \end{bmatrix}, \quad K = [K_p \quad K_I \quad K_D]。$$

上述静态输出反馈系统可简化为时滞线型系统：

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}_1 \bar{x}(t) + \bar{A}_d \bar{x}(t - \tau(t)) + \bar{B}_w w(t) \quad (2-19)$$

式中： $\bar{A}_d = -\bar{B}_1 K \bar{C} - \bar{B}_2 K \bar{C}$ ， $\bar{B}_w = \bar{F} - \bar{B} K \bar{D}_w$ 。

设时滞线性系统(2-19)运行的平衡点为 $\bar{x}^*(t)$ ，则：

$$0 = \bar{A}_1 \bar{x}^*(t) + \bar{A}_d \bar{x}^*(t - \tau(t)) + \bar{B}_w w(t) \quad (2-20)$$

令 $x_s(t) = \bar{x}(t) - \bar{x}^*(t)$, $A_s = \bar{A}$, $A_{ds} = \bar{A}_d$ 。

由式(2-19)减去式(2-20)可得：

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + A_{ds} x_s(t - \tau(t)) \quad (2-21)$$

式中：

$$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & 0 & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_G R} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 - \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{ds} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_p \beta}{T_G} + \frac{\beta D K_D}{M T_G} & -\frac{\beta K_D}{M T_G} & 0 & -\frac{\beta K_D}{M T_G} & 0 & -\frac{K_I}{T_G} \\ \frac{K_1 K_D \beta D}{M} - K_1 K_p \beta & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -K_1 K_I \\ \frac{K_1 K_D \beta D}{M} - K_1 K_p \beta & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -K_1 K_I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

故可得出含光伏发电的新型时滞电力系统线性模型的一般形式：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_s x(t) + A_{ds} x(t - \tau(t)), t > 0 \\ x(t) = \varphi(t), t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (2-22)$$

式中： A_s 和 A_{ds} 为系统矩阵， $\tau(t)$ 是满足 $0 \leq \tau(t) \leq h$ 和 $|\dot{\tau}(t)| \leq \mu$ 的时滞时变函数，

$\varphi(t)$ 是初始值。

2.5 本章小结

本章基于含光伏发电模块的电力系统的传递函数模型,控制指令通过电力通信网进行传输时存在的时滞现象,建立含光伏发电模块的单区域时滞电力系统状态空间方程数学模型,采用 PID 控制律对含光伏发电模块的电力系统进行 LFC,给出基于 PID 控制律的含光伏发电模块的单区域时滞电力系统静态输出反馈闭环控制系统状态空间方程。因考虑传递函数无法处理时变时滞系统,所以本文基于状态空间方程法描述系统中所含变量之间的关系,为后续含光伏发电模块的单区域时滞电力系统时滞稳定性分析和控制器设计提供模型支持。

第3章 含光伏发电的时滞电力系统频率稳定性分析

3.1 引言

时滞现象是普遍存在于人类生产生活中，它会使系统性能受阻，妨碍系统正常工作状态。为了更好地研究时滞系统的稳定性问题，时滞通常分为定常时滞和时变时滞。但在实际的系统中时滞总是复杂多变的，不是一般性，本章基于第2章建立的含光伏发电的时滞电力系统状态空间方程，研究该电力系统的时滞相关稳定性问题，通过构建含时变时滞信息的多增广 Lyapunov-Krasovskii 泛函，基于 Lyapunov 稳定性分析理论，提出含光伏发电的时滞电力系统时滞相关频率稳定性判据。

本章标号注释如下： $\mathbb{R}^n$ 和 $\mathbb{R}^{n \times m}$ 分别表示 n 维欧几里得向量空间和 $n \times m$ 实数矩阵空间； M^T 和 M^{-1} 分别表示矩阵 M 的转置矩阵和矩阵 M 的逆矩阵； I_n 、 0_n 和 $0_{n \times m}$ 分别 $n \times n$ 单位矩阵、 $n \times n$ 零矩阵和 $n \times m$ 零矩阵； $P > 0$ 表示一个 P 是实对称正定矩阵； $\text{diag}\{\dots\}$ 表示对角矩阵； $\text{Sym}\{X\} = X + X^T$ ；“*”表示矩阵中的对称项； $\binom{n}{m}$ 指的是二项式系数 $\frac{n!}{m!(n-m)!} \binom{n}{m}$ 。

3.2 预备知识

在进行电力系统时滞稳定性分析之前，本小节先给出电力系统时滞稳定性分析所涉及到的定义和引理。

对于任意系统微分方程：

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3-1)$$

式中： x 表示 n 维状态矢量， f 为 n 维矢量函数，也是 x 和 t 的时变非线性函数。

设方程式(3-1)在 (t_0, x_0) 的初始值下，有唯一的解：

$$x = \varphi(t; x_0, t_0) \quad (3-2)$$

式中： $x_0 = \varphi(t; x_0, t_0)$ 代表当 $t = t_0$ 时的状态。

若系统方程(3-1)在任意时刻都存在状态矢量 x_e ，使得式(3-3)成立，则称 x_e 为

系统的平衡状态。

$$f(x_e, t) = 0 \quad (3-3)$$

引理 3.1: 基于 Lyapunov 第二法, 系统稳定性判据如下:

若 $V(x, t)$ 正定、 $\dot{V}(x, t)$ 负定, 则系统的平衡状态 x_e 是一致渐进稳定的。进一步, 若也满足 $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} V(x, t) = \infty$, 则系统的平衡状态 x_e 是大范围一致渐进稳定的。

若 $V(x, t)$ 正定、 $\dot{V}(x, t)$ 也正定, 则系统的平衡状态 x_e 是不稳定的。

若 $V(x, t)$ 正定、 $\dot{V}(x, t)$ 半负定, 则系统的平衡状态 x_e 是 Lyapunov 意义下的一致稳定。

引理 3.2^[71]: 对于正定矩阵 $Z \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 以及任意矩阵 $N \in \mathbb{R}^{(N+1)n \times m}$, 存在一个定义在 $[\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$ 上的可导函数 x , 则有下列积分不等式成立:

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds \leq 2\xi_N^T \Gamma_N^T N \xi_N + (\beta - \alpha) \xi_N^T N^T \tilde{Z} N \xi_N \quad (3-4)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Gamma_N &= [\pi_N^T(0) \quad \pi_N^T(1) \quad \dots \quad \pi_N^T(N)] \\ \tilde{Z} &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{Z}, \frac{1}{3Z}, \dots, \frac{1}{(2N+1)Z} \right\} \\ \xi_N &= \begin{cases} [x^T(\beta) \quad x^T(\alpha)]^T, N=0 \\ [x^T(\beta) \quad x^T(\alpha) \quad \frac{1}{\beta-\alpha} \Theta_0^T \quad \dots \quad \frac{1}{\beta-\alpha} \Theta_{N-1}^T]^T, N>0 \end{cases} \\ \pi_N^T(k) &= \begin{cases} [I \quad -I], N=0 \\ [I \quad (-1)^{k+1} I \quad \theta_{Nk}^0 I \quad \dots \quad \theta_{Nk}^{N-1} I], N \geq 1 \end{cases} \\ \theta_{Nk}^j &= \begin{cases} (2j+1)((-1)^{k+j} - 1), j \leq k, \\ 0, j > k \end{cases} \\ F_k(s) &= (-1)^k \sum_{i=0}^k [(-1)^i \binom{k}{i} \binom{k+i}{i} \left(\frac{s-\alpha}{\beta-\alpha} \right)^i] \\ \Theta_k &= \int_{\alpha}^{\beta} F_k(s) x(s) ds \end{aligned}$$

当 $N=2$ 时, 式(3-4)可以写成如下式子:

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds \leq 2\xi_2^T \Gamma_2^T N \xi_2 + (\beta - \alpha) \xi_2^T N^T \tilde{Z} N \xi_2 \quad (3-5)$$

式中：

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 3Z_0 & 0 \\ 0 & 0 & 5Z_0 \end{bmatrix}$$

$$\xi_2 = \text{col} \{x^T(\beta) \quad x^T(\alpha) \quad \varpi_1 \quad \varpi_2\}$$

$$\varpi_1 = \frac{1}{\beta - \alpha} \int_{\alpha}^{\beta} x(s) ds$$

$$\varpi_2 = \frac{1}{(\beta - \alpha)^2} \int_{\alpha}^{\beta} (\beta - s) x(s) ds$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} I & -I & 0 & 0 \\ I & I & -2I & 0 \\ I & -I & -6I & 12I \end{bmatrix}$$

引理 3.3(Schur 引理): 对于一个给定的矩阵 $S = S^T \in R^{n \times n}$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$$

式中： $S_{11} \in R^{r \times r}$, $S_{12} \in R^{r \times (n-r)}$, $S_{22} \in R^{(n-r) \times (n-r)}$

若 S_{11}, S_{22} 是可逆矩阵，则下列三个式子存在等价关系：

- (1) $S < 0$
- (2) $S_{11} < 0$ 且 $S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$
- (3) $S_{22} < 0$ 且 $S_{11} - S_{12}^T S_{22}^{-1} S_{12} < 0$

此外，为方便对含光伏发电的时滞电力系统进行稳定性分析，优先给出如下向量和矩阵的定义：

$$w_1(t) = \frac{1}{h - \tau(t)} \int_{t-h}^{t-\tau(t)} x(s) ds$$

$$w_2(t) = \frac{1}{(h-\tau(t))^2} \int_{t-h}^{t-\tau(t)} (t-\tau(t)-s)x(s)ds$$

$$w_3(t) = \int_{t-\tau(t)}^t \frac{x(s)}{\tau(t)} ds$$

$$w_4(t) = \frac{1}{\tau^2(t)} \int_{t-\tau(t)}^t (t-s)x(s)ds$$

$$\eta_{1a}(t) = [x^T(t) \quad x^T(t-\tau(t)) \quad x^T(t-h)]^T$$

$$\eta_{1b}(t) = [\tau(t)w_3^T(t) \quad (h-\tau(t))w_1^T(t) \quad (h-\tau(t))w_2^T(t) \quad \tau(t)w_4^T(t)]^T$$

$$\eta_1(t) = [\eta_{1a}^T(t) \quad \eta_{1b}^T(t)]^T$$

$$\eta_2(t) = [\dot{x}^T(s) \quad x^T(s) \quad x^T(t) \quad \dot{x}^T(t-\tau(t)) \quad \dot{x}^T(t-h)]$$

$$\xi_1(t) = [x^T(t) \quad x^T(t-\tau(t)) \quad \dot{x}^T(t-\tau(t)) \quad x^T(t-h) \quad \dot{x}^T(t-h)]^T$$

$$\xi_2(t) = [w_1^T(t) \quad w_2^T(t) \quad w_3^T(t) \quad w_4^T(t)]^T$$

$$\xi(t) = [\xi_1^T(t) \quad \xi_2^T(t)]^T$$

$$e_i = [0_{n \times (i-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (9-i)n}], i=1,2,\dots,9$$

3.3 基于广义自由权积分不等式的时滞电力系统负荷频率稳定分析

基于第2章建立的含光伏发电的时滞电力系统(2-22)，本小节基于 Lyapunov 稳定性理论进行稳定性分析，其时滞相关稳定性判据如下：

定理 3.1： 对给定的标量 $h, \mu > 0$ ，如果存在正定矩阵 $P \in \mathbb{R}^{7n \times 7n}$ ， $Q_1, Q_2 \in \mathbb{R}^{5n \times 5n}$ ， $R_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $R_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ，以及任意矩阵 $N_1 \in \mathbb{R}^{3n \times 9n}$ ， $N_2 \in \mathbb{R}^{3n \times 9n}$ ，在时滞满足约束条件 $0 \leq \tau(t) \leq h, |\dot{\tau}(t)| \leq \mu$ 的情况下，使如下列线性矩阵不等式成立，则系统(2-22)是时滞相关渐进稳定的。

$$\begin{bmatrix} \Xi(0, \dot{\tau}(t)) & \sqrt{h}N_2^T \\ * & -\tilde{R}_2^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3-6)$$

$$\begin{bmatrix} \Xi(h, \dot{\tau}(t)) & \sqrt{h}N_1^T \\ * & -\tilde{R}_1^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3-7)$$

式中:

$$\Xi(\tau(t), \dot{\tau}(t)) = \text{Sym}\{\Pi_1^T P \Pi_2\} + \Pi_3^T Q_1 \Pi_3 - (1 - \dot{\tau}(t)) \Pi_4^T (Q_1 - Q_2) \Pi_4$$

$$- \Pi_5^T Q_2 \Pi_5 + h e_A^T R_1 e_A + h(1 - \dot{\tau}(t)) e_3^T (R_2 - R_1) e_3$$

$$+ \text{Sym}\{\Pi_6 Q_1 H_1 + \Pi_7 Q_2 H_1\} - \Phi$$

$$\Phi = \text{Sym}\{\Pi_8^T N_1 + \Pi_9^T N_2\}$$

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} e_1^T & e_2^T & e_4^T & \tau(t) e_8^T & (h - \tau(t)) e_6^T & (h - \tau(t)) e_7^T & \tau(t) e_9^T \end{bmatrix}^T$$

$$\Pi_{21} = [e_A^T \quad (1 - \dot{\tau}(t)) e_3^T \quad e_5^T]^T$$

$$\Pi_{22} = e_1^T - (1 - \dot{\tau}(t)) e_2^T$$

$$\Pi_{23} = (1 - \dot{\tau}(t)) e_2^T - e_4^T$$

$$\Pi_{24} = \dot{\tau}(t) e_7^T - e_6^T + (1 - \dot{\tau}(t)) e_2^T$$

$$\Pi_{25} = -\dot{\tau}(t) e_9^T - (1 - \dot{\tau}(t)) e_8^T + e_1^T$$

$$\Pi_2 = [\Pi_{21}^T \quad \Pi_{22}^T \quad \Pi_{23}^T \quad \Pi_{24}^T \quad \Pi_{25}^T]^T$$

$$\Pi_3 = [e_A^T \quad e_1^T \quad e_1^T \quad e_2^T \quad e_4^T]^T$$

$$\Pi_4 = [e_3^T \quad e_2^T \quad e_1^T \quad e_2^T \quad e_4^T]^T$$

$$\Pi_5 = [e_5^T \quad e_4^T \quad e_1^T \quad e_2^T \quad e_4^T]^T$$

$$\Pi_6 = [e_1^T - e_2^T \quad \tau(t) e_8^T \quad \tau(t) e_1^T \quad \tau(t) e_2^T \quad \tau(t) e_4^T]^T$$

$$\Pi_{71} = e_2^T - e_4^T$$

$$\Pi_{72} = [(h - \tau(t)) e_6^T \quad (h - \tau(t)) e_1^T \quad (h - \tau(t)) e_2^T \quad (h - \tau(t)) e_4^T]^T$$

$$\Pi_8 = \begin{bmatrix} e_1^T - e_2^T & e_1^T + e_2^T - 2e_8^T & e_1^T - e_2^T + 6e_8^T - 12e_9^T \end{bmatrix}^T$$

$$\Pi_9 = [e_2^T - e_4^T \quad e_2^T + e_4^T - 2e_6^T \quad e_1^T - e_2^T + 6e_8^T - 12e_9^T]^T$$

$$H_1(t) = [e_0^T \quad e_0^T \quad e_A^T \quad (1-\dot{\tau}(t))e_3^T \quad e_5^T]^T$$

$$e_A = A_s e_1 + A_{ds} e_2$$

$$\tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 3R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 5R_1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 3R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 5R_2 \end{bmatrix}$$

证明：构造如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函：

$$\begin{aligned} V(t) = & \eta_1^T(t) P \eta_1(t) + \int_{t-\tau(t)}^t \eta_2^T(t, s) Q_1 \eta_2(t, s) + \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \eta_2^T(t, s) Q_2 \eta_2(t, s) \\ & + \int_{t-\tau(t)}^t (h-t+s) \dot{x}^T(s) R_1 \dot{x}(s) ds + \int_{t-h}^{t-\tau(t)} (h-t+s) \dot{x}^T(s) R_2 \dot{x}(s) ds \end{aligned} \quad (3-8)$$

式中： $P > 0$ 、 $Q_1 > 0$ 、 $Q_2 > 0$ 、 $R_1 > 0$ 、 $R_2 > 0$ 。

此时， $V(t) > 0$ ，即满足函数正定，对 $V(t)$ 关于时间变量求导可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & 2\eta_1^T(t) P \dot{\eta}_1(t) + \eta_2^T(t, t) Q_1 \eta_2(t, t) \\ & - \eta_2^T(t, t-\tau(t)) (1-\dot{\tau}(t)) (Q_1 - Q_2) \eta_2(t, t-\tau(t)) \\ & - \eta_2^T(t, t-h) Q_2 \eta_2(t, t-h) + 2 \int_{t-\tau(t)}^t \eta_2^T(t, s) Q_1 \frac{\partial \eta_2(t, s)}{\partial t} ds \\ & + 2 \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \eta_2^T(t, s) Q_2 \frac{\partial \eta_2(t, s)}{\partial t} ds + h \dot{x}^T(t) R_1 \dot{x}(t) \\ & - (h-d(t) \dot{x}^T(t-\tau(t)) (R_2 - R_1) \dot{x}(t-\tau(t)) \\ & - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}^T(s) R_1 \dot{x}(s) ds - \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \dot{x}^T(s) R_2 \dot{x}(s) ds \\ = & \xi^T(t) \Omega(t) \xi(t) - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}^T(s) R_1 \dot{x}(s) ds - \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \dot{x}^T(s) R_2 \dot{x}(s) ds \end{aligned} \quad (3-9)$$

令：

$$\begin{aligned} \Omega(t) = & \text{Sym}\{\Pi_1^T P \Pi_2\} + \Pi_3^T Q_1 \Pi_3 - (1-\dot{\tau}(t)) \Pi_4^T (Q_1 - Q_2) \Pi_4 - \Pi_5^T Q_2 \Pi_5 + h e_A^T R_1 e_A \\ & + h(1-\dot{\tau}(t)) e_3^T (R_2 - R_1) e_3 + \text{Sym}\{\Pi_6 Q_1 H_1 + \Pi_7 Q_2 H_1\} \end{aligned}$$

由式(3-9)可知:

$$\dot{V}(t) = \xi^T(t) \Omega(t) \xi(t) - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}^T(s) R_1 \dot{x}(s) ds - \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \dot{x}^T(s) R_2 \dot{x}(s) ds \quad (3-10)$$

应用引理 3.2($N = 2$ 时)对式(3-10)中的积分项进行界定, 可得:

$$\begin{aligned} & -\int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}^T(s) R_1 \dot{x}(s) ds \\ & \leq \xi^T(t) \{ \text{Sym}\{\Pi_8^T N_1\} + \tau(t) N_1^T R_1^{-1} N_1 \} \xi(t) \\ & -\int_{t-h}^{t-\tau(t)} \dot{x}^T(s) R_2 \dot{x}(s) ds \\ & \leq \xi^T(t) \{ \text{Sym}\{\Pi_9^T N_2\} + (h - \tau(t)) N_2^T R_2^{-1} N_2 \} \xi(t) \end{aligned} \quad (3-11)$$

结合式(3-9)和式(3-11), 可推导出式(3-12):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) & \leq \xi^T(t) \{ \Omega(t) + \text{Sym}\{\Pi_8^T N_1 + \Pi_9^T N_2\} + \\ & \tau(t) N_1^T R_1^{-1} N_1 + (h - \tau(t)) N_2^T R_2^{-1} N_2 \} \xi(t) \end{aligned} \quad (3-12)$$

由 Schur 补定理可知, 式 (3-6) 和 式 (3-7) 同时成立意味着 $\Omega(t) + \text{Sym}\{\Pi_8^T N_1 + \Pi_9^T N_2\} + \tau(t) N_1^T R_1^{-1} N_1 + (h - \tau(t)) N_2^T R_2^{-1} N_2 < 0$, 即 $\dot{V}(t, x(t)) < 0$, 由引理 3.1 可知, 时滞电力系统(2-33)是时滞相关一致渐进稳定的, 证明完毕。

注释 3.1: 在多增广 Lyapunov-Krasovskii 泛函中, 多增广项 $\eta_1^T(t) P \eta_1(t) + \int_{t-\tau(t)}^t \eta_2^T(t, s) Q_1 \eta_2(t, s) + \int_{t-h}^{t-\tau(t)} \eta_2^T(t, s) Q_2 \eta_2(t, s)$ 包含了系统尽可能多的各状态之间的耦合关系有利于推导出保守性低的稳定性判据。

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱, 可以很容易地求出时滞系统在不损失稳定性的情况下所能承受的最大允许延迟上界。系统的时滞稳定裕度计算步骤流程图如图 3-1 所示。

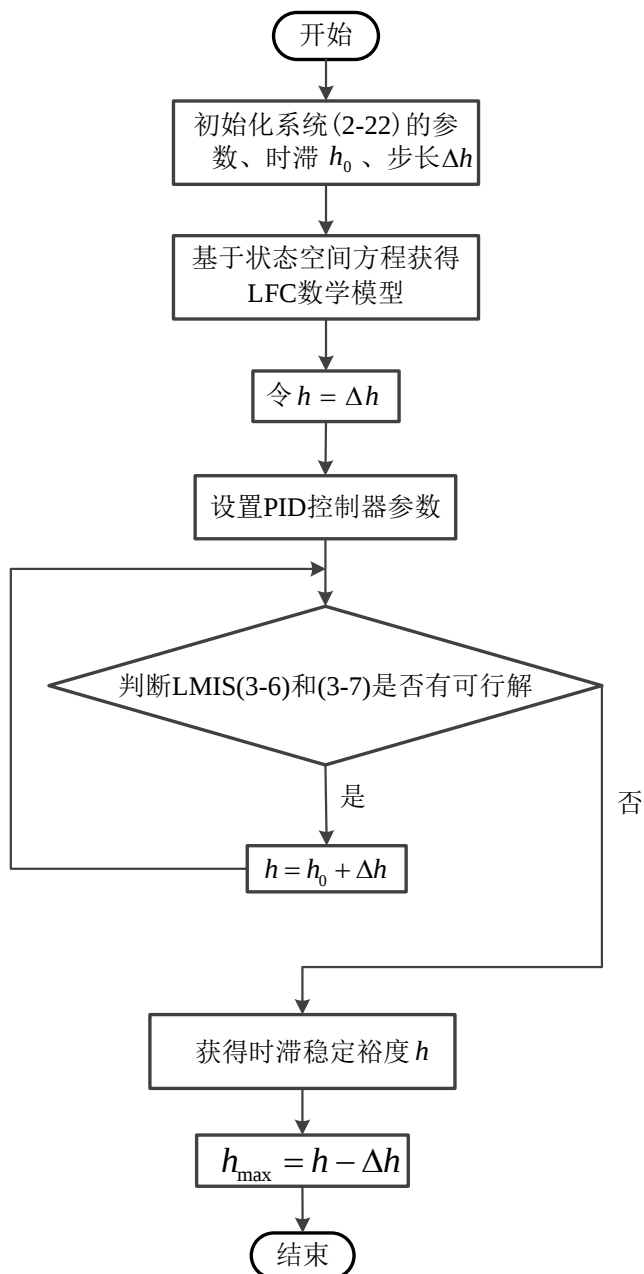


图 3-1 时滞系统计算时滞上界步骤流程图

3.4 数值分析

为了验证本章所提时滞相关稳定性判据(定理 3.1)的有效性和优越性, 分别对时滞控制系统较为经典的二阶状态矩阵时滞系统、单区域负荷频率控制系统和含光伏发电模型的单区域负荷频率系统进行时滞相关稳定性分析。

3.4.1 典型二阶系统

针对时滞系统(2-22)其经典的系统状态参数如下^[70-71]:

$$A_s = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -0.9 \end{bmatrix}, A_{ds} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

分别应用文献[70]、文献[71]和本章所提定理 3.1 对典型二阶系统进行时滞相关稳定性分析，表 3-1 给出了 μ 分别取 0.1、0.5 和 0.8 时，系统的最大允许时滞上界。

表 3-1 不同 μ 值时典型二阶系统的最大允许时滞上界

μ	0.1	改进百分比	0.5	改进百分比	0.8	改进百分比
文献[70]	4.900	——	3.160	——	2.730	——
文献[71]	4.921	0.428%	3.221	0.782%	2.792	2.271%
定理 3.1	4.9283	0.0014%	3.2789	1.975%	2.8573	2.338%

从表 3-1 可以看出，采用本章定理 3.1 获得的典型二阶系统的最大允许时滞上界优于文献[70]和文献[71]所提时滞相关稳定性判据，特别是当时滞变化率比较大的时候，其优越性更加明显，如当时滞变化率的 $\mu = 0.8$ 时，改进百分比达到 2.338%。

3.4.2 不含光伏发电的单区域负荷频率控制系统

基于文献[72]中的单区域负荷频率控制系统参数矩阵为：

$$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{T_G R} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{ds} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\beta K_p}{T_G} & 0 & 0 & -\frac{K_I}{T_G} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中： $D=1.0$, $R=0.05$, $T_G=0.10$, $M=10$, $T_T=0.3$ 。

分别应用文献[72]和本章定理 3.1，在时滞变化率 $\mu=0$ 和时变时滞 $\mu=0.5$ 两种情况下，基于不同 PI 控制增益，单区域负荷频率控制系统时滞稳定裕度如表 3-2 和表 3-3 所示。

表 3-2 不同 K_p 对应的定常时滞稳定裕度($\mu=0$)

K_p	$K_I=0.05$		$K_I=0.40$		$K_I=1.00$	
	文献[72]	本文结果	文献[72]	本文结果	文献[72]	本文结果
0	30.853	30.914	3.377	3.381	0.922	0.923
0.05	31.263	31.874	3.496	3.501	0.969	0.970
0.20	27.763	34.242	3.784	3.792	1.077	1.078
0.40	22.194	35.830	3.472	3.980	1.116	1.118
1.00	0.594	0.595	0.515	0.517	0.360	0.362

表 3-3 不同 K_p 对应的时变时滞稳定裕度($\mu=0.5$)

K_p	$K_I=0.05$		$K_I=0.40$		$K_I=1.00$	
	文献[72]	本文结果	文献[72]	本文结果	文献[72]	本文结果
0	27.324	29.106	2.962	3.205	0.743	0.849
0.05	27.240	29.876	3.068	3.323	0.785	0.896
0.20	22.524	31.960	3.212	3.581	0.853	0.993
0.40	14.868	33.100	2.578	3.668	0.768	0.984
1.00	0.435	0.505	0.390	0.445	0.300	0.327

从两个表中可以看出,本文方法得出的最大允许时滞上界是比文献[72]出的最大允许时滞上界要高,这表明了本文提出的时滞稳定判据保守性更低。

为了进一步说明本章所提定理 3.1 的优越性,引入比较参量的相对差,用相对误差值说明时滞相关稳定性判据的低保守性。

相对差: 相对于方法 2 计算的数据,方法 1 计算的数据提高的百分比,即

$$\Delta\tau_{prv} = \frac{\tau_{\max 1} - \tau_{\max 2}}{\tau_{\max 2}} \times 100\% \quad (3-13)$$

式中: $\tau_{\max i}$, $i=1,2$ 表示方法 i 获得的最大允许时滞上界, $\Delta\tau_{prv} > 0$ 说明方法 1 效果更好,保守性更低。

表 3-4 和表 3-5 分别列出时滞变化率 $\mu = 0$ 和 $\mu = 0.5$ 下的相对差 $\Delta\tau_{prv}$ 。

表 3-4 本文方法与文献[72]所得时滞上界的相对差 $\Delta\tau_{prv}(\%)(\mu = 0)$

K_p	K_I		
	0.05	0.40	1.00
0	0.188	0.118	0.108
0.05	1.954	0.143	0.103
0.20	23.33	0.211	0.093
0.40	61.52	14.63	0.179
1.00	0.168	0.388	0.550

表 3-5 本文方法与文献[72]所得时滞上界的相对差 $\Delta\tau_{prv}(\%)(\mu = 0.5)$

K_p	K_I		
	0.05	0.40	1.00
0	6.52	8.20	14.3
0.05	9.67	8.31	14.1
0.20	41.89	11.5	16.4
0.40	122.6	42.3	28.1
1.00	16.09	14.1	9.00

从表中可以看出，不论是定常时滞还是时变时滞，定理 3.1 计算出的时滞上界都比文献[72]中的时滞裕度提高了不少，明显降低了计算结果的保守性，这进一步说明了定理 3.1 的优越性。

3.4.3 含光伏发电的负荷频率控制系统

为了验证定理 3.1 用于分析含光伏发电的单区域时滞负荷频率控制系统的有效性，其系统状态矩阵如下：

$$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & 0 & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_G R} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 - \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{ds} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_p \beta}{T_G} + \frac{\beta D K_D}{M T_G} & -\frac{\beta K_D}{M T_G} & 0 & -\frac{\beta K_D}{M T_G} & 0 & -\frac{K_I}{T_G} \\ \frac{K_1 K_D \beta D}{M} - K_1 K_p \beta & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -K_1 K_I \\ \frac{K_1 K_D \beta D}{M} - K_1 K_p \beta & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -\frac{K_1 K_D \beta}{M} & 0 & -K_1 K_I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中： $\lambda_1 = 99.497$ 、 $\lambda_2 = -50$ 、 $\lambda_3 = 0.503$ 、 $K_1 = -18$ (系统参数来自文献[68])，其它数值与 3.2 中一致。表 3-4 和表 3-5 分别给出了时滞变化率 $\mu = 0$ 、 $\mu = 0.1$ 时，基于不同 PI 控制增益情况下，应用定理 3.1 得到的含光伏发电的时滞负荷频率控制系统的时滞稳定裕度。

表 3-4 不同 K_p 对应的定常时滞稳定裕度($\mu=0$)

K_p	K_I		
	0.05	0.10	0.15
0	1.007	0.374	0.148
0.05	1.634	0.755	0.413
0.10	1.259	0.751	0.464
0.15	0.537	0.480	0.313
0.20	0.289	0.246	0.201

表 3-5 不同 K_p 对应的时变时滞稳定裕度($\mu=0.1$)

K_p	K_I		
	0.05	0.10	0.15
0	1.002	0.371	0.145
0.05	1.623	0.752	0.411
0.10	1.239	0.736	0.458
0.15	0.513	0.395	0.305
0.20	0.283	0.242	0.198

为了进一步验证结论的有效性，基于文献[72]中的控制器参数值 $K_p=0.05, K_I=0.1$ ，在时滞变化率 $\mu=0$ ，时滞稳定裕度为 0.755s(见表 3-4)，利用 MATLAB 软件上的 Simulink 平台，通过搭建状态空间模型对含光伏发电的单区域时滞负荷频率控制系统进行时域仿真分析(见图 3-5 电力系统频率偏差曲线,图 3-6 机械功率输出响应曲线和图 3-7 光伏功率输出响应曲线)，在仿真 10s 时加入负荷为 0.01pu 的扰动，即 $\Delta P_d=0.01pu$ 时，系统频率发生波动，此时发电单元(机械功率输出和光伏功率输出)在 PI 控制器作用下开始响应，使得频率偏差在 $t=140s$ 时进入并保持在电力系统运行安全范围之内，这说明系统在时滞上界 0.755 内是可以保持系统频率稳定的。

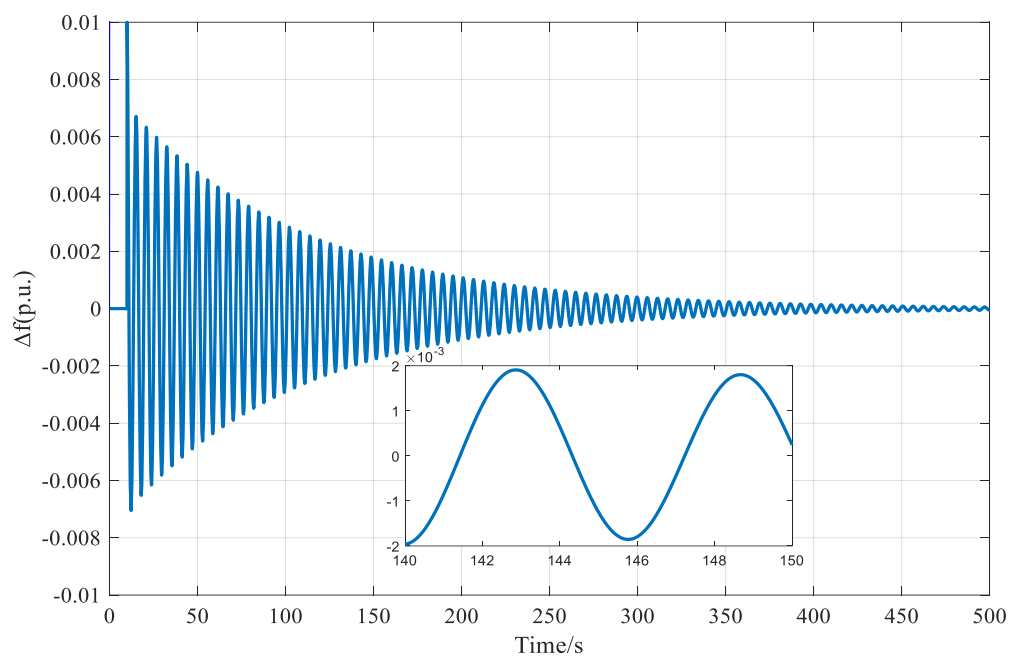


图 3-5 电力系统频率偏差曲线

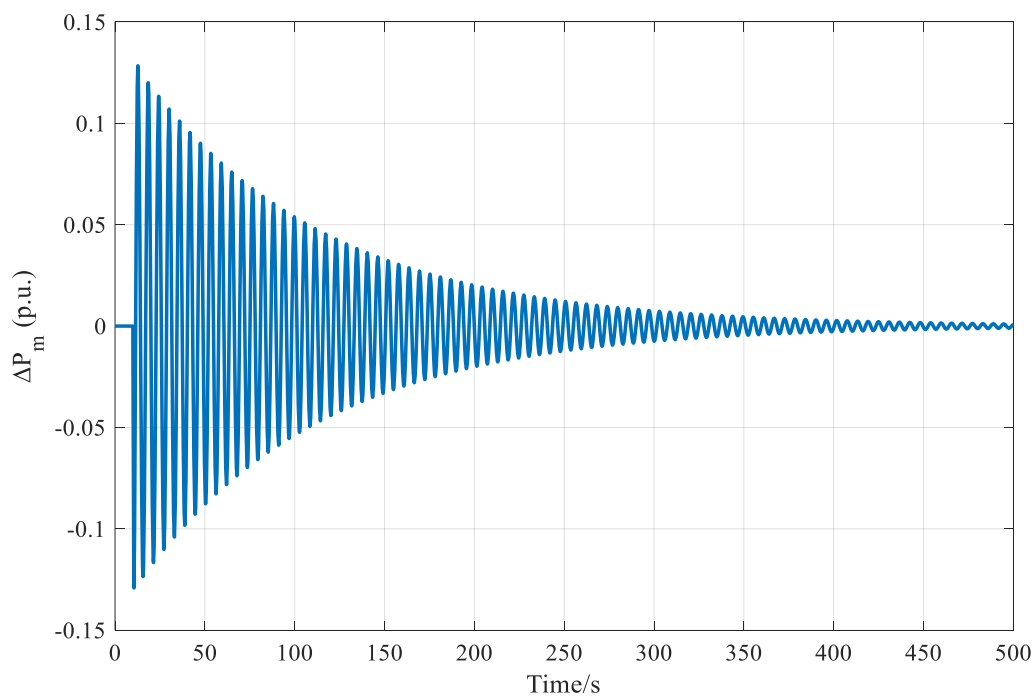


图 3-6 机械功率输出曲线

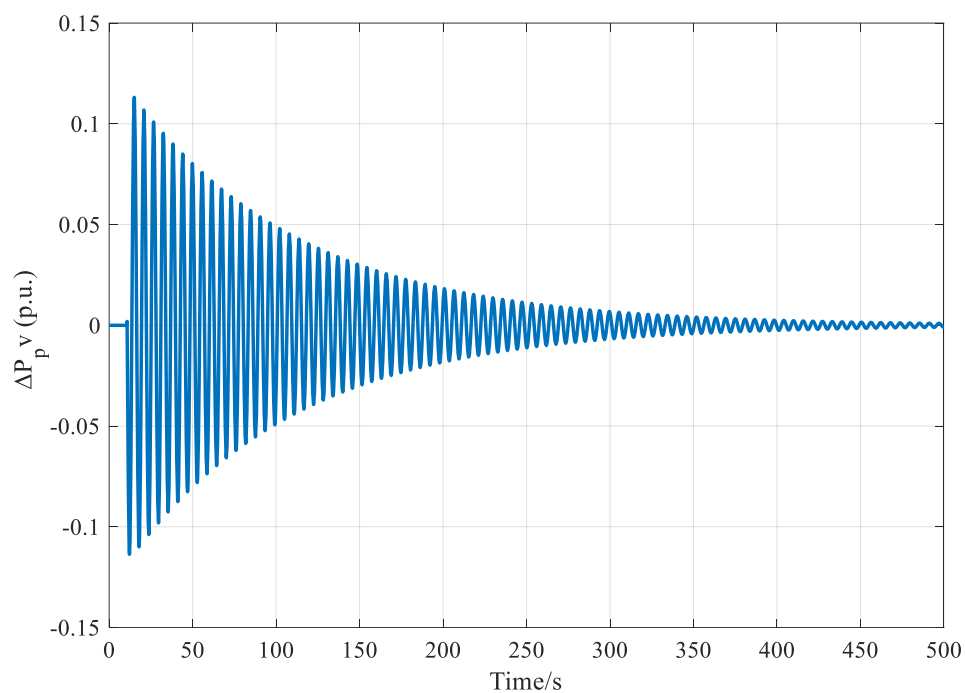


图 3-7 光伏功率输出曲线

3.5 本章小结

考虑时滞的影响，本章采用第 2 章提出的单区域电力系统负荷频率控制模型，通过构建包含更多时滞关联信息的多增广 LKF，引入基于自由矩阵的广义积分不等式处理 LKF 导数中的积分项，提出一种具有更低保守性的时滞相关稳定性判据，最后，以典型二阶系统、单区域 LFC 方案和含光伏发电的单区域 LFC 为例，数值比较和仿真分析所提稳定性判据的低保守性和有效性。

第 4 章 含光伏发电的时滞电力系统控制器设计

4.1 引言

传统的发电方式(如燃煤、天然气等)使用旋转机械(如蒸汽轮机)来产生电能, 具有较大的转动惯量, 而新能源发电方式(如风力发电和光伏发电)转动惯量较小。另一方面新能源发电系统通常使用变流器将直流电转换为交流电并入电网。变流器具有快速响应的特点, 可以迅速调整输出功率以适应新能源的波动性。然而, 由于变流器的特性, 它们无法提供与传统发电机相同的惯性响应。当系统负荷发生变化时, 传统发电机可以通过调整燃料供给来保持稳定的频率, 而新能源发电系统则需要依靠其他控制手段来实现频率稳定。因此, 当大量新能源并入电网时, 由于其较小的转动惯量和变流器的特性, 导致整个电网的惯性会下降, 这使得电力系统的调频能力减弱, 需要采取额外的措施来保持电网的稳定运行。与此同时, 信息技术的发展, 互联电网的远距离输电过程中, 时滞带来的影响更是无法避免。为了使电力系统稳定运行, 避免因时滞的存在和新能源并网后对系统频率造成波动甚至失稳, 近些年来学者们设计了可以保证在外部扰动作用下安全运行的控制器来控制频率偏差, 例如变结构控制、模型预测控制^[73-74]、采样控制^[75]、鲁棒控制等。

鲁棒控制如 H_∞ ^[76], H_2 / H_∞ 控制^[77]、Riccati 方程法^[78]、 μ 综合法^[79]、Lyapunov 直接法等。例如文献[80]对多区域互联电网提出基于 LMI 的分布式 H_∞ 负荷频率控制策略, 在添加链路故障和传输时滞的情况下, 用积分不等式分析时滞, 设计出切换拓扑下分布式 H_∞ 控制器, 最后在 39 节点测试系统中进行实验。

而在实际的工程应用中, PID 控制器应用范围最广, 主要研究如何利用各种算法寻优 PID 控制器参数, 如遗传算法^[81]、粒子群算法^[82]、灰狼算法^[83]等智能算法, 但是这些文献并没有将时滞因素对系统的影响考虑进去。文献[84]结合光伏、热电和风力系统组成的可再生能源多区域电力系统(Multi-Area Power Systems, MPS)考虑负荷频率区域控制误差信号中的通信延迟, 提出了一种基于遗传算法优化的级联比例-积分-导数(PID)控制方案来处理通信延迟。通过比较有无

不同时延时 PI 参数的稳定性边界,讨论了通信时延对 PI 参数稳定性的不利影响。基于所提出的级联控制方案,采用遗传算法对其参数进行优化。在不同场景下的仿真结果验证了所提控制方案的优越性,该方案能够最快地抑制负载变化的干扰,并获得较小的超调量,提出的遗传算法优化的级联 PI 控制方案在负荷频率调节方面具有很大的应用前景。文献[85]将太阳能、风能、氢能等可再生能源并入电网形成的大型互联混合电力系统,研究在放松管制环境下的时滞依赖稳定性,首先为了判断所提混沌原子搜索优化算法(Chaotic Atomic Search Optimization, CASO)的有效性,将该算法与其他进化算法对比,结果表明 CASO 算法具有更好的动态响应。而后建立两区域时滞电力系统,采用线性矩阵不等式法计算出时滞稳定裕度,使用仿真方法清楚地分析了在特定延迟范围内时滞裕度如何随控制器增益显著变化。而文献[85]尽管采用智能算法,以传递函数为优化目标,考虑时滞对系统的影响,但仍是传递函数为优化目标,而不是以状态空间方程作为优化目标,得到的控制器参数并非最优,而且具有一系列的约束。

基于第 3 章的稳定性分析的结果,单区域时滞电力系统控制器增益的求解方法是通过计算线性矩阵不等式获得。然而, Lyapunov-Krasovskii 泛函中引入增广矩阵时,一般使用传统的锥补迭代(Cone Complementary Linearisation, CCL)算法来解决这一问题,经过有限迭代结束后,能够获得控制增益,但是非线性矩阵不等式转化为线性矩阵不等式的过程中,会增加有一些近似化约束,比如文献[86]在构造一个双侧环 Lyapunov 泛函时,同时在不等式中的变量矩阵 Z_1 和 Z_2 两侧定义新的变量约束条件 $U_1 \leq LZ_1^{-1}L$ 和 $U_2 \leq LZ_2^{-1}L$ 使其线性化,得到了在状态反馈控制器下闭环系统绝对稳定的充分条件。事实上, Z_1 和 Z_2 是自由矩阵,不存在约束条件。由于 CCL 算法计算过程中,通过约束变量使其线性化,就可以用线性矩阵不等式法进行求解。但是强加约束会改变求解范围,给控制器设计带来不便,不一定得到最优解。针对控制器设计,一方面可以考虑用人工智能算法进行寻优,而且这些智能算法在以传递函数上都得到了广泛的应用,取得了较好的效果,可是目前在状态空间方程上没有应用。本章针对控制器增益的求解问题,受强化学习的启发,通过提出一种基于高斯分布的调节参数搜索算法,对控制器的参数进行寻优,以求得到最佳的控制结果。

4.2 基于高斯分布的调节参数搜索算法

在统计学概论中, 高斯函数(Gaussian Function)是描述正态分布的密度函数。其表达式为

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4-1)$$

式中: μ 表示均值, σ 表示标准差。图 4-1 给出在 μ 为 0 时, σ 分别取 0.2、0.4、0.8 和 1 时的高斯分布曲线, 可以看出 σ 越大, 则图形越宽, 分布越分散, 尖峰越小; σ 越小, 则图形越窄, 分布越集中, 尖峰越大。

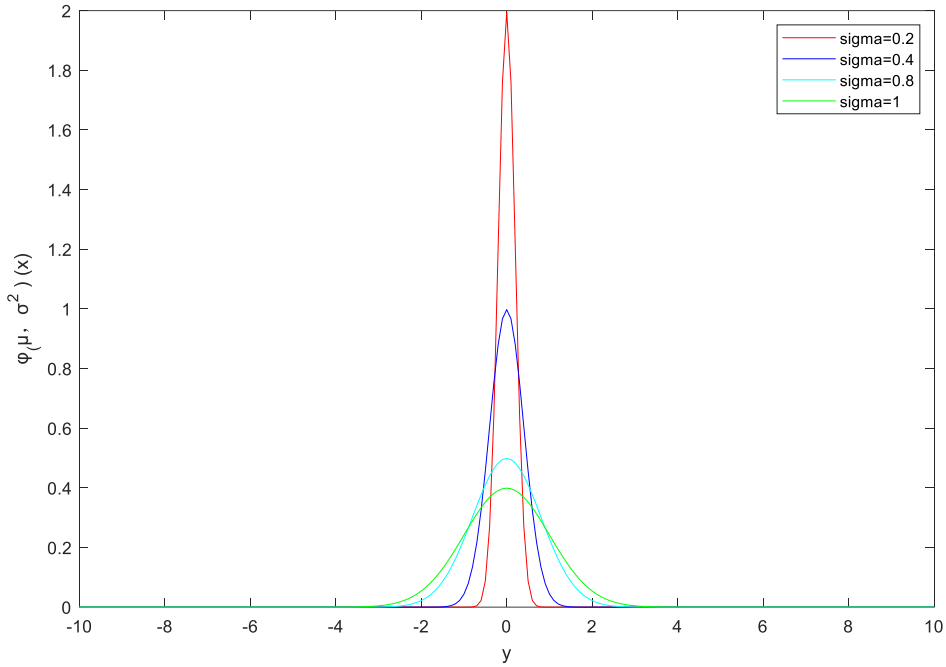


图 4-1 高斯分布曲线

本文在算法中引入高斯函数 $f(x, \mu, \sigma)$ 和范围搜索因子 ε , 与第 3 章中的定理 3.1 结合在一起形成含光伏发电的时滞电力系统负荷频率控制器调节参数搜索算法。其中, 局部搜索因子 ε :

$$\varepsilon = \exp \left\{ \frac{g}{g_{\max}} \right\} \quad (4-2)$$

式中: $g_{\max}$ 表示最大迭代次数, g 表示当前迭代次数, 缩放因子 F_i 表示为:

$$F_i = A_p \times \varepsilon \times f(x, \mu, \sigma), i=1, 2 \quad (4-3)$$

式中： A_p 是控制搜索范围的。

在局部搜索算法中，通过引入范围搜索因子 ε ，并且随着迭代次数的增加，使范围搜索因子 ε 随机性逐渐减小，这样可以在一定程度上增加计算的稳定性和收敛性。

算法 4.1 基于高斯分布的调节参数搜索算法

Step1: 初始化含光伏发电的新型时滞电力系统方程式(2-22)的系统矩阵 A_s 和 A_{ds} , $h_{\max}$, h_{step} , h_{up} 和 h , 最大迭代次数 $g_{\max}$, μ_1 , μ_2 。

Step2: 如果 $g \leq g_{\max}$, 设 $K_p = K_i = K_d = F = A_p \times \varepsilon \times f(x)$, 否则, 令 $g=0$, 进入 Step4。

Step3: 对于给定的 μ_1 , μ_2 , 如果 $h < h_{up}$ 且存在线性矩阵不等式(3-6)和式(3-7)的可行解, 求出 K_p 、 K_i 和 K_d 。令 $h_{\max} = h$, $K_{pout} = K_p$, $K_{iout} = K_i$, $K_{dout} = K_d$ 。令 $h = h_{\max} + h_{step}$, 返回 Step3。否则 $g = g + 1$, $h = h_{\max}$ 返回 Step2。

Step4: 如果 $g \leq g_{\max}$, 令 $K_p = K_{iout} \times F_1$, $K_d = K_{iout} \times F_2$, 进入 Step5。否则输出 K_{pout} 、 K_{iout} 、 K_{dout} 和 $h_{\max}$ 。

Step5: 对于给定的 μ_1 , μ_2 , 如果 $h < h_{up}$ 且存在线性矩阵不等式(3.6)和式(3-7)的可行解, 求出 K_p 、 K_i 和 K_d 。令 $h_{\max} = h$, $K_{pout} = K_p$, $K_{iout} = K_i$, $K_{dout} = K_d$ 。令 $h = h_{\max} + h_{step}$, 返回 Step5, 否则 $g = g + 1$, $h = h_{\max}$ 返回 Step4。

算法伪代码:

输入: 初始化系统 2-22 的相关参数, $h > 0, h_{up}, h_{step}, h_{\max}, g_{\max}, \mu_1, \mu_2$

while $g \leq g_{\max}$ **do**

 set $K_p = K_i = K_d = F = A_p \times \varepsilon \times f(x)$

while $h < h_{up}$ **do**

if the LMIs (3-6)-(3-7) exist a feasible solution **then**

$K_{pout} = K_p, K_{iout} = K_i, K_{dout} = K_d, h_{\max} = h, h = h_{\max} + h_{step}$

续表:

```

    else
        break;
    end if
end while
g = g + 1;
end while
set g = 0
while g ≤ gmax do
    set  $K_p = K_{iout} \times F_1, K_d = K_{iout} \times F_2$ 
    while h < hup do
        if the LMIs (3-6)-(3-7) exist a feasible solution then
             $K_{pout} = K_p, K_{iout} = K_i, K_{dout} = K_d, h_{max} = h, h = h_{max} + h_{step}$ 
        else
            break;
        end if
    end while
    g = g + 1;
end while

```

输出: $K_{pout}, K_{iout}, K_{dout}$ and h_{max} 。

注释 4.1: 在该算法中, 适当选择最大迭代次数可以保证线性矩阵不等式(3-6)和(3-7)在步骤 2 到步骤 4 有可行解, 从而使步骤 5 和 6 能够顺利进行, 此外值得注意的是, 缩放因子中的 A_p 控制搜索范围是可以根据寻优目标的需求进行更改的。

4.3 控制器性能分析

在对含光伏发电模型的单区域负荷频率控制系统中, 采用基于高斯分布的调节参数搜索算法进行参数整定, 相关参量取值为, 均值 μ 取值 0.01, 标准差 σ 取值 0.001, 最大迭代次数为 10, 步长为 1, PID 控制器维数 D 为 3, A_p 为 50, 参

数搜索范围设定为： $K_p, K_i, K_d \in [0,1]$ 。

由于算法寻优控制器参数都是随机的，为了计算出更优异的控制器的，先添加约束条件，假设 $K_p = K_i = K_d = F_i$ ，在三个参数都相等的情况下得到的控制器参数为 $K = [0.0536 \ 0.0536 \ 0.0536]$ ，时滞稳定裕度为 2.275s。然后取 $K_i = 0.0536$ ，在算法步骤3中存在 K_p, K_d 与 K_i 的关系，寻优计算出 $K_p = 0.0692$ ， $K_d = 0.0728$ ，此时，电力系统的时滞稳定裕度 2.524s。

图 4-2 是取时滞为 2.524s 时控制器 $K = [0.0692 \ 0.0536 \ 0.0728]$ 的系统频率偏差曲线见图 4-2，可以清楚看到在 70 秒开始收敛，系统逐渐趋于稳定状态。由此可见，经过算法寻优的控制器能够有效的实现频率稳定。图 4-3 和图 4-4 分别是发动机机械功率增量曲线图和光伏功率输出响应曲线图。

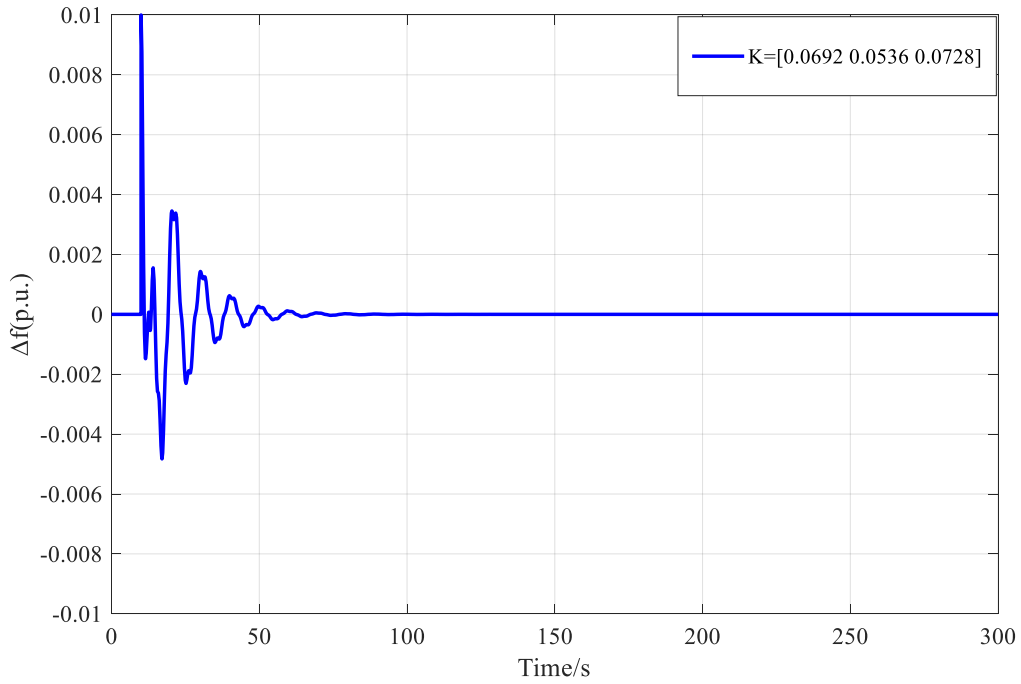


图 4-2 电力系统频率偏差曲线

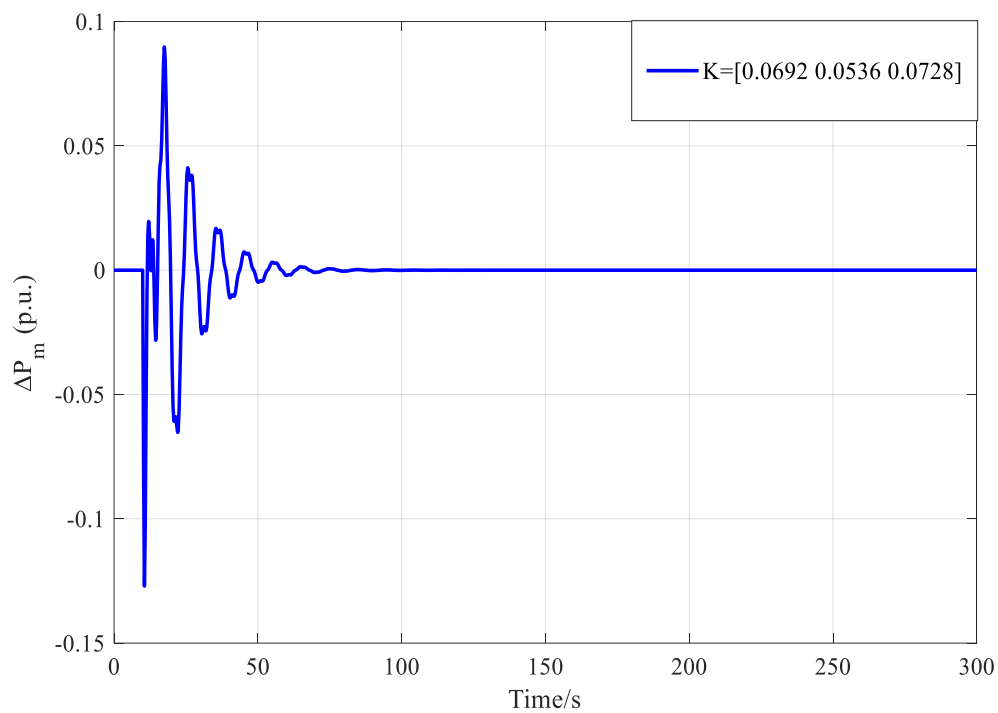


图 4-3 发电机机械功率增量曲线

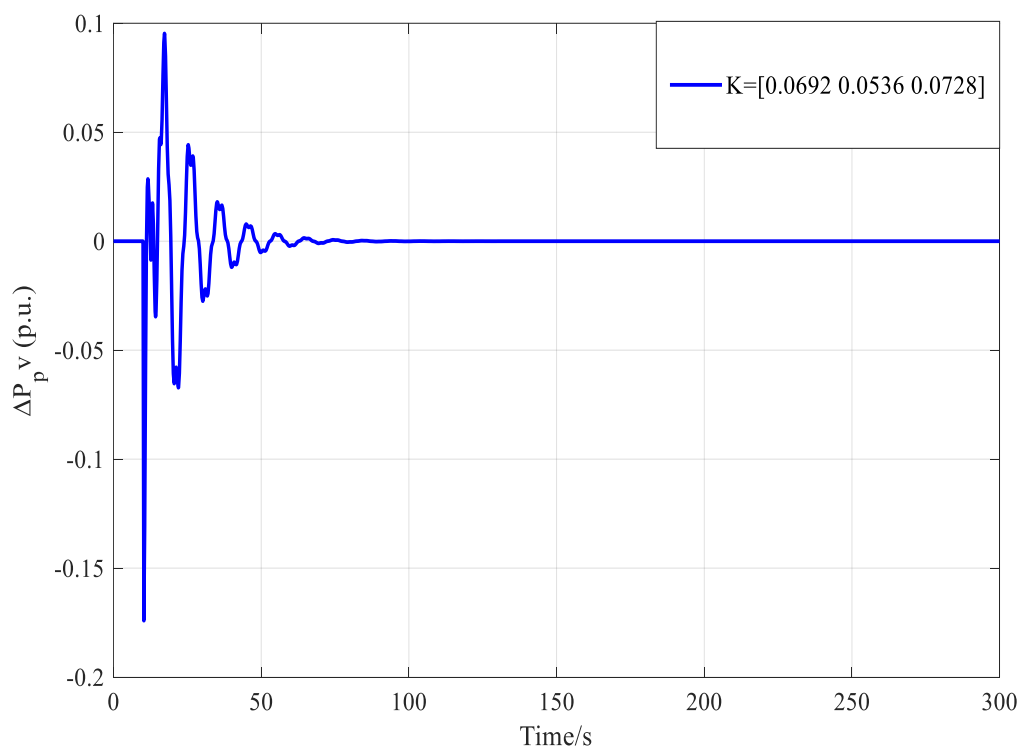


图 4-4 光伏功率输出响应曲线图

为了验证本文所提算法的优越性，表 4-1 给出了对于 $\mu_2 = -\mu_1 = 0$ 时滞上界 h 和相应的控制器增益。

表 4-1 对于 $\mu_2 = -\mu_1 = 0$ 的时滞上界 h 和相应的控制器增益

μ_1	$h_{\max}$	控制器增益
0	1.582	$K = [0.0274 \quad 0.05 \quad 0.0297]$
	0.974	$K = [0.0457 \quad 0.10 \quad 0.0498]$
	0.496	$K = [0.080 \quad 0.15 \quad 0.0659]$

选取文献[72]的控制器参数 $K = [0 \ 0.05 \ 0]$ ，计算得到的时滞裕度为 $1.007s$ ，同时在 $t = 10s$ 时加入 $\Delta P_d = 0.01pu$ 的负荷扰动，而后取 $K_i = 0.05$ ，经过基于高斯分布的调节参数搜索算法对 K_p 和 K_d 进行寻优，寻优控制器增益为 $K = [0.0274 \ 0.05 \ 0.0297]$ ，计算得到的时滞裕度为 1.582 秒。为了方便对比控制器的性能，分析取相同时滞时不同控制器的效果。由图 4-5 的对比可知，文献[72]的控制器系统频率曲线(蓝线)一直在震荡，而经过算法寻优后的控制器频率曲线(红线)在大约 30 秒时开始收敛，系统趋于稳定。图 4-6 和图 4-7 分别是发动机机械功率增量曲线图和光伏功率输出响应曲线图。

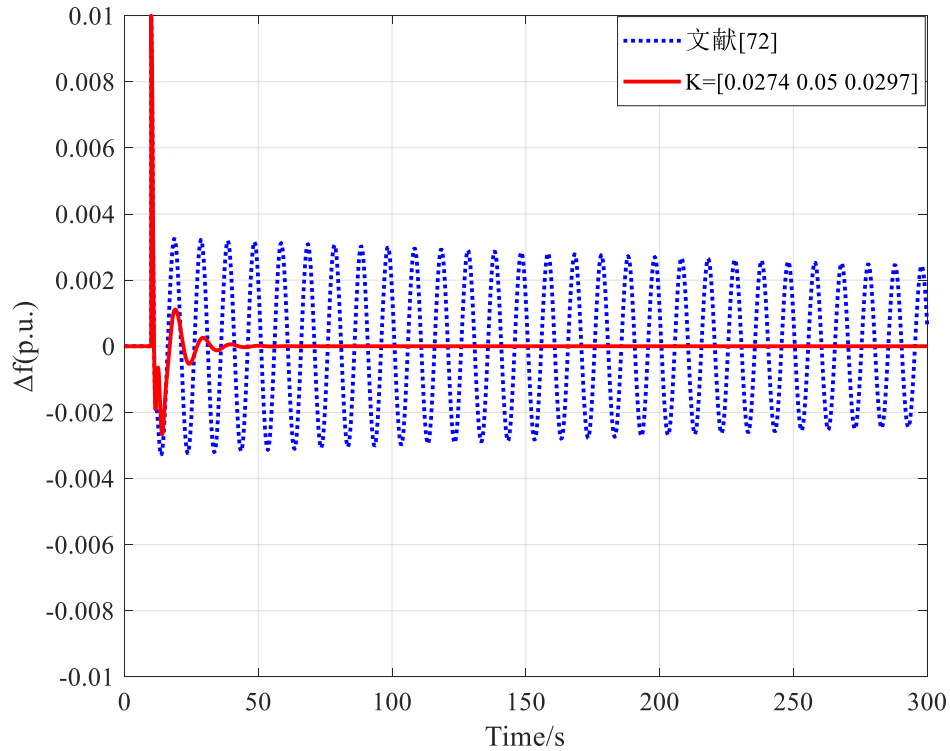


图 4-5 电力系统频率偏差曲线

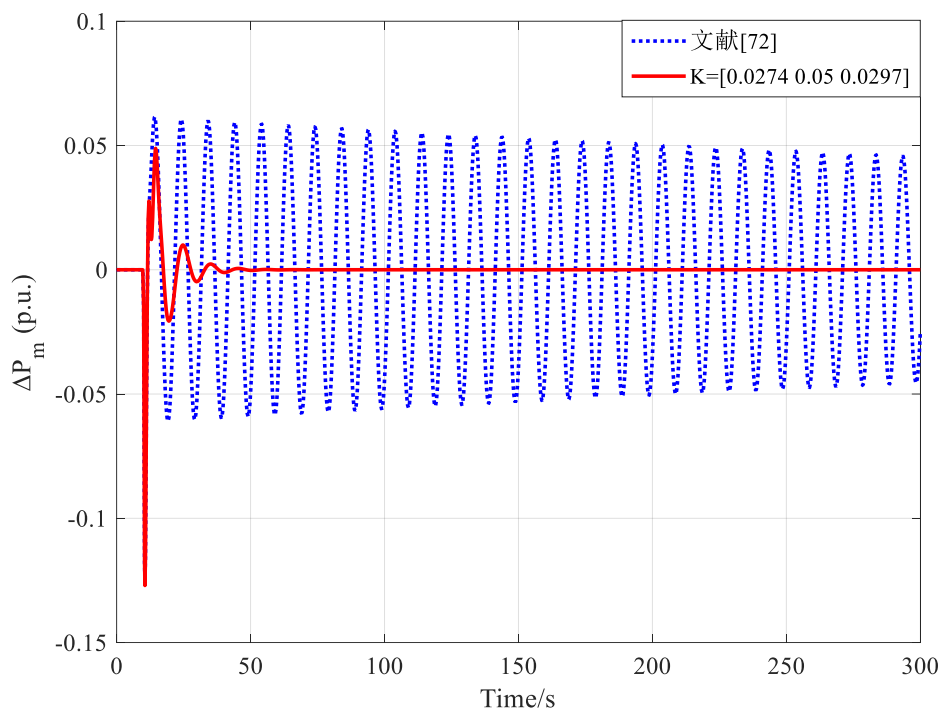


图 4-6 发动机机械功率增量曲线

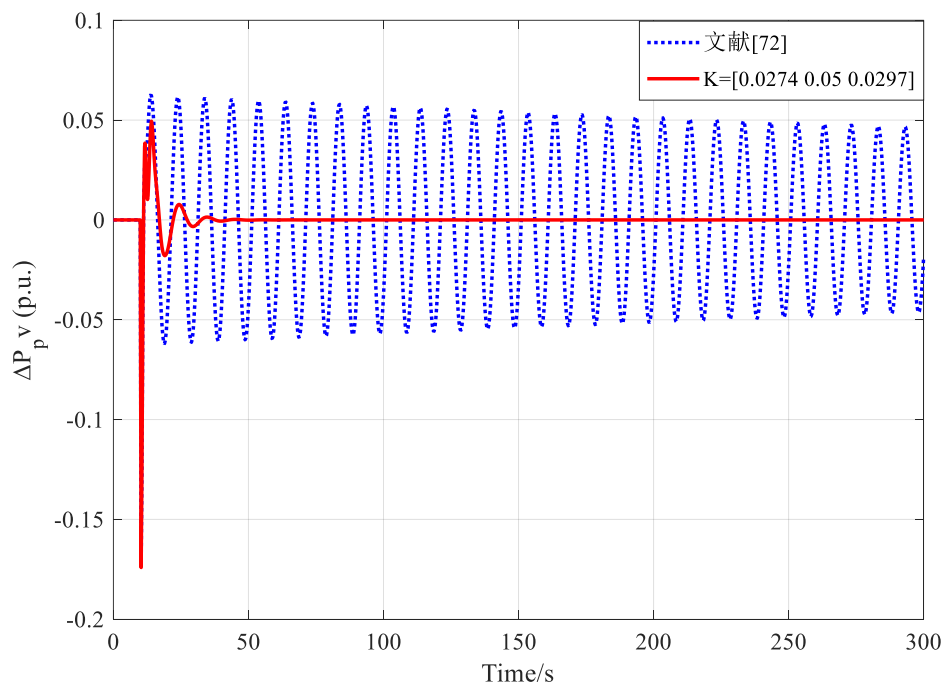


图 4-7 光伏功率输出响应曲线图

上述分析了定常时滞 $\mu = 0$ 时的控制器性能，现在分析在时变时滞下的控制器性能，表 4-2 给出了对于在 $\mu_2 = -\mu_1 = 0.1$ 时的时滞上界 h 和相应的控制器参数。

表 4-2 对于 $\mu_2 = -\mu_1 = 0.1$ 的时滞上界 h 和相应的控制器增益

μ_1	$h_{\max}$	控制器增益
0.1	2.540	$K = [0.0651 \quad 0.05 \quad 0.0692]$
	1.494	$K = [0.0688 \quad 0.10 \quad 0.0782]$
	0.996	$K = [0.0774 \quad 0.15 \quad 0.0773]$

选取文献[72]的控制器进行对比, 参数为 $K = [0 \ 0.05 \ 0]$, 时滞裕度为 1.002s, 同时在 $t=10s$ 时加入 $\Delta P_d = 0.01pu$ 的负荷扰动, 时变延迟函数 $h(t) = \sin(0.1t) + 0.902$ 。经过 4.3 的算法对控制器进行寻优, 寻优参数结果为 $K = [0.0651 \ 0.05 \ 0.0692]$, 计算时滞裕度为 2.540 秒。从图 4-8 中可以看出在取相同的时滞 1.002 秒时, 对比于文献[72]的控制器, 算法寻优的控制器对应的频率偏差曲线(红线)在大约 40 秒时开始收敛, 系统逐渐趋于稳定, 而在 40 秒时, 文献[72]的控制器对应的频率偏差曲线(蓝线)还在震荡, 说明算法寻优的控制器有不错的控制效果。图 4-9 和图 4-10 分别是发动机机械功率增量曲线图和光伏功率输出响应曲线图。

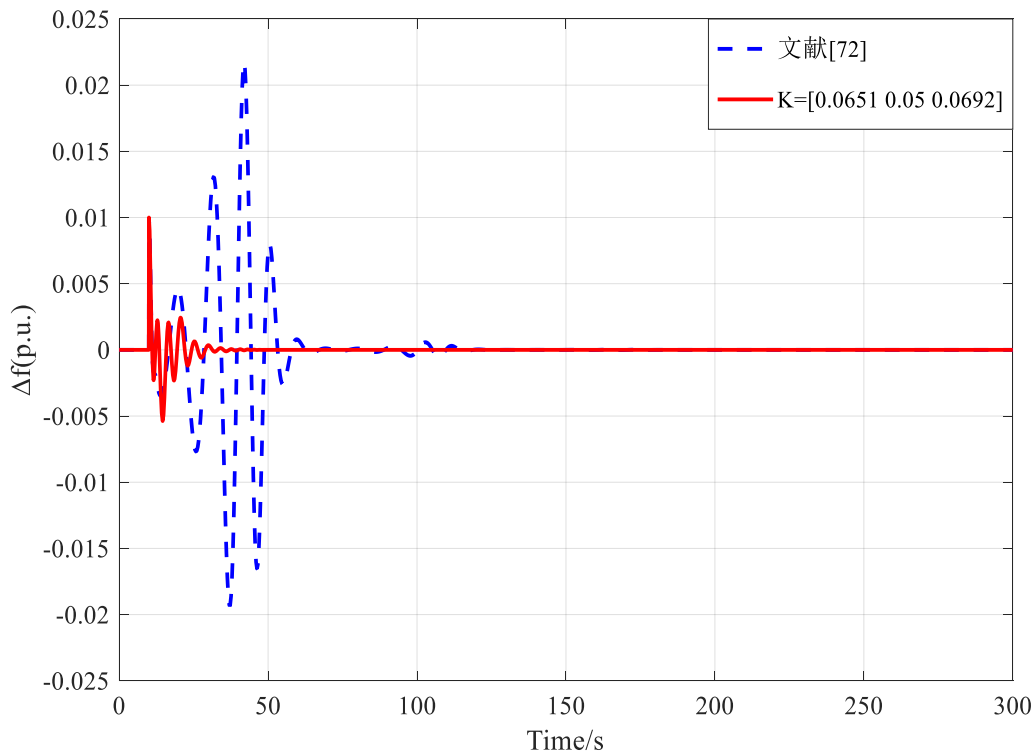


图 4-8 电力系统频率偏差曲线

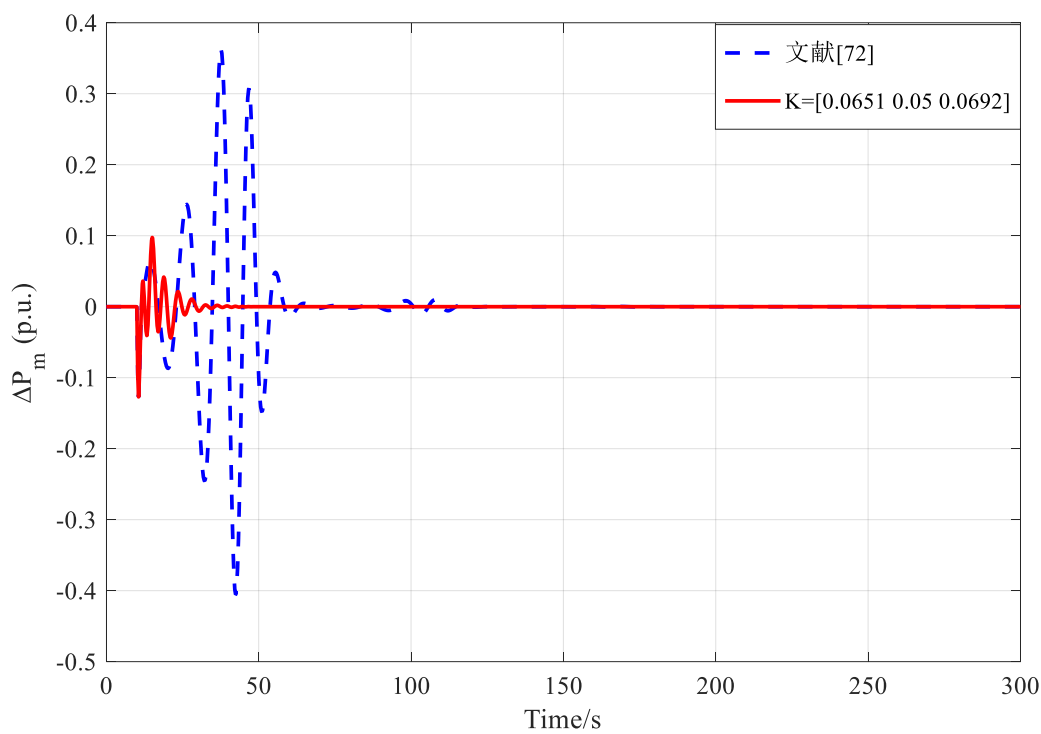


图 4-9 发动机机械功率增益曲线

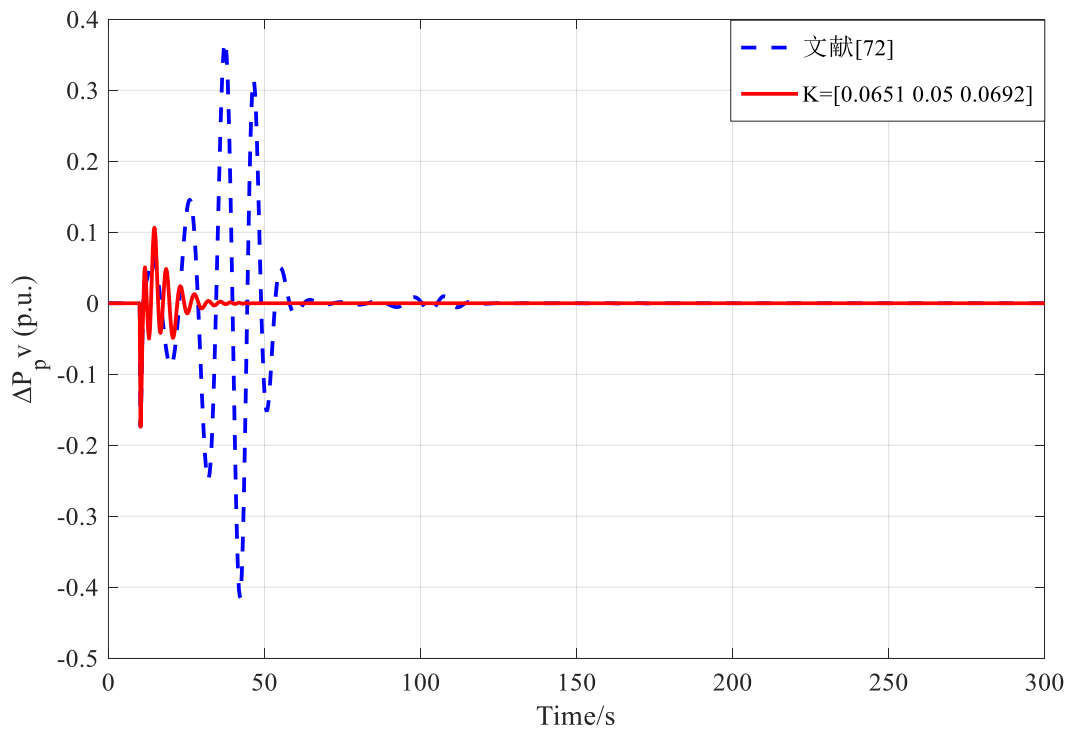


图 4-10 光伏功率输出响应曲线图

4.4 本章小结

本章针对控制器求解问题，基于第 2 章含光伏发电的单区域 LFC 控制数学模型和第 3 章含光伏发电的单区域 LFC 时滞相关稳定性分析，引入范围搜索因子和缩放因子寻优控制器增益，提出基于高斯分布的调节参数搜索算法。为验证所设计的控制器性能，考虑外部负荷波动的情况下，对控制器进行仿真分析，结果表明，经过基于高斯分布的调节参数搜索算法计算出的控制器与文献[72]的控制器相比，系统频率偏差收敛速度更快，控制效果更好。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

随着我国 2020 年在联合国大会上提出的“双碳”战略目标，同时我国也面临化石燃料能源枯竭的危机。为了社会和国家的可持续发展，也为了人类子孙后代的永续发展，我国将逐渐从传统火力发电转移至可再生能源方式发电，而以太阳能为代表的新能源得到了大力发展，但由于其技术还存在壁垒，目前完全取代火力发电还不现实，所以我国现在形成了以火力发电为主，新能源发电为辅的互联电力系统。新能源发电确实可以减少污染气体的排放，起到保护环境的作用，但是自身的不稳定和高渗透率会干扰电力系统的稳定运行，影响电能输送质量，使系统调整频率能力减弱。

同时随着科学技术的发展，互联网还未普及，传统的电力系统由局部信息进行监控，而基于网络的负荷频率控制(LFC)需要现场到控制中心、控制中心到现场的数据传输，开放通信网络造成的通信延迟使网络延迟具有时变性质，这种时变延迟可能会降低 LFC 系统的动态性能或不稳定性。因此，如何研究考虑时滞的含光伏发电的负荷频率控制系统的稳定性以及提高电能质量和维持系统频率在标准范围内有重要的现实意义。

本文首先介绍了以光伏发电为主的新能源并入传统电网中，考虑通信延迟对系统的影响，构建含光伏发电的单区域负荷频率控制系统，利用状态空间方程建立数学模型，结合 Lyapunov 控制理论对时滞系统进行稳定性分析，求解系统的最大时滞稳定裕度，并提出基于高斯分布的调节参数搜索算法对控制器增益进行寻优，进而获得优化的控制器参数，实现 LFC 的频率控制。主要研究内容如下：

(1) 针对光伏发电并入火力发电为主的传统电力系统，带来的调频困难问题。首先是建模分析，但实际的电力系统是一个高度非线性的复杂系统，并且带有通讯延迟，对其准确地建模分析几乎是不可能的。要根据不同的控制需求和目标建立模型，同时还要考虑外部负荷扰动的作用，所以第二章给出调速器模型、原动机模型、发电机-负荷系统模型、光伏发电模型以及传输时滞模型为后续的稳定性分析和控制器设计做准备。

(2) 针对单区域负荷频率控制系统的稳定性分析, 首先构建 Lyapunov 泛函, 对其求导, 提出一种基于广义自由权积分不等式的时滞鲁棒稳定分析方法, 相比于传统方法具有更低的保守性, 利用推导出的定理计算系统时滞上界, 讨论在定常时滞和时变时滞两种情况下的 PID 控制器增益和时滞上界之间的变化关系。

(3) 针对 PID 型鲁棒控制器的设计问题, 考虑到在第三章的时滞稳定性分析时, 在构建 Lyapunov 函数和求导时, 在积分项中引入了新的自由矩阵变量, 无法使用传统的锥补迭代算法求解反馈控制器。为解决时滞新型电力系统鲁棒控制器这一难题, 本文采用基于高斯分布的调节参数搜索算法进行控制器增益矩阵的寻优, 该算法引入范围搜索因子和缩放因子, 来增加算法的收敛性和稳定性, 获取较为优化的控制器增益用于电力系统进行负荷频率控制。最后进行实验对比分析说明了设计控制器的性能良好。

5.2 展望

尽管负荷频率研究和时滞系统理论已经经过了几十年的发展, 并且硕果累累, 但是随着时代发展和变化, 新能源发电已成必然趋势, 传统电力系统结构必然改变。本文虽然针对含光伏发电的新型时滞电力系统的稳定性分析和控制器设计取得了一些成果, 但是研究还不够深入, 依旧存在如下不足:

(1) 对于新能源高比例并入电网, 本文只考虑了光伏发电, 下一步可以考虑其他种类的新能源并入电网进行研究。

(2) 实际的电力系统是一个复杂多变的系统, 通讯时滞也是变化的, 但是仿真中考虑的时变延迟近似假设为正弦和线性, 这会导致理论值与仿真值之间存在差异, 应用到实际工程背景上还有很大的挑战。

(3) 提出的基于高斯分布的调节参数搜索算法中随机搜索具有高斯分布特性, 如果调节参数具有其他随机特性, 搜索算法的寻优效果, 收敛速率是否会有所改进? 仍然存在很大的可能性, 具有很大的改进空间, 比如在收敛性能和搜索精度等方面, 可以更加深入改进控制器增益, 优化参数, 达到更好的控制效果。

参考文献

- [1] 郑亚先,杨争林,冯树海,等.碳达峰目标场景下全国统一电力市场关键问题分析[J].电网技术,2022,46(01):1-20.
- [2] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(09):3117-3126.
- [3] 蒋媛杰.新能源发电并网对电网电能质量的影响分析[J].电子技术,2023,52(12):92-93.
- [4] 雒德宏.我国新能源发电技术发展面临的瓶颈及对策[J].中国资源综合利用,2023,41(03):188-190.
- [5] 陈俊.新能源发电技术在电力系统中的应用[J].光源与照明,2023,13(9):231-233.
- [6] 钱伟,孙晓彤,费树岷.可再生能源高渗透下时滞孤岛微电网的负荷频率控制[J].电网技术,2024,48(02):630-640.
- [7] Wang Q, Li M, Luo P, et al. Analysis on the coupling characteristics of frequency stability and voltage stability in weak connected power grid with high ratio of clean energy[J]. Energy Reports, 2022, 8(1): 1432-1437.
- [8] Liu X, Qiao S, Liu Z. A survey on load frequency control of multi-area power systems: Recent challenges and Strategies[J]. Energies, 2023, 16(5): 22-42.
- [9] Yang S, Huang C, Yu Y, et al. Load frequency control of interconnected power system via multi-agent system method[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(8): 839-851.
- [10] Rouhani S H, Mojallali H, Baghrmian A. Load frequency control in the presence of simultaneous cyber-attack and participation of demand response program[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(10): 1993-2011.
- [11] Shi G, Qian Y. Application of Vessel Solar Photovoltaic Power Generation System[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 106(4): 510-513.
- [12] Yap K Y, Sarimuthu C R, Lim J M Y. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: A review[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6): 1043-1059.
- [13] Golla M, Thangavel S, Simon S P, et al. A novel control scheme using UAPF in an integrated PV grid-tied system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 38(1): 133-145.
- [14] Peng. C, Zhang. J. Delay-distribution-dependent load frequency control of power system with probabilistic interval delays [J]. IEEE Transactions on Power System, 2016, 31(4): 3309-3317.
- [15] Wen. S, Yu. X, Zeng. Z, et al. Event-triggering load frequency control for multi-area power systems with communication delays [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 3(2): 1308-1317.

- [16] Sonmez S, Ayasun S, Nwankpa C.O. An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays [J]. IEEE Transactions on Power System, 2016, 31(1):370–377.
- [17] M. Liu, L. Yang, D. Wang, et al. The stability of AGC systems with commensurate delays. European Transactions on Electrical Power, 2007, 17(6): 615–27.
- [18] 肖伸平,张天,唐军,等.基于 PI 控制的时滞电力系统稳定性分析[J].电网技术,2020,44(10):3949-3954.
- [19] 符杨,丁枳尹,米阳.计及储能调节的时滞互联电力系统频率控制[J].上海交通大学学报,2022,56(09):1128-1138.
- [20] Sönmez Ş, Ayasun S. Gain and phase margins based delay-dependent stability analysis of two-area LFC system with communication delays[C]//2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, Bursa, Turkey, 27-28 April, 2017:1409-1413.
- [21] Mary T J, Rangarajan P. Delay-dependent stability analysis of microgrid with constant and time-varying communication delays[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(13): 1441-1452.
- [22] Hu W, Zhu Q, Karimi H R. Some improved Razumikhin stability criteria for impulsive stochastic delay differential systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(12): 5207-5213.
- [23] 李婷.基于广域测量技术的时滞电力系统稳定性分析与控制设计[D].中南大学,2013.
- [24] He Y, Wang Q G, Lin C, et al. Augmented Lyapunov functional and delay-dependent stability criteria for neutral systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal, 2005, 15(18): 923-933.
- [25] Gholami H, Binazadeh T. Observer-based H_∞ finite-time controller for time-delay nonlinear one-sided Lipschitz systems with exogenous disturbances. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(4): 806-819.
- [26] R. Nie, S.P. He, X.L. Luan. Finite-time stabilisation for a class of time delayed Markovian jumping systems with conic non-linearities. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(9): 1279-1283.
- [27] Shang-Guan X C, He Y, Zhang C, et al. Sampled-data based discrete and fast load frequency control for power systems with wind power[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114202.
- [28] L.F.R. Jerónimo, J.Z. Torres, B. Saldivar, J. Dávila, J.C.Á. Vilchis. Robust stabilisation of linear time-invariant time-delay systems via first order and supertwisting sliding mode controllers. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(1): 175-186.
- [29] Z. Lian, He. Y, Wu. M. Stability and stabilization for delayed fuzzy systems via

- reciprocally convex matrix inequality. *Fuzzy Sets and Systems*, 2021, 402(1): 124-141.
- [30] 翟正亮.时滞电力系统稳定性分析及负荷频率控制[D].湖南工业大学,2020.
- [31] Fridman E, Shaked U. A descriptor system approach to H_∞ /control of linear time-delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(2): 253-270.
- [32] Park P G. A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic control*, 1999, 44(4): 876-877.
- [33] Moon Y S, Park P, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems[J]. *International Journal of control*, 2001, 74(14): 1447-1455.
- [34] Gu K, Niculescu S I. Survey on recent results in the stability and control of time-delay systems[J]. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 2003, 125(2):158-165.
- [35] Seuret A, Gouaisbaut F. Wirtinger-based integral inequality: Application to time-delay systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(9):2860-2866.
- [36] Park P G, Lee W, Lee S Y. Auxiliary function-based integral inequalities for quadratic functions and their applications to time-delay systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(4): 1378-1396.
- [37] Zhang C K, He Y, Jiang L, et al. An extended reciprocally convex matrix inequality for stability analysis of systems with time-varying delay[J]. *Automatica*, 2017, 85: 481-485.
- [38] Seuret A, Gouaisbaut F. Hierarchy of LMI conditions for the stability analysis of time-delay systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2015, 81(2): 1-7.
- [39] Zhang C K, He Y, Jiang L, et al. Delay-dependent stability analysis of neural networks with time-varying delay: A generalized free-weighting-matrix approach[J]. *Applied mathematics and computation*, 2017, 294: 102-120.
- [40] Zhang X M, Han Q L, Ge X. Novel stability criteria for linear time-delay systems using Lyapunov-Krasovskii functionals with a cubic polynomial on time-varying delay[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 8(1): 77-85.
- [41] Liu K, Seuret A, Xia Y. Stability analysis of systems with time-varying delays via the second-order Bessel–Legendre inequality[J]. *Automatica*, 2017, 76(1): 138-142.
- [42] Lee W I, Lee S Y, Park P G. Affine Bessel–Legendre inequality: Application to stability analysis for systems with time-varying delays[J]. *Automatica*, 2018, 93(2): 535-539.
- [43] Guo W, Liu F, Zou R, et al. H_∞ Load frequency control of power systems with multiple time-varying delays via improved reciprocally convex inequality[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2023, 360(12): 7933-7957.
- [44] Sasaki T, Enomoto K, Dynamic analysis of generation control performance

- standards [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 806-81.
- [45] Bevrani H. Robust Power System Frequency Control [M]. New York, NY, USA: Springer, 2009.
- [46] 虞忠明, 朱伟. 含风力发电机的时滞电力系统稳定性研究 [J]. 控制工程, 2018, 25(10): 1871-1875.
- [47] Shang-Guan X, He Y, Zhang C, et al. Sampled-data based discrete and fast load frequency control for power systems with wind power [J]. Applied Energy, 2020, 259: 114202.
- [48] Hua C, Wang Y. Delay-dependent stability for load frequency control system via linear operator inequality [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2020, 52(7): 6984-6992.
- [49] Sari A, Sönmez Ş, Ayasun S, et al. Delay-Dependent Stability Analysis of Multi Area LFC-EVs System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022.
- [50] Zeng H B, Zhou S J, Zhang X M, et al. Delay-dependent stability analysis of load frequency control systems with electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(12): 13645-13653.
- [51] Shen C, Li Y, Zhu X, et al. Improved stability criteria for linear systems with two additive time-varying delays via a novel Lyapunov functional [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2020, 363: 312-324.
- [52] Zhao N, Gorbachev S, Yue D, et al. The effect of communication delays on the frequency stability of power systems integrated with inverter air conditioners [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 32: 100920.
- [53] Arunagirinathan S, Muthukumar P, Yu S S, et al. A novel observer-based approach to delay-dependent LFC of power systems with actuator faults and uncertain communications conditions [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 106957.
- [54] 王政豪, 刘永慧, 苏庆堂. 基于滑模控制的多区域 V2G 系统的负荷频率控制 [J]. 控制工程, 2022, 29 (11): 1981-1988.
- [55] 孔莲芳, 罗天祥, 吴捷. 基于状态收缩约束的模型预测负荷频率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 18-22.
- [56] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (17): 101-109.
- [57] 李谟发, 张志文, 练红海, 等. 含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(02): 77-88.
- [58] 符家骥. 基于改进差分进化算法的两区域互联电力系统负荷频率控制 [D]. 安徽工程大学, 2023.
- [59] 熊林云, 王杰. 三区延迟电力系统鲁棒负荷频率控制研究 [J]. 电网技术, 2018, 42(03): 894-902.

- [60] Yang F, He J, Wang D. New stability criteria of delayed load frequency control systems via infinite-series-based inequality[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(1): 231-240.
- [61] Lin C, Hu B, Shao C, et al. Delay-dependent optimal load frequency control for sampling systems with demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4310-4324.
- [62] 鲁志远,刘世林,范保程,等.含广域混合储能互联电力系统的负荷频率控制[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(06):96-104.
- [63] Zhang Z, Liu Y, Zhou Y, et al. Frequency regulation scheme in power system using an observer-based waiting event-triggered control with random features[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(18): 14567-14583.
- [64] 金丽.大规模时滞电力系统负荷频率控制的稳定性分析与鲁棒性设计[D].中国地质大学,2021.
- [65] Shang-Guan X C, Zhang C K, He Y, et al. Robust load frequency control for power system considering transmission delay and sampling period[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(8): 5292-5303.
- [66] 周一辰,覃露,李永刚.基于多求和不等式输出反馈 Lyapunov 判据的时变时滞电力系统二次调频控制[J].电网技术,2021,45(08):3247-3258.
- [67] Revathi D, Mohan Kumar G. Analysis of LFC in PV-thermal-thermal interconnected power system using fuzzy gain scheduling[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(5): e12336.
- [68] 樊国东,刘世林,裴俊,等.光火储混合发电系统的负荷频率协调优化控制[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(12):134-143.
- [69] 张传科.时滞电力系统的小扰动稳定分析与负荷频率控制[D].中南大学, 2013.
- [70] Lee W I, Lee S Y, Park P G. Affine Bessel–Legendre inequality: Application to stability analysis for systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2018, 93: 535-539.
- [71] Zeng H B, Liu X G, Wang W. A generalized free-matrix-based integral inequality for stability analysis of time-varying delay systems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 354: 1-8.
- [72] 曾红兵,刘晓桂,肖会芹,等.基于 PID 负荷频率控制的电力系统时滞相关鲁棒稳定性分析[J].电测与仪表,2019,56(23):112-118.
- [73] 陈超.基于状态空间模型的快速预测控制算法研究[D].华东理工大学,2015.
- [74] Mohamed T H, Morel J, Bevrani H, et al. Model predictive based load frequency control design concerning wind turbines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 859-867.
- [75] 李谟发,张志文,练红海,等.基于采样 PI 的时滞电力系统负荷频率控制[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(12):156-166.

- [76]Lin Y, Zhuang G. Asynchronous H_∞ dynamic output feedback control for Markovian jump neural networks with time-varying delays[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20(3): 909-923.
- [77]曹飞,钱晶,曾云,等.基于 SSA 的微电网负荷频率鲁棒 H_2/H_∞ 控制研究[J].电机与控制应用,2023,50(06):71-77.
- [78]Ferrante A, Ntogramatzidis L. The generalised discrete algebraic Riccati equation in linear-quadratic optimal control[J]. Automatica, 2013, 49(2): 471-478.
- [79]Pinheiro R F, Colón D. On the μ -analysis and synthesis for uncertain time-delay systems with Padé approximations[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(4):1-22.
- [80]黄磊.基于 LMI 的时滞系统的分布式 H_∞ 负荷频率控制[J].电气自动化,2023,45(05):20-26.
- [81]Lara M, Garrido J, van Wingerden J W, et al. Optimization with genetic algorithms of individual pitch control design with and without azimuth offset for wind turbines in the full load region[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 342-347.
- [82]Zheng Y, Huang Z, Tao J, et al. A novel chaotic fractional-order beetle swarm optimization algorithm and its application for load-frequency active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 69(3): 1267-1271.
- [83]Guha D, Roy P K, Banerjee S. Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization[J]. Swarm and Evolutionary computation, 2016, 27(2): 97-115.
- [84]Wu Z, Li P Z, Liu Y, et al. Optimized cascaded PI controller for the load frequency regulation of multi-area power systems with communication delays[J]. Energy Reports, 2022, 8(13): 469-477.
- [85]Biswas S, Roy P K, Chatterjee K. Development of MADB of P-I controller using LMI technique in a renewable energy based AGC system and study its application in a deregulated environment including energy storage device[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2023, 44(2): 426-451.
- [86]Wang W, Zeng H B .A Looped Functional Method to Design State Feedback Controllers for Lurie Networked Control Systems[J].自动化学报:英文版, 2023, 10(4):1093-1095.

攻读学位期间取得的学术成果

- [1] **Penxian Zhang**, Zhang Yan, Liu Rui. Stability Analysis of Time-varying Delay Systems Based on Generalized Free Weight Integral Inequality[C]//The 38th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC2023), Hefei, China, 27-29 August, 2023. **(EI: 20240815614590)**

致谢

回首三年研究生生涯，时光匆匆流逝，我已走完学生时代的所有路程，一路的辛酸苦辣、痛苦迷茫、开心喜悦像放电影一样在我脑海中一幕幕回响。研一刚开学时的激动还历历在目，转眼间我就已经研究生毕业，即将踏上社会，奔赴新征程。

在这座红墙白瓦，绿色青葱的美丽校园里，度过了人生最美好的三年时光，校园里可爱的大胖橘猫、小松鼠、温柔的宿管阿姨都使我念念不忘。在整个研究生三年生涯里，我最感谢的是我的导师张艳老师，很幸运能够遇到这样一位和蔼无私、严谨负责的老师。在我迷茫和痛苦时，给予我受益匪浅的指导，安慰我，给我提出宝贵的人生意见，她就像朋友一样温暖我。其次，感谢我的同门严回回，一起在实验室互相聊天的日子真的很开心，感谢师妹马文静和周园，她们在学习和生活上给我提供了很多帮助。还要感谢我的男朋友刘瑞，本科四年，研究生三年，我们一起携手走过了七年的同窗生涯，是彼此最亲密的朋友和战友。

我要感谢我的父母，是他们无私奉献的爱，才有了今天的我，在我遇到困难时，总是在身后默默支持我，没有他们，我也不可能走到现在。最后，我想感谢自己，谢谢自己没有放弃，谢谢曾经坚持的自己。希望我的同学们都能有一个美好的未来，希望帮助过我的人都能工作顺利，幸福美满！

张佩娴

2024 年于安徽工程大学

尚德敏学 唯实惟新

