

学校代码: 10286

分 类 号: TM732

密 级: 公开

U D C: 621.3

学 号: 162273



工程硕士学位论文

含微电网的配电网

多级鲁棒控制方法研究

研究生姓名: 葛浦东

导师姓名: 窦晓波

校外导师: 汪梦余

申请学位类别 工程硕士 学位授予单位 东南大学

工程领域名称 电气工程 论文答辩日期 2019年5月26日

研究方向 配电网鲁棒控制 学位授予日期 20 年 月 日

答辩委员会主席 高丙团 评 阅 人 高丙团

郝雨辰

2019年6月

東南大學

工程硕士学位论文

含微电网的配电网多级鲁棒控制方法研究

专业名称: 电气工程

研究生姓名: 葛浦东

导师姓名: 窦晓波

校外导师: 汪梦余

RESEARCH ON MULTI-LEVEL ROBUST CONTROL METHOD FOR DISTRIBUTION NETWORK WITH MICROGRIDS

A Thesis Submitted to
Southeast University
For the Professional Degree of Master of
Engineering
BY
GE Pu-dong

Supervised by
Prof. DOU Xiao-bo

School of Electrical Engineering
Southeast University
June 2019

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: 高浦东 日期: 2019.6.14

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司、万方数据电子出版社、北京万方数据股份有限公司有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括以电子信息形式刊登）论文的全部内容或中、英文摘要等内容。论文的公布（包括以电子信息形式刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: 高浦东 导师签名: 黎加群 日期: 2019.6.14

摘要

随着分布式发电单元越来越多的接入电网，有源配电网作为区域电网最主要的组成形式，其可靠、高效运行直接影响着电网运行的安全性和经济性。虽然分布式电源（Distributed Generation, DG）的接入使得电网的运行特性愈加复杂，如功率的波动特性，接入点的分散性等，但是大量电力电子装置的应用丰富了电网的控制手段，提升了电网运行的灵活性。

在此背景下，有机整合先进信息通信手段、电力电子设备及智能控制方法，构建区域电网智能化控制系统，为实现分布式可再生能源高渗透并网与高效利用提供了一种有效解决方案，对支撑低碳经济发展具有重要战略意义。不确定性强是有源配电网和智能电网的重要特征，构建具有高鲁棒性的配电网电网智能控制系统必将成建设坚强智能电网路上的重要发展方向。

本文针对配电网中 DG 接入的多样性，从微电网分布式控制和有源配电网集中式控制两个层次深入研究，主要研究成果如下：

1、针对微电网中 DG 大信号模型非线性问题，基于 Lie 导数对该大信号模型进行状态反馈线性化处理；然后，针对由模型参数不确定性和测量噪声带来的线性化模型误差，设计面向微电网控制的 DG 扩张状态观测器，在降低误差给控制系统带来影响的同时简化了测量系统的部署；最后，分析了该观测模型的有效性。

2、基于无向图理论构建微电网分布式控制的稀疏通信网络，并在此基础上，以提升电压控制收敛性为目标基于快速终端滑模（Fast Terminal Sliding Mode, FTSM）模型构建微电网分布式电压鲁棒控制模型，并利用改进 Super-Twisting（Adaptive Super-Twisting, AST）模型求解电压鲁棒控制 FTSM 模型，在简化参数选取的同时，进一步改善电压控制系统的收敛特性；然后，考虑 DG 有功出力的分配，设计微电网分布式频率控制保证频率稳定；最后，通过多组算例验证所提方法的有效性、鲁棒性和可扩展性。

3、针对分布式光伏出力和负荷的不确定性，基于无功电压灵敏度和多胞型模型建立有源配电网无功电压控制模型；同时，采用 H_∞ 鲁棒性能来约束无功电压控制系统求解最优鲁棒控制律，解决有源配电网的电压越限问题；然后，针对系统级控制存在的不确定时滞，基于自适应三次指数平滑算法补偿模通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性；最后，通过算例仿真分析验证了有源配电网电压鲁棒控制方法的有效性和适用性。

关键词：有源配电网，微电网，反馈线性化，扩张状态观测器，分布式控制， H_∞ 鲁棒控制

Abstract

With an increasing number of distributed generations (DGs) connecting to power systems, active distribution network has become a significant type of regional power grids, and its reliability and efficiency exerts direct influences on the security and economy of power grids. Although DGs integrated into grids have made the operation of power systems more complicated, such as the fluctuation of power flow and the dispersion of connection points, many power electronic devices make control tools diversified, enhancing the flexibility of grids operation.

In this context, rationally integrating advanced communication tools, power electronic devices and intelligent control methods to build smart control systems in regional power grids can provide an effective scheme of efficient utilization of DGs, which is meaningful to support low-carbon economic development. Active distribution network features high-level uncertainty, so establishing intelligent control systems with strong robustness in active distribution networks is a vital way to construct strong smart grid.

This thesis conducts research from two aspects, namely microgrid distributed control and active distribution network centralized control in regional power grids with various DGs, main research results show as follows:

1. In the second section, to address the nonlinearization of DG models in microgrid, state feedback linearization is applied based on Lie derivative. Then, an extended state observer is designed to reduce the negative effects caused by model uncertainty and measurement noise, which also simplifies the implementation of measurement devices. The effectiveness of this observer system is verified at the end.

2. In the third section, the sparse communication network is built based on undirected graph, and microgrid distributed voltage robust control model is established based on fast terminal sliding mode (FTSM) model to improve the convergence rate. Then, the FTSM model of voltage control solved by adaptive super-twisting (AST) model enhances the convergence rate also and simplifies the selection of control algorithm. Moreover, the distributed frequency control is designed considering active power sharing. In the end, several cases are designed to demonstrate the effectiveness, robustness and scalability of proposed control method.

3. In the fourth section, based on sensitivity method and multicellular model, a reactive-voltage control model in active distribution network is established to address the uncertainty of DGs and loads. Then, overvoltage problem is solved by optimal robust control law based on H_∞ robust performance, and the adaptive cubic exponential smoothing algorithm compensates for the uncertain dealy of system-level control caused by mode communication delay and closed-loop control. Simulation cases are designed to illustrate the validity and applicability of proposed voltage robust control in the active distribution network.

Keywords: active distribution network, microgrid, feedback linearization, extended state observer, distributed control, H_∞ robust control

目 录

| | |
|---|-----|
| 摘要 | I |
| ABSTRACT | III |
| 目录 | V |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究的背景及意义 | 1 |
| 1.2 含微电网的配电网结构 | 1 |
| 1.3 国内外研究现状 | 2 |
| 1.3.1 微电网控制问题研究现状 | 2 |
| 1.3.2 配电网控制问题研究现状 | 3 |
| 1.4 本文的主要工作 | 4 |
| 第二章 分布式电源建模与模型线性化方法研究 | 7 |
| 2.1 引言 | 7 |
| 2.2 基于 Lie 导数的分布式电源模型线性化方法 | 7 |
| 2.2.1 逆变器的大信号动态模型 | 7 |
| 2.2.2 基于 Lie 导数的分布式电源模型状态反馈线性化 | 10 |
| 2.3 基于扩张状态观测器的分布式电源状态观测器设计方法 | 12 |
| 2.3.1 非线性模型的扩张状态观测器设计 | 12 |
| 2.3.2 分布式电源模型的动态补偿线性化 | 14 |
| 2.4 算例分析 | 15 |
| 2.4.1 仿真系统 | 15 |
| 2.4.2 仿真结果分析 | 16 |
| 2.5 本章小结 | 17 |
| 第三章 微电网分布式鲁棒控制方法研究 | 19 |
| 3.1 引言 | 19 |
| 3.2 基于图论的微电网分布式控制系统 | 19 |
| 3.3 基于 FTSM 和 AST 的孤岛微电网分布式鲁棒电压控制 | 20 |
| 3.3.1 基于 FTSM 的微电网分布式鲁棒控制器设计 | 20 |
| 3.3.2 基于 AST 的微电网分布式鲁棒电压控制律求解方法 | 21 |
| 3.3.3 考虑有功出力分配的微电网分布式鲁棒频率控制 | 23 |
| 3.4 微电网分布式鲁棒控制算法的实现 | 24 |
| 3.5 算例分析 | 25 |
| 3.5.1 小型微电网仿真系统 | 25 |
| 3.5.2 中等规模微电网仿真系统 | 32 |
| 3.6 本章小结 | 33 |

| | |
|--|----|
| 第四章 有源配电网无功电压鲁棒控制研究 | 35 |
| 4.1 引言 | 35 |
| 4.2 计及不确定时滞的配电网鲁棒电压控制系统 | 35 |
| 4.3 有源配电网无功电压鲁棒控制器 | 36 |
| 4.3.1 计及不确定性的无功电压鲁棒控制多胞型模型 | 37 |
| 4.3.2 基于 H_∞ 性能约束的无功电压鲁棒控制律求解 | 38 |
| 4.4 基于自适应三次指数平滑法的不确定时滞补偿方法 | 39 |
| 4.4.1 基于三次指数平滑法的电压预测模型 | 40 |
| 4.4.2 模型平滑参数的自适应选取方法 | 40 |
| 4.5 算例分析 | 41 |
| 4.5.1 仿真系统 | 41 |
| 4.5.2 仿真结果分析 | 42 |
| 4.6 本章小结 | 47 |
| 第五章 总结与展望 | 49 |
| 5.1 总结 | 49 |
| 5.2 展望 | 49 |
| 致 谢 | 51 |
| 参考文献 | 53 |
| 附 录 A 改进 IEEE37 节点数据 | 57 |
| 附 录 B PG&E69 节点数据 | 58 |
| 作者简介 | 59 |

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

能源是经济社会发展的核心动力，而电能作为最重要的能源形式，在国家社会发展中有着不可替代的作用。世界范围内的电力系统必须满足不断增长的电力需求，提供更稳定的电力供应。根据国际能源署发布的《2013年世界能源展望》^[1]，目前化石燃料在发电中仍然占主导地位，由此带来的二氧化碳排放和全球变暖问题日益明显。为了应对这一趋势，可持续电力能源系统逐渐发展起来。只有可再生能源如光伏系统，风能发电机，生物质能，热电联产系统等的大规模应用才能使得最小化温室气体的排放成为可能^{[2]-[4]}。这些可再生能源通常以分散的方式接入电网^[3]。规模化分布式电源(Distributed Generation, DG)会对局域电网的安全稳定运行产生重大影响，主要体现在：

1) 电压质量的影响。分布式发电单元受天气等自然状况影响很大，发电功率会出现随机性的快速剧烈变化，间歇式 DG 规模化接入后波动的功率输出影响到电网功率平衡特性，进而造成电网母线电压大幅波动。

2) 功率特性的影响。高渗透 DG 接入配电网后影响传统配电网的负荷曲线，电力电量的实时平衡在多分布式发电单元的电网中变得非常复杂。极端工况甚至会发生频率急剧变化，触发安全稳定装置、继电保护装置动作等严重的安全运行问题。

总之，分布式发电单元规模化、分散化接入电网对整个电网安全可靠运行提出了巨大的挑战。基于对电网安全性、可靠性的需求，2003 年美国能源部在《Grid 2030》中首次提出并明确智能电网的概念^[5]。随后，为应对我国电网发展需要，国家电网公司在“2009 特高压输电技术国际会议”上提出了名为“坚强智能电网”的发展规划，标志着我国智能电网建设的正式展开。

电网的控制系统就好像电网的“大脑”，是坚强智能电网安全稳定运行的保障，所以坚强智能电网需要有一套完善的、可靠的控制系统，设计一套坚强智能电网的控制系统是我国在电网建设发展路上的必经之路。建设电网的智能控制系统，不仅可以优化电网运行方式，提高电网运行效率，还可以保证优质可靠的电能供应，保障现代社会产业的发展，进一步推动新能源革命，实现社会的可持续发展。配电网作为智能电网的重要组成部分，其安全、稳定、高效的运行对于电网智能化发展有着重大的意义，其控制系统的健壮性直接影响着智能电网的运行安全性和经济性，所以需要开展配电网鲁棒控制方法的研究。

1.2 含微电网的配电网结构

多种形式的 DG 接入电网后，含微电网的配电网的结构如图 1-1 所示。微电网由于运行的灵活性，已经成为解决 DG 规模化并网后消纳问题的重要方式，所以当今配电网

的组成形式通常包括微电网和有源配电网，其中微电网的运行较为灵活，可并网运行亦可孤岛运行。当微电网孤岛运行时，微电网所在区域自治控制；当微电网并网运行时，整个区域电网变成有源配电网。所以，研究配电网鲁棒控制系统的设计，可以认为是研究微电网孤岛自治鲁棒控制和有源配电网鲁棒控制这两个层级上鲁棒控制方法。

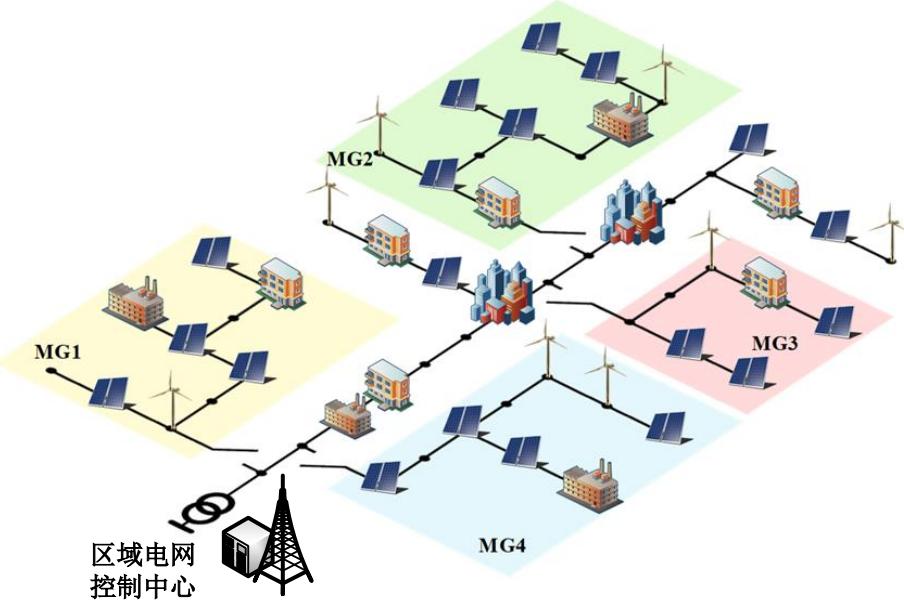


图 1-1 含微电网的配电网的结构

1.3 国内外研究现状

1.3.1 微电网控制问题研究现状

随着越来越多的 DG 接入电网，微电网已经成为发展新能源的重要方式^{[6]-[8]}。微电网能够运行在并网模式或者离网孤岛模式^[9]，当其孤岛运行时，由于控制算法直接影响整个系统的运行特性，控制系统的设计显得相当重要^{[8][10]}。

为了实现微电网电压和频率的稳定控制，一系列本地控制策略^{[10]-[12]}，如下垂控制被广泛应用，尽管这些本地控制策略通过下垂控制策略能够保证微电网的稳定运行，但是会导致电压和频率偏离参考值，因此文献^{[10][13][14]}中提出二次控制策略来保证微电网中 DG 的出口电压和系统频率能够保持跟踪参考值。传统的微电网二次控制策略为集中控制方式^{[15][16]}，在这样的集中控制架构下，控制中心需要收集每一个 DG 的信息，其鲁棒性和经济性较差，存在如下缺点：

- 1) 集中控制架构往往需要长距离传输信息，所以不可避免需要部署大量的测量装置和信息传输系统，成本较高；
- 2) DG 和控制中心的信息传输的单向性和集中式运算机制不可避免产生较大的通信延迟，对整个系统的控制性能产生影响；
- 3) 集中式控制架构导致系统会因为小故障产生控制的错误和失败，整个系统的稳定性和鲁棒性较差；

4) 集中式控制架构导致系统的即插即用功能较差。

集中式控制架构的缺点将对整个微电网系统的运行带来负面影响，为了解决上述局限性，基于稀疏通信的分布式控制架构^{[14][17]-[20]}已经被广泛应用在微电网电压和频率控制中。这样的分布式控制架构具有较好的可扩展性、灵活性和经济性。然而，现有的微电网分布式二次控制策略也存在一些缺点：

1) 文献[17][21]-[23]中所研究的分布式二次控制并未考虑 DG 的内环控制对整个控制系统的影响，虽然内环控制并不会对整个控制系统的稳态控制误差产生很大的负面影响，但是它会影响整个微电网控制系统的动态特性。

2) 文献[24]-[26]虽然基于整个微电网的精确模型进行控制其设计，但其控制方法设计过程中需要使用利用大量的电网状态信息，这会带来巨大的测量装置部署的花费。另外由于不可忽视的测量误差会带来测量系统的数据不精确，控制系统的鲁棒性和抗干扰性会降低；

3) 对于微电网来说，因为负荷的变化和 DG 的投切随机性较大，电压和频率控制的收敛速度是整个系统重要的运行指标。文献[14][17][18][22]中所提控制方法快速跟踪电压和频率的参考值，导致整个微电网运行时的电能质量较差。尽管一些有限时间二次控制策略^{[20][24][26]}已经被应用到微电网控制系统中，但是其收敛特性仍然可以通过一些被广泛应用于机器人和航空领域的有限时间一致性稳定控制算法^{[27]-[30]}来改进。

总之，尽管目前大量学者已经在微电网分布式控制领域展开了深入的研究，然而一方面，电力系统、通信系统和测量系统 3 者之间耦合性不断增强，测量数据的正确性对整个系统运行的影响日益显著，考虑电力数据在测量和传输过程中的不确定性设计微电网控制系统亦尤为关键；另一方面，微电网的电压和频率控制的收敛特性仍有改善的空间，例如有限时间稳定控制等先进控制方法可以被应用甚至改进应用到微电网控制系统中，提升微电网系统控制收敛速度，改善微电网运行的鲁棒性能；因此综合考虑上述微电网控制系统中的多源不确定性，设计微电网鲁棒控制器很有必要。

1.3.2 配电网控制问题研究现状

DG 出力具有较强的间歇性、波动性和不确定性，其高渗透、分散化接入配电网对配电网网损、电压、电能质量、稳定性等运行特性产生了巨大影响^{[31]-[33]}。针对 DG 高渗透接入配电网带来的一系列问题，国内外学者主要从稳态优化和动态控制两个方面来研究。

稳态优化的研究多基于最优理论，主要通过建立数学优化模型、利用优化算法进行求解等步骤得到可控设备功率等稳态控制指令，文献[34]-[38]以系统网损为优化目标，挖掘 DG 无功调节能力，并协调 DG 与 SVC、并联电容器等无功设备，基于混合整数规划模型进行求解，得到 DG 与无功设备的无功参考值，达到配电网安全经济运行的目的；文献[39]建立配电网无功优化随机潮流模型，侧重解决 DG 出力随机性带来的配电网安全运行问题。文献[40][41]将 DG 有功出力描述为区间数，从有功调度角度出发，最小化

运行费用来建立经济调度优化模型。随着 DG 高渗透率接入配电网，线路电阻和电抗数值接近，系统有功与无功耦合性较强，传统的基于有功无功解耦的分析决策也难以在配电网中直接应用^[42]。文献[43]-[45]在有源配电网三相有功无功耦合模型的基础上，以能量损耗、DG 利用率、DG 有功削减所产生的费用最小为目标，建立含储能、有载调压变压器等多可控设备的非凸非线性有功无功协调优化模型，并采用凸松弛理论进行求解。然而，稳态优化的控制时间尺度通常至少为分钟级，在配电网电力电子化日益严重的环境下，渐渐体现出其控制时效性差的问题。

然而随着有机整合先进信息通信、电力电子及智能控制等技术的发展，在配电网中进行动态反馈控制已经渐渐成为可能。动态控制最初应用在并网点电压就地控制^{[46]-[49]}，而系统级的有源配电网电压动态控制研究也是逐渐开展。

文献[50]按照“先最大程度地利用逆变器无功调节能力，后最小化地进行光伏有功剪切”的原则，通过分布式光伏有功/无功电压灵敏度矩阵设计电压控制策略；文献[51]充分利用光伏逆变器无功的双向调节能力和逆变器无功调节的智能性和灵活性，通过快速调节其无功出力来参与配电网电压控制。文献[52][53]提出基于模型预测控制的配电网电压集中控制策略来应对光伏高渗透配电网带来的不确定性问题，进行配电网电压控制，改善配电网电压质量；文献[54]充分考虑 DG 的不确定性，并计及网损进行无功电压优化控制；文献[55]-[57]针对负荷和分布式光伏波动、负荷量测等系统不确定参数给电压带来的不良影响，设计有源配电网鲁棒电压优化控制方法；文献[58]构建基于平衡 Gramian 的电力系统电压多步预测—滚动优化模型，及时响应系统动态变化，维持电压稳定。另外由于分布式光伏在空间上分布松散，有源配电网的电压控制策略在数据采集、指令传输、指令响应等环节都需要时间，而以上文献针对配电网的过电压问题控制方法均未考虑由此带来的控制不确定时滞问题，不利于控制系统的快速响应，控制滞后问题难以避免。针对电网控制系统存在的网络传输延迟问题，文献[59][60]将不确定性延迟转化为确定性延迟并考虑在控制器模型中，简化了控制模型和控制器设计；文献[61]则增加了网络延迟补偿器以补偿固定和随机通信网络通信延迟。

总之，一方面，现有的有源配电网稳态优化因为控制时间尺度大的缺点，很难解决 DG 这类出力波动性大的电源带来的配电网安全稳定运行，所以系统记得有源配电网动态反馈控制研究十分有必要；另一方面，由于 DG 给配电网带来的诸多不确定性，所以设计满足有源配电网运行鲁棒性能要求的控制方法很有意义；再者，由于实际工程存在光纤、电力线通信、无线等不同的通信传输条件，通信延迟的差异使得控制难度加大，这对控制系统设计和实现带来难题；因此综合考虑功率、参数、时滞等多方面不确定性，设计有源配电网鲁棒控制方法变得尤为重要。

1.4 本文的主要工作

相比于传统的配电网，含微电网的配电网运行特性复杂，虽然微电网能够解决 DG 大规模并网带来的控制难题，但是微电网并入配电网带来的功率不确定性同样会引起电

压波动，此时配电网控制系统需要解决电压安全问题；同时，微电网自治运行特性使得其控制系统与配电网控制系统相对独立，故需要设计微电网和配电网两级控制系统来实现含微电网的配电网运行的稳定性和安全性。相比于配电网，微电网自治运行时的频率稳定问题也不可忽略，故不同于配电网只考虑电压控制，微电网控制系统需要实现电压和频率的稳定。

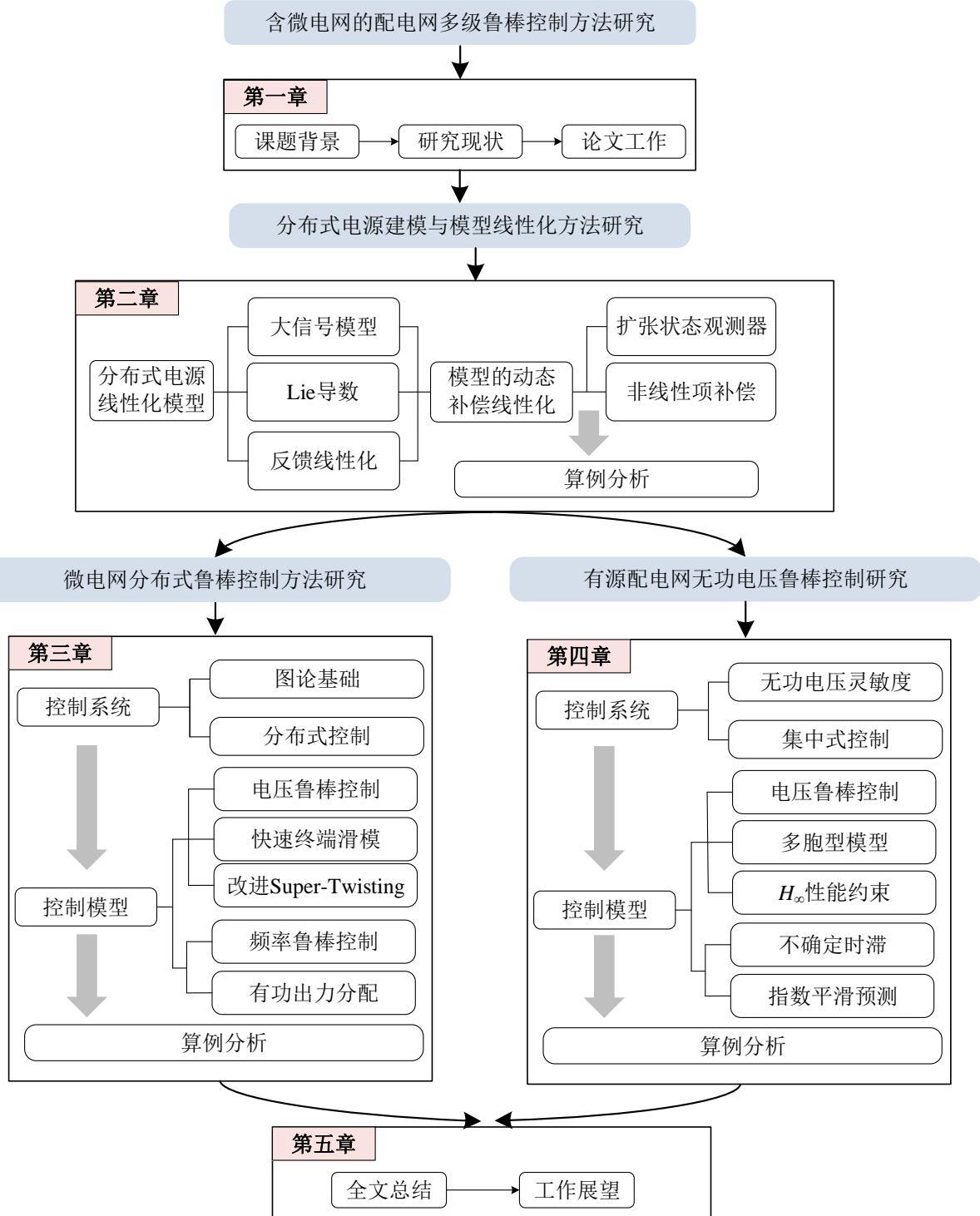


图 1-2 论文的技术路线图

综上所述，本论文以含微电网的配电网为研究对象，系统性研究了配电网鲁棒控制的关键技术，包括面向微电网分布式控制的 DG 建模方法，基于快速终端滑模（Fast

Terminal Sliding Mode, FTSM) 的微电网分布式鲁棒控制方法, 计及不确定时滞的有源配电网无功电压鲁棒控制方法, 开展了相关分析和验证工作。技术路线如图 1-2 所示。

全文内容共分为五章, 安排如下:

第一章为绪论, 介绍了本课题研究的背景和意义, 并从微电网控制和配电网控制两个方面阐述了相关的国内外研究现状, 分析了现有研究成果的特点与不足, 并在此基础上明确了本文的主要研究内容和全文架构。

第二章以建立 DG 模型, 设计 DG 鲁棒状态观测器为目的开展研究。首先建立了含功率控制环的 DG 大信号模型, 由于此模型的非线性会给控制器设计带来困难, 采用 Lie 导数对该大信号模型进行状态反馈线性化处理, 得到保留模型输入输出特性的线性模型; 然后, 考虑到模型参数不确定性和测量噪声会给简化线性模型带来误差, 易对整个控制系统的效果产生不良影响, 引入扩张状态来表征系统非线性项和不确定性的集合, 设计面向微电网控制的 DG 扩张状态观测器, 简化了测量系统的部署, 便于 DG 信息的精确获取; 最后, 在 Matlab/Simulink 中通过仿真算例验证所提建模和观测器设计方法的正确性和有效性。

第三章在第二章基础上以设计微电网分布式鲁棒电压和频率控制器为目标开展研究。首先介绍了无向图理论, 指出基于无向图理论的稀疏通信网络是解决 DG 接入电网后控制策略部署的重要手段; 其次, 不同于现有的电压控制方法, 采用快速终端滑模模型构建微电网分布式电压鲁棒控制模型, 保证了电压控制更快的收敛特性, 同时利用改进 Super-Twisting (Adaptive Super-Twisting, AST) 理论求解 FTSM 模型, 在简化参数选取的同时, 进一步改善了电压控制系统的收敛特性; 然后, 设计微电网分布式频率控制, 在保证微电网频率稳定的同时, 实现了 DG 有功出力的合理分配; 最后, 在 Matlab/Simulink 中通过多组仿真算例验证所提方法的有效性、鲁棒性和可扩展性。

第四章以解决高渗透分布式光伏接入配电网带来的局部过电压问题, 同时兼顾光伏出力、负荷和通信延迟的不确定性为目标开展研究。首先, 针对分布式光伏出力和负荷的波动特性, 建立基于多胞型模型的有源配电网功率特性模型; 其次, 应用离散系统 H_∞ 鲁棒控制原理设计有源配电网无功电压控制律, 实现对配电网中多个分布式光伏的功率控制, 来解决有源配电网的电压越限问题; 然后, 由于配电网系统级控制中不可避免的存在不确定时滞, 故采用基于自适应三次指数平滑算法的不确定时滞补偿模型来解决通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性问题。最后, 通过算例仿真分析验证了所提有源配电网电压鲁棒控制方法的有效性和适用性。

第五章总结了本文的主要研究成果, 分析了本文研究中存在的不足, 并对本课题的下一步研究工作进行了探讨与展望。

第二章 分布式电源建模与模型线性化方法研究

2.1 引言

DG 规模化接入电网后，其复杂的动态特性会对电网的安全运行产生影响，由于存在快、慢不同时间尺度的动态特性，所以需要深入分析其动态特性对系统级控制的影响，并合理简化其动态模型，这样既能简化系统级控制系统的工作过程，又能保证系统级控制系统和设备级控制系统兼容化运行。

所以，本章首先建立了含功率控制环的 DG 大信号模型，由于此模型的非线性会给控制器设计带来困难，所以，采用 Lie 导数对该大信号模型进行状态反馈线性化处理，得到保留模型输入输出特性的线性模型；然后，考虑到模型参数不确定性和测量噪声会给简化线性模型带来误差，易对整个控制系统的运行效果产生不良影响，故引入扩张状态来表征系统非线性项和不确定性的集合，设计面向微电网控制的 DG 扩张状态观测器，在简化了测量系统的部署的同时，便于 DG 信息的精确获取；最后，在 Matlab/Simulink 中通过仿真算例验证所提建模和观测器设计方法的正确性和有效性。

2.2 基于 Lie 导数的分布式电源模型线性化方法

2.2.1 逆变器的大信号动态模型

含多 DG 的微电网的结构如图 2-1 所示，每个 DG 通过逆变器接入微电网，逆变器的控制结构包含 3 个控制环节：功率控制环、电压控制环和电流控制环^{[9][62][63]}。为了实现微电网的稳定和 DG 之间的功率分配，此控制结构下，每个 DG 的控制环设计通常在其 $(d-q)_i$ 坐标系下设计（下标 i 表示第 i 个 DG，下同），且旋转角频率为 ω_i 。将任一 DG 的参照系作为具有旋转角频率的公共参照系 ω_{com} ， δ_i 表示 DG 与公共参照系的旋转角频率的偏差，满足

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{com} \quad (2.1)$$

功率控制环在为逆变器控制系统提供旋转角频率的参考值的基础上，同时为电压控制环提供参考值，而电压控制环和电流控制环保证逆变器出口处的电压稳定跟踪控制性能。目前下垂控制已经被广泛应用于功率控制环，精确表达出逆变器有功出力 P_i 和角频率 ω_i 、无功出力 Q_i 和电压幅值 $v_{o,magi}^*$ 的关系，当取 d 轴为基准时，它们的关系可以表述为

$$\omega_i = \omega_{ni} - m_{pi} P_i \quad (2.2)$$

$$v_{odi}^* = V_{ni} - n_{qi} Q_i \quad (2.3)$$

$$v_{oqi}^* = 0 \quad (2.4)$$

式中, v_{odi}^* 和 v_{oqi}^* 分别是电压幅值 $v_{o,magi}^*$ 的 d、q 轴分量; m_{Pi} 和 n_{Qi} 分别是频率和电压的下垂因子; P_i 和 Q_i 分别是有功和无功出力; ω_{ni} 和 V_{ni} 分别是逆变器控制系统的频率和电压参考值, 由上层控制得到。

功率分量 P_i 和 Q_i 可以通过低通滤波器获得:

$$P_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{odi} i_{odi} + v_{oqi} i_{oqi}) \quad (2.5)$$

$$Q_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{oqi} i_{odi} - v_{odi} i_{oqi}) \quad (2.6)$$

式中 $v_{odi}, v_{oqi}, i_{odi}, i_{oqi}$ 分别是逆变器输出电压 v_{oi} 和输出电流 i_{oi} 的 d、q 轴分量; ω_{ci} 表示低通滤波器的截止频率。

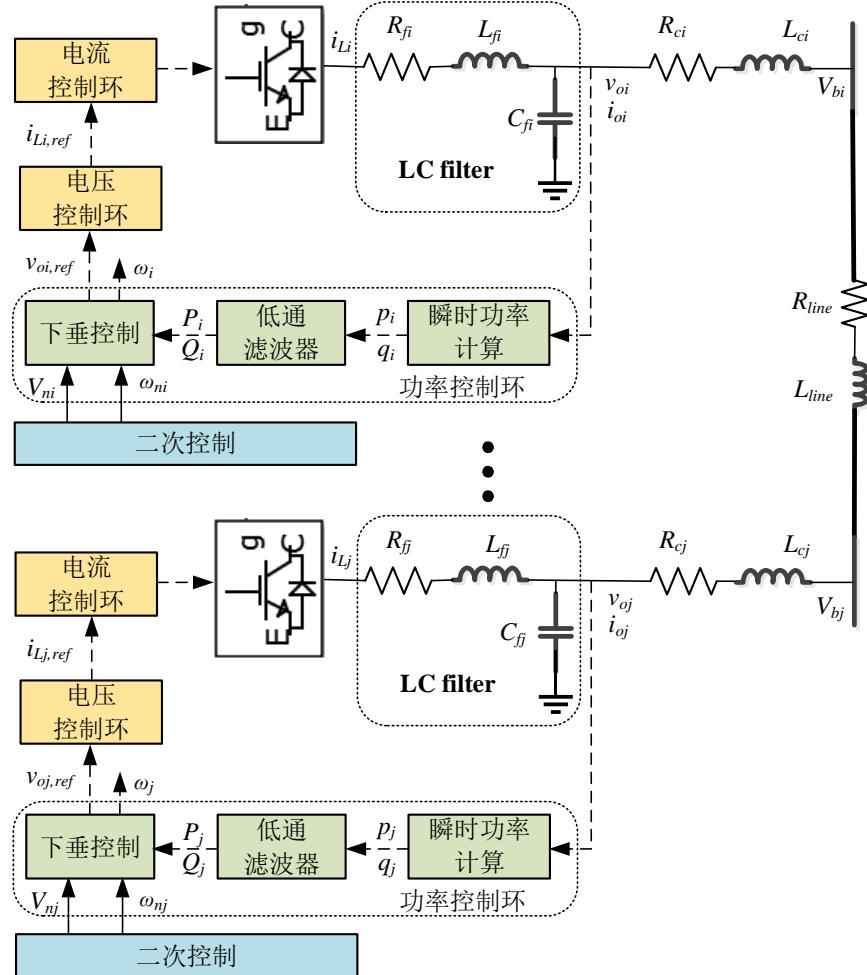


图 2-1 含多 DG 的微电网结构示意图

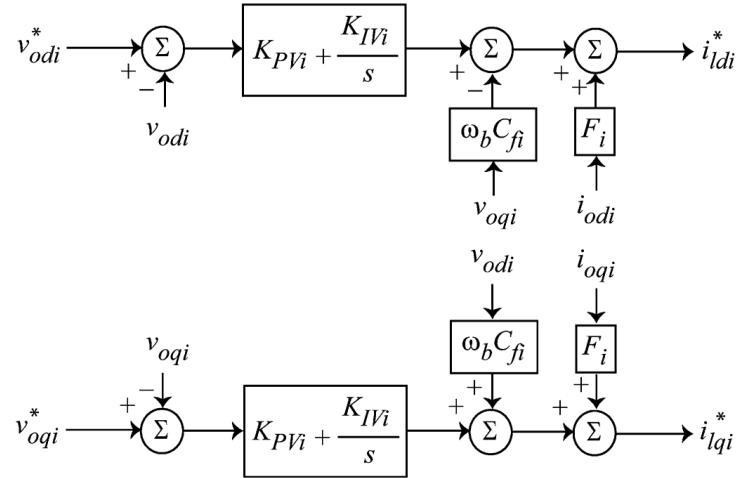


图 2-2 电压控制环的结构示意图

电压控制环的结构示意图如图 2-2 所示。其动态模型可表达为

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{di} = v_{odi}^* - v_{odi} \\ \dot{\phi}_{qi} = v_{oqi}^* - v_{oqi} \\ \dot{i}_{ldi}^* = F_i i_{odi} - \omega_b C_{fi} v_{oqi} + K_{PVi}(v_{odi}^* - v_{odi}) + K_{IVi}\phi_{di} \\ \dot{i}_{lqi}^* = F_i i_{oqi} + \omega_b C_{fi} v_{odi} + K_{PVi}(v_{oqi}^* - v_{oqi}) + K_{IVi}\phi_{qi} \end{cases} \quad (2.7)$$

式中, ϕ_{di} 和 ϕ_{qi} 表示图 2-2 中 PI 控制器的辅助状态量; ω_b 表示系统的额定角频率; 其他状态量如图 2-2 所示。

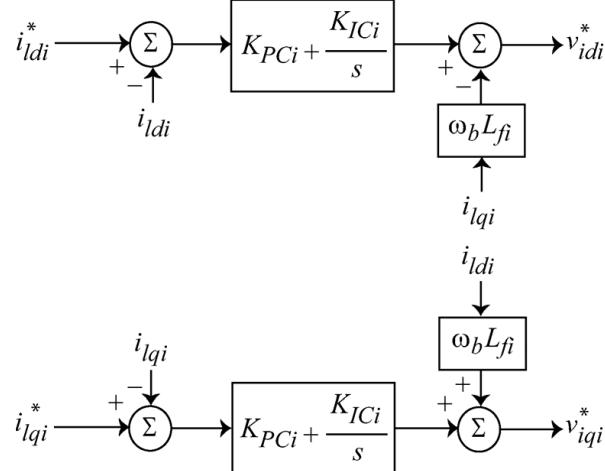


图 2-3 电流控制环的结构示意图

电流控制环的结构示意图如图 2-3 所示。其动态模型可表达为

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_{di} = i_{ldi}^* - i_{ldi} \\ \dot{\gamma}_{qi} = i_{lqi}^* - i_{lqi} \\ \dot{v}_{ldi}^* = -\omega_b L_{fi} i_{lqi} + K_{PCi}(i_{ldi}^* - i_{ldi}) + K_{ICi}\gamma_{di} \\ \dot{v}_{lqi}^* = \omega_b L_{fi} i_{ldi} + K_{PCi}(i_{lqi}^* - i_{lqi}) + K_{ICi}\gamma_{qi} \end{cases} \quad (2.8)$$

式中, γ_{di} 和 γ_{qi} 表示图 2-3 中 PI 控制器的辅助状态量; 其他状态量如图 2-3 所示。

图 2-1 中输出 LC 滤波器和输出阻抗的动态模型可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{ldi} = -\frac{R_{fi}}{L_{fi}} i_{ldi} + \omega_i i_{lqi} + \frac{1}{L_{fi}} v_{idi} - \frac{1}{L_{fi}} v_{odi} \\ \dot{i}_{lqi} = -\frac{R_{fi}}{L_{fi}} i_{lqi} - \omega_i i_{ldi} + \frac{1}{L_{fi}} v_{iqi} - \frac{1}{L_{fi}} v_{oqi} \\ \dot{v}_{odi} = \omega_i v_{oqi} + \frac{1}{C_{fi}} i_{ldi} - \frac{1}{C_{fi}} i_{odi} \\ \dot{v}_{oqi} = -\omega_i v_{odi} + \frac{1}{C_{fi}} i_{lqi} - \frac{1}{C_{fi}} i_{oqi} \\ \dot{i}_{odi} = -\frac{R_{ci}}{L_{ci}} i_{odi} + \omega_i i_{oqi} + \frac{1}{L_{ci}} v_{odi} - \frac{1}{L_{ci}} v_{bdi} \\ \dot{i}_{oqi} = -\frac{R_{ci}}{L_{ci}} i_{oqi} - \omega_i i_{odi} + \frac{1}{L_{ci}} v_{oqi} - \frac{1}{L_{ci}} v_{bqi} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

联立式(2.1)-式(2.9)可以得到第 i 个 DG 逆变器面向微电网分布式控制的大信号模型，该模型可表示为如下的多输入多输出（MIMO）非线性系统：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i)\mathbf{u}_i + \mathbf{k}_i(\mathbf{x}_i)\mathbf{D}_i \\ \mathbf{y}_i &= \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{d}_i \mathbf{u}_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

式中，状态变量为

$$\mathbf{x}_i = [\delta_i \ P_i \ Q_i \ \phi_{di} \ \phi_{qi} \ \gamma_{di} \ \gamma_{qi} \ i_{Ldi} \ i_{Lqi} \ v_{odi} \ v_{oqi} \ i_{odi} \ i_{oqi}]^T \quad (2.11)$$

其他变量为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i &= [\omega_{ni} \ V_{ni}]^T \\ \mathbf{D}_i &= [\omega_{com} \ v_{bdi} \ v_{bqi}]^T \\ \mathbf{y}_i &= [\omega_i \ v_{odi}]^T \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.2.2 基于 Lie 导数的分布式电源模型状态反馈线性化

式(2.10)精确刻画了整个逆变器的精确模型，该模型为双输入双输出模型，为了简化控制设计过程，在设计控制器时可以根据控制目标将模型转化为单输入单输出（SISO）模型，以输出电压为例得到

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i)\mathbf{u}_i + \mathbf{k}_i(\mathbf{x}_i)\mathbf{D}_i \\ &= \mathbf{F}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i)\mathbf{u}_i \\ y_i &= v_{odi} = h_i(\mathbf{x}_i) \end{aligned} \quad (2.13)$$

式中 $\mathbf{u}_i = V_{ni}$ 。

对于式(2.13)所示的非线性 SISO 系统，为了实现输入输出线性化以简化控制器设计，需要采用适当的坐标变换和响应的数学处理，使其状态或者输入输出响应实现精确线性化^[64]，最终转化为一个输入输出具有线性关系的系统。

在式(2.13)中，为了在输入信号 \mathbf{u}_i 和输出信号 y_i 之间建立直接的联系，对 y_i 求导并

带入 \dot{x}_i 的动态特性，利用 Lie 导数^[65]进行整理后得到

$$\begin{aligned}\dot{y}_i &= L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) \\ \ddot{y}_i &= L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) \\ &\dots \\ y_i^{(k)} &= L_{F_i}^k h_i(\mathbf{x}_i) + L_{g_i} L_{F_i}^{k-1} h_i(\mathbf{x}_i) u_i\end{aligned}\quad (2.14)$$

其中

$$\begin{aligned}L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) &= \frac{\partial h_i}{\partial \mathbf{x}_i} F_i(\mathbf{x}_i) \\ L_{F_i}^k h_i(\mathbf{x}_i) &= L_{F_i} L_{F_i}^{k-1} h_i(\mathbf{x}_i) = \frac{\partial L_{F_i}^{k-1} h_i}{\partial \mathbf{x}_i} F_i(\mathbf{x}_i) \\ L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) &= L_{g_i} L_{F_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) = \dots = L_{g_i} L_{F_i}^{k-2} h_i(\mathbf{x}_i) = 0 \\ L_{g_i} L_{F_i}^{k-1} h_i(\mathbf{x}_i) &= \frac{\partial L_{F_i}^{k-1} h_i}{\partial \mathbf{x}_i} g_i(\mathbf{x}_i) \neq 0\end{aligned}\quad (2.15)$$

式中 k 表示所得系统(2.14)和(2.15)的相对阶。

由于 $L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) \neq 0$ ，系统(2.13)的相对阶为 2。经过上述反馈线性化过程该系统转化为下述二阶线性系统

$$\begin{cases} \dot{y}_{i,1} = y_{i,2} \\ \dot{y}_{i,2} = L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) + L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) u_i \\ y_i = y_{i,1} = v_{odi} \end{cases}\quad (2.16)$$

其中

$$\begin{aligned}\dot{v}_{odi} &= \omega_i v_{oqi} + \frac{i_{ldi} - i_{odi}}{C_{fi}} \\ L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) &= (-\omega_i^2 - \frac{K_{pci} K_{pvi} + 1}{C_{fi} L_{fi}} - \frac{1}{C_{fi} L_{ci}}) v_{odi} + (\frac{\omega_i}{C_{fi}} - \frac{R_{fi} + K_{pci}}{C_{fi} L_{fi}}) i_{ldi} \\ &\quad - \frac{2\omega_i}{C_{fi}} i_{oqi} + \frac{\omega_i - \omega_b}{C_{fi}} i_{lqi} - \frac{\omega_b K_{pci}}{L_{fi}} v_{oqi} - \frac{K_{pci} K_{pvi} n_{Q_i}}{C_{fi} L_{fi}} Q_i \\ &\quad + \frac{K_{pci} K_{Ivi}}{C_{fi} L_{fi}} \phi_{di} + \frac{K_{Ici}}{C_{fi} L_{fi}} \gamma_{di} + \frac{R_{ci}}{C_{fi} L_{ci}} i_{odi} + \frac{1}{C_{fi} L_{ci}} v_{bdi} \\ L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) &= \frac{K_{pci} K_{pvi}}{C_{fi} L_{fi}}\end{aligned}\quad (2.17)$$

选择系统的控制输入为

$$u_i = \frac{v_i - L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)}{L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i)}\quad (2.18)$$

式中 v_i 为新的控制信号。将新的控制信号带入式(2.16)，可得

$$\begin{aligned}\dot{y}_{i,1} &= y_{i,2} \\ \dot{y}_{i,2} &= v_i \\ y_i &= y_{i,1} = v_{odi}\end{aligned}\tag{2.19}$$

式(2.19)表示可有 2 个积分器串联而成的线性系统，逆变器的大信号状态模型可由以下的状态空间描述

$$\dot{\mathbf{y}}_i = \mathbf{A}\mathbf{y}_i + \mathbf{B}v_i\tag{2.20}$$

其中系统矩阵 $\mathbf{A} \in R^{2 \times 2}$ ，输入向量 $\mathbf{B} \in R^2$ 分别定义如下

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\tag{2.21}$$

2.3 基于扩张状态观测器的分布式电源状态观测器设计方法

2.3.1 非线性模型的扩张状态观测器设计

考虑非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \\ y = x_1 \end{cases}\tag{2.22}$$

将 $f(x_1, x_2)$ 扩充成新的状态量 x_3 ，记为

$$x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t))\tag{2.23}$$

并记 $\dot{x}_3(t) = w(t)$ ，那么系统(2.22)可扩张为新的线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = w(t) \\ y = x_1 \end{cases}\tag{2.24}$$

对扩张系统(2.24)建立如下状态观测器

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e_1 + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases}\tag{2.25}$$

只要选取适当的参数 β_1 、 β_2 、 β_3 ，该系统能很好的估计系统(2.24)的状态变量 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 以及被扩张的状态量 $x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t))$ ，即

$$z_1(t) \rightarrow x_1(t), z_2(t) \rightarrow x_2(t)\tag{2.26}$$

并且

$$z_3(t) \rightarrow x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t))\tag{2.27}$$

如果函数 $f(x_1, x_2)$ 中含有时间变量 t 和位置扰动作用 $w(t)$ ，则令

$$x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t), w(t)) \quad (2.28)$$

则从观测器(2.25)同样可以得到状态变量 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 的估计值 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ 以及被扩张的状态量 $x_3(t)$ 。状态观测器(2.25)被称为系统(2.22)的扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) [66]。

扩张状态观测器是一个动态过程，它只用了原对象的输入输出信息，没有用到描述对象传递关系的函数 f 的任何信息，故其对对象具体模型具有弱依赖性，独立于对象传递关系函数 f 的具体形式。

接下来对扩张观测器的误差进行讨论。通常可假定为常数 w_0 ， $x_3(t)$ 系统(2.24)和系统(2.25)的误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_1 e_1, & e_1 = z_1 - y \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_2 e_1, & e_2 = z_2 - x_2 \\ \dot{e}_3 = w_0 - \beta_3 e_1, & e_3 = z_3 - x_3 \end{cases} \quad (2.29)$$

当该系统进入稳态时，方程右边收敛为 0，系统的稳态误差为

$$\begin{cases} e_1 = \frac{w_0}{\beta_3} \\ e_2 = \beta_1 \frac{w_0}{\beta_3} \\ e_3 = \beta_2 \frac{w_0}{\beta_3} \end{cases} \quad (2.30)$$

故只要满足 $\beta_3 \gg \beta_2$ 、 $\beta_3 \gg \beta_1$ 、 $\beta_3 \gg 1$ ，该估计误差就会足够小。

扩张状态观测器(2.25)中的 $z_3(t)$ 能够很好的跟踪系统的扩张状态量 x_3 的根本原因，是只要系统满足能观测性条件，那么不管 x_3 是什么形式，只要它是在起作用，那么其作用必定会反映在系统的输出上，就有可能从系统输出信息中提炼出其作用量。扩张状态观测器(2.25)就是从系统输出中提炼出 $x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t), w(t))$ 实时作用量的一种方法。

有了这个扩张的状态 $x_3(t)$ 的估计值 $z_3(t)$ ，只要参数 b 已知，控制量可以被取成

$$u = u_0 - \frac{z_3(t)}{b} \quad \text{或} \quad u = \frac{u_0 - z_3(t)}{b} \quad (2.31)$$

即控制量中补偿被扩张的状态 $x_3(t)$ 的估计 $z_3(t)$ ，就能使对象变成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b \left(u_0 - \frac{z_3(t)}{b} \right) \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t)) - z_3(t) + bu_0 \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu_0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.32)$$

或

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b\left(\frac{u_0 - z_3(t)}{b}\right) \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t)) - z_3(t) + u_0 \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u_0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.33)$$

即原来的非线性系统(2.22)变成线性的积分器串联型控制系统。

对非线性控制系统(2.22)用扩张状态观测器(2.25)估计的结果来把控制量取成(2.31)的形式，使原非线性控制系统(2.22)变成线性控制系统(2.32)或(2.33)的过程，成为动态补偿线性化过程，即用系统输出 y 来改造系统输入 u 的过程。

这样，无论对象(2.22)是确定性的还是不确定性的，线性的还是非线性的，时变的还是非时变的，经过式(2.31)形式的补偿，均可以把系统化成式(2.32)或式(2.33)形式的积分器串联型被控制系统。这样，扩张状态观测器和式(2.31)形式的补偿办法给予一种可能性，用统一的方式来处理确定性和不确定性，线性和非线性，时变和时不变等控制系统的控制问题。

2.3.2 分布式电源模型的动态补偿线性化

微电网电压控制的目标为 DG 的出口电压跟踪参考值，反映到模型中为

$$\begin{cases} v_{odi} \rightarrow v_{ref} \\ \dot{v}_{odi} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

为了实现电压控制的准确性和有效性，得到 DG 的状态信息是电压控制的基础和必要条件。具体来说，基于式(2.16)和式(2.17)所述的模型，电压控制中需要的得到 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ ，而需要注意的是：

- 1) 由于现实条件下直接测量微分值会存在严重的误差，所以状态量 \dot{v}_{odi} 只能通过式(2.17)间接获得。
- 2) 状态量 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 为中间状态，由式(2.17)可以发现，间接计算 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 需要逆变器系统中的电压、电流、系统参数等多个量，需要布置大量的传感器；同时这些直接测量量中包含 v_{bdi} 这样的非逆变器本地状态量，很难通过测量获取；
- 3) 由于逆变器的电感参数 L_{fi} 、电容参数 C_{fi} 的数量级非常小，即使直接测量的电压电流值存在的误差很小，反映在 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 上的误差也会很大，所以通过测量间接获取这些参数很可能给整个系统的控制效果带来严重的影响。

所以，本章考虑采用扩张观测器来观测 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ ，实现微电网中 DG 模型的动态补偿线性化。具体观测器设计方法介绍如下。

二阶系统(2.16)可以被扩张为如下三阶系统

$$\begin{cases} \dot{y}_{i,1} = y_{i,2} \\ \dot{y}_{i,2} = y_{i,3} + g_{i0}u_i \\ \dot{y}_{i,3} = \xi(y_{i,3}) \\ y_i = y_{i,1} \end{cases}$$

$$g_i = g_{i0} + \Delta g_i = L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) \quad (2.35)$$

$$y_{i,3} = f(y_{i,3}) + \Delta g_i u_i = L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) + \Delta g_i u_i$$

式中 $[y_{i,1} \ y_{i,2}]^T$ 为状态向量。 g_{i0} 和 Δg_i 分别表示 g_i 的额定值和不确定性带来的误差值；扩张状态 $y_{i,3}$ 表示 DG 逆变器内环控制环路、系统的误差和不确定性。

文献[67]给出如下假设：

- 1) 多项式 $f(y_{i,3})$ 、输入 u_i 和函数 $\xi(y_{i,3})$ 有界并且局部满足利普希茨连续条件，同时假定 $f(y_{i,3})|_{t=0} = 0$ 和 $\dot{f}(y_{i,3})|_{t=0} = 0$ ；
- 2) 系统输出 $y_i = y_{i,1}$ 以及其四阶导数均为有界的。

基于上述假设，对于系统(2.35)，考虑如下扩张状态观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}_{i,1} = \hat{y}_{i,2} - G_1 e_i \\ \dot{\hat{y}}_{i,2} = \hat{y}_{i,3} - G_2 e_i + g_{i0} u_i \\ \dot{\hat{y}}_{i,3} = -G_3 e_i \end{cases} \quad (2.36)$$

其中， G_1, G_2, G_3 为观测器的增益； $\hat{y}_{i,1}$ 、 $\hat{y}_{i,2}$ 和 $\hat{y}_{i,3}$ 为观测量；当选取合适的观测器增益时，观测误差 $e_i = y_i - \hat{y}_{i,1}$ 具有快速收敛特性。

观测器增益 G_1, G_2, G_3 的选择可参考文献[68]：

$$G_j = \chi_{(n,j)} \omega_0^j \quad j=1,2\cdots n \quad (2.37)$$

式中二项式系数为

$$\chi_{(n,j)} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (2.38)$$

参数 ω_0 的选取需要折中考虑状态观测的收敛速度和噪声、采样时间的影响^{[67][69]}。

2.4 算例分析

为验证面向微电网分布式控制的 DG 建模方法的正确性和有效性，以小型微电网中的逆变型 DG 为例，基于 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型进行验证。仿真平台的硬件环境为 Intel Xeon@2.40GHz CPU，内存为 32GB，开发平台的操作系统为 Windows10 64bit，MATLAB 版本为 R2018b。

2.4.1 仿真系统

建立参数如图 2-4 和表 2-1 所示的 DG 模型, 由于本算例主要论证 DG 运行时 ESO 的有效性, 外部电网的集合等效为图中的负荷, 基于此结构设计如下算例来验证控制算法的有效性:

1) $t=0$ 秒 (仿真初始化阶段): 系统中仅有逆变器本地控制器投入运行; 2) $t=1$ 秒: 基于 ESO 的系统级控制算法启动运行; 3) $t=1.5$ 秒: 系统中有负荷接入; 4) $t=2$ 秒: 系统中的部分负荷切除; 5) $t=3$ 秒: 系统中的其他 DG 离网; 6) $t=4$ 秒: 系统中的其他 DG 并网。

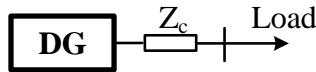


图 2-4 DG 并网仿真系统示意图

表 2-1 DG 参数

| 参数 | | | |
|-------|-----------------------|----------|-------|
| m_P | 6.28×10^{-5} | L_c | 2mH |
| n_Q | 0.5×10^{-3} | K_{PV} | 0.05 |
| R_f | 0.1Ω | K_{IV} | 390 |
| L_f | 1.35mH | K_{PC} | 10.5 |
| C_f | $47\mu F$ | K_{IC} | 16000 |
| R_c | 0.02Ω | | |

2.4.2 仿真结果分析

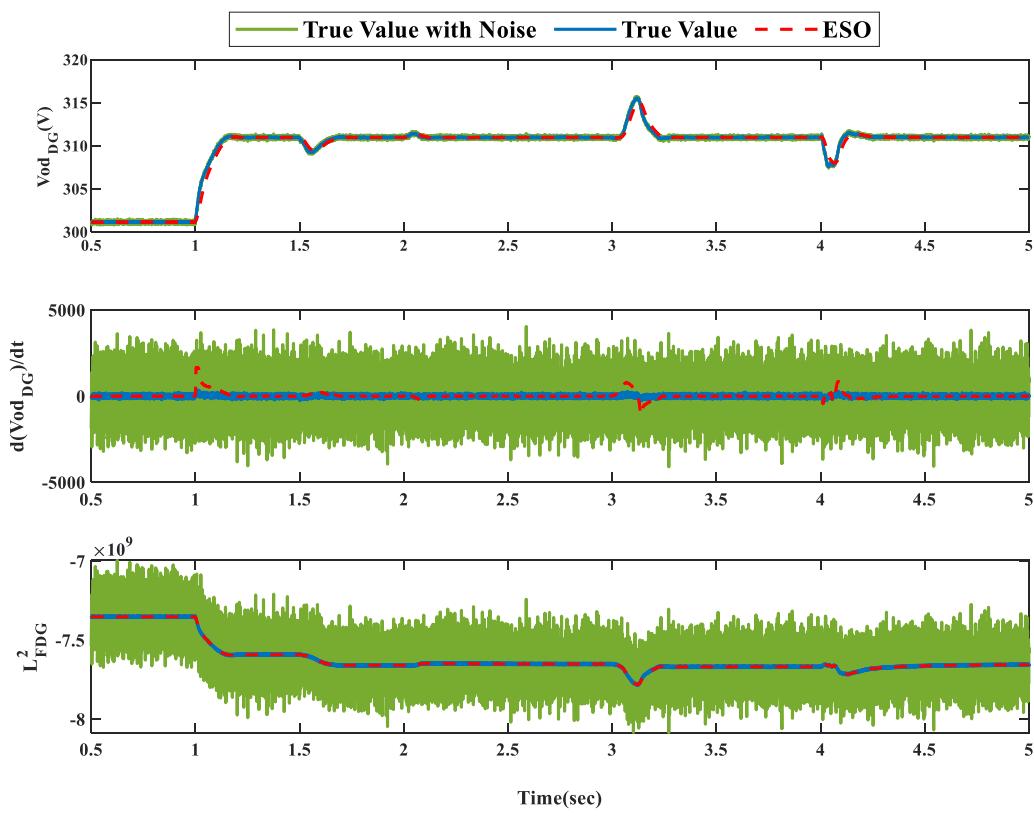


图 2-5 扩张状态观测器的观测效果分析

扩张观测器的运行效果如图 2-5 所示。0.5 秒前整个系统处于初始化阶段，从图中可以看出，虽然测量单元获得的电网电压信息的误差很小，可以认为不影响电网的控制，但是对于控制系统中如式(2.17)所描述的中间变量来说，此测量噪声会直接影响它们取值的准确性，进一步影响控制系统的性能。

在 1.5 秒、2 秒、3 秒和 4 秒时系统的运行状态、功率特性产生变化，但是所设计的扩张观测器均能获得很好的观测效果。

2.5 本章小结

本章针对含功率控制环的 DG 大信号模型的非线性会给控制器设计带来困难的问题，提出了一种面向微电网系统级控制的 DG 模型简化和观测方法。具有以下特点

1) 采用 Lie 导数对 DG 的大信号模型进行状态反馈线性化处理，得到保留模型输入输出特性的线性模型，尽可能避免了非线性项对系统控制器设计带来的难题；

2) 考虑到反馈线性化的到的模型中的参数不确定性和测量噪声会给简化线性模型带来误差，易对整个控制系统的产生不良影响，引入扩张状态来表征系统非线性项和不确定性的集合，设计面向微电网控制的 DG 扩张状态观测器，简化了测量系统的部署，便于 DG 信息的精确获取。

模型的简化和扩张观测器的引入实现了模型的动态补偿线性化，不仅简化了微电网分布式鲁棒控制器的设计，同时也使得整个控制系统具有更好的鲁棒性能。

第三章 微电网分布式鲁棒控制方法研究

3.1 引言

微电网孤岛化自治运行作为发展分布式能源的重要形式，相比并网运行具有更大的灵活性，然而正是这种灵活自治的控制方式，给微电网的控制系统提出了挑战：由于频率为电网最重要的运行指标，在缺乏大电网的支撑下，微电网的频率控制显得尤其重要；同时微电网的供电质量也亟需鲁棒控制系统的保障；同时为了支撑微电网的灵活运行，其控制系统应具有较强的即插即用功能。

所以，本章首先介绍了无向图理论，指出基于无向图理论的稀疏通信网络是解决 DG 接入电网后控制策略部署的重要手段；其次，不同于现有的电压控制方法，采用快速终端滑模（Fast Terminal Sliding Mode, FTSM）模型构建微电网分布式电压鲁棒控制模型，保证了电压控制更快的收敛特性，同时利用改进 Super-Twisting(Adaptive Super-Twisting, AST) 理论求解 FTSM 模型，在简化参数选取的同时，进一步改善了电压控制系统的收敛特性；然后，设计微电网分布式频率控制，在保证微电网频率稳定的同时，实现了 DG 有功出力的合理分配；最后，在 Matlab/Simulink 中通过多组仿真算例验证所提方法的有效性、鲁棒性和可扩展性。

3.2 基于图论的微电网分布式控制系统

分布式控制因其灵活性和可扩展性^{[14][17]-[20]}，被广泛应用于微电网的控制系统。为了实施控制策略，在微电网中基于图论建立多 DG 的稀疏通信网络，减少控制系统中通信和计算的压力。

采用无向图 $\mathbf{G} = \{\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{A}\}$ 表示含多 DG 的微电网的通信拓扑，每一个 DG 为一个节点。 $\mathbf{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 、 $\mathbf{E} \subset \mathbf{V} \times \mathbf{V}$ 分别表示节点的集合和节点的边， $N_j = \{i | (i, j) \in \mathbf{E}\}$ 表示节点 j 邻接节点的集合；实对称矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 表示具有 N 节点的图 \mathbf{G} 的邻接矩阵， a_{ij} 为邻接矩阵中的元素；若 $(i, j) \in \mathbf{E}$ ，节点 i 为节点 j 的邻居；若节点 i 能够接收来自节点 j 的信息且 $(j, i) \in \mathbf{E}$ ，则 $a_{ij} > 0$ ，反之 $a_{ij} = 0$ 。定义 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 为节点 i 的入度，相应的矩阵为 $\mathbf{D} = diag\{d_i\} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ；图 \mathbf{G} 邻接矩阵对应的拉普拉斯矩阵可以定义为

$$\begin{cases} \mathbf{L} = [l_{ij}]_{N \times N} = \mathbf{D} - \mathbf{A} \\ l_{ii} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \\ l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j \end{cases} \quad (3.1)$$

为了不失一般性^{[30][70]}，假设共有 N 个跟随节点和 1 个领导节点，节点 $1, \dots, N$ 为跟随节点，而节点 0 为领导节点。此时相应的可逆拉普拉斯矩阵为

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{B} \\ \mathbf{B} = \text{diag}\{b_i\} \in \mathbb{R}^{N \times N} \end{cases} \quad (3.2)$$

式中 \mathbf{B} 表示领导节点和跟随节点的通信权重矩阵，即若节点 i 能收到领导节点 0 的信息， $b_i = 1$ ，反之 $b_i = 0$ 。

3.3 基于 FTSM 和 AST 的孤岛微电网分布式鲁棒电压控制

3.3.1 基于 FTSM 的微电网分布式鲁棒控制器设计

3.3.1.1 FTSM 模型

滑模控制系统由于其鲁棒性和实用性，被广泛应用在工业控制系统中^[71]。通过对滑模控制律的设计得到滑模控制律，控制系统到达能够使得系统渐进稳定的滑模面上。然而，对于控制精度要求高的系统，渐近稳定性往往导致系统的收敛速度不够快，非线性切换面如终端滑模（Terminal Sliding Mode, TSM），可以大幅度提高暂态性能。TSM 模型首次在文献[72]中提出，有如下描述

$$s = \dot{x}_1 + \beta x_1^{q/p} = 0 \quad (3.3)$$

式中， $x_1 \in R^1$ 为标量， $\beta > 0$ ， $p > q$ 且均为正实数。由于参数 p 和 q 都是奇数，故对于任意实数 x_1 ， $x_1^{q/p}$ 定为实数。给定初始变量 $x_1(0) \neq 0$ ，动态模型(3.3)会在有限的时间内收敛至 $x_1 = 0$ ^[73]，该收敛时间为

$$t^s = (p / \beta(p - q)) |x_1(0)|^{(p-q)/p} \quad (3.4)$$

系统(3.3)对于达到平衡状态具有加速收敛特性^[74]，即状态 $x_1 = 0$ 能在有限时间内达到且系统保持稳定，收敛时间 t^s 可由参数 p 、 q 和 β 确定。

式(3.3)中的非线性项 $x_1^{q/p}$ 能改善系统向平衡状态收敛的性能，当越趋近平衡状态时，系统具有越快的收敛速度，即系统能够有有限时间稳定的收敛性。需要说明的是虽然此时系统的动态性能并不能满足利普希茨（Lipschitz）连续条件，但对于任意非零的初始状态，在正向时间方向上的解是唯一的^{[73][75]}。

TSM 控制模型已成功应用于文献[72][76][77]的控制设计中。然而，当系统状态远离其平衡状态时，现有的 TSM 控制模型可能不会提供与滑模控制模型相同的收敛性，即，由于当系统的状态远离平衡状态的时候非线性项 $x_1^{q/p}$ 往往会降低收敛速度，此时 TSM 模型并不优于其相应的线性模型（即 $p = q$ ），故提出如下的 FTSM 模型

$$s = x_1 + \alpha x_1 + \beta x_1^{q/p} = 0 \quad (3.5)$$

式中 $\alpha, \beta > 0$ 。此时系统可表达为

$$\dot{x}_1 = -\alpha x_1 - \beta x_1^{q/p} \quad (3.6)$$

选取合适的参数 p 和 q ，任意初始状态 $x_1(0) \neq 0$ ，动态系统(3.5)能够实现有限时间收敛至 $x_1 = 0$ 。此特性可以从式(3.6)中分析得到：当 $|x_1| \gg 0$ 时，系统的收敛性能可近似为

$\dot{x}_1 = -\alpha x_1$, 其良好的收敛特性很好理解; 当系统接近 $x_1 = 0$ 时, 系统的收敛性能可近似为 $\dot{x}_1 = -\beta x_1^{q/p}$, 即含加速收敛因子的 TSM 模型。更具体的来说, 通过分析可得到系统达到平衡状态的时间 t^s [73]

$$t^s = \frac{P}{\alpha(p-q)} \left(\ln(\alpha x_1(0)^{(p-q)/p} + \beta) - \ln \beta \right) \quad (3.7)$$

3.3.1.2 分布式鲁棒电压控制器设计

分布式鲁棒电压控制器主要是为了选取合适的 DG 功率控制环的输入 V_{ni} 控制 DG 出口处的电压幅值为电压参考值 v_{ref} , 根据第二章中得到的模型, 即使得电压幅值的 d 轴分量 v_{odi} 控制为电压参考值 v_{ref} 。

根据逆变器大信号模型(2.20)和扩张状态观测器(2.36)考虑观测得到的如下 DG 二阶线性模型

$$\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{A}\hat{\mathbf{y}}_i + \mathbf{B}v_i \quad (3.8)$$

式中 $\hat{\mathbf{y}}_i = [\hat{y}_{i,1} \ \hat{y}_{i,2}]^T$, $\mathbf{B} = [0 \ 1]^T$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

相应的参考值为 $y_{i,1} \rightarrow v_{ref}$ 和 $y_{i,2} \rightarrow 0$, 即

$$\dot{\mathbf{y}}_0 = \mathbf{A}\mathbf{y}_0 \quad (3.9)$$

式中 $\mathbf{y}_0 = [y_0 \ \dot{y}_0]^T = [v_{ref} \ 0]^T$ 。

由 3.2 节中的图论基础可知通常只有 1 个 DG 节点可以获得参考值, 故各个 DG 的控制误差为

$$\begin{cases} e_{i,1} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{y}_{i,1} - \hat{y}_{j,1}) + b_i (\hat{y}_{i,1} - y_0) \\ e_{i,2} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{y}_{i,2} - \hat{y}_{j,2}) + b_i \hat{y}_{i,2} \end{cases} \quad (3.10)$$

观察式(3.10)不难发现 $\dot{e}_{i,1} = e_{i,2}$, 根据式(3.5)可定义如下 FTSM 模型来解决微电网内多 DG 的电压收敛问题:

$$s_i = e_{i,2} + ce_{i,1} + de_{i,1}^{m/q} \quad (3.11)$$

式中 $i = 1, \dots, N$, $c, d > 0$, $q > m > 0$ 且为奇数。

3.3.2 基于 AST 的微电网分布式鲁棒电压控制律求解方法

3.3.2.1 AST 模型

AST 控制模型在文献[78]中提出, 本文应用该控制模型求解微电网的分布式鲁棒控制律, 该模型能够在保证分布式系统稳定地同时, 最大限度的抵抗外部的扰动和系统的不确定性。

针对如下一阶系统

$$\dot{x}_1 = u \quad (3.12)$$

有如下动态反馈控制律

$$u = -\alpha |x_1|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(x_1) + x_2, \dot{x}_2 = -\frac{\beta}{2} \operatorname{sign}(x_1) \quad (3.13)$$

式(3.13)为 AST 控制律，其中 x_2 为控制律的中间变量；参数 α, β 为控制器的增益，定义如下

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \begin{cases} k \operatorname{sign}(|x_1| - \mu) & \text{if } \alpha > \alpha_{\min} \\ \alpha_{\min} & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \end{cases} \\ \beta &= 2\epsilon\alpha \end{aligned} \quad (3.14)$$

AST 控制模型的优势为其控制增益可以自适应调节，并且参数 μ 可以防止滑模控制的抖振现象，即只要达到 $|x_1| \leq \mu$ 域内，增益 α, β 开始下降直到系统离开 $|x_1| \leq \mu$ 域，而系统增益的增加是保证系统运行在该域内；变量 k 决定了系统到达稳定域的速度，变量 α_{\min} 保证系统的增益为正数，防止系统失稳。

3.3.2.2 分布式鲁棒控制律求解方法

针对式(3.11)所示的微电网分布式电压鲁棒控制 FTSM 模型，采用 AST 控制模型进行求解。

对式(3.11)求导，可以得到

$$\dot{s}_i = \dot{e}_{i,2} + ce_{i,2} + d \frac{m}{q} e_{i,1}^{m/q-1} e_{i,2} \quad (3.15)$$

基于上述 AST 控制算法，令

$$\bar{v}_i = \dot{e}_{i,2} + ce_{i,2} + d \frac{m}{q} e_{i,1}^{m/q-1} e_{i,2} \quad (3.16)$$

在系统(3.15)中应用式(3.13)的 AST 控制算法，得到

$$\dot{s}_i = -\alpha |s_i|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(s_i) + \rho_i, \dot{\rho}_i = -\beta \operatorname{sign}(s_i) \quad (3.17)$$

接下来证明应用 AST 控制算法系统的稳定性，以及讨论控制系统的参数选取。

令

$$\zeta_i = \begin{bmatrix} |s_i|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(s_i) & \rho_i \end{bmatrix}^T \quad (3.18)$$

系统(3.17)可表达为

$$\dot{\zeta} = -\frac{1}{2|s_i|^{\frac{1}{2}}} \begin{bmatrix} \alpha & 1 \\ \beta & 0 \end{bmatrix} \zeta \quad (3.19)$$

其中

$$\dot{\zeta}_{i,1} = -\frac{\alpha \zeta_{i,1} + \zeta_{i,2}}{2|s_i|^{\frac{1}{2}}}, \dot{\zeta}_{i,2} = -\frac{\beta \zeta_{i,1}}{2|s_i|^{\frac{1}{2}}} \quad (3.20)$$

为了验证稳定性，考虑如下二次李雅普诺夫函数

$$V(\zeta) = \zeta^T \mathbf{P} \zeta, \mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \lambda + 4\epsilon^2 & -2\epsilon \\ -2\epsilon & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

式中, $\lambda > 0$ 。代入 $\beta = 2\epsilon\alpha$, 对式(3.21)求导得到

$$\dot{V}(\zeta) = -\frac{1}{|s_i|^2} \zeta^T \mathbf{Q} \zeta, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 2\lambda\alpha & \lambda + 4\epsilon^2 \\ * & 4\epsilon \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

式中 \mathbf{Q} 为正定矩阵。

根据 AST 控制算法控制增益的定义(3.14), 控制参数 α 的选取只需满足如下条件

$$\alpha > \frac{(\lambda + 4\epsilon^2)^2}{8\lambda\epsilon} \quad (3.23)$$

由于 $\mathbf{Q} > 0$, $\dot{V}(\zeta) < 0$ 成立, 系统(3.17)稳定性得证。

故由式(3.16)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{e}_{i,2} + ce_{i,2} + d \frac{m}{q} e_{i,1}^{m/q-1} e_{i,2} &= -\alpha |s_i|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_i) + \rho_i \\ \dot{\rho}_i &= -\beta \text{sign}(s_i) \end{aligned} \quad (3.24)$$

由于存在 $\dot{e}_{i,2} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (v_i - v_j) + b_i v_i$, 代入式(3.24), 可以得到如下鲁棒控制律

$$\begin{aligned} v_i &= (\sum_{j \in N_i} a_{ij} + b_i)^{-1} [\sum_{j \in N_i} a_{ij} v_j - ce_{i,2} - d \frac{m}{q} e_{i,1}^{m/q-1} e_{i,2} - \alpha |s_i|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_i) + \rho_i] \\ \dot{\rho}_i &= -\beta \text{sign}(s_i) \end{aligned} \quad (3.25)$$

该控制律能保证每个 DG 的输出电压 v_{odi} 在有限时间内准确跟踪电压参考值 v_{ref} , 使电压控制闭环系统具有更好的鲁棒性和抗干扰性能

3.3.3 考虑有功出力分配的微电网分布式鲁棒频率控制

分布式鲁棒频率控制器主要是为了选取合适的 DG 功率控制环的输入 ω_{ni} 同步 DG 的频率为频率参考值 ω_{ref} , 即

$$\omega_i = \omega_j = \omega_{ref} \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad (3.26)$$

同时保证多个 DG 之间的有功出力按照其下垂特性 (额定容量) 分配, 即

$$m_{pi} P_i = m_{pj} P_j \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad (3.27)$$

对于微电网频率控制和有功出力分配问题, 系统模型(2.10)可以简化为如下单输入单输出 (SISO) 模型

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f_i(x_i) + g_i(x_i) u_i + k_i(x_i) D_i \\ &= F_i(x_i) + g_i(x_i) u_i \\ y_i &= \omega_i = \omega_{ni} - m_{pi} P_i \end{aligned} \quad (3.28)$$

该系统的输入和输出分别为 $u_i = \omega_{ni}$ 、 $y_i = \omega_i = \omega_{ni} - m_{pi} P_i$ 。由于 y_i 与 u_i 之间相关, 为了应用反馈线性化方法, 直接对 $\omega_i = \omega_{ni} - m_{pi} P_i$ 求导得到一个辅助的控制输入 u_{fi}

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{ni} - m_{pi} \dot{P}_i \equiv u_{fi} \quad (3.29)$$

对 $m_{Pi}P_i$ 求导得到另一辅助的控制输入 u_{Pi}

$$m_{Pi}\dot{P}_i \equiv u_{Pi} \quad (3.30)$$

由式(3.29)和式(3.30)可以得到控制输入 ω_{ni}

$$\omega_{ni} = \int (u_{fi} + u_{Pi}) dt = \int u_{\omega i} dt \quad (3.31)$$

式(3.31)中的辅助控制输入 u_{fi} 和 u_{Pi} 的选取可以通过相邻节点的测量信息, 由如下控制律得到

$$u_{fi} = c_f \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(\omega_j - \omega_i)^{\alpha_\omega} + b_i \text{sig}(\omega_{ref} - \omega_i)^{\alpha_\omega} \right) \quad (3.32)$$

$$u_{Pi} = c_p \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(mP_j - mP_i)^{\alpha_p} \quad (3.33)$$

式中控制增益 $c_f > 0$, $c_p > 0$, 且 $0 < \alpha_\omega, \alpha_p < 1$ 。其中函数 $\text{sig}(r)^\alpha$ 具有如下定义

$$\begin{aligned} \text{sig}(r)^\alpha &= \text{sign}(r)|r|^\alpha \\ \text{sign}(r) &= \begin{cases} 1, & r > 0 \\ 0, & r = 0 \\ -1, & r < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.34)$$

根据文献[24][26][79][80]中的分析, 式(3.31)、(3.32)和(3.33)的控制律为有限时间稳定控制律, 即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} [\omega_j - \omega_i] = 0 & \forall i, j \\ \omega_i = \omega_j & \forall t \geq T \quad \forall i, j \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} [m_{pj}P_j - m_{Pi}P_i] = 0 & \forall i, j \\ m_{Pi}P_i = m_{pj}P_j & \forall t \geq T \quad \forall i, j \end{cases} \quad (3.36)$$

与传统的分布式控制相比, 由于 α_ω 增加了控制器的自由度, 所以该有限时间稳定闭环系统具有更好的鲁棒性和抗扰动性能^[81]。式(3.31)所示控制律包含 2 部分, 式(3.32)保证了频率的无差跟踪(式(3.26)), 而式(3.33)保证了无功出力的准确分配。

3.4 微电网分布式鲁棒控制算法的实现

本文所提的分布式鲁棒控制算法的结构示意图如图 3-1 所示。从图中可以看到, 每个 DG 的本地控制器只需要参考值信息和通过分布式通信拓扑得到的相邻节点的信息。通过本章所提的分布式鲁棒控制算法, 当微电网中的负荷或者 DG 接入状态发生变化时下垂控制(式(2.2)-式(2.4))的控制输入 V_{ni} 和 ω_{ni} 得到更新。

此外, 分布式稀疏通信网络的应用增加了整个系统的可靠性, 减少了系统对于故障的敏感性; 同时在此通信网络下, 所提的控制算法并不依赖复杂的计算, 更加提高了算法实施的可靠性。另外, 虽然分布式稀疏通信网络能够降低通信延迟对控制系统的影响,

但是所提出的的微电网分布式鲁棒控制算法仍然存在不可避免的通信延迟，然而由于所提算法为二次控制，其时间尺度远远大于 DG 逆变器自身的控制时间尺度，所以通信延迟并不会严重影响本文所提算法的控制性能^{[22][26]}。

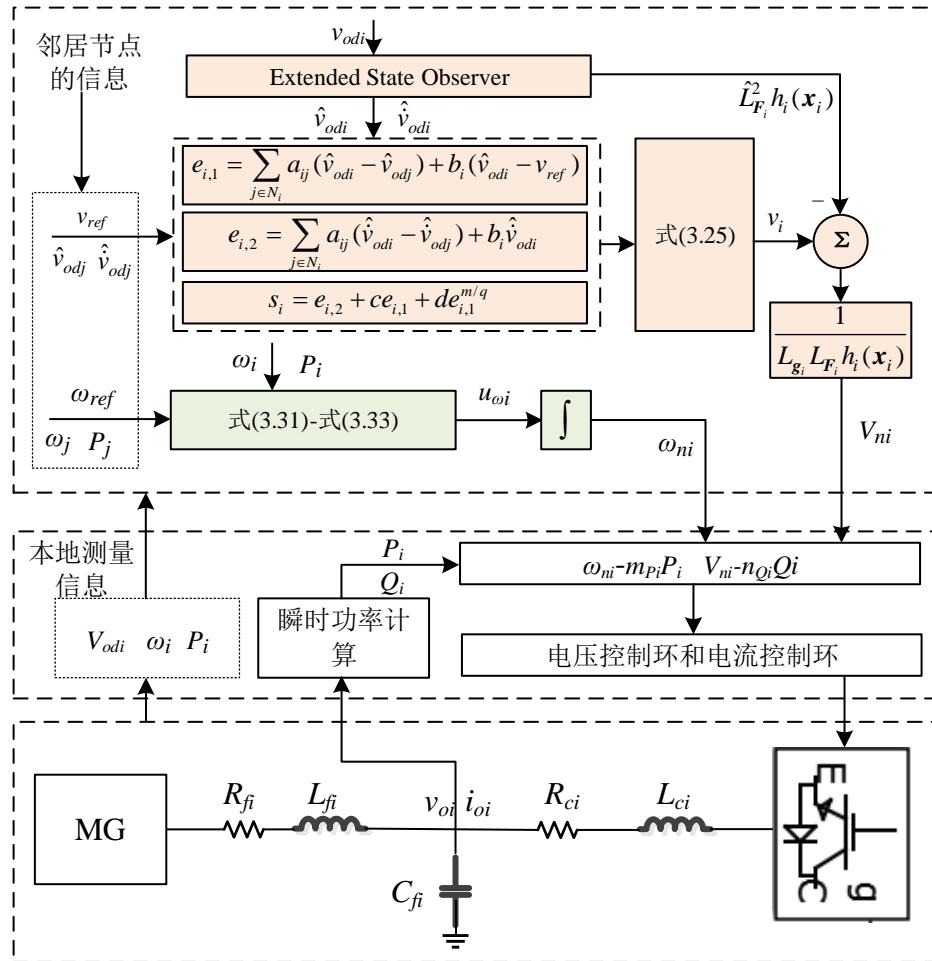


图 3-1 分布式鲁棒控制算法结构

3.5 算例分析

为验证第二章面向微电网分布式控制的 DG 建模方法和本章第三章 基于 FTSM 的微电网分布式鲁棒控制方法的有效性，分别以小型微电网和中等规模微电网为仿真系统，基于 MATLAB/Simulink 建立了上述仿真系统的仿真模型。仿真平台的硬件环境为 Intel Xeon@2.40GHz CPU，内存为 32GB，开发平台的操作系统为 Windows10 64bit，MATLAB 版本为 R2018b。

3.5.1 小型微电网仿真系统

首先建立如图 3-2 所示的小型微电网拓扑结构，具体的 DG、线路、负荷参数以及控制系统参数如表 3-1 所示。

基于此拓扑结构设计如下算例来验证控制算法的有效性：

1) $t=0$ 秒 (仿真初始化阶段): 系统中仅有逆变器本地控制器投入运行，同时负荷 2

未接入；2) $t=1$ 秒：基于 ESO 的微电网分布式鲁棒控制算法启动运行；3) $t=1.5$ 秒：负荷 2 接入；4) $t=2$ 秒：负荷 3 有 50% 的负荷切除；5) $t=3$ 秒：DG4 离网；6) $t=4$ 秒：DG4 并网。

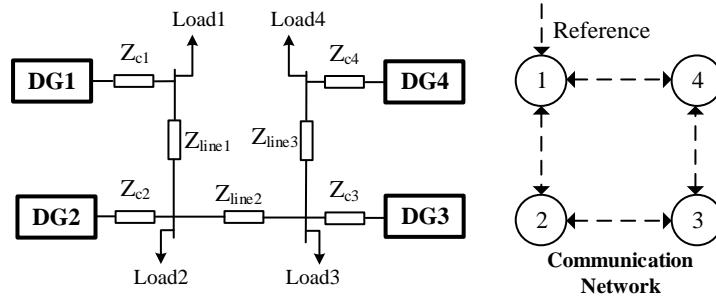


图 3-2 小型微电网仿真系统结构图

表 3-1 小型微电网仿真系统参数

| | DG 1 | DG 2 | DG 3&DG 4 | | |
|-----------------|--|--|------------------------|--|--|
| m_P | 6.28×10^{-5} | 9.42×10^{-5} | 12.56×10^{-5} | | |
| n_Q | 0.5×10^{-3} | 0.75×10^{-3} | 1×10^{-3} | | |
| R_f | 0.1Ω | 0.1Ω | 0.1Ω | | |
| L_f | 1.35mH | 1.35mH | 1.35mH | | |
| C_f | $47\mu\text{F}$ | $47\mu\text{F}$ | $47\mu\text{F}$ | | |
| DG | R_c | 0.02Ω | 0.03Ω | | |
| | L_c | 2mH | 2mH | | |
| | K_{PV} | 0.05 | 0.05 | | |
| | K_{IV} | 390 | 390 | | |
| | K_{PC} | 10.5 | 15 | | |
| | K_{IC} | 16000 | 20000 | | |
| 线路 | Line1 | $R = 0.23\Omega, L = 318\mu\text{H}$ | | | |
| | Line2 | $R = 0.35\Omega, L = 1847\mu\text{H}$ | | | |
| | Line3 | $R = 0.23\Omega, L = 318\mu\text{H}$ | | | |
| 负荷 | Load1 | $R = 2\Omega, L = 6.4\text{mH}$ | | | |
| | Load2 | $R = 4\Omega, L = 9.6\text{mH}$ | | | |
| | Load3 | $R = 6\Omega, L = 12.8\text{mH}$ | | | |
| | Load4 | $R = 6\Omega, L = 12.8\text{mH}$ | | | |
| 控制参数 | Frequency Control | $k_\omega = 80, k_{\Delta\omega} = 80, \alpha_\omega = 1/3, \alpha_{\Delta\omega} = 1/2$ | | | |
| Voltage Control | ESO: $\omega_0 = 3 \times 10^3; c = 400, d = 200, m = 3, q = 5,$ $\alpha_{\min} = 1e6, \mu = 100, k = 1 \times 10^6, \varepsilon = 1/2$ | | | | |
| References | $V_{mag,ref} = 311\text{V}, \omega_{ref} = 50\text{Hz}$ | | | | |

3.5.1.1 基于 ESO 的微电网分布式鲁棒控制器效果分析

仿真结果如图 3-3 和图 3-4 所示。仿真开始阶段，由于只有逆变器下垂控制系统运行，各个 DG 的电压和频率都偏离参考值；当所提分布式控制算法在 1 秒时接入后，电压和频率都能准确、迅速的恢复到参考值；为了验证负荷变化时的控制效果，在 1.5 秒和 2 秒时分别有负荷接入和切除，此时控制器仍有良好的控制效果；为了验证所提控制

算法的即插即用功能，在3秒和4秒时发生DG离网和并网，从图3-3中可以看到，尽管在DG4并离网的瞬间会出现短暂的电压、频率偏移，但是所提控制算法能仍能保证有功出力分配、电压和频率准确跟踪的实现。

为了验证ESO在整个控制算法中的作用和效果，观测值和真实值之间的比较如图3-4所示，在系统负荷或者DG状态发生变化时，每个DG的观测器都能准确快速得到观测值 v_{odi} 、 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2$ ，这对于整个控制系统安全稳定运行具有重要的意义。

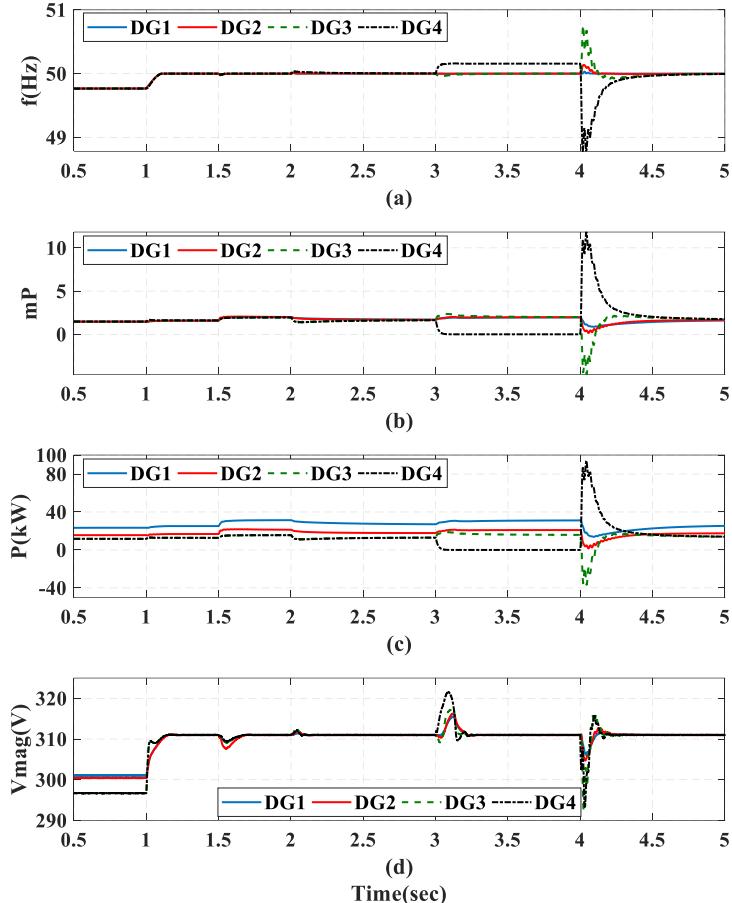


图 3-3 控制器效果：(a) 频率, (b) 有功功率的比例 ($m_{P_i}P_i$) , (c) 有功出力, (d) 电压幅值

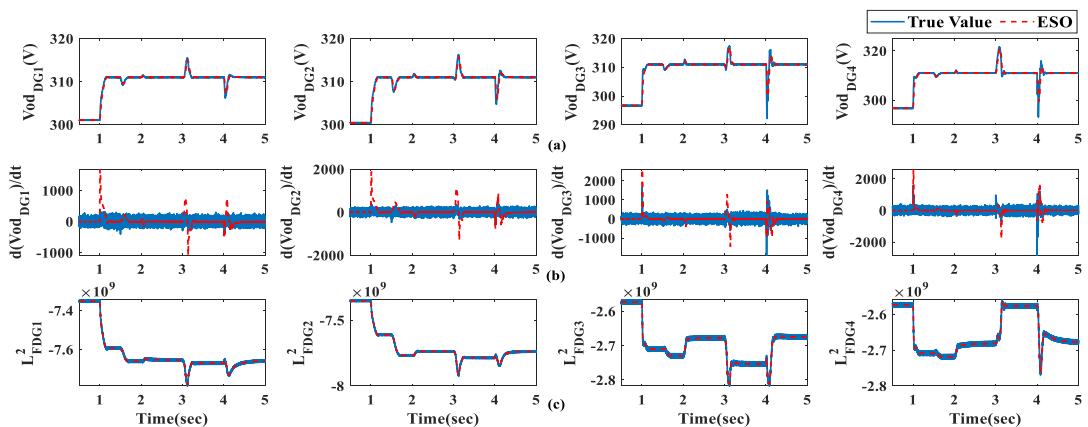


图 3-4 ESO 的应用效果：(a) v_{odi} , (b) \dot{v}_{odi} , (c) $L_{F_i}^2$

3.5.1.2 参数不确定和测量误差条件下的控制系统鲁棒性分析

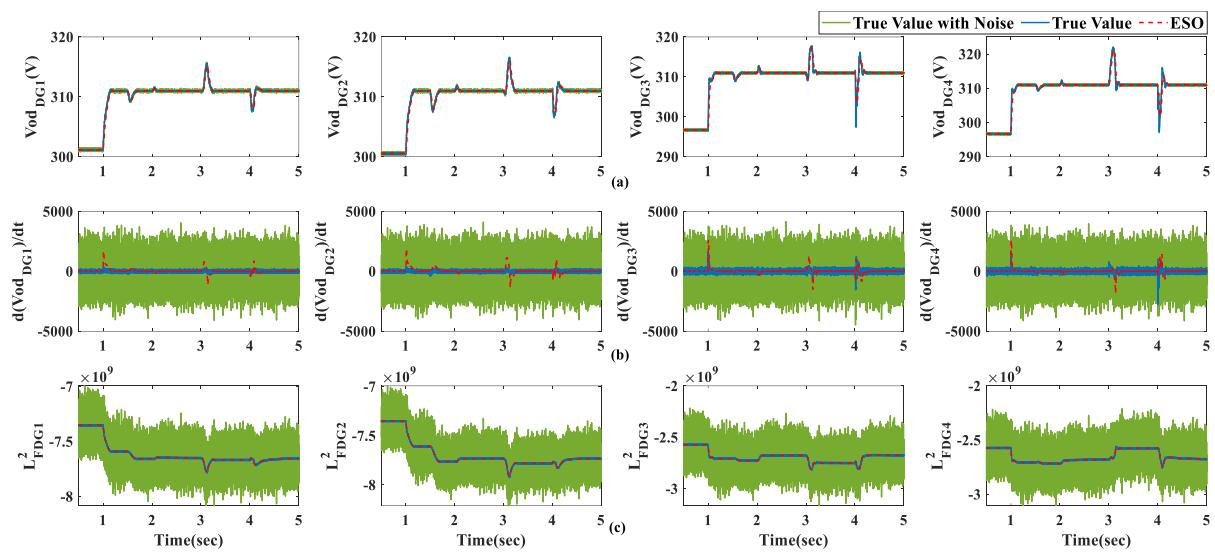


图 3-5 存在不确定性系统中 ESO 的应用效果: (a) v_{odi} , (b) \dot{v}_{odi} , (c) $L_{F_i}^2$

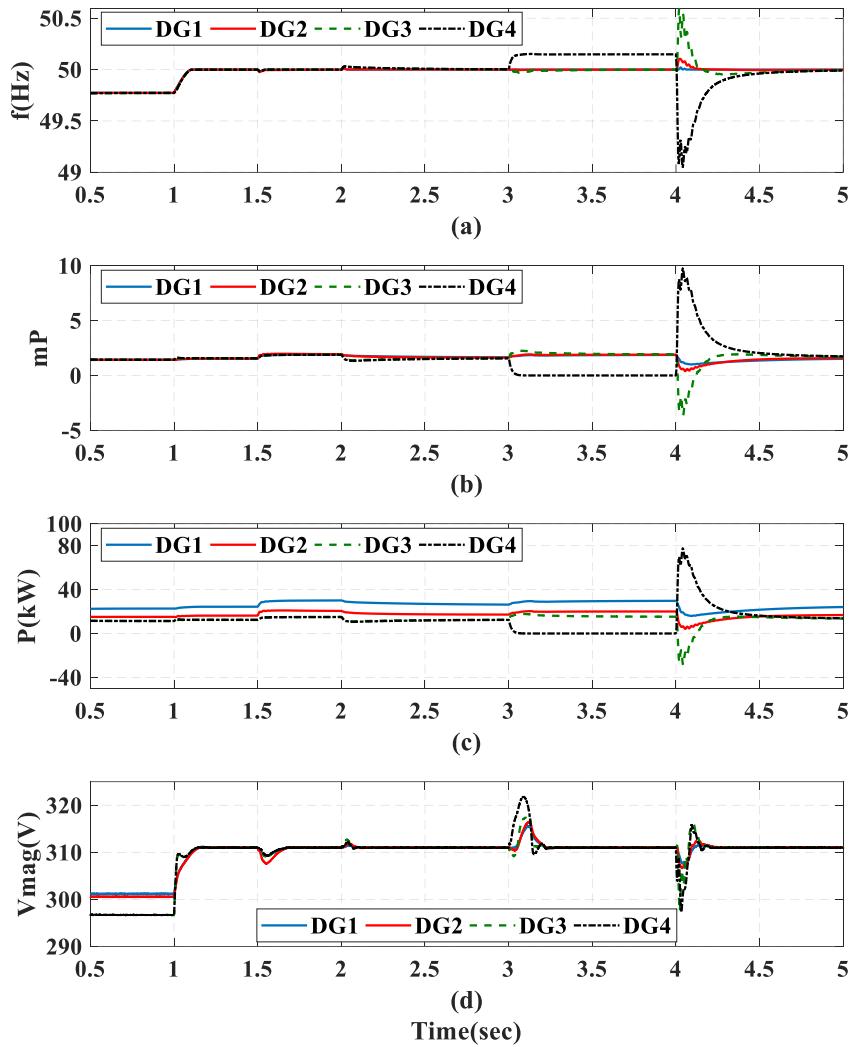


图 3-6 控制器的鲁棒性: (a) 频率, (b) 有功功率的比例 ($m_{Pi}P_i$), (c) 有功出力, (d) 电压幅值

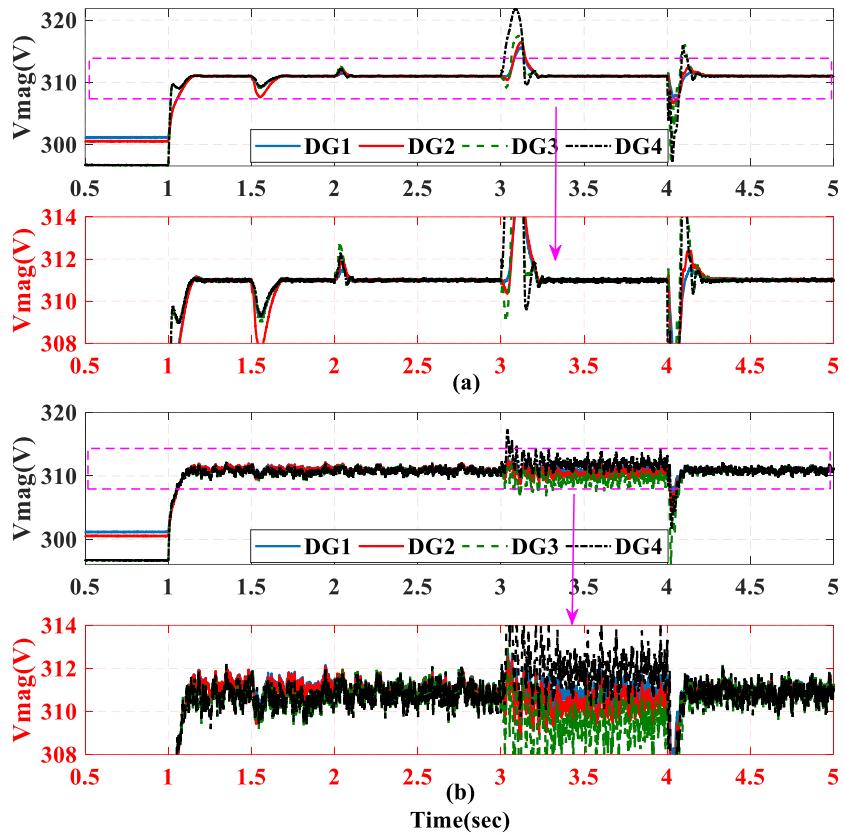


图 3-7 电压控制鲁棒性分析: (a) 含 ESO, (b) 不含 ESO

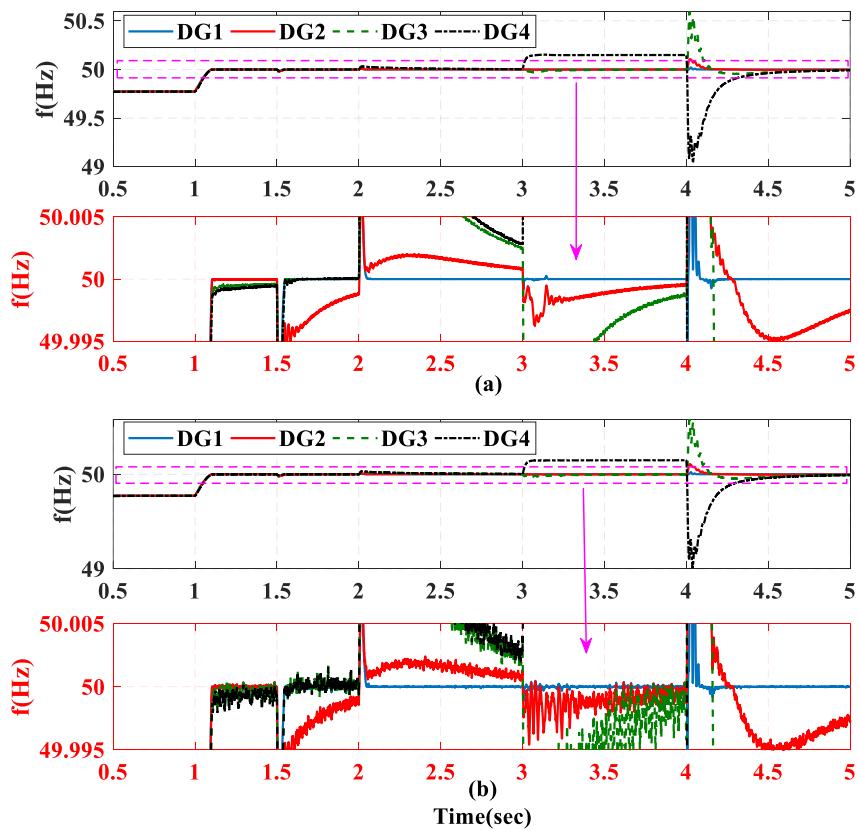


图 3-8 频率控制鲁棒性分析: (a) 含 ESO, (b) 不含 ESO

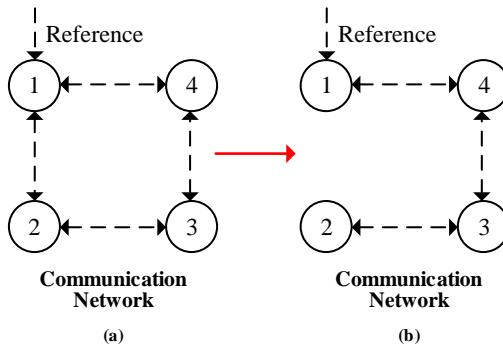
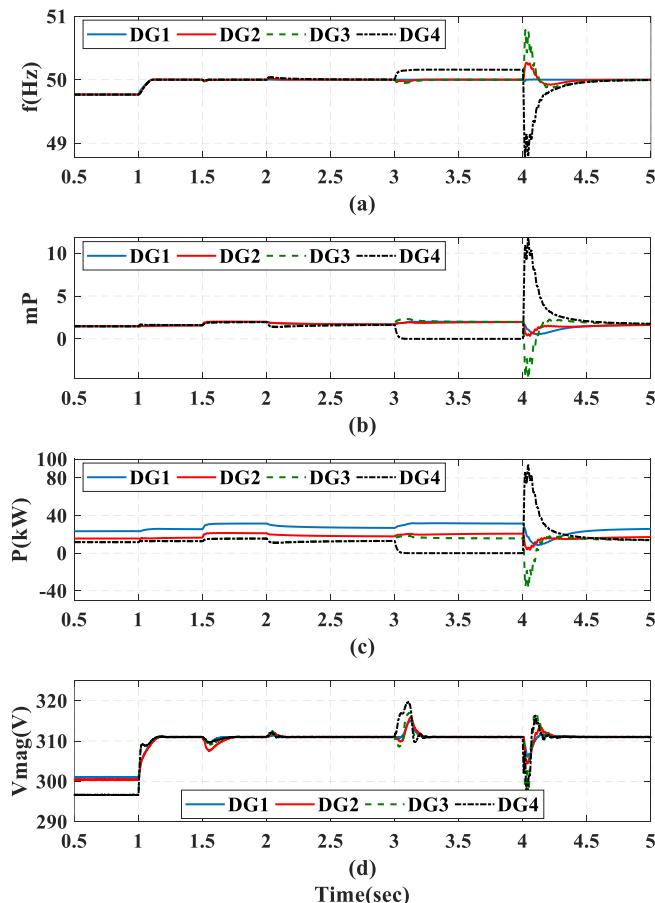


图 3-9 通信拓扑变化示意图

图 3-10 通信拓扑变化: (a) 频率, (b) 有功功率的比例 ($m_{P_i} P_i$), (c) 有功出力, (d) 电压幅值

为了验证在参数不确定和存在测量误差情况下微电网控制系统的鲁棒性，整个系统的线路参数值在表 3-1 的基础上增加 20%，且存在方差 $\sigma^2=0.01$ 的测量误差，由于式 (2.17) 中 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 是由系统直接测量决定，这些不确定性因素都会直接影响 \dot{v}_{odi} 和 $L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 的准确性，以至于直接影响整个系统控制的准确性和稳定性。

整个算例与 3.5.1.1 节中的算例相同，在此情况下系统电压、频率变化和 ESO 的观测效果分别如图 3-5 和图 3-6 所示。从图 3-6 可以看出，控制器在系统存在不确定性的情况下仍能保证有功出力分配、电压和频率的准确跟踪，系统具有良好的鲁棒控制性能。从图 3-5 中可以看出，较小的直接测量误差会直接影响控制系统中间变量的出现很大的

误差，但是所提出的 ESO 能在此情况下获得准确的系统参数，保证整个控制系统的稳定运行。

为了进一步突出 ESO 的应用对于整个控制系统至关重要的作用，图 3-7 和图 3-8 分别对比了在有无 ESO 的情况下电压和频率的控制效果。从图中不难看出，系统在存在不确定性的情况下，不采用 ESO 时电压和频率的控制效果恶化。

3.5.1.3 通信拓扑变化时控制系统的鲁棒性分析

为了验证在通信拓扑变化时，所提控制算法的普适性，在如图 3-9 所示的通信拓扑变化的情况下，采用 3.5.1.1 节中的算例进行仿真，仿真结果如图 3-10 所示，不难看出在此条件下，控制系统仍然具有良好的鲁棒性。

3.5.1.4 与传统控制方法的比较

为了现在所提方法相比传统的控制方法具有一定的优势，在本节应用 3.5.1.1 节中的算例对比本基于 ESO 的微电网分布式鲁棒控制方法和文献[26]中所提的方法进行对比。为了简单起见，图 3-11 中只对比了 DG1 的电压和频率变化，从图中可以看出，基于 ESO 的控制方法具有更快的收敛特性。尽管文献[26]的控制方法的收敛速度可以通过调整控制参数来优化，但这也增加了对参数选取的难度，本文所提控制算法的优势就在于其通过 AST 模型中积分环节进行控制增益的自适应选取，使得控制系统对控制增益的选取不具有依赖性。

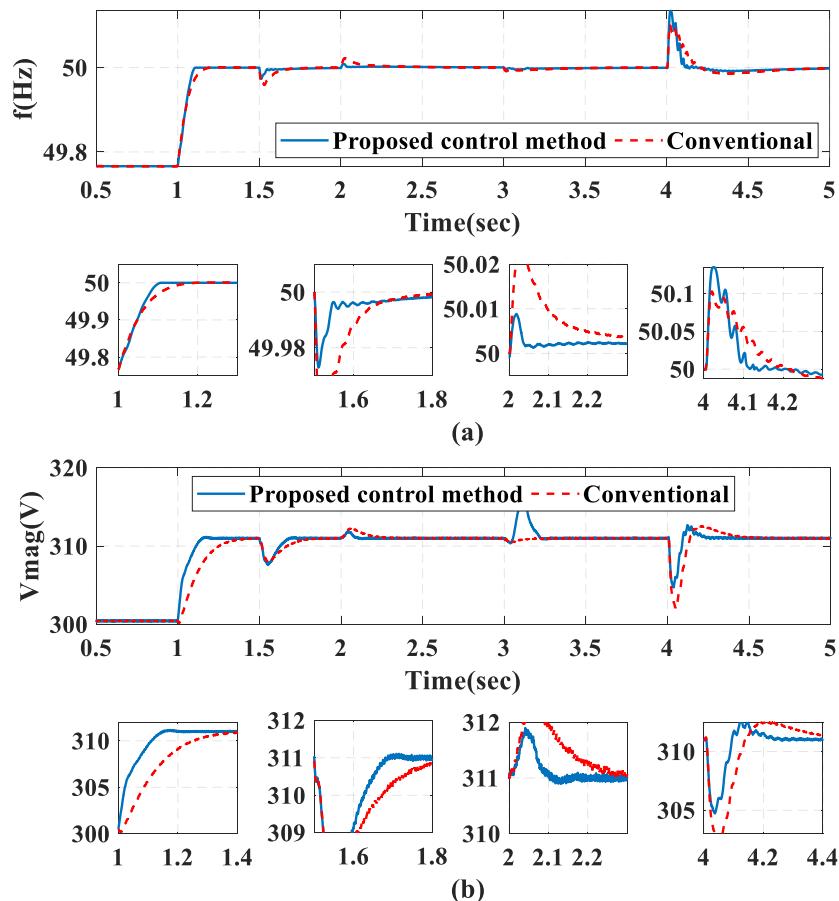


图 3-11 与传统控制方法的对比（以 DG1 为例）：(a) 频率, (b) 电压幅值

3.5.2 中等规模微电网仿真系统

为了验证所提分布式鲁棒控制方法的可扩展性，采用如图 3-12 所示的中等规模微电网（改进 IEEE 37 节点系统^[82]）进行仿真验证，该系统电压等级为 400V，总有功负荷为 244.2kW，总无功负荷为 140.7kVar，仿真系统原始参数可参见本文附录 A。在该系统之上接入 6 个 DG，其接入点如图 3-12 所示，该系统的控制参数见表 3-2。

在 1.5 秒之前，系统处于仿真初始化阶段，所提分布式鲁棒控制方法未启动；1.5 秒之后所提鲁棒控制方法在系统中部署；在这之后，总量为 31.5kW、15.75kVAr 的负荷分别在 2 秒和 2.5 秒在微电网中并入和切除；DG5 分别在 3 秒和 4 秒时离网和并网。

如图 3-14 所示，所提分布式鲁棒控制方法在整个过程中都能保证有功出力的精准分配和电压、频率的快速准确跟踪；同时从图 3-13 中能发现 ESO 良好的观测性能充分保证了控制算法的稳定性和鲁棒性。所以，所提分布式鲁棒控制方法能够应用在更大的微电网结构中，证明了其可扩展性。

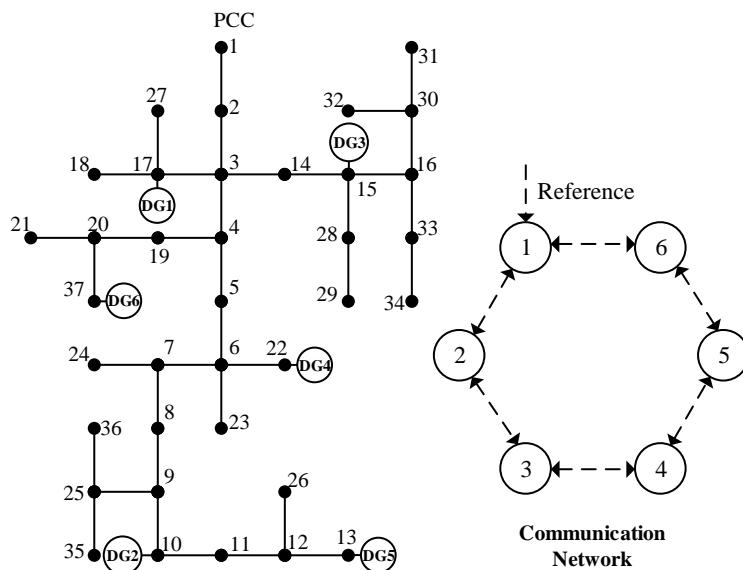
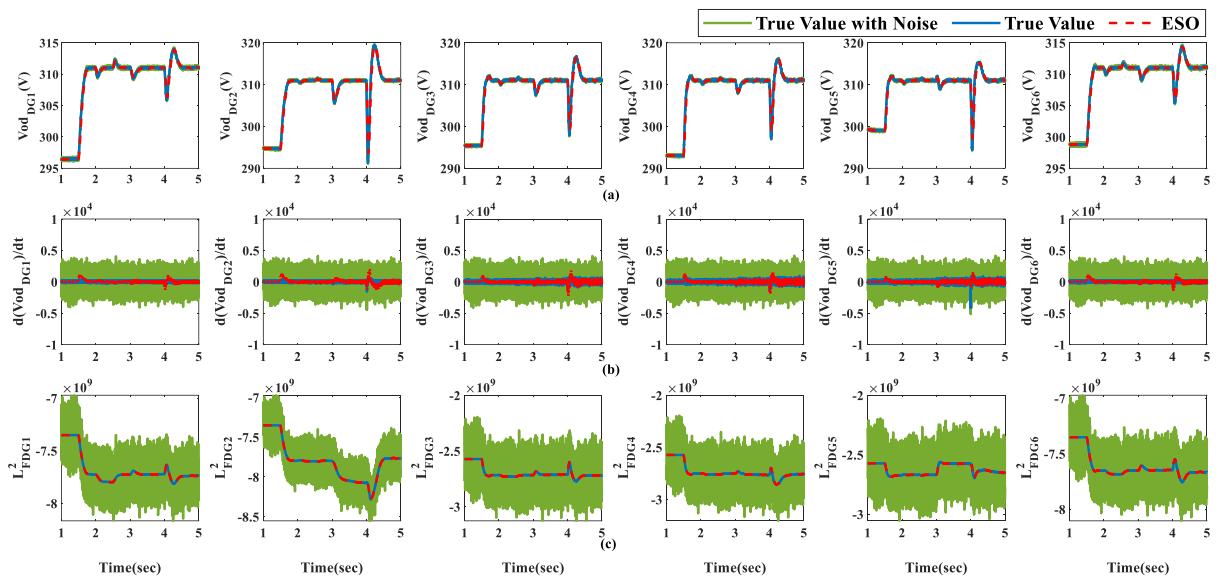
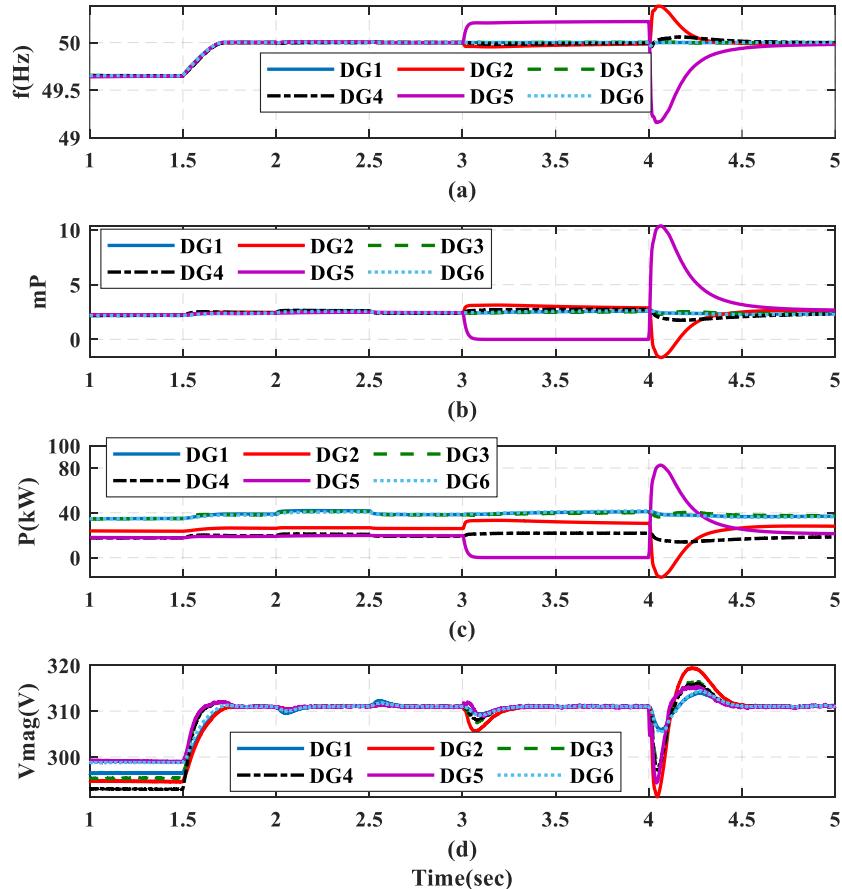


图 3-12 中等规模微电网拓扑结构

表 3-2 中等规模微电网仿真系统参数

| | DG 1 & DG 6 | DG 2 | DG 3 & DG 4 & DG 5 |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| m_P | 6.28×10^{-5} | 9.42×10^{-5} | 12.56×10^{-5} |
| n_Q | 0.5×10^{-3} | 0.75×10^{-3} | 1×10^{-3} |
| R_f | 0.1Ω | 0.1Ω | 0.1Ω |
| L_f | 1.35mH | 1.35mH | 1.35mH |
| C_f | $47\mu\text{F}$ | $47\mu\text{F}$ | $47\mu\text{F}$ |
| DG | R_c | 0.02Ω | 0.03Ω |
| | L_c | 2mH | 2mH |
| | K_{PV} | 0.05 | 0.05 |
| | K_{IV} | 390 | 390 |
| K_{PC} | 10.5 | 10.5 | 15 |
| K_{IC} | 16000 | 16000 | 20000 |

图 3-13 存在不确定性改进中等规模微电网 ESO 的应用效果: (a) v_{odi} , (b) \dot{v}_{odi} , (c) $L_{F_i}^2$ 图 3-14 可扩展性验证: (a) 频率, (b) 有功功率的比例 ($m_{pi}P_i$), (c) 有功输出, (d) 电压幅值

3.6 本章小结

本章针对存在参数不确定的微电网电压和频率的鲁棒控制现实需求, 提出了一种基于 FTSM 的微电网分布式鲁棒控制方法。具有以下特点:

1) 与传统微电网分布式控制不同, 利用含加速收敛因子的 FSTM 模型构建分布式控制模型, 提升了系统的收敛特性, 同时 AST 的应用来求解 FTSM 模型进一步简化了控制参数的选取, 参数自适应选取使得分布式电压控制系统具有更好的收敛特性;

2) 采用有限时间稳定控制律设计微电网分布式频率控制器, 实现系统频率跟踪参考值的同时, 保证了 DG 之间的有功处理分配与其下垂特性相符合。

该方法具有良好的鲁棒性和可扩展性, 更能适应微电网作为 DG 大规模发展背景下新能源消纳的一种重要方法的趋势, 提升微电网运行的鲁棒性。

第四章 有源配电网无功电压鲁棒控制研究

4.1 引言

分布式发电单元大量并网后，除微电网外，有源配电网也是配电网运行的典型方式之一。传统配电系统的不确定性因素主要由负荷随机波动造成，以光伏，风电为主的大批 DG 接入配电系统后，配电网的运行灵活性可以得到提高，但分散化多点接入特点及其出力间歇性和波动性给配电网的运行带来的不稳定性和不确定性，影响配电网安全稳定运行。

所以，本章首先针对分布式光伏出力和负荷的波动特性，建立基于多胞型模型的有源配电网功率特性模型；其次，应用离散系统 H_∞ 鲁棒控制原理设计有源配电网无功电压控制律，实现对配电网中多个分布式光伏的功率控制，来解决有源配电网的电压越限问题；然后，由于配电网系统级控制中不可避免的存在不确定时滞，故采用基于自适应三次指数平滑算法的不确定时滞补偿模型来解决通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性问题。最后，通过算例仿真分析验证了所提有源配电网电压鲁棒控制方法的有效性和适用性。

4.2 计及不确定时滞的配电网鲁棒电压控制系统

对于光伏高渗透率的配电网，由于光伏出力和负荷存在的波动性和不确定性，若不对光伏的出力加以控制，让其运行于最大功率点跟踪模式下，日照条件好时光伏注入电网的实际有功出力较大，可能导致系统电压出现越限，尤其是光伏并网点出现局部过电压。与此同时光伏高渗透接入配电网也会给配电网带来的无功调节能力^[83]，提升配电网控制的灵活性，可以给电网提供无功支撑，优化配电网的电压分布。

本节针对上述问题，考虑到配电网的不确定性，提出了如图 4-1 所示的有源配电网无功电压鲁棒控制框架。主要包括以下 3 个模块：

1) 系统参数不确定处理模块：将负荷和光伏出力的不确定性转化为无功电压灵敏度的变化，基于系统多胞型模型建立考虑系统参数不确定的无功电压控制特性模型，便于无功电压鲁棒控制律的设计；

2) 系统控制律求解模块：以无功电压控制系统的多胞型模型为基础，优化控制系统的 H_∞ 性能指标，通过线性矩阵不等式 (LMI) 求解无功电压控制系统鲁棒控制律，以此精确调节分布式光伏的无功出力，解决配电网的过电压问题；

3) 不确定时滞补偿模块：基于自适应三次指数平滑法设计不确定时滞补偿环节对分布式光伏并网点电压进行预测，得到并网点电压预测值 V_{pred} ，准确的预测到电压越限事件的到来并进行电压控制，以此来消除通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性。

图中 \mathbf{Q} 为分布式光伏的无功出力向量, $\Delta\mathbf{V}$ 为光伏并网点的电压变化向量, \mathbf{V}_{ref} 为控制器设定的电压参考区间, 由于配电网电压受到 DG、外部电网功率变化等多方面的影响, 难以保证其稳定在某一数值不改变, 为防止控制器频繁动作增加配电网运行的不确定性, 故考虑改无功电压控制系统只需将配电网中节点的电压控制在安全运行裕度内。该电压控制系统的基本流程为: 控制系统采集光伏并网点电压信息, 得到并网点电压向量 \mathbf{V} , 通过不确定时滞补偿环节得到电压预测向量 \mathbf{V}_{pred} ; \mathbf{V}_{pred} 与电压基准值 \mathbf{V}_{ref} 比较得到电压偏差向量 $\Delta\mathbf{V}$, 经过无功电压鲁棒控制器得到分布式光伏无功出力指令向量 \mathbf{Q} ; 电压控制系统将光伏无功出力指令 \mathbf{Q} 下发给分布式光伏, 光伏跟踪功率指令, 解决电压越限事件。

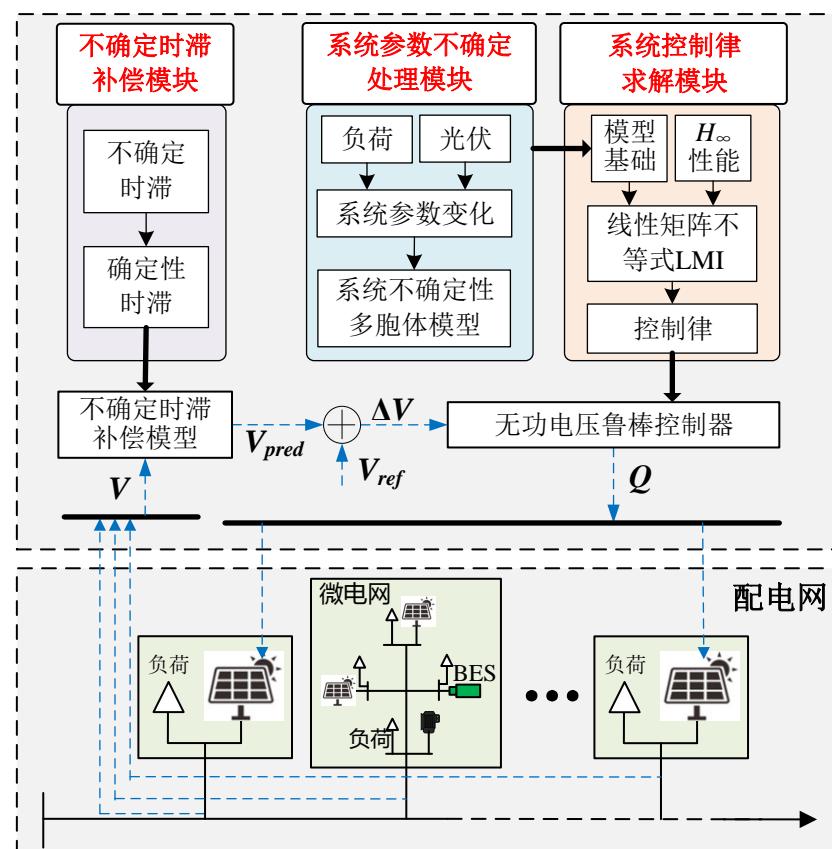


图 4-1 有源配电网无功电压鲁棒控制框架

4.3 有源配电网无功电压鲁棒控制器

有源配电网无功电压鲁棒控制器结构如图 4-2 所示, 控制器的输入向量为采集到的光伏并网点电压偏差向量 $\Delta\mathbf{V}$, 输出向量为光伏逆变器输出的无功变化向量 $\Delta\mathbf{Q}$, 第 k 时刻的光伏无功变化向量 $\Delta\mathbf{Q}_k$, 与第 $k-1$ 时刻的光伏无功出力向量 \mathbf{Q}_{k-1} 相加后得到第 k 时刻的分布式光伏无功出力基准向量 $\mathbf{Q}_{k,ref}$, 控制系统下发功率指令给分布式光伏, 光伏本地控制器进行功率跟踪。

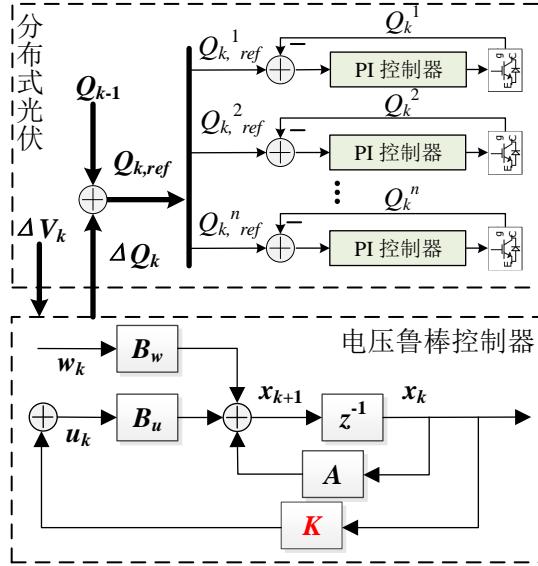


图 4-2 有源配电网无功电压鲁棒控制器结构

图中：

$$\mathbf{u}_k = \Delta \mathbf{Q}_k = [\Delta Q_k^1 \ \Delta Q_k^2 \ \cdots \ \Delta Q_k^n]^T \quad (4.1)$$

$$\mathbf{x}_k = \Delta \mathbf{V}_k = [\Delta V_k^1 \ \Delta V_k^2 \ \cdots \ \Delta V_k^n]^T \quad (4.2)$$

其中 ΔQ_k^i 和 ΔV_k^i 分别表示 k 时刻第 i 台光伏的无功出力变化值和并网点电压与参考值的偏差。

对应图中所示关系，定义系统的控制向量为 $\mathbf{u}=\Delta \mathbf{Q}$ ，状态向量 $\mathbf{x}=\Delta \mathbf{V}$ ，那么无功电压控制系统的动态特性为：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}_u \mathbf{u}_k + \mathbf{B}_w \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k \end{aligned} \quad (4.3)$$

式中： \mathbf{x}_k 为 k 时刻状态量； \mathbf{u}_k 为 k 时刻控制量； \mathbf{z}_k 为 k 时刻控制的输出量； \mathbf{w} 表示影响并网点电压的干扰项，主要表现为负荷和光伏的出力变化带来的电压变化。 \mathbf{B} 的大小由被控节点与无功控制设备之间的无功电压灵敏度^[84]决定， \mathbf{A} 和 \mathbf{C} 均为单位矩阵。

针对上述系统(4.3)，考虑系统的不确定参数设计如图 4-2 中所示的反馈控制律 \mathbf{K} ，使得无功电压鲁棒控制系统快速有效地响应电压越限事件。

4.3.1 考虑不确定性的无功电压鲁棒控制多胞型模型

考虑电力系统中功率和电压之间的非线性使得无功电压灵敏度会随着潮流的变化而变化，即随着负荷和光伏出力的变化，无功电压灵敏度会变化，导致系统(4.3)中的模型会出现误差，对系统的控制效果产生影响。因此利用凸优化理论中的多胞型模型处理系统中的不确定性，以方便采用 LMI 的优化方法求解得到鲁棒控制律。该方法可以保证

配电网在不同运行工况下运行的鲁棒性能。

基于上述的分析，在建模时定义向量 $p=(P_{pv}, P_{load}, Q_{load})$ 约束在多胞型模型内，分别表征光伏有功出力、负荷有功和无功出力的不确定性，在式(4.3)的基础上，形成无功电压控制系统的多胞型模型

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{Ax}_k + \mathbf{B}_u(p)\mathbf{u}_k + \mathbf{B}_w(p)\mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{Cx}_k \end{aligned} \quad (4.4)$$

式中，矩阵 $\mathbf{B}_u(p)$ 、 $\mathbf{B}_w(p)$ 由不确定参数决定，向量 p 表示系统参数的不确定性，向量 p 由 N 个不确定参数 $p=[p_1, \dots, p_N]$ 组成，任一不确定量 p_i 均为有界变量：

$$p_i \in [p_{i,\min}, p_{i,\max}] \quad (4.5)$$

所以 p_i 的取值均在 $L=2^N$ 个顶点 $\{v_1, \dots, v_L\}$ 组成的凸多面体内，顶点 v_i 唯一对应于矩阵 $[\mathbf{B}_u(p_i), \mathbf{B}_w(p_i)]$ ，具体来说，由于无功电压鲁棒控制系统中 $p=(P_{pv}, P_{load}, Q_{load})$ ，即 $N=3$ ，不确定量 P_{pv} 、 P_{load} 、 Q_{load} 在一定的区间内：

$$\begin{cases} P_{pv} \in [P_{pv,\min}, P_{pv,\max}] \\ P_{load} \in [P_{load,\min}, P_{load,\max}] \\ Q_{load} \in [Q_{load,\min}, Q_{load,\max}] \end{cases} \quad (4.6)$$

4.3.2 基于 H_∞ 性能约束的无功电压鲁棒控制律求解

首先考虑系统中的参数确定的情况，对于系统(4.3)，存在一个状态反馈控制律 \mathbf{K} ，使得整个系统能最大程度的降低扰动对系统输出的影响。 H_∞ 范数作为设计鲁棒控制系统中普遍应用的性能指标，对于与模型不确定性有关的控制稳定性问题是行之有效的， H_∞ 范数越小说明控制系统对扰动的抑制能力越强。对于式(4.3)描述的离散系统而言，扰动信号 \mathbf{w} 到输出信号 \mathbf{z} 的传递函数为 $G(z)$ ，相应的范数表示为：

$$\|G(z)\|_\infty = \sup_{\|\mathbf{w}\|_2 \leq 1} \|\mathbf{z}\|_2 \quad (4.7)$$

其中， $\|\cdot\|_\infty$ 和 $\|\cdot\|_2$ 分别表示无穷范数和 2 范数。对给定的标量 $\gamma > 0$ ，如果 $\|G(z)\|_\infty < \gamma$ ，则称系统具有 H_∞ 性能 γ 。

对离散系统，存在一个状态反馈 H_∞ 控制器 ($\mathbf{u}_k = \mathbf{Kx}_k$)，当且仅当一个正定矩阵 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{n^*n}$ 和矩阵 $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^{n^*n}$ ，使得矩阵不等式(4.8)成立。若式(4.8)存在一个可行解 $\mathbf{Y}^*, \mathbf{X}^*$ ，则 $\mathbf{u}_k = \mathbf{Y}^*(\mathbf{X}^*)^{-1}\mathbf{x}_k$ 是离散系统(4.3)的一个状态反馈 H_∞ 控制器^[85]，其中 $\mathbf{K} = \mathbf{YX}^{-1}$ 。通过求解线性矩阵不等式(4.8)可以得到系统状态反馈 γ -最优 H_∞ 控制器，在此基础上可以通过求解式(4.9)的优化问题，来得到系统的最优 H_∞ 控制器。

$$\begin{bmatrix} -X & \mathbf{0} & (AX + B_u Y)^T & Y^T & XC^T \\ \mathbf{0} & -\gamma^2 I & B_w^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ AX + B_u Y & B_w & -X & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ Y & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -I & \mathbf{0} \\ CX & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.8)$$

$$\min \rho$$

$$\text{s.t. (i)} \begin{bmatrix} -X & \mathbf{0} & (AX + B_u Y)^T & Y^T & XC^T \\ \mathbf{0} & -\rho I & B_w^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ AX + B_u Y & B_w & -X & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ Y & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -I & \mathbf{0} \\ CX & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.9)$$

$$\text{(ii)} X > 0$$

式中，参数 $\gamma = \sqrt{\rho}$ 表示该系统的最优 H_∞ 性能。

接下来讨论当系统中出现参数不确定情况时，鲁棒控制律的求解方法。

对于系统(4.4)，通常只需要求解得到鲁棒控制律，使其满足多胞型模型中的所有顶点 $\{v_1, \dots, v_L\}$ 系统的 H_∞ 性能，即只需对 $[B_u(p_i), B_w(p_i)]$ 建立如式(4.9)中(i)式的不等式，联立为式(4.9)中的约束条件，便可解决系统参数不确定情况下的稳定性问题。

4.4 基于自适应三次指数平滑法的不确定时滞补偿方法

由于系统级闭环电压控制依赖实时采样数据，但是系统控制器和采集装置之间、控制器和执行装置之间均通过网络传输信息，受网络承载能力和网络传输机制的影响，不可避免地会产生传输延迟，但是每个周期内控制系统的传输最大延迟时间是有上界的，且一般情况下控制包的闭环延迟小于系统采样周期。因此含网络传输延迟的电压控制具有一定的滞后性，即控制系统从传感器采集到电压越限数据到执行装置完成控制指令的跟踪解决电压越限问题需要经过一段时间，时间长度小于采样周期。

为解决控制滞后性问题，提出基于指数平滑法的不确定时滞补偿模型，并通过自适应平滑参数来提高模型的补偿精度，该方法具有所需数据量少、短期预测较准确等特点，能够实现对电压趋势的短期预测，便于鲁棒电压控制器对电压越限事件的有效响应。

如图 4-3 所示，通信传输延迟 t_{delay} 通常认为小于系统控制周期 T ， τ_{sc}^k 和 τ_{ca}^k 分别表示信息传输过程中从传感器到控制器和从控制器到执行器的延迟。首先，分析不确定时滞对控制系统的影响，假设电压越限事件发生在 t_2 时刻，则如网络数据传输时序图所示：

- 1) 当 k 时刻传感器获得电压越限的信息，那么控制系统在 t_4 时刻才能解决电压越限问题，而配电网在 $t_2 \sim t_4$ 时间段内会存在节点电压不安全运行的状态；
- 2) 当 $k-1$ 时刻预测到电压越限，那么 t_3 时刻电压越限问题得以解决，配电网会在 $t_2 \sim t_3$ 时间段内存在过电压运行的状态；
- 3) 而当 $k-2$ 时刻预测到电压越限， t_1 时刻电压越限问题就能得以解决，无电压越限

事件发生。

所以，基于上述的分析同时为保证预测精度，采用两步电压预测模型：

$$V_{pred|k-2} = \hat{V}_k \quad (4.10)$$

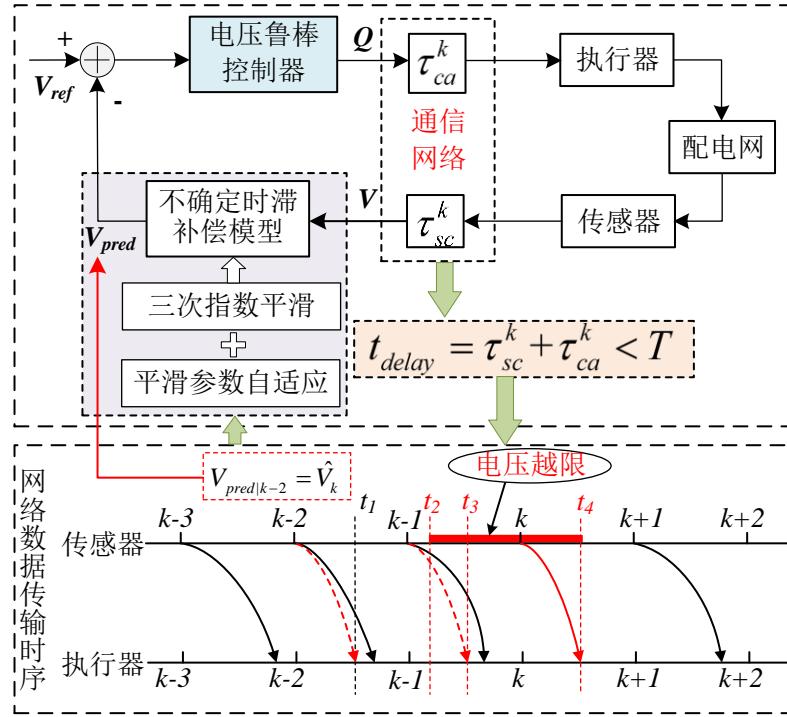


图 4-3 计及不确定时滞的电压控制系统实现示意图

4.4.1 基于三次指数平滑法的电压预测模型

该模型以三次指数平滑法^[86]为基础，电压指数平滑值为

$$\begin{cases} S_k^{(1)} = \alpha V_k + (1-\alpha)S_{k-1}^{(1)} \\ S_k^{(2)} = \alpha S_k^{(1)} + (1-\alpha)S_{k-1}^{(2)} \quad k=2,3,4\cdots \\ S_k^{(3)} = \alpha S_k^{(2)} + (1-\alpha)S_{k-1}^{(3)} \end{cases} \quad (4.11)$$

其中 $S_k^{(1)}$ 、 $S_k^{(2)}$ 、 $S_k^{(3)}$ 表示 k 时刻的一次、二次、三次指数平滑值， V_k 表示 k 时刻的电压采样值， $S_1^{(1)}=S_1^{(2)}=S_1^{(3)}=V_1$ ， α 为平滑参数。基于式(4.11)的电压预测值 V_{pred} 为

$$\begin{cases} V_{pred} = \hat{V}_{k+2} = a_k + b_k \times 2 + \frac{1}{2} c_k \times 2^2 \\ a_k = 3S_k^{(1)} - 3S_k^{(2)} + S_k^{(3)} \\ b_k = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} [(6-5\alpha)S_k^{(1)} - (10-8\alpha)S_k^{(2)} + (4-3\alpha)S_k^{(3)}] \\ c_k = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)^2} (S_k^{(1)} - 2S_k^{(2)} + S_k^{(3)}) \end{cases} \quad (4.12)$$

4.4.2 模型平滑参数的自适应选取方法

在指数平滑预测中，参数的选取尤为重要，直接决定了预测结果的准确性，选取越合理，则预测结果就越精确。预测算法的目标是预测值与实测值间的误差最小，所以通过预测值和实测值之间的误差平方和（SSE）来表征预测效果：

$$\min SSE = \min \sum_{k=1}^N (\hat{V}_k - V_k)^2 \quad (4.13)$$

其中 N 表示模型所用的预测周期数， \hat{V}_k 和 V_k 分别表示 k 时刻电压预测值和实测值。

基于评价指标(4.13)，含自适应平滑参数 α 的电压预测流程具体如下：

- 1) 选取电压时间序列实测值 $\{V_1, V_2 \dots V_N\}$ ，对 α 遍历 $0 \sim 1$ 分别计算式(4.11)和(4.12)得到其电压预测值，即得到时间序列预测值 $\{\hat{V}_1, \hat{V}_2 \dots \hat{V}_N\}$ ；
- 2) 通过计算式(4.13)，得到当 SSE 最小时的 α ，记为最优平滑参数 α_{opt} ；
- 3) 对 $\{V_1, V_2 \dots V_N\}$ 和 α_{opt} 应用电压预测模型(4.11)和(4.12)得到 $N+2$ 时刻的电压预测值 $V_{pred|N+2}$ ；
- 4) 选取电压时间序列实测值 $\{V_2, V_3 \dots V_{N+1}\}$ ，重复步骤 1~步骤 3，并依次类推。

4.5 算例分析

为验证计及不确定时滞的有源配电网无功电压鲁棒控制方法的正确性和有效性，以 PG&E 69 节点的配电网拓扑为例，基于 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型进行验证。仿真平台的硬件环境为 Intel Xeon@2.40GHz CPU，内存为 32GB，开发平台的操作系统为 Windows10 64bit，MATLAB 版本为 R2018b。

4.5.1 仿真系统

4.5.1.1 仿真系统参数

基于 PG&E 69 节点的配电网拓扑，并在拓扑网络中接入光伏，设计如图 4-4 所示典型的有源配电网结构。详细线路和负荷参数见附录 B。节点 16、27、34、39、41、44、50、54、58 和 69 处接入分布式光伏，光伏接入总容量分别为 600、800、500、600、400、500、800、600、300 和 500kW。默认配电网中节点电压上下限为 $V_{min}=0.95p.u.$ ， $V_{max}=1.05p.u.$ 。

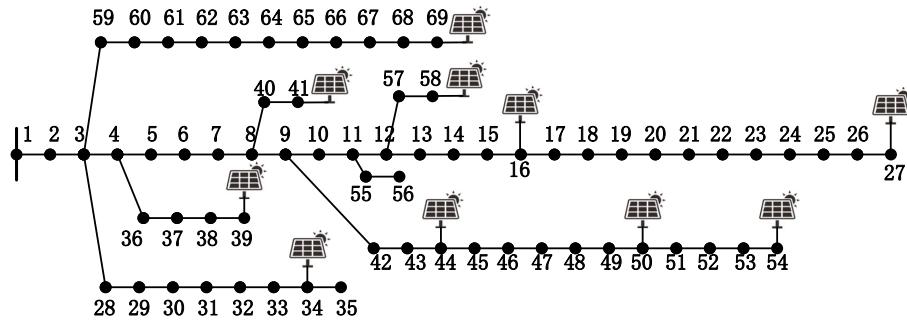


图 4-4 含高渗透分布式光伏的配电网仿真拓扑

4.5.1.2 无功电压鲁棒控制律设计

文献[87]中描述了典型负荷和光伏的出力变化曲线，本仿真算例选取负荷有功出力的变化范围为 0.5~1p.u.，负荷无功出力的变化范围为 0.7~1p.u.，光伏有功出力变化范围为 0~1p.u.，根据负荷和光伏的出力变化建立控制系统的多胞型模。

将 \mathbf{B}_u 和 \mathbf{B}_w 代入式(4.9)，用 Matlab 中 LMI 工具箱求解，得到相应的闭环控制矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -0.750 & 0.393 & -0.000 & 0.001 & -0.018 & -0.003 & 0.070 & 0.002 & 0.153 & -0.000 \\ 0.346 & -0.474 & 0.000 & -0.001 & 0.026 & 0.004 & -0.040 & 0.034 & 0.052 & 0.000 \\ -0.001 & 0.001 & -0.608 & 0.001 & 0.000 & 0.000 & 0.001 & 0.000 & -0.001 & 0.001 \\ 0.002 & -0.002 & 0.001 & -0.651 & 0.002 & 0.002 & 0.001 & -0.000 & 0.002 & 0.001 \\ 0.004 & 0.008 & 0.000 & 0.002 & -0.945 & 0.304 & 0.014 & 0.029 & 0.179 & 0.000 \\ 0.018 & -0.018 & 0.000 & 0.002 & 0.312 & -0.934 & 0.141 & 0.069 & 0.165 & 0.000 \\ 0.089 & -0.063 & 0.001 & 0.001 & 0.018 & 0.146 & -0.711 & 0.355 & 0.069 & 0.001 \\ 0.016 & -0.000 & 0.001 & -0.000 & 0.025 & 0.067 & 0.364 & -0.543 & 0.033 & 0.001 \\ 0.179 & 0.058 & -0.001 & 0.002 & 0.177 & 0.158 & 0.052 & 0.002 & -0.779 & -0.000 \\ -0.000 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.000 & 0.000 & 0.003 & 0.003 & -0.000 & -0.489 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

对应的控制指令为

$$\Delta Q = \mathbf{K} \Delta V \quad (4.15)$$

即：

$$\begin{aligned} & [\Delta Q_{16} \quad \Delta Q_{27} \quad \Delta Q_{34} \quad \Delta Q_{39} \quad \Delta Q_{41} \quad \Delta Q_{44} \quad \Delta Q_{50} \quad \Delta Q_{54} \quad \Delta Q_{58} \quad \Delta Q_{69}]^T \\ & = \mathbf{K} [\Delta V_{16} \quad \Delta V_{27} \quad \Delta V_{34} \quad \Delta V_{39} \quad \Delta V_{41} \quad \Delta V_{44} \quad \Delta V_{50} \quad \Delta V_{54} \quad \Delta V_{58} \quad \Delta V_{69}]^T \end{aligned} \quad (4.16)$$

式中 ΔV_i 表示光伏并网点节点 i 的电压偏差值， ΔQ_i 表示节点 i 光伏的无功出力变化值。

4.5.2 仿真结果分析

选取该具有代表性的运行工况进行仿真验证，模拟天气由阴转晴，光伏有功出力迅速增加，光伏有功出力和负荷变化如图 4-5 和图 4-6 所示。若此时线路负载较轻则可能引起线路电压抬升甚至越限。这种情况下，传统配电网通过投入并联电抗器等无功调节设备来调节馈线电压，无法达到对电压越限的快速抑制。

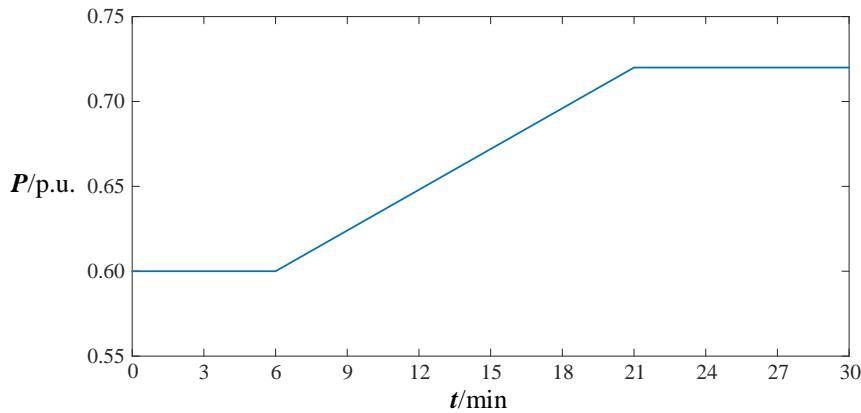


图 4-5 光伏有功出力变化曲线

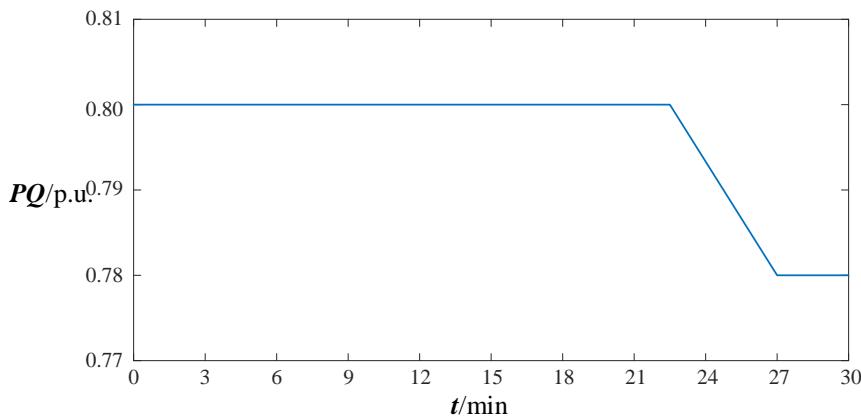


图 4-6 负荷变化曲线

4.5.2.1 有源配电网无功电压鲁棒控制器控制效果分析

1) 电压控制总体效果分析

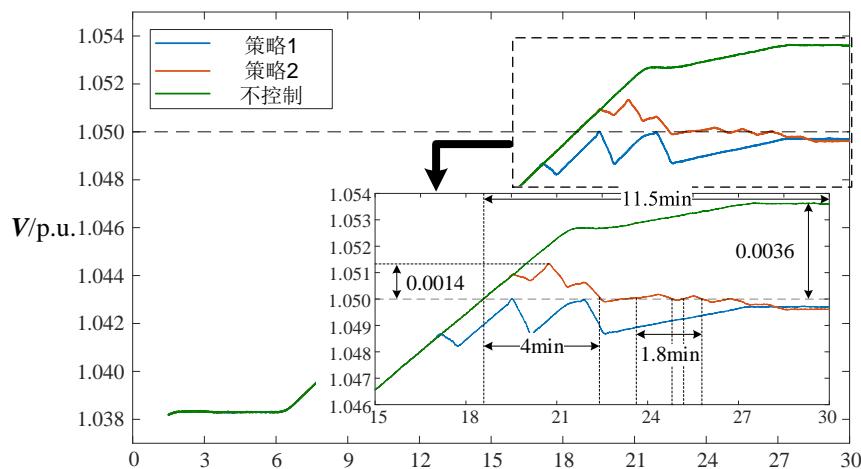


图 4-7 不同控制策略下节点 27 电压变化曲线

分别应用计及不确定时滞的有源配电网无功电压鲁棒控制（策略 1）和文献[50]所述分布式光伏电压控制策略（策略 2）时，节点 27 电压变化对比如图 4-7 所示，其中策略 1 的控制周期 T 为 1.2 分钟。

表 4-1 有源配电网电压鲁棒控制效果分析

| 控制策略 | 电压最大越限值/p.u. | 电压越限时长/min |
|------|--------------|------------|
| 策略 1 | 0 | 0 |
| 策略 2 | 0.0014 | 5.8 |
| 不控制 | 0.0036 | 11.5 |

随着分布式光伏有功出力的增加，18.5 分钟时节点电压越限事件发生，策略 2 控制系统得到电压越限信息后，调节光伏无功出力，但由于其控制策略仅针对当前时刻得到的电压越限信息进行电压控制，不考虑系统不确定时滞和光伏有功出力的持续上升带来的持续性电压越限出现的可能性，控制滞后性问题突出，电压越限持续了 4 分钟才得以解决，随后负荷水平下降带来的电压越限，该控制滞后性问题仍然存在；而当采用控制策略 1 时，由于考虑了控制系统的不确定性时滞问题，电压越限问题得到解决且电压一直低于 1.05p.u.。控制效果对比如表 4-1 所示，所提有源配电网电压鲁棒控制能够解决分布式光伏有功出力的持续上升带来的电压越限问题，避免电压越限事件。

2) 多胞型模型验证

如图 4-8 所示，当考虑系统参数不确定的无功电压控制系统多胞型模型设计无功电压鲁棒控制器时，节点 27 电压变化如红色曲线所示，其他曲线均为只考虑多胞型模型中单个胞型的情况设计鲁棒控制器。

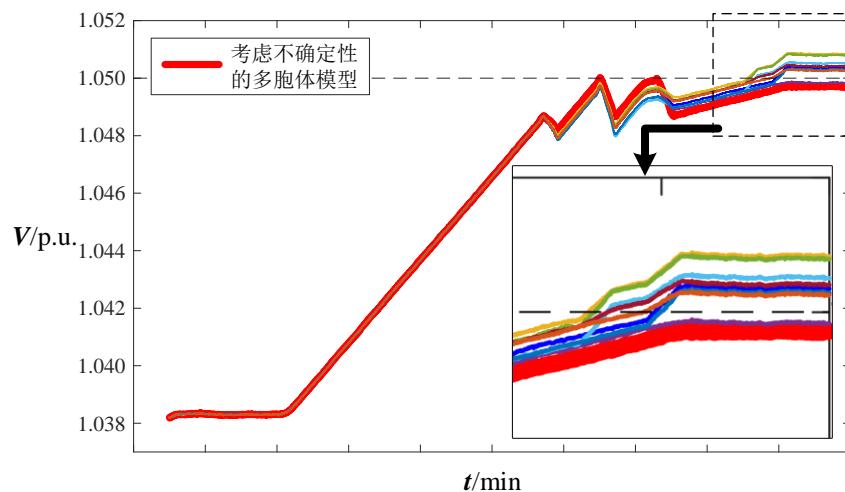


图 4-8 单/多胞型模型的节点 27 电压变化曲线

在光伏有功出力增加导致电压越限时，利用多胞型模型设计鲁棒控制器能较好的解决电压越限问题，而只考虑单胞型模型设计鲁棒电压控制器的情况下，由于未考虑电力系统中的非线性带来无功电压灵敏度随着潮流的变化而改变，导致光伏无功出力存在一定的误差，当节点 27 接入的光伏无功出力达到其上限时，电压越限问题仍未解决。

4.5.2.2 不确定时滞补偿模型效果分析

1) 不确定时滞补偿效果分析

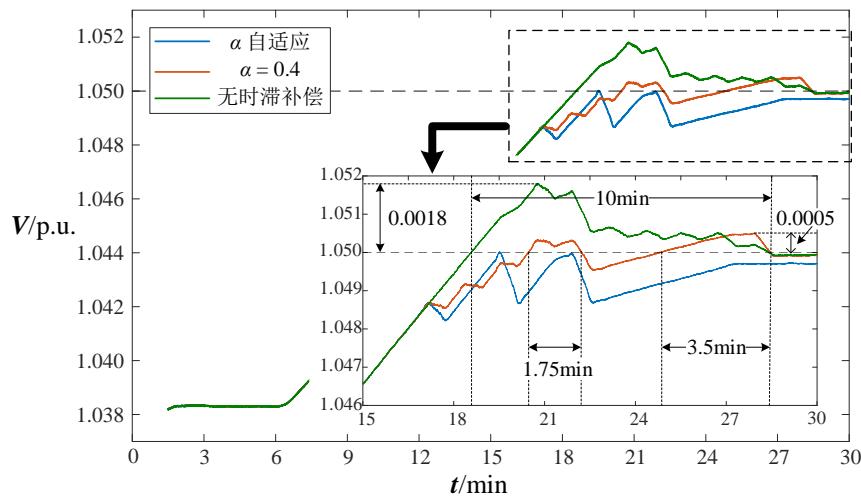


图 4-9 不同时滞补偿情况下的节点 27 电压变化曲线

选取 $t_{delay}=1/4T$, 在无不确定时滞补偿、固定平滑参数补偿和自适应平滑参数补偿 3 种情况下, 节点 27 电压变化曲线如图 4-9 所示, 当采用无不确定时滞补偿的电压鲁棒控制时, 18.5 分钟时电压越上限触发电压鲁棒控制, 由于存在通信延迟, 光伏跟随无功指令滞后, 随着 22.5 分钟负荷水平的下降, 电压继续上升, 直到 28.5 分钟时电压越限才得到解决; 当考虑不确定时滞、设计平滑参数 $\alpha=0.4$ 的电压控制补偿模型时, 虽然控制系统能预判到电压越限事件, 但由于平滑参数不准确导致无法准确预测电压变化, 在 20.5 分钟和 25 分钟分别出现电压越限事件; 当采用本文所提出的自适应平滑参数的电压补偿模型时, 由于对电压变化的准确预判, 未发生电压越限, 具体平滑参数 α 的取值见表 4-3。控制效果对比如表 4-2 所示, 所提自适应平滑参数的不确定时滞补偿方法能够准确预测电压变化, 响应电压越限。此时节点 27 光伏无功变化曲线见图 4-10。

表 4-2 不同时滞补偿情况下控制效果

| 时滞补偿策略 | 电压最大越限值/p.u. | 电压越限时长/min |
|--------------|--------------|------------|
| α 自适应 | 0 | 0 |
| $\alpha=0.4$ | 0.0005 | 5.25 |
| 无时滞补偿 | 0.0018 | 10 |

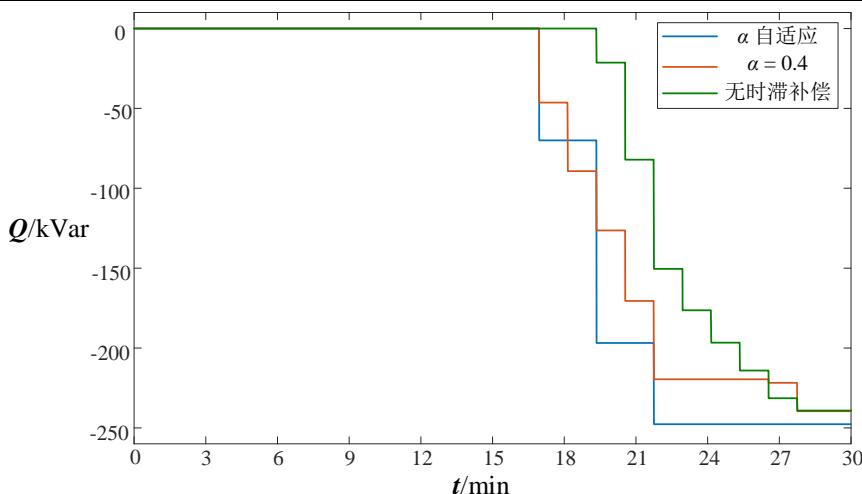


图 4-10 不同时滞补偿情况下的节点 27 光伏无功变化曲线

表 4-3 不同时滞情况下平滑参数 α 取值

| 时刻/min | $t_{\text{delay}}=1/8T$ | | $t_{\text{delay}}=1/4T$ | | $t_{\text{delay}}=7/8T$ | |
|--------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | 节点 27 电压采样值/p.u. | 平滑参数 α | 节点 27 电压采样值/p.u. | 平滑参数 α | 节点 27 电压采样值/p.u. | 平滑参数 α |
| 0 | 1.03807 | | 1.03807 | | 1.03807 | |
| 1.2 | 1.03807 | | 1.03807 | | 1.03807 | |
| 2.4 | 1.03834 | | 1.03831 | | 1.03833 | |
| 3.6 | 1.03830 | | 1.03830 | | 1.03831 | |
| 4.8 | 1.03830 | | 1.03830 | | 1.03830 | |
| 6 | 1.03829 | | 1.03832 | | 1.03830 | |
| 7.2 | 1.03902 | | 1.03893 | | 1.03878 | |
| 8.4 | 1.04016 | | 1.04008 | | 1.03994 | |
| 9.6 | 1.04133 | | 1.04122 | | 1.04107 | |
| 10.8 | 1.04248 | | 1.04238 | | 1.04224 | |
| 12 | 1.04361 | 0.994 | 1.04354 | 0.999 | 1.04340 | 0.997 |
| 13.2 | 1.04477 | 0.999 | 1.04468 | 0.999 | 1.04455 | 0.999 |
| 14.4 | 1.04593 | 0.999 | 1.04582 | 0.999 | 1.04568 | 0.999 |
| 15.6 | 1.04708 | 0.999 | 1.04700 | 0.999 | 1.04684 | 0.999 |
| 16.8 | 1.04824 | 0.999 | 1.04816 | 0.999 | 1.04801 | 0.999 |
| 18 | 1.04833 | 0.78 | 1.04830 | 0.763 | 1.04921 | 0.763 |
| 19.2 | 1.04949 | 0.772 | 1.04948 | 0.785 | 1.04948 | 0.78 |
| 20.4 | 1.04886 | 0.742 | 1.04875 | 0.752 | 1.04872 | 0.77 |
| 21.6 | 1.04989 | 0.694 | 1.04984 | 0.693 | 1.04985 | 0.786 |
| 22.8 | 1.04874 | 0.658 | 1.04870 | 0.647 | 1.05008 | 0.54 |
| 24 | 1.04899 | 0.58 | 1.04897 | 0.573 | 1.04895 | 0.483 |
| 25.2 | 1.04925 | 0.467 | 1.04923 | 0.464 | 1.04927 | 0.157 |
| 26.4 | 1.04949 | 0.157 | 1.04947 | 0.161 | 1.04950 | 0.136 |
| 27.6 | 1.04970 | 0.143 | 1.04970 | 0.151 | 1.04976 | 0.124 |
| 28.8 | 1.04970 | 0.144 | 1.04971 | 0.153 | 1.04982 | 0.066 |
| 30 | 1.04970 | | 1.04969 | | 1.04983 | |

2) 电压预测模型验证

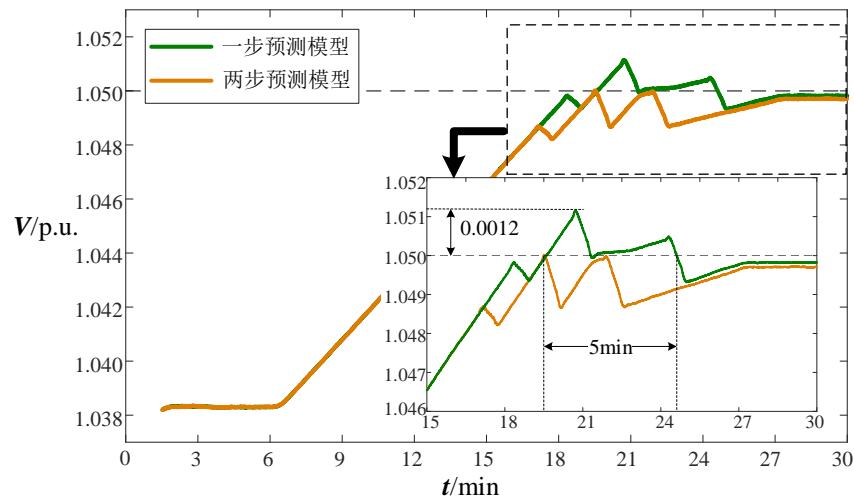


图 4-11 不同预测模型下节点 27 电压变化曲线

选取 $t_{delay}=1/4T$, 分别采用一步和两步电压预测模型进行电压控制, 节点 27 电压变化曲线如图 4-11 所示。当采用一步电压预测模型时, 由于含通信延迟的电压控制具有一定的滞后性, 控制系统不能抑制光伏出力持续上升带来的电压越限, 电压越限时长为 5 分钟, 越限的最大值为 0.0012p.u.; 当采用两步电压预测模型时, 电压越限问题得到解决, 无电压越限事件发生, 说明所提两步电压预测模型的必要性和有效性。

3) 不同时滞情况下控制系统的鲁棒性分析

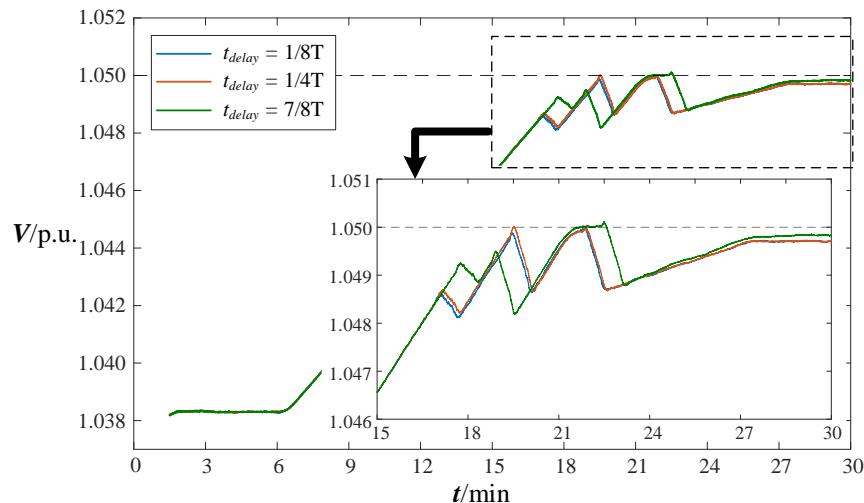


图 4-12 不同时滞情况下节点 27 电压变化曲线

在不同的时滞条件下, 节点 27 的电压变化曲线如图 4-12 所示, 计及不确定时滞的有源配电网无功电压鲁棒控制系统均能有效响应电压越限事件, 快速解决过电压问题, 电压处于安全运行裕度内, 说明该控制系统对于不同的时滞具有鲁棒性。节点 27 光伏无功变化如图 4-13 所示, 平滑参数 α 的取值见表 4-3。

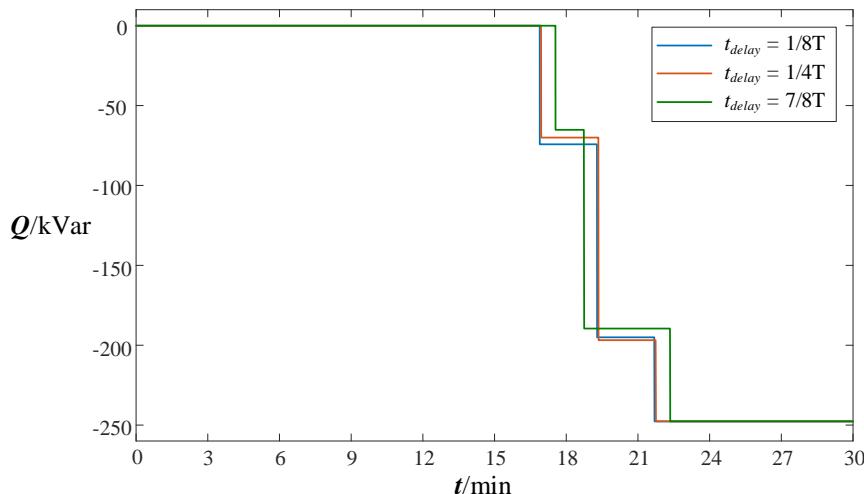


图 4-13 不同时滞补偿情况下的节点 27 光伏无功变化曲线

4.6 本章小结

本文为分布式光伏高渗透接入后配电网的控制难题提供了一种有效的解决方案。具有以下特点:

- 1) 计及光伏和负荷的不确定性, 利用凸优化理论中的多胞模型建立系统模型, 以方便采用 LMI 的优化方法求解控制参数, 保证系统在不同运行状况下的稳定性、以及最优的抗干扰能力;
- 2) 基于三次指数平滑法的两步电压补偿模型, 对并网点电压波动趋势进行预测, 来解决通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性问题;
- 3) 系统级电压鲁棒控制能够考虑配电网区域光伏多点并网的情况对光伏并网点电压进行集中式控制, 对各并网点电压越限均有较好的抑制作用。

该方法与现有 AVC 系统的电压优化与控制策略配合使得配电网电压控制更加全面, 更能适应分布式光伏高渗透接入配电网的趋势, 提升配电网电压控制的鲁棒性。

第五章 总结与展望

5.1 总结

鲁棒性是电网控制系统的核心要素，本文全面分析了有源配电网鲁棒控制的关键技术，结合配电网不同运行状态及其需求，开展了针对含 DG 高渗透接入配电网后系统动态特性复杂、鲁棒性差等问题开展了一系列研究工作。本文首先回顾了现有微电网和配电网系统级控制领域的相关研究成果，然后在有源配电网架构下，提出了相应的建模方法和控制器设计方法，进一步提升了有源配电网控制系统的鲁棒性能和抗干扰性能，提高了配电网运行的经济性及其供电可靠性。

本文的主要工作和成果总结如下：

- 1) 建立了含功率控制环的 DG 大信号模型，由于此模型的非线性会给控制器设计带来困难，采用 Lie 导数对该大信号模型进行状态反馈线性化处理，得到保留模型输入输出特性的线性模型；考虑到模型参数不确定性和测量噪声会给简化线性模型带来误差，易对整个控制系统的效果产生不良影响，引入扩张状态来表征系统非线性项和不确定性的集合，设计面向微电网控制的 DG 扩张状态观测器，简化了测量系统的部署，便于 DG 信息的精确获取；并验证所提建模和观测器设计方法的正确性和有效性。
- 2) 介绍了无向图理论，指出基于无向图理论的稀疏通信网络是解决 DG 接入电网后控制策略部署的重要手段；不同于现有的电压控制方法，采用 FTSM 模型构建微电网分布式电压鲁棒控制模型，保证了电压控制更快的收敛特性，同时利用 AST 理论求解 FTSM 模型，在简化参数选取的同时，进一步改善了电压控制系统的收敛特性；同时设计微电网分布式频率控制，在保证微电网频率稳定的同时，实现了 DG 有功出力的合理分配；并通过多组仿真算例验证所提方法的有效性、鲁棒性和可扩展性。
- 3) 针对分布式光伏出力和负荷的波动特性，建立基于多胞型模型的有源配电网功率特性模型；应用离散系统 H_∞ 鲁棒控制原理设计有源配电网无功电压控制律，实现对配电网中多个分布式光伏的功率控制，来解决有源配电网的电压越限问题；由于配电网系统级控制中不可避免的存在不确定时滞，故采用基于自适应三次指数平滑算法的不确定时滞补偿模型来解决通信延迟和闭环控制带来的控制滞后性问题；并通过算例仿真分析验证了所提有源配电网电压鲁棒控制方法的有效性和适用性。

5.2 展望

本文系统研究了有源配电网的鲁棒控制方法，并取得了一些具有启发意义的结果。但是，由于时间有限以及作者水平的不足，文中工作难免存在一些不足和一定的局限性，未能全面的、系统的阐述整个智能配电网控制体系架构，有必要进行进一步的讨论和说明：

1) 本文虽然设计了基于扩张观测器的 DG 状态观测器来降低测量噪声和参数不确定性给测量系统带来的负面影响，但是对于观测器增益的选取并未做详细的讨论，因此有必要结合相应的模型进一步讨论参数选取对观测系统收敛性和观测误差的影响。

2) 本文虽然通过设计微电网分布式电压和频率控制系统实现了微电网的安全稳定运行，但是不可否认的是分布式稀疏通信网络中存在的通信延迟会影响系统的收敛特性，因此有必要进一步定量的研究该通信延迟对系统收敛特性的影响，分析系统的所能接受的最大通信延迟。

3) 本文所设计的有源配电网无功电压控制器考虑了不确定时滞的影响给闭环控制系统带来的影响，但并未全面分析分布式光伏功率跟踪控制的动态性能和配电网电压控制动态性能的耦合特性，因此有必要在系统模型中考虑能反映其功率跟踪动态性能的状态空间方程，研究计及光伏逆变器控制动态性能的有源配电网电压控制，进一步提高控制系统的动态性能；另外本文方法并未全面考虑通信失败对控制指令执行结果的影响，今后可针对通信状况对控制系统容错性的影响进行研究，研究应对复杂通信状况的光伏高渗透配电网电压鲁棒控制方法，进一步提高所提策略在实际工程应用中的通用性和鲁棒性。

致 谢

时光荏苒，三年的硕士生涯即将结束，回望过去三年，感慨良多。生活总是欢笑与忧愁并存，汗水和泪水交织，而它带给我的都是幸福的回忆。在三年的科研学习中，我不断磨练自己的技能，相信正是有了这段青春岁月，我未来的学术生涯会更加精彩。

在这里，我要衷心感谢陪伴我度过硕士生涯的每一位老师和同学，正是你们的陪伴和帮助，我能克服重重困难，正是你们的悉心指导，是我受益良多。

首先感谢我的导师窦晓波教授，本文实在窦老师的悉心指导下完成的。从文献的收集、框架的设计、结构的布局到最终的论文定稿都有他的细心指导，没有窦老师的辛勤栽培、孜孜教诲就没有我论文的顺利完成，老师严谨求实的治学态度，认真严谨的敬业精神时刻激励着我。由衷感谢三年来导师窦晓波教授对我的关心和指导。

感谢课题组吴在军教授对我的关心与帮助，三年的研究生生涯中，与吴老师的沟通交流给我了很多科研上的启发。同样十分感谢课题组的全相军老师和胡秦然老师，两位年轻的老师给我的科研道路提供很多宝贵意见，让我的科研之路更加的宽广而顺利。

感谢课题组已毕业的师兄师姐，你们的帮助和指导让我在三年研究生生涯中少走了很多弯路。感谢课题组的师弟师妹们给实验室带来的快乐。还要感谢各位同门，无论是科研、娱乐还是生活的点点滴滴，都将成为我人生中一段美好的回忆。

感谢实验室能够让我有机会参加到国家重点研发计划的研究工作中，在国家重点研发项目“分布式可再生能源发电集群灵活并网集成关键技术及示范”（项目编号：2016YFB0900400, 2016YFB09004003）中能够充分锻炼我的能力，让我在今后的科研学习生活中更加得心应手。

感谢朝夕相处的舍友邵伟，吴杰，李亚州，感谢你们对我生活学习上的帮助，也祝愿你们能前程似锦，一帆风顺。

感谢163班的全体同学陪我一起走过这段人生难忘的历程！

还要感谢东南大学对我的培养。东南大学人才辈出，学习氛围浓厚，三年来竞争与合作共存的学习生活使我养成勤学认真的态度，值此即将别离之际，由衷的感谢学校及学院老师对我们的教导与培养。

感谢父母一直以来的关心和鼓励，朋友长期以来给予的支持和帮助，正是父母和朋友的支持、理解和鼓励，才让我具有克服一切困难和挫折的勇气和信心。

最后，我要向百忙之中参与审阅、评议本论文各位老师、向参与本人论文答辩的各位老师表示由衷的感谢！

参考文献

- [1] World Energy Outlook 2013, IEA, Paris, France, Tech. Rep., 2013. [OL]. Available: <http://www.iea.org>
- [2] Cecati C , Citro C , Piccolo A , et al. Smart Operation of Wind Turbines and Diesel Generators According to Economic Criteria[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10):4514-4525.
- [3] Liserre M , Sauter T , Hung J Y . Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1):18-37.
- [4] Spagnuolo G , Petrone G , Araujo S V , et al. Renewable Energy Operation and Conversion Schemes: A Summary of Discussions During the Seminar on Renewable Energy Systems[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1):38-51.
- [5] Transmission O O E. Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years[J]. 2003.
- [6] Olivares D E, Mehrizi-Sani A, Etemadi A H, et al. Trends in Microgrid Control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4):1905-1919.
- [7] Lasseter, R. H . Smart Distribution: Coupled Microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6):1074-1082.
- [8] Vinet L , Zhedanov A . A "missing" family of classical orthogonal polynomials[J]. J. Phys. A Math. Theor., 2010, 44(8):085201.
- [9] Mehrizi-Sani A, Iravani R . Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4):1883-1891.
- [10] Guerrero J M , Vasquez J C , Matas J , et al. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):158-172.
- [11] Díaz González, Domingo Guzmán, González Morán, Cristina. Scheduling of Droop Coefficients for Frequency and Voltage Regulation in Isolated Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):489-496.
- [12] Divshali P H , Alimardani A , Hosseinian S H , et al. Decentralized cooperative control strategy of microsources for stabilizing autonomous VSC-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1949-1959.
- [13] Bidram A , Davoudi A . Hierarchical Structure of Microgrids Control System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1963-1976.
- [14] Bidram A , Davoudi A , Lewis F L , et al. Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3462-3470.
- [15] Zhong Q C . Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel.[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4):1281-1290.
- [16] Mahmood H , Michaelson D , Jiang J . Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3):1605-1617.
- [17] Wu X , Shen C , Iravani R . A Distributed, Cooperative Frequency and Voltage Control for Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(4):2764-2776.
- [18] Lu X , Yu X , Lai J , et al. A Novel Distributed Secondary Coordination Control Approach for Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(4):2726-2740.
- [19] Antoniadou-Plytaria K E , Kouveliotis-Lysikatos I N , Georgilakis P S , et al. Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6):2999–3008.
- [20] Pilloni A, Pisano A, Usai E. Robust Finite Time Frequency and Voltage Restoration of Inverter-based Microgrids via Sliding Mode Cooperative Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1):907–917.
- [21] Meng C, Xiao X, Guerrero J M. Secondary Restoration Control of Islanded Microgrids With Decentralized Event-triggered Strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9):3870-3880.

- [22] Bidram A , Davoudi A , Lewis F L , et al. Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2013, 7(8):822-831.
- [23] Banadaki A D, Mohammadi F D, Feliachi A. State Space Modeling of Inverter Based Microgrids Considering Distributed Secondary Voltage Control[C]. 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017. 1–6.
- [24] Zuo S , Davoudi A , Song Y , et al. Distributed Finite-time Voltage and Frequency Restoration in Islanded AC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10):5988–5997.
- [25] Islam S, Liu P , El Saddik A. Distributed robust adaptive finite-time voltage control for microgrids with uncertainty[C]. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017. 2200–2202.
- [26] Mahdian Dehkordi N , Sadati N , Hamzeh M . Distributed Robust Finite-Time Secondary Voltage and Frequency Control of Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3648–3659.
- [27] Zhao L , Yu J , Lin C , et al. Adaptive Neural Consensus Tracking for Nonlinear Multiagent Systems Using Finite-Time Command Filtered Backstepping[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017:1-10.
- [28] Wang Y , Song Y , Hill D J , et al. Prescribed-Time Consensus and Containment Control of Networked Multiagent Systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(4):1138-1147.
- [29] Tian B , Lu H , Zuo Z , et al. Fixed-Time Leader-Follower Output Feedback Consensus for Second-Order Multiagent Systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(4):1545-1550.
- [30] Khoo S , Xie L , Man Z . Robust Finite-Time Consensus Tracking Algorithm for Multirobot Systems[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, 14(2):219-228.
- [31] Antoniadou-Plytaria K E , Kouveliotis-Lysikatos I N , Georgilakis P S , et al. Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6):2999-3008.
- [32] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, et al. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1):2-14.
- [33] Schonardie M F, Martins D C. Application of the dq0 transformation in the three-phase grid-connected PV systems with active and reactive power control[C]// IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2008. 18-23.
- [34] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等.基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J].电力系统自动化, 2014, 38(15):58-64.
- [35] Novalio Daratha, Biswarup Das, Jaydev Sharma. Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):289-299.
- [36] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等.单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J].电力系统自动化, 2016, 40(13):13-18.
- [37] 董雷, 田爱忠, 于汀, 等.基于混合整数半定规划的含 DG 配电网无功优化[J].电力系统自动化, 2015, 39(21):66-72.
- [38] Bonfiglio A, Brignone M, et al. Optimal control and operation of grid connected photovoltaic production units for voltage support in medium voltage networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1):254-263.
- [39] Mohammadhafez B, Nikolaos G. Decentralized stochastic optimal power flow in radial networks with distributed generation[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2017, 8(2):787-801.
- [40] 周玮, 胡姝博, 孙辉, 等.考虑大规模风电并网的电力系统区间非线性经济调度研究[J].中国电机工程学报, 2017, 37(2):557-562.
- [41] 王守相, 王栋, 韩亮.考虑不确定性的微电网日前经济优化调度区间线性规划方法[J].电力系统自动化, 2014, 38(24):5-11.
- [42] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等.基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行 [J].中国电机工程学报, 2014, 34(16):2576-2583.

-
- [43] 刘斌, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19):40-47.
- [44] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功-无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9):184-191.
- [45] Hongjun Gao, Junyong Liu, et al. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems[J]. IEEE transactions on Smart Grid, 2017, 9(5):4436-4447.
- [46] Sansawatt T, O'Donnell J, Ochoa L F, et al. Decentralised voltage control for active Distribution Networks[C]// Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2010: 1-5.
- [47] Ali Mehrizi-Sani, Reza Iravani. Online set point adjustment for trajectory shaping in microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 216-223.
- [48] Ali Mehrizi-Sani, Reza Iravani. Online set point modulation to enhance microgrid dynamic response: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2167-2174.
- [49] Moling G A, Mastromauro R A, Liserre M. A combined centralized/decentralized voltage regulation method for PV inverters in LV distribution networks[C]//IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA: 5p.
- [50] 肖传亮, 赵波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 147-155.
- [51] 李鹏, 于航, 夏曼, 等. 分布式光伏集群分层多模式无功控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3038-3044.
- [52] Balram P, Carlson O, Le T. Demonstration of Voltage Control in a Real Distribution System using Model Predictive Control[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(16):3922-3929.
- [53] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
- [54] LI P, Wu Z, Wang Y, et al. An adaptive robust optimal reactive power dispatch method in unbalanced distribution networks with high penetration of distributed generation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1382-1389.
- [55] Zheng W, Wu W, Zhang B, et al. Robust reactive power optimisation and voltage control method for active distribution networks via dual time-scale coordination[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(6): 1461-1471.
- [56] 王永杰, 吴文传, 张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 138-144.
- [57] Christakou K, Paolone M, Abur A. Voltage Control in Active Distribution Networks Under Uncertainty in the System Model: A Robust Optimization Approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):5631-5642.
- [58] 赵洪山, 兰晓明, 王颖, 等. 基于平衡 Gramian 的电力系统电压预测控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6038-6048.
- [59] 盛戈皞, 江秀臣, 曾奕. 考虑网络传输延迟的二级电压控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 30-34.
- [60] 盛戈皞, 刘亚东, 江秀臣. 具有鲁棒容错特性的网络化二级电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 43-48.
- [61] 姚伟, 文劲宇, 孙海顺, 等. 考虑通信延迟的分散网络化预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 84-92.
- [62] Gu W, Lou G, Tan W, et al. A Nonlinear State Estimator-Based Decentralized Secondary Voltage Control Scheme for Autonomous Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4794-4804.

- [63] Kamel R M , Chaouachi A , Nagasaka K . Three Control Strategies to Improve the Microgrid Transient Dynamic Response During Isolated Mode: A Comparative Study[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4):1314-1322.
- [64] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 国防工业出版社, 2002.
- [65] Sastry S. Nonlinear Systems[M], 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA:Prentice-Hall, 2002.
- [66] 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]. 国防工业出版社, 2008.
- [67] Herman Castañeda, Oscar S. Salas-Peña, Jesús de León-Morales. Extended observer based on adaptive second order sliding mode control for a fixed wing UAV[J]. ISA Transactions, 2016, 66:226–232.
- [68] Madoński, R, Herman P . Survey on methods of increasing the efficiency of extended state disturbance observers[J]. ISA Transactions, 2015, 56:18-27.
- [69] Zhao Z L , Guo B Z . On convergence of non-linear extended state observer for multi-input multi-output systems with uncertainty[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(15):2375-2386.
- [70] Han T , Guan Z H , Liao R Q , et al. Distributed finite-time formation tracking control of multi-agent systems via FTSMC approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(15):2585-2590.
- [71] Utkin V I. Sliding Modes in Control and Optimization[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [72] Man Z, Paplinski A P, Wu H R, A robust MIMO terminal sliding mode control for rigid robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39: 2464–2469.
- [73] Yu, Huo X . Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Fundamental Theory & Applications, 2009, 49(2):261-264.
- [74] Zak M . Terminal attractors in neural networks[J]. Neural Networks, 1989, 2(4):259-274.
- [75] V. V. Nemitskii and V. V. Stepanov. Qualitative Theory of Differential Equations[M]. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1960.
- [76] Xinghuo Y U , Man Z . Model Reference Adaptive Control Systems with Terminal Sliding Modes[J]. International Journal of Control, 1996, 64(6):1165-1176.
- [77] Zhihong M , Yu X H . Terminal sliding mode control of MIMO linear systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications, 1997, 44(11):1065-1070.
- [78] Shtessel Y, Taleb M, Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application[J]. Automatica, 2012, 48(5):759-769.
- [79] Wang L , Xiao F . Finite-Time Consensus Problems for Networks of Dynamic Agents[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(4):950-955.
- [80] Liu X , Lam J , Yu W , et al. Finite-Time Consensus of Multiagent Systems With a Switching Protocol.[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2016, 27(4):853-862.
- [81] Guan Z H , Sun F L , Wang Y W , et al. Finite-Time Consensus for Leader-Following Second-Order Multi-Agent Networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(11):2646-2654.
- [82] Nourollah S , Pirayesh A , Aminifar F . Combinational scheme for voltage and frequency recovery in an islanded distribution system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12):2899-2906.
- [83] Ndiaye I, Wu X, Agamy M. Impact of micro-inverter reactive power support capability in high penetration residential PV networks[C]//Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd. IEEE, 2015: 1-6.
- [84] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [85] 姜偕富, 徐文立. 线性离散时滞系统滞后相关型 $H\infty$ 状态反馈控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 464-467.
- [86] 王国权, 王森, 刘华勇, 等. 基于自适应的动态三次指数平滑法的风电场风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014(15): 117-122.
- [87] Wang Z, Wang J, Chen B, et al. MPC-Based Voltage/Var Optimization for Distribution Circuits With Distributed Generators and Exponential Load Models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2412-2420.

附录 A 改进 IEEE37 节点数据

| 支路 编号 | 源节点 | 目的 节点 | 支路电阻/欧 | 支路电抗/欧 | 目的节点 有功/kW | 目的节点 无功/kVar | 支路 编号 | 源节点 | 目的 节点 | 支路电阻/欧 | 支路电抗/欧 | 目的节点 有功/kW | 目的节点 无功/kVar |
|----------|-----|----------|--------|--------|---------------|-----------------|----------|-----|----------|--------|---------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.2978 | 0.2049 | 63 | 31.5 | 20 | 16 | 30 | 0.6777 | 0.3442 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 3 | 0.1545 | 0.1063 | 0 | 0 | 21 | 30 | 31 | 0.5599 | 0.2843 | 4.2 | 2.1 |
| 3 | 3 | 4 | 0.2125 | 0.1462 | 0 | 0 | 22 | 30 | 32 | 0.0884 | 0.0449 | 15.9 | 7.8 |
| 4 | 4 | 5 | 0.442 | 0.2245 | 8.4 | 4.2 | 23 | 3 | 17 | 0.2947 | 0.1496 | 0 | 0 |
| 5 | 5 | 6 | 0.1473 | 0.0748 | 0 | 0 | 24 | 17 | 18 | 0.2357 | 0.1197 | 9.3 | 4.5 |
| 6 | 6 | 7 | 0.2357 | 0.1197 | 0 | 0 | 25 | 17 | 27 | 0.1768 | 0.0898 | 8.4 | 4.2 |
| 7 | 7 | 8 | 0.2357 | 0.1197 | 8.4 | 4.2 | 26 | 4 | 19 | 0.1768 | 0.0898 | 4.2 | 2.1 |
| 8 | 8 | 9 | 0.4125 | 0.2095 | 4.2 | 2.1 | 27 | 19 | 20 | 0.2063 | 0.1047 | 4.2 | 2.1 |
| 9 | 9 | 10 | 0.4715 | 0.2394 | 13.8 | 6.9 | 28 | 20 | 21 | 0.2063 | 0.1047 | 4.2 | 2.1 |
| 10 | 10 | 11 | 0.2947 | 0.1496 | 12.6 | 6.3 | 29 | 20 | 37 | 0.1473 | 0.0748 | 12.6 | 6.3 |
| 11 | 11 | 12 | 0.2947 | 0.1496 | 0 | 0 | 30 | 6 | 22 | 0.442 | 0.2245 | 8.4 | 4.2 |
| 12 | 12 | 13 | 0.2947 | 0.1496 | 4.2 | 2.1 | 31 | 6 | 23 | 0.0001 | 0.0001 | 0 | 0 |
| 13 | 3 | 14 | 0.2591 | 0.1347 | 8.4 | 4.2 | 32 | 7 | 24 | 0.2357 | 0.1197 | 4.2 | 2.1 |
| 14 | 14 | 15 | 0.3831 | 0.1945 | 0 | 0 | 33 | 9 | 25 | 0.3831 | 0.1945 | 0 | 0 |
| 15 | 15 | 28 | 0.0589 | 0.0299 | 3.6 | 1.8 | 34 | 25 | 36 | 0.9429 | 0.4788 | 4.2 | 2.1 |
| 16 | 28 | 29 | 0.3831 | 0.1945 | 8.4 | 4.2 | 35 | 25 | 35 | 0.1473 | 0.0748 | 8.4 | 4.2 |
| 17 | 15 | 16 | 0.5893 | 0.2993 | 8.4 | 4.2 | 36 | 12 | 26 | 0.1473 | 0.0748 | 8.4 | 4.2 |
| 18 | 16 | 33 | 0.442 | 0.2245 | 0 | 0 | 37 | | | | | | |
| 19 | 33 | 34 | 0.2063 | 0.1047 | 4.2 | 2.1 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 总负载 | 244.2kW | 140.7kVar | |
| | | | | | | | | | | 基准电压 | 400V | | |

附录 B PG&E69 节点数据

| 支路 编号 | 源节点 | 目的 节点 | 支路电阻/欧 | 支路电抗/欧 | 目的节点 有功/kW | 目的节点 无功/kVar | 支路 编号 | 源节点 | 目的 节点 | 支路电阻/欧 | 支路电抗/欧 | 目的节点 有功/kW | 目的节点 无功/kVar | 支路 编号 | 源节点 | 目的 节点 | 支路电阻/欧 | 支路电抗/欧 | 目的节点 有功/kW | 目的节点 无功/kVar |
|----------|-----|----------|--------|--------|---------------|-----------------|----------|-----|----------|--------|--------|---------------|-----------------|----------|-----|----------|--------|--------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.0050 | 0.0012 | 0. | 0. | 26 | 26 | 27 | 0.1732 | 0.0572 | 14.00 | 10.00 | 51 | 40 | 41 | 0.3319 | 0.1114 | 0. | 0. |
| 2 | 2 | 3 | 0.0050 | 0.0012 | 0. | 0. | 27 | 3 | 28 | 0.0044 | 0.0108 | 26.00 | 18.60 | 52 | 9 | 42 | 0.1740 | 0.0886 | 227.00 | 162.00 |
| 3 | 3 | 4 | 0.0015 | 0.0036 | 0. | 0. | 28 | 28 | 29 | 0.0640 | 0.1565 | 26.00 | 18.60 | 53 | 42 | 43 | 0.2030 | 0.1034 | 59.00 | 42.00 |
| 4 | 4 | 5 | 0.0251 | 0.0294 | 0. | 0. | 29 | 29 | 30 | 0.3978 | 0.1315 | 0. | 0. | 54 | 43 | 44 | 0.2842 | 0.1447 | 18.00 | 13.00 |
| 5 | 5 | 6 | 0.3660 | 0.1864 | 2.60 | 2.20 | 30 | 30 | 31 | 0.0702 | 0.0232 | 0. | 0. | 55 | 44 | 45 | 0.2813 | 0.1433 | 18.00 | 13.00 |
| 6 | 6 | 7 | 0.3811 | 0.1941 | 40.40 | 30.00 | 31 | 31 | 32 | 0.3510 | 0.1160 | 0. | 0. | 56 | 45 | 46 | 1.5900 | 0.5337 | 28.00 | 20.00 |
| 7 | 7 | 8 | 0.0922 | 0.0470 | 75.00 | 54.00 | 32 | 32 | 33 | 0.8390 | 0.2816 | 14.00 | 10.00 | 57 | 46 | 47 | 0.7837 | 0.2630 | 28.00 | 20.00 |
| 8 | 8 | 9 | 0.0493 | 0.0251 | 30.00 | 22.00 | 33 | 33 | 34 | 1.7080 | 0.5646 | 19.50 | 14.00 | 58 | 47 | 48 | 0.3042 | 0.1006 | 26.00 | 18.55 |
| 9 | 9 | 10 | 0.8190 | 0.2707 | 28.00 | 19.00 | 34 | 34 | 35 | 1.4740 | 0.4873 | 6.00 | 4.00 | 59 | 48 | 49 | 0.3861 | 0.1172 | 26.00 | 18.55 |
| 10 | 10 | 11 | 0.1872 | 0.0691 | 145.00 | 104.00 | 35 | 3 | 59 | 0.0044 | 0.0108 | 0. | 0. | 60 | 49 | 50 | 0.5075 | 0.2585 | 0. | 0. |
| 11 | 11 | 12 | 0.7114 | 0.2351 | 145.00 | 104.00 | 36 | 59 | 60 | 0.0640 | 0.1565 | 79.00 | 56.40 | 61 | 50 | 51 | 0.0974 | 0.0496 | 24.00 | 17.00 |
| 12 | 12 | 13 | 1.0300 | 0.3400 | 8.00 | 5.50 | 37 | 60 | 61 | 0.1053 | 0.1230 | 384.70 | 274.50 | 62 | 51 | 52 | 0.1450 | 0.0738 | 24.00 | 17.00 |
| 13 | 13 | 14 | 1.0440 | 0.3450 | 8.00 | 5.50 | 38 | 61 | 62 | 0.0304 | 0.0355 | 384.70 | 274.50 | 63 | 52 | 53 | 0.7105 | 0.3619 | 1.20 | 1.00 |
| 14 | 14 | 15 | 1.0580 | 0.3496 | 0. | 0. | 39 | 62 | 63 | 0.0018 | 0.0021 | 40.50 | 28.30 | 64 | 53 | 54 | 1.0410 | 0.5302 | 0. | 0. |
| 15 | 15 | 16 | 0.1966 | 0.0650 | 45.50 | 30.00 | 40 | 63 | 64 | 0.7283 | 0.8509 | 3.60 | 2.70 | 65 | 11 | 55 | 0.2012 | 0.0611 | 6.00 | 4.30 |
| 16 | 16 | 17 | 0.3744 | 0.1238 | 60.00 | 35.00 | 41 | 64 | 65 | 0.3100 | 0.3623 | 4.35 | 3.50 | 66 | 55 | 56 | 0.0047 | 0.0014 | 0. | 0. |
| 17 | 17 | 18 | 0.0047 | 0.0016 | 60.00 | 35.00 | 42 | 65 | 66 | 0.0410 | 0.0478 | 26.40 | 19.00 | 67 | 12 | 57 | 0.7394 | 0.2444 | 39.22 | 26.30 |
| 18 | 18 | 19 | 0.3276 | 0.1083 | 0. | 0. | 43 | 66 | 67 | 0.0092 | 0.0116 | 24.00 | 17.20 | 68 | 57 | 58 | 0.0047 | 0.0016 | 39.22 | 26.30 |
| 19 | 19 | 20 | 0.2106 | 0.0696 | 1.00 | 0.60 | 44 | 67 | 68 | 0.1089 | 0.1373 | 0. | 0. | 69 | 8 | 21 | 2.0000 | 2.0000 | | |
| 20 | 20 | 21 | 0.3416 | 0.1129 | 114.00 | 81.00 | 45 | 68 | 69 | 0.0009 | 0.0012 | 0. | 0. | 70 | 9 | 15 | 2.0000 | 2.0000 | | |
| 21 | 21 | 22 | 0.0140 | 0.0046 | 5.30 | 3.50 | 46 | 4 | 36 | 0.0034 | 0.0084 | 0. | 0. | 71 | 12 | 22 | 2.0000 | 2.0000 | | |
| 22 | 22 | 23 | 0.1591 | 0.0526 | 0. | 0. | 47 | 36 | 37 | 0.0851 | 0.2083 | 100.00 | 72.00 | 72 | 23 | 33 | 0.5000 | 0.5000 | | |
| 23 | 23 | 24 | 0.3463 | 0.1145 | 28.00 | 20.00 | 48 | 37 | 38 | 0.2898 | 0.7091 | 0. | 0. | 73 | 41 | 66 | 0.5000 | 0.5000 | | |
| 24 | 24 | 25 | 0.7488 | 0.2457 | 0. | 0. | 49 | 38 | 39 | 0.0822 | 0.2011 | 1244.00 | 888.00 | 74 | 25 | 29 | 0.5000 | 0.5000 | | |
| 25 | 25 | 26 | 0.3089 | 0.1021 | 14.00 | 10.00 | 50 | 8 | 40 | 0.0928 | 0.0473 | 32.00 | 23.00 | 75 | 53 | 56 | 2.0000 | 2.0000 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 总负载 | 3802.19 | 2694.60 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 基准电压 | 12.66kV | |

作者简介

葛浦东（1995—），男，汉族，江苏南京人，现为东南大学电气学院硕士研究生，研究方向为配电网鲁棒控制。

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] Ge P , Dou X , Quan X , et al. Extended-State-Observer-Based Distributed Robust Secondary Voltage and Frequency Control for an Autonomous Microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, PP(99):1-1.
- [2] 窦晓波, 葛浦东, 全相军, 季宇, 吴在军, 顾伟, 张从越. 计及不确定时滞的有源配电网无功电压鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (5): 1290-1300.
- [3] 窦晓波,常莉敏,倪春花,段向梅,葛浦东,吴在军.面向分布式光伏虚拟集群的有源配电网多级调控[J]. 电力系统自动化, 2018,42(03):21-31.

攻读硕士学位期间发表的专利

- [1] 一种基于虚拟集群的有源配电网电压控制方法和系统. (第二发明人, 已受理)

攻读硕士学位期间参与的项目

- [1] 国家自然科学基金资助项目“含动态控制区域的有源配电网区域协同控制”(51777031)
- [2] 国家重点研发项目“分布式可再生能源发电集群灵活并网集成关键技术及示范”(项目编号: 2016YFB0900400, 2016YFB09004003)
- [3] “智能电网保护和运行控制”国家重点实验室开放课题“基于局部动态控制的主动配电网分区控制研究”
- [4] 国家电网科技项目“区域分布式电源集群技术研究”