

分类号： TM73

密 级： 公开

学校代码：10363

学 号：2210320115



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于改进有限时间一致性的微
电网经济优化调度策略研究

论 文 作 者 李浩宇

指 导 教 师 张春（教授）

学 科（专业） 控制科学与工程

研 究 方 向 控制理论与控制工程

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：2210320115

题 目 基于改进有限时间一致性的微
电网经济优化调度策略研究

题 目 RESEARCH ON ECONOMIC
OPTIMIZATION DISPATCH STRATEGY FOR
MICROGRIDS BASED ON IMPROVED
FINITE TIME CONSISTENCY

学 生 姓 名： 李浩宇

指 导 教 师： 张春

专 业： 控制科学与工程

研 究 方 向： 控制理论与控制工程

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后果由本人承担。

学位论文作者签名：李浩宇

日期：2024 年 5 月 28 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：

李浩宇

指导教师签名：

陈春

日期：2024 年 5 月 28 日

日期：2024 年 5 月 28 日

基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度策略研究

摘 要

近年来,由于环境问题日益突出、化石能源枯竭和能源需求增加,分布式发电(Distributed Generation, DG)技术得到了迅猛发展。微电网(Micro-Grid, MG)作为新型电力系统中的重要组成部分,其内部融合了大量分布式发电单元,并且每种分布式发电单元的发电特性、发电成本特性、控制特性具有多样性。为了能更好协调和利用各 DG,研究微电网经济优化调度策略,并将经济优化调度结果用于微电网分布式分层优化控制中显得尤为重要。因此,为实现微电网经济性最优、频率与电压稳定、供需功率动态平衡以及功率合理分配等目标,本文基于传统多智能体有限时间一致性算法及微电网分布式分层架构,提出了基于领导-跟随改进有限时间一致性的微电网分布式经济优化调度策略与基于改进平均有限时间一致性的微电网分布式分层优化控制策略,通过算例与仿真验证了所提两种改进算法以及分布式经济优化调度策略与分布式分层优化控制策略的有效性与优越性。主要内容如下:

(1) 介绍并分析了微电网调度策略、控制方法以及分布式电源逆变器技术的原理及特点,同时对图论中的基本知识以及李雅普诺夫稳定性理论进行详细介绍。随后,研究了多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)一致性问题,并介绍了不同一致性协议的特点。

(2) 针对微电网经济优化调度中传统有限时间一致性算法收敛速度慢、微电网中供需功率不平衡等问题, 提出了基于多智能体的领导-跟随改进有限时间一致性算法。首先, 在传统有限时间一致性算法基础上引入增益系数与功率偏差消除项, 在加快算法收敛速度的同时, 使微电网中供需功率达到动态平衡。随后, 利用图论定理和李雅普诺夫稳定性理论对该改进算法的收敛性与稳定性进行证明, 结果表明该改进算法能使多智能体系统在有限时间内达到收敛一致。接着, 针对含多 DG 微电网运行成本高的问题, 基于等微增率准则与领导-跟随改进有限时间一致性算法研究了一种微电网分布式经济优化调度策略, 该策略利用系统中每个智能体与邻居智能体的信息交互来更新自身一致性变量, 并通过选择领导智能体控制全局一致性变量的变化。最后, 根据各智能体一致性变量收敛值得出其对应的最优响应功率值, 使系统运行在经济最优情况下。

(3) 针对微电网分布式分层控制中传统平均有限时间一致性算法收敛速度慢等问题, 研究了基于多智能体的改进平均有限时间一致性算法。首先, 在传统平均有限时间一致性算法基础上引入增益系数, 加快了算法收敛速度, 并采用李雅普诺夫稳定性理论对算法稳定性进行证明。随后, 针对传统下垂控制会带来电压和频率偏差、系统内功率不能合理分配、如何同时满足系统稳定运行与经济性最优等问题, 基于多智能体改进平均有限时间一致性算法, 研究了一种微电网分布式分层优化控制策略, 并将微电网经济优化调度结果用于微电网分布式分层优化控制中。该策略首先介绍了一级控制层的整体控制架构,

分析了下垂控制原理、一次控制中各环节的模型设计以及 DG 基于下垂控制的输出功率分配。然后，针对系统负荷发生突变时频率与电压不稳定问题，基于改进平均有限时间一致性算法研究了一种微电网二次频率、电压控制策略，通过计算频率、电压补偿量并将其反馈给一级控制层，保证了系统频率、电压的稳定性。最后，三级控制层中采用基于领导-跟随改进有限时间一致性的微电网分布式经济优化调度策略，将三级控制层中计算出的各智能体最优响应信息作为调度指令发送给一级控制层，让各智能体按照最优出力运行，使微电网运行在经济最优情况下。

关键词：微电网，多智能体，改进有限时间一致性，经济优化，分布式分层控制

RESEARCH ON ECONOMIC OPTIMIZATION DISPATCH STRATEGY FOR MICROGRIDS BASED ON IMPROVED FINITE TIME CONSISTENCY

ABSTRACT

In recent years, due to increasingly prominent environmental issues, depletion of fossil fuels, and increased energy demand, distributed generation (DG) technology has experienced rapid development. Microgrid (MG), as an important component of the new power system, integrates a large number of distributed generation units internally, and each type of distributed generation unit has diverse generation characteristics, generation cost characteristics, and control characteristics. In order to better coordinate and utilize various DGs, it is particularly important to study economic optimization scheduling strategies for microgrids and apply the results of economic optimization scheduling to distributed hierarchical optimization control of microgrids. Therefore, in order to achieve the goals of optimal economic efficiency, stable frequency and voltage, dynamic balance of supply and demand power, and reasonable

power allocation of microgrids, this paper proposes a distributed economic optimization scheduling strategy for microgrids based on leader follower improvement finite time consistency and a distributed hierarchical optimization control strategy for microgrids based on improved average finite time consistency, based on the traditional multi-agent finite time consistency algorithm and the distributed hierarchical architecture of microgrids. The effectiveness and superiority of the proposed two improved algorithms, as well as the distributed economic optimization scheduling strategy and the distributed hierarchical optimization control strategy, are verified through examples and simulations. The main content is as follows:

(1) Introduced and analyzed the scheduling strategy and control methods of microgrids, as well as the principles and characteristics of distributed power inverter technology. At the same time, detailed introductions were made to the basic knowledge of graph theory and Lyapunov stability theory. Subsequently, the consistency problem of multi-agent system (MAS) was studied, and the characteristics of different consistency protocols were introduced.

(2) A multi-agent based leader follower improved finite time consistency algorithm is proposed to address issues such as slow convergence speed of traditional finite time consistency algorithms and imbalanced supply and demand power in microgrids for economic

optimization scheduling. Firstly, based on the traditional finite time consistency algorithm, the gain coefficient and power deviation elimination term are introduced to accelerate the convergence speed of the algorithm and achieve dynamic balance of supply and demand power in the microgrid. Subsequently, the convergence and stability of the improved algorithm were proved using graph theory and Lyapunov stability theory. The results showed that the improved algorithm can achieve convergence consistency in a finite time for multi-agent systems. Subsequently, to address the issue of high operating costs in microgrids with multiple DGs, a distributed economic optimization scheduling strategy for microgrids was studied based on the equal incremental rate criterion and the leader follower improved finite time consistency algorithm. This strategy utilizes the information interaction between each agent in the system and neighboring agents to update its own consistency variables, and controls the changes in global consistency variables by selecting the leader agent. Finally, based on the convergence values of the consensus variables of each intelligent agent, the corresponding optimal response power value is determined to ensure that the system operates under the economically optimal conditions.

(3) Aiming at the problems of slow convergence speed of traditional mean finite time consensus algorithm in distributed hierarchical control of microgrids, an improved mean finite time consensus algorithm based on

multi-agent was studied. Firstly, based on the traditional mean finite time consistency algorithm, a gain coefficient is introduced to accelerate the convergence speed of the algorithm, and the stability of the algorithm is proved using Lyapunov stability theory. Subsequently, in response to the problems of voltage and frequency deviation caused by traditional droop control, unreasonable power allocation within the system, and how to simultaneously meet the stable operation and optimal economy of the system, a distributed hierarchical optimization control strategy for microgrids was studied based on the multi-agent improved average finite time consistency algorithm. The economic optimization scheduling results of microgrids were applied to the distributed hierarchical optimization control of microgrids. This strategy first introduces the overall control architecture of the first level control layer, analyzes the principle of droop control, the model design of each link in the first control, and the output power allocation of DG based on droop control. Then, in response to the problem of frequency and voltage instability when the system load undergoes sudden changes, a microgrid secondary frequency and voltage control strategy was studied based on the improved mean finite time consistency algorithm. By calculating the frequency and voltage compensation and feeding them back to the primary control layer, the stability of the system frequency and voltage was ensured. Finally, in the three-level control layer, a distributed economic optimization scheduling

strategy for microgrids based on leader follower improved finite time consistency is adopted. The optimal response information of each intelligent agent calculated in the three-level control layer is sent as scheduling instructions to the first level control layer, allowing each intelligent agent to operate according to the optimal output, so that the microgrid operates under the optimal economic situation.

Haoyu Li(Control Science and Engineering)

Supervised by_Prof.Chun Zhang

KEY WORDS: microgrid, multi-agent, improved finite time consistency, economic optimization, distributed hierarchical control

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
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 微电网调度策略.....	2
1.2.2 微电网控制方法.....	4
1.2.3 微电网控制策略.....	6
1.2.4 分布式电源逆变器控制方法.....	9
1.3 本文主要研究工作.....	11
第 2 章 预备知识.....	14
2.1 图论.....	14
2.1.1 基本概述.....	14
2.1.2 通信拓扑图.....	14
2.1.3 拉普拉斯矩阵.....	15
2.2 李雅普诺夫稳定性理论.....	16
2.3 多智能体一致性.....	17
2.3.1 多智能体简述.....	17
2.3.2 一致性理论.....	17
2.3.3 一致性协议.....	18
2.4 本章小结.....	19
第 3 章 基于领导-跟随改进有限时间一致性的微电网经济优化调度	20
3.1 领导-跟随改进有限时间一致性算法	20
3.1.1 算法描述.....	20
3.1.2 算法收敛性分析.....	21
3.2 数学模型建立与求解.....	25

3.2.1 分布式发电、储能、可控负荷成本模型.....	25
3.2.2 目标函数.....	26
3.2.3 分布式经济调度求解.....	26
3.3 分布式经济优化调度策略.....	30
3.4 算例与仿真.....	31
3.4.1 基于改进算法的少节点系统性能研究.....	31
3.4.1.1 系统动态响应性能研究.....	31
3.4.1.2 DG“即插即用”特性研究	36
3.4.1.3 增益系数对系统收敛速度影响研究.....	37
3.4.1.4 系统拓扑结构改变影响研究.....	38
3.4.2 基于改进算法的多节点系统性能研究.....	39
3.4.2.1 系统动态响应性能研究.....	39
3.4.2.2 DG“即插即用”特性研究	42
3.5 本章小结.....	43
第 4 章 基于改进平均有限时间一致性的微电网分布式分层优化控制.....	44
4.1 改进平均有限时间一致性算法.....	45
4.1.1 算法描述.....	45
4.1.2 算法收敛性分析.....	45
4.2 微电网的一次控制策略.....	48
4.2.1 下垂控制原理.....	48
4.2.2 一次控制模型建立.....	49
4.2.3 基于下垂控制的输出功率分配.....	51
4.3 基于改进平均有限时间一致性的微电网二次控制.....	52
4.3.1 系统频率二次控制策略.....	53
4.3.2 系统电压二次控制策略.....	54
4.4 分布式分层优化控制策略.....	55
4.5 算例与仿真.....	56
4.5.1 算法收敛性能研究.....	57
4.5.2 频率与电压二次控制性能研究.....	59

4.5.3 分布式分层优化控制性能研究.....	62
4.6 本章小结.....	66
第 5 章 结论与展望.....	68
5.1 总结.....	68
5.2 展望.....	69
参考文献.....	71
攻读硕士学位期间的研究成果.....	78
致 谢.....	79

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

面对能源需求增长、气候变暖与减排压力，国家能源局提倡优先开发本土分散式和分布式可再生能源，推动用户侧就近利用，并借助新技术提高其在能源结构中的占比^[1,2]。

新能源发电技术应用于能源互联网与新型电力系统中有利于降低碳排放和减少不可再生能源消耗。目前，新能源发电技术包括集中式、分散式以及分布式三种主要方式。分布式发电与其它两种发电技术相比，具有更强的鲁棒性和更高的灵活性。随着每千瓦电能成本持续下降以及政策扶持力度加大，分布式发电技术的应用范围正在日益拓宽^[3]。

随着新型电力系统中各种 DG 渗透率不断提高，新能源领域中的风力发电、光伏发电、海洋能发电等存在一定的随机性，因此 DG 的不确定性会使得新型电力系统中电能质量下降^[4]，对新型电力系统的安全稳定运行提出新挑战。DG 的随机性与不确定性不仅会使新型电力系统中的频率、电压与功率分配受到影响，同时也会扰乱新型电力系统潮流以及经济优化调度，使其不能在经济最优的情况下运行，严重时会导致新型电力系统崩溃。为解决 DG 的随机性与不稳定性等因素带来的影响以及实现 DG 间的协调优化运行、系统供需功率动态平衡与运行经济性等问题，微电网优化调度与控制技术受到关注。

微电网是一种小型独立发配电网络，其主要特点之一是能够在并网和孤岛模式下运行^[5]，其通常采用下垂控制，但因其存在控制偏差且未考虑经济效益，难以实现预先设定的经济优化目标^[6]。随着微电网的不断发展和与其它技术的结合，其内部已实现数字化、信息化和智能化的高度融合，使微电网向经济性更好、功率协调分配、频率和电压稳定的方向转变^[7]。

为了克服集中式调度和控制方式主要依赖于中央控制器(Microgrid Central Controller, MGCC)和通信网络以及分散式调度和控制方式只针对局部 DG 的问题，基于 MAS 的分布式分层优化控制策略受到关注^[8-10]，其不依赖于 MGCC，

只需每个智能体与其邻居之间进行信息交互，在经过多次交互后，每个智能体均能获取全局信息，并通过该全局信息实现自我调节，其采用的分布式算法具有较好的稳定性以及鲁棒性^[11-13]。

在上述背景下，从微电网优化调度、控制的角度出发，深入研究微电网中出现的相关问题以及运用于分布式分层框架中的分布式算法，基于多智能体一致性理论制定相应的微电网优化调度与控制策略，使微电网运行在经济最优的同时，保证微电网的频率与电压稳定、功率合理分配以及供需功率动态平衡。因此，研究微电网的优化调度与控制策略，保证微电网的经济稳定运行具有重大意义。

1.2 国内外研究现状

全球都在应对化石燃料日渐短缺和全球气候变化带来的一系列威胁，实现“双碳”目标^[14]。为此，国内外学者开展了大量研究，建立并成功投入运用了大量微电网示范工程，并围绕微电网优化调度与控制技术进行研究，取得了很多重大成果。

1.2.1 微电网调度策略

微电网经济调度是电力系统中最基本的问题之一，其核心是在满足电力系统各种约束的前提下，如何使系统内部供需功率平衡以及经济性最优^[15]。传统经济调度方法通常依赖调度中心收集必要信息，然后建立优化模型并求解，将求解出的最优调度方案作为调度指令发送给各 DG，使各 DG 按照调度指令动作。随着大量地域分散且特性不同的新型可控单元接入比例增大，传统集中式调度方法存在调度中心通信与计算压力大、单点故障易导致系统崩溃等问题。同时，这种模式无法提供与分布式电能资源高度分散等特点相适应的接入灵活性与控制鲁棒性^[16]。为弥补集中式调度方法存在的不足，电力系统分布式调度方法得到了关注和研究，分布式调度方法强调各单元进行自主决策，实现个体智能，通过通信网络与邻居进行信息交互，进而做出决策以调整自身动作，通过各个单元的相互协作完成经济调度目标。相比较而言，采用分布式调度方法的系统具有更强的可扩展性、鲁棒性，更小的计算与通信负担以及更强的信息保密性与安全性等优势，相关研究成果已被成功应用于 MAS 以及微电网经济优化调度中^[17,18]。

(1) 集中式调度

根据微电网特点，国内外学者针对微电网优化调度问题进行了许多相关研究。

针对集中式优化调度问题,文献[19]构建了基于马尔可夫决策过程的强化学习模型,该模型模拟了智能体与环境之间的交互行为,同时考虑到训练过程中可能存在安全约束无法满足的情况,进一步提出了一种利用部分模型信息的微电网优化调度策略学习方法,得到了满足网络安全约束的优化调度策略。文献[20]针对微电网经济性与稳定性问题,构建了考虑集中式储能系统与需求响应影响的微电网负荷优化调度模型。文献[21]针对微电网系统 MGCC 面临满足客户需求的同时,能有效利用可再生能源的问题,提出了一种新的电力供需管理方案,并建立一种新的不确定性模型,同时针对如何发电调度实现最佳功耗以及最大限度降低燃料成本的问题,提出一种两阶段优化方法,该方法能对问题进行变换并求得最优解。文献[22]针对冷热电联供型(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)微电网并入主动配电网后的系统优化调度问题,采用集中式方法对系统进行建模,建立一种整合了综合需求响应机制的 CCHP 微电网主动配电网集中式优化调度模型,并将系统总运行成本最小作为优化目标,在共同运行约束条件下,对模型进行求解分析。文献[23]针对风电具有随机性和波动性等特点,对含风电场的电力系统优化调度问题进行研究,建立了基于多目标粒子群算法的优化调度模型,同时通过引入遗传算子对多目标粒子群算法进行改进,提高了算法的动态响应性能。文献[24]提出了两个协调框架,包含多个分布式能源系统:一个是集中协调框架,能源管理系统通过该框架实现社会福利最大化;另一个是基于最小化发电成本提出的去中心化框架;在此基础上,通过建立数学模型,来确定多种能源优化调度策略。

(2) 分布式调度

虽然集中式调度方法有了一定的发展,但面对大规模、多区域互联以及可再生能源渗透率高的场景存在模型求解难度高、响应速度慢、过度依赖 MGCC 等问题。因此,针对以上问题有很多学者提出采用分布式调度方式,该方式不依赖于控制中心,只需相邻智能体之间通信,具有计算量小、可靠性高等优点^[18]。文献[25]开发了一种主导-从属-交互式随机规划模型,为微电网制定了一种主导-从属调度策略,并提出了一种具有多关注点的双水平随机模型,可以解决不同系统违规风险下的发电、供热、供冷、一次能源供应等相关问题。文献[26]为了更好地平衡微电网调度的精度、经济性和鲁棒性,提出一种考虑源荷不确定性的微电

网多时间尺度最优调度策略,并针对微电网调度的不确定性,提出一种多时间尺度的优化调度框架和两阶段分布鲁棒模型,采用分布式模型预测控制方法,提高日前调度计划的鲁棒性与接触线功率的平滑性。文献[27]针对混合微电网设计了一种不依赖于初始化过程的全分布式算法去解决动态调度问题,使得动态经济调度问题中的总发电成本最小,还通过凸分析和 Lyapunov 函数方法分析了所提算法的收敛性。文献[28]为解决微电网的经济调度问题,提出基于二阶导数上限分配的分布式多步梯度下降法,通过该算法求解建立的双层优化模型,可实现可控 DG 的优化调度。文献[29]针对现有调度算法不能很好应对电力需求发生变化的问题,提出一种适应动态电力需求的分布式实时调度算法,在迭代过程中,所提算法能通过满足实时功率平衡约束来求得动态最优解。文献[30]基于边缘计算框架提出一种并行分布式优化方法,用来对含有大量可再生能源的微电网经济调度问题进行求解,该方法在提高问题求解速度的同时,也能使调度成本最小。文献[31]针对微电网传统集中式调度方法中过度依赖 MGCC 的问题,基于梯度下降法与一致性理论提出一种完全分布式优化调度策略,通过将两种方法结合,在加快系统收敛速度的同时,降低微电网发电成本。文献[32]针对大量 DG 接入和其出力不确定性的问题,提出一种基于深度强化学习的微电网分布式调度策略,通过各智能体之间传递信息,实现微电网系统经济最优运行。文献[33]为实现多微电网间 DG 优势互补,提出一种基于区块链技术的多微电网互联两阶段三级调度方法,根据调度级别设计微电网分布式调度框架,并采用列约束生成算法对其进行求解。

1.2.2 微电网控制方法

微电网的控制方法主要分为集中式、分散式和分布式等^[34-36]。

(1) 集中式控制

集中式控制的 MGCC 会收集每个 DG 的信息,并根据控制目的做出控制决策,再将此决策作为控制指令发送给每个 DG,使其动作。但其存在通信网络建设成本高、过分依赖于控制中心等问题^[37]。微电网集中式控制架构如图 1-1 所示。

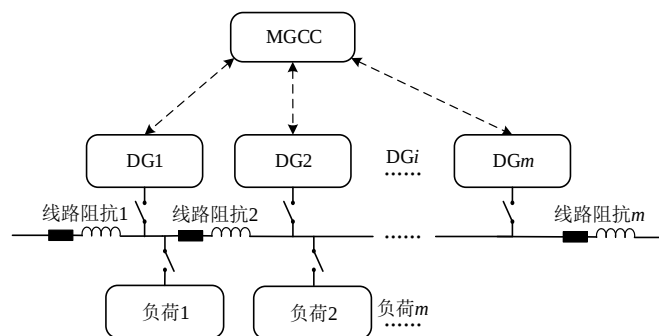


图 1-1 微电网集中式控制架构图

（2）分散式控制

分散式控制不依赖于 MGCC，只需各 DG 的本地信息便可实现微电网中 DG 的自治运行与控制，并且控制复杂程度低、稳定性高，但其难以满足复杂控制要求，系统整体协调性差，并且随着接入微电网的 DG 数量增加，各个 DG 采集本地信息的能力有限，分散式控制方式不能很好地协调各 DG 间的关系^[38]。微电网分散式控制架构如图 1-2 所示。

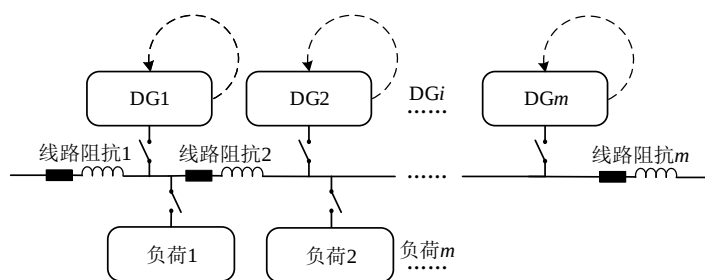


图 1-2 微电网分散式控制架构

（3）分布式控制

分布式控制方式不依赖于 MGCC 收集智能体信息，只需相邻智能体之间传递信息即可获得全局信息，并根据这些信息得出控制决策，使各 DG 按照控制决策运行，实现系统中频率和电压稳定、供需功率动态平衡、功率合理分配等协调控制目标。其采用的多智能体一致性算法，具有收敛条件简单、收敛速度快、协同性好等优点，能有效提高微电网运行的稳定性与安全性。微电网分布式控制架构如图 1-3 所示。

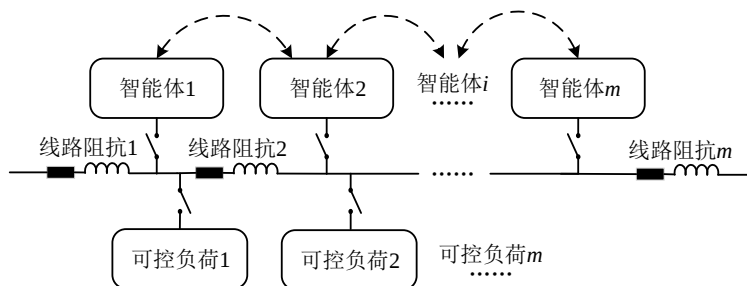


图 1-3 微电网分布式控制架构

综上所述，虽然分散式控制与分布式控制能有效解决集中式控制中存在的问题，但随着 DG 的渗透率不断提高，分散式控制不能较好地满足微电网运行要求，而分布式控制与多智能体一致性理论结合可实现大量 DG 之间的协调运行与控制。因此，研究基于多智能体一致性的分布式优化控制策略具有重要意义。

1.2.3 微电网控制策略

(1) 主从控制

主从控制是分布式控制策略的一种，采用主从控制的系统包含两种控制器，一种是主控制器，其通常由一台或多台具有特定功能的控制器组成。另一种是从控制器，由其他控制性能略低的控制器组成^[39,40]。微电网主从控制架构如图 1-4 所示。目前，已有大量文献对主从控制方式进行研究。文献[41]为了提高系统的可靠性和经济性，提出一种新型自适应主从控制策略，使系统电压和频率保持在国家电网要求的范围内，并且与传统主从控制策略相比，所提控制策略可以解决对主 DG 依赖性高的问题。文献[42]为解决微电网离网运行时电力电量的计算问题，研究了一种基于储能荷电状态的微电网离网主从控制策略，同时基于该策略提出一种精确工程计算方法。文献[43]为解决并离网切换时电压不可控问题，提出一种基于电压控制器和附加电流控制器的平滑切换控制策略，两种控制器相互配合，保证了切换过程中电压稳定。

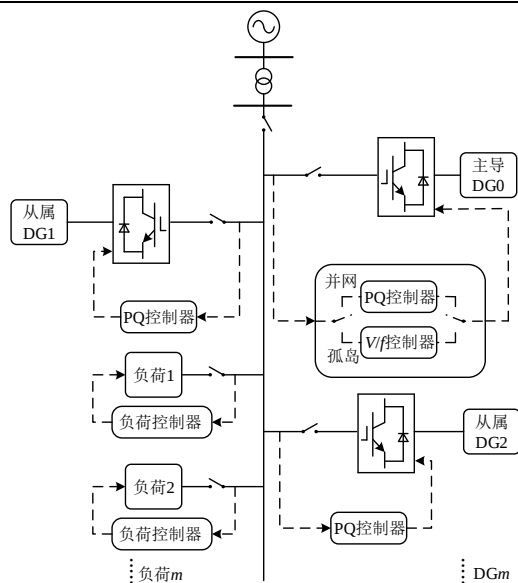


图 1-4 微电网主从控制架构

(2) 对等控制

对等控制是分布式控制策略的一种，其特点是各 DG 之间功能、地位相同，可自主决定并控制自身的运行方式^[39]。与主从控制相比，对等控制易实现 DG 的“即插即用”功能，还可实现并离网无缝切换，并且不需要通信系统，降低了系统成本，但采用对等控制的孤岛微电网缺少大电网支撑，且采用下垂控制调节频率与电压时系统稳态频率是未知的，而频率对系统影响较大，严重时会造成系统崩溃^[44]。微电网对等控制架构如图 1-5 所示。

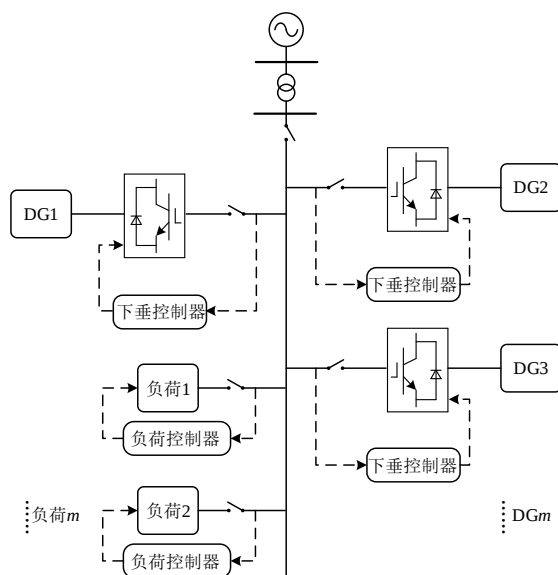


图 1-5 微电网对等控制架构

(3) 分层控制

分层控制分为集中式与分布式两种。集中式分层控制能兼顾系统运行经济性与稳定性。分布式分层控制采用分布式算法并通过 DG 间的通信实现全局控制，有效解决了微电网频率与电压不稳定以及如何使运行成本最优的问题^[45]。图 1-6 为微电网集中式分层控制架构，图 1-7 为微电网分布式分层控制架构。

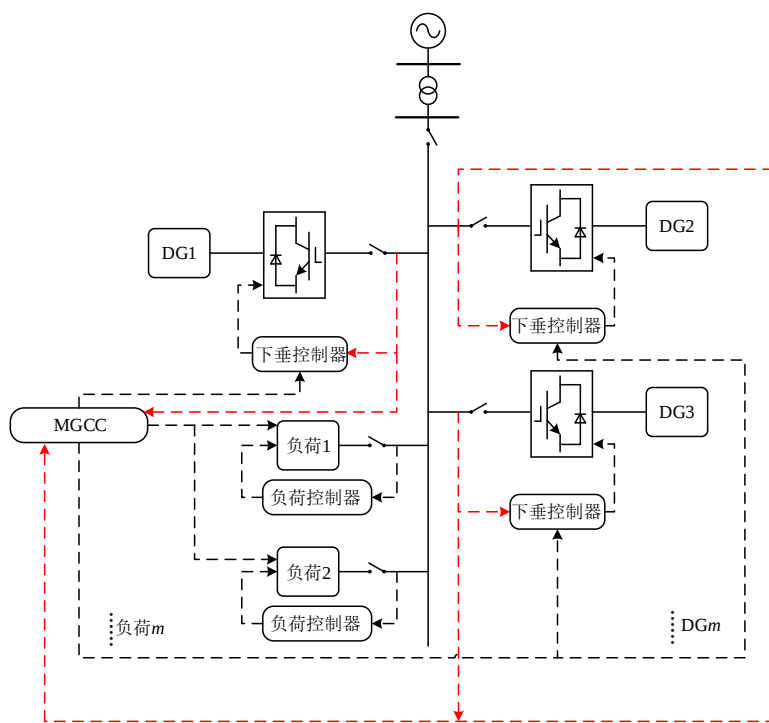


图 1-6 微电网集中式分层控制架构

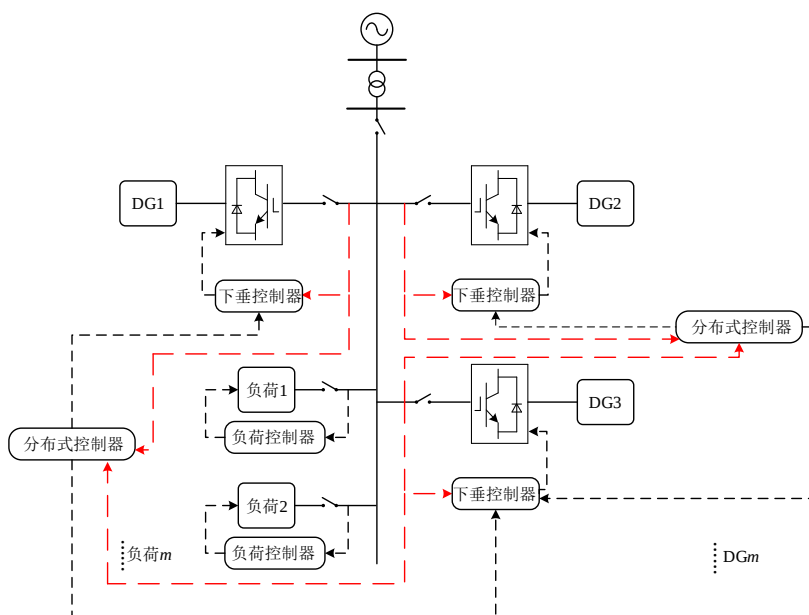


图 1-7 微电网分布式分层控制架构

1.2.4 分布式电源逆变器控制方法

(1) PQ 恒功率控制

PQ 恒功率控制(PQ Constant Power Control, 以下简称为 PQ 控制)由功率外环与电流内环组成, 功率外环实现恒功率输出, 电流内环提高响应速度^[46]。DG 逆变器 PQ 控制原理如图 1-8 所示。由图 1-8 可知, DG 的初始运行点为 B 点, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别表示额定运行点处的有功和无功功率。在保证功率恒定的同时, 控制 DG 逆变器输出侧的输出频率和输出电压稳定在额定值。

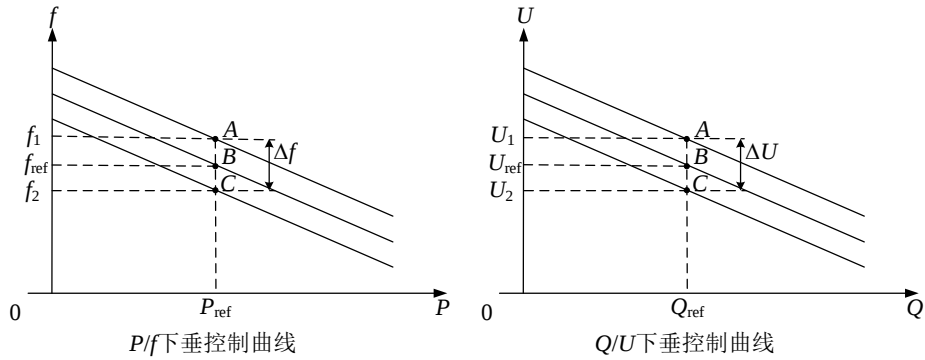


图 1-8 DG 逆变器 PQ 控制原理

(2) V/f 恒压恒频控制

DG 逆变器 V/f 控制原理如图 1-9 所示。DG 的初始运行点为 B 点, 调节有功与无功功率去改变频率与电压, 使输出频率与电压稳定在额定值。在分布式发电场景下, 采用 V/f 控制技术的 DG 能在并网运行时, 根据电网的实际需求动态调整自身的输出频率和电压, 以达到与电网同步运行的目的。当电网中其它分布式发电系统出现频率或电压波动时, 该 DG 能迅速响应, 通过自身 V/f 控制功能提供必要补偿, 从而使整个电网的频率和电压维持在额定值, 增强电网的整体稳定性和可靠性, 为电力系统的安全高效运行提供了有力保障^[47-49]。

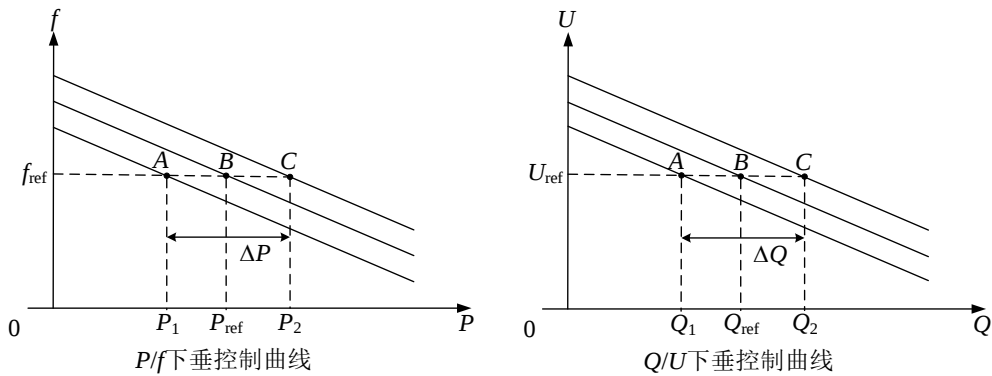


图 1-9 DG 逆变器 V/f 控制原理

(3) 下垂控制

目前,国内外已有大量学者对下垂控制进行研究。文献[50]针对光伏出力变化时存在下垂系数突变的问题,基于非线性函数提出一种改进下垂控制策略,使下垂特性曲线在额定工作点能平稳过渡,并改善了母线电压偏移率以及功率分配精度。文献[51]针对直流微电网中功率发生剧烈变化时,直流电压可能过低的问题,提出一种基于可调度可变下垂系数的变换器控制方法,以在功率剧烈变化时保持电压稳定。文献[52]针对传统微电网逆变器下垂控制策略存在无功分布不均的固有缺陷,提出一种基于深度强化学习的改进下垂控制策略,并通过深度强化学习算法对优化问题进行求解,得到动态最优下垂系数。文献[53]针对微电网内功率分配不均与存在环流等问题,提出一种混合微电网自适应下垂控制策略,该策略可以减少子微电网间的功率流以及补偿交、直流母线电压偏差。文献[54]针对传统预同步控制策略过度依赖于准确的时间尺度以及可扩展性、灵活性较差的问题,提出一种新的预同步控制策略,以克服对精确开关时间的高要求,减少微电网并网或孤岛运行时的瞬态影响以及对通信的过度依赖。文献[55]为了控制不平衡电压,在多节点双极性直流微电网中应用了一种基于模糊算法的自适应下垂控制器,以电压偏差、电压不平衡系数和荷电状态为输入,得到修正后的下垂系数。文献[56]为了提高系统的电流分布精度,提出了一种改进电流下垂控制策略,该策略可在降低控制操作复杂度的基础上抑制系统频率波动。

DG 逆变器下垂控制原理如图 1-10 所示。微电网常采用 P/f 和 Q/U 下垂控制方程,通过调节有功和无功功率去改变频率与电压,并且其可实现 DG “即插即用”功能。

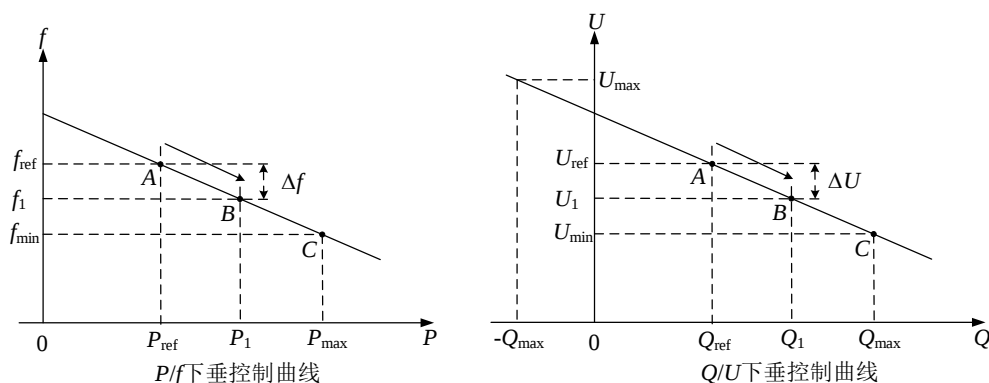


图 1-10 DG 逆变器下垂控制原理

(4) VSG 控制

VSG 控制方法为虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制, 通过模拟虚拟同步机运行模式以及外部特性对频率、电压进行调节。相比于常规的下垂控制与 PQ 控制, VSG 控制的优点在于可模拟同步发电机的转子外特性, 使并网逆变器具有阻尼和虚拟惯量, 不仅如此, 在 VSG 控制下, 并网逆变器能参与电网电压、频率调节, 灵活性更好^[57]。DG 逆变器 VSG 控制原理如图 1-11 所示。

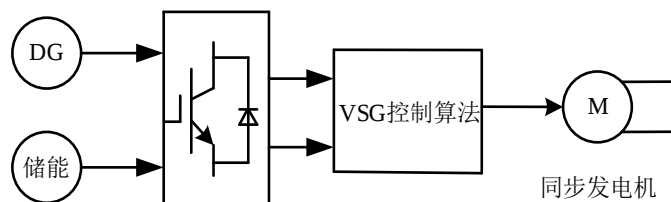


图 1-11 DG 逆变器 VSG 控制原理

国内外学者对 VSG 控制方法进行了大量研究。文献[58]针对微电网采用 VSG 技术时的振荡问题进行理论分析, 提出了一种多 VSG 协同控制方法。文献[59]针对微电网二次控制依赖复杂通信系统的问题, 提出了一种含多个 VSG 的孤岛微电网无误差频率调节分散控制策略。文献[60]针对以分布式发电机为主导的孤岛微电网可能遇到严重的频率不稳定问题, 提出了一种下垂控制与 VSG 控制相结合的控制策略, 并重点研究了孤岛微电网的频率稳定性。

1.3 本文主要研究工作

本文主要针对微电网经济优化调度和控制策略进行研究, 基于不同的研究对象建立相应的多智能体模型, 并对模型进行数学分析。为了能更好地对模型进行求解, 首先重点研究了多智能体有限时间一致性算法, 并根据调度、控制目标的需要对算法进行改进, 使算法收敛速度加快, 并能很好满足微电网的运行要求。接着, 采用李雅普诺夫稳定性理论与图论定理分析了所提改进算法的收敛性与稳定性。最后, 基于多智能体改进有限时间一致性算法提出相应的微电网分布式经济优化调度与控制策略, 通过算例与仿真可知, 所提策略能满足微电网供需功率动态平衡、功率合理分配、频率和电压稳定以及运行经济性最优等要求。本文研究内容概述框图如图 1-12 所示。

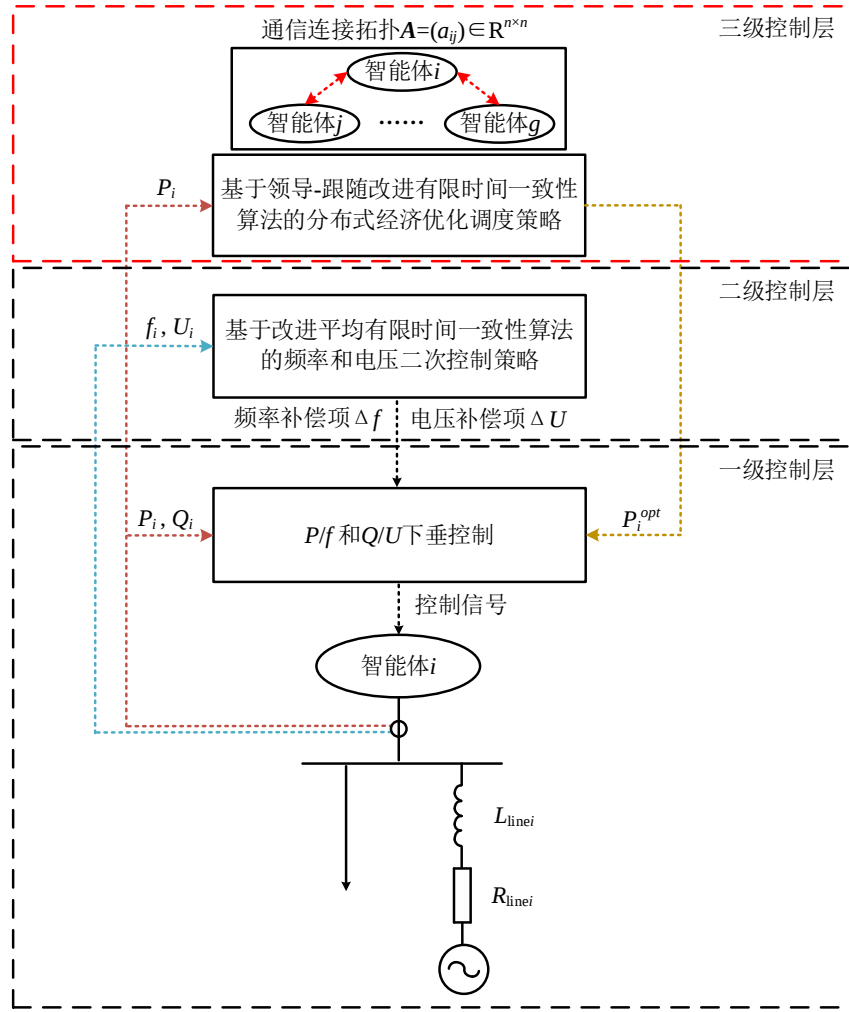


图 1-12 本文研究内容概述框图

图 1-12 中, P_i 、 Q_i 分别为智能体 i 的实时有功功率、无功功率; f_i 、 U_i 分别为智能体 i 的实时频率、电压; P_i^{opt} 为基于领导-跟随改进有限时间一致性算法的分布式经济优化调度策略计算出的各智能体最优响应功率值。

本文主要研究内容为:

(1) 首先, 对论文的研究背景、意义进行了阐述, 详细介绍了国内外微电网调度策略、控制方法以及分布式电源逆变器技术的研究现状、相关概念与优缺点, 并说明了微电网优化调度、控制技术与多智能体一致性理论相结合的必要性以及研究微电网经济优化调度与功率协调控制的重要性。然后, 详细介绍了图论的基本概念及其相关知识。最后, 对李雅普诺夫稳定性理论以及多智能体系统理论、一致性理论、不同的一致性协议进行了详细阐述。

(2) 针对集中式算法收敛精度不高、易陷入局部最优、不能得知系统内部

能量流向以及分布式算法中传统一致性算法收敛速度慢、不能满足系统供需功率平衡等问题，研究了一种基于多智能体的领导-跟随改进有限时间一致性算法，并采用李雅普诺夫稳定性理论与图论定理对该改进算法的稳定性与收敛性进行了证明。随后，针对可再生能源的渗透率不断升高，传统集中式经济调度策略过度依赖于 MGCC 等问题，基于该改进算法研究了一种分布式经济优化调度策略，该策略利用系统中每个智能体与邻居智能体的信息交互来更新自身的一致性变量，并通过选择领导智能体来控制全局一致性变量的变化。最后，通过算例与仿真验证了该改进算法能加快系统收敛速度与实现系统内供需功率动态平衡，所提分布式经济优化调度策略能实现微电网的最优经济运行。

(3) 针对传统平均有限时间一致性算法收敛速度慢等问题，研究了一种基于多智能体的改进平均有限时间一致性算法，在传统算法的基础上引入增益系数，加快了算法的收敛速度，并采用李雅普诺夫稳定性理论对该改进算法的稳定性进行证明。随后，针对集中式控制对 MGCC 的要求较高，在面对大规模分散 DG 时通信网络的建设成本高、不利于 DG 扩展以及微电网如何同时实现功率合理分配、频率与电压稳定和经济性最优的问题，基于改进平均有限时间一致性算法研究了一种分布式分层优化控制策略，并将微电网经济优化调度结果应用于微电网分布式分层优化控制中，该分布式分层控制分为三层。首先，三级控制层采用领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出系统最优响应功率，然后将其作为调度指令下发给一级控制层，一级控制层按照调度指令快速响应，保证系统运行经济性最优。然后，针对一级控制层带来的频率、电压偏差问题，二级控制层采用改进平均有限时间一致性算法计算出频率、电压补偿量，并将补偿量反馈给一级控制层，从而保证系统频率、电压稳定在额定值。最后，通过算例与仿真验证了本文所提微电网分布式分层优化控制策略能在保证系统功率合理分配、频率和电压稳定的同时，使微电网处于经济最优的运行状态。

(4) 最后，对全文研究内容进行总结，对论文的不足以及未来研究方向和下一步工作内容进行阐述。

第 2 章 预备知识

2.1 图论

2.1.1 基本概述

图论中研究的图通常用于表示研究对象间的特定联系，用点代表研究对象，用连接两点的线表示两个对应研究对象间存在联系，由此建立数学模型，并根据图的性质对该模型进行分析求解，其已运用于控制理论、人工智能等领域^[61]。

通常，利用图论中的图描述多智能体系统的拓扑结构与通信关系。对于含领导智能体和跟随智能体组成的多智能体系统，均将一个智能体视为一个节点。智能体之间的通信拓扑用图 $G=(V,E,A)$ 表示。其中， $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 代表图 G 中所有顶点的集合，是一个有限的非空集合，称为顶点集。 E 是由 V 中的元素构成的无序二元组的集合，称为边集，边集 $E=V\times V$ ，图的边 $e_{ij}=(v_i,v_j)\in E$ ，表示智能体 i 和智能体 j 之间可以传递信息。在本文中，假设 $e_{ii}=(v_i,v_i)\notin E$ ，即图中不存在自环。如果存在领导-跟随关系，则领导智能体与跟随智能体之间的通信连接用矩阵 $A_0=\text{diag}(a_{10},a_{20},\dots,a_{n0})$ 表示。如果领导智能体与跟随智能体之间存在通信连接，则 $a_{i0}=1$ ；否则， $a_{i0}=0$ ， $i=1,2,\dots,n$ 。

2.1.2 通信拓扑图

电力通信网络的结构可由通信拓扑图简化表示，其仅涉及网络元件间的连接关系而不涉及电气关系，图中的每条连线代表一个通信连接线路，每一个顶点代表一个控制单元，其中边有方向的图为有向图，边没有方向的图为无向图，这样就构成了电力网络的通信拓扑图。无向通信拓扑图如图 2-1 所示，有向通信拓扑图如图 2-2 所示。

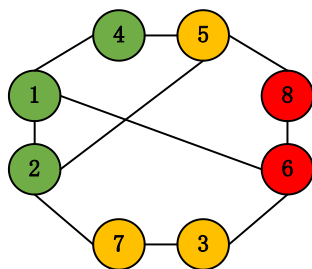


图 2-1 无向通信拓扑图

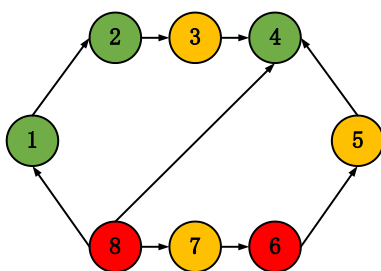


图 2-2 有向通信拓扑图

2.1.3 拉普拉斯矩阵

对无向连通图 G 来说，图中的相互连接关系可以由数学矩阵表示。其中，使用最广泛的是拉普拉斯矩阵，其是基于图论中的两个基本矩阵衍生出来的，一个是邻接矩阵，另一个是度矩阵，并通过对这两种矩阵进行特定数学运算得出。接下来，将对这些矩阵逐一进行说明。

邻接矩阵(Adjacency Matrix)是图论中的一个关键矩阵，其能很好的描述图 G 中各个顶点的相互连接关系，定义邻接矩阵 A 中元素 a_{ij} 的表达式为：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & j \in N_i \\ 0 & j \notin N_i \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， a_{ij} 表示顶点 i, j 之间是否存在连接，还可表示它们之间边的权重。 N_i 表示所有与顶点 i 直接相连的其它顶点集合。

与顶点 i 关联边的数目之和为 d_i ，称为顶点 i 的度。度矩阵(Degree Matrix)定义为 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ ，其能表示每一顶点所连接的其它顶点数量。若图 G 中有 n 个顶点，那么 D 表示为：

$$D = \begin{pmatrix} |N_1| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & |N_2| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & |N_i| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & |N_n| \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

式中, $|N_i|$ 为集合 N_i 的元素个数。

拉普拉斯矩阵(Laplacian Matrix)是图论中一个至关重要的矩阵, 其体现了图的各种特性及结构信息。拉普拉斯矩阵 L 可通过计算公式 $L = D - A$ 得出, 则 L 中元素 L_{ij} 表示为:

$$L_{ij} = \begin{cases} N_i & i = j \\ -1 & j \in N_i \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2-3)$$

2.2 李雅普诺夫稳定性理论

稳定性的研究是至关重要的, 它影响到系统能否正常运行, 是衡量系统可行性的指标, 是研究系统其它性能的基础。其常见分析方法包括李雅普诺夫函数、特征值分析等。

设系统表达式为 $\dot{x} = f(x, t)$, 且 $x_e = 0$ 是其一个平衡状态; 若标量函数 $V(x)$ 满足在某一个邻域内有连续一阶偏导数, 则以下定义成立。

定义 2.1^[62]如下所示:

- 1) 若 $V(x, t)$ 正定, $\dot{V}(x, t)$ 负定, 则原点渐近稳定。
- 2) 若 $V(x, t)$ 正定, $\dot{V}(x, t)$ 负半定, 且 $\dot{V}(x(t, x_0, t_0))$ 在 $x \neq 0$ 处不一直为零, 则原点渐近稳定。
- 3) 若 $V(x, t)$ 正定, $\dot{V}(x, t)$ 负半定, 且 $\dot{V}(x(t, x_0, t_0))$ 在 $x \neq 0$ 处全为零, 则原点是李雅普诺夫条件下稳定。

判断系统稳定性依靠能否构造合适的李雅普诺夫函数 $V(x)$ 并验证其沿系统动态方向的导数为负定还是半负定。在实际应用中, 大多根据经验构造 $V(x)$ 。

总的来说, 系统稳定性判定过程可概括为:

1) 依照状态变量 x 构造 $V(x)$ ，但要确保 $V(x)$ 正定。

2) 求出其对时间 t 的导数 $\dot{V}(x) = \partial V(x) / \partial t$ 。

3) 若 $\dot{V}(x)$ 非正定，则系统稳定。

按照以上步骤即可判断系统是否稳定，但构造合适的 $V(x)$ 是系统稳定性判断中的一大难题。在进行系统分析时，若能选取合适的 $V(x)$ ，就能简化系统的分析过程。

2.3 多智能体一致性

2.3.1 多智能体简述

智能体是配备传感器的计算机系统，能感知环境并利用学习经验协同完成指定任务^[63]。由此可知，智能体主要体现五大特性：自主运行能力、对外界环境的响应性、积极主动的行为模式、与其它智能体的社会互动性及持续的自我进化性。

单个智能体因受限于其自治、独立性，难以应对复杂大规模系统控制。因此，构建 MAS，通过智能体间局部通信完成复杂任务，优化系统整体性能。

目前，MAS 技术已在众多领域得到广泛应用，例如在编队控制^[64-66]、避障控制^[67,68]、路径规划^[69,70]等方面都有应用。MAS 研究聚焦两点：①改造系统实现分布式、灵活扩展功能；②用 MAS 模型解决实践问题。因其能很好的解决分布式场景问题，被广泛应用于微电网分布式经济优化调度与分布式分层优化控制等领域。

2.3.2 一致性理论

在 MAS 中，一致性这一概念主要表现为各个智能体根据预设的协议规则动作，通过本地化或局部化的信息交互，使得各自状态信息在动态变化过程中逐渐趋于一致。这种一致性的达成并不依赖于 MGCC 的全局协调，而是基于智能体之间的自主合作和信息共享机制。在微电网系统中，由于其包含多种分布式能源、储能设备以及负荷单元，它们需要进行高效、灵活且实时的功率调度和系统控制以保证整个微电网的安全稳定运行。此时，一致性协议就发挥了关键作用，通过设计合适的一致性算法，可以使各个智能体在满足自身约束的同时，协同调整各自运行状态，使整个微电网的全局状态（例如频率、电压、功率分配等）达到预期均衡点或跟踪某一预定参考值，从而实现复杂的调度与控制目标。

2.3.3 一致性协议

(1) 有限时间一致性协议

定义 2.2: 定义函数 $sign^M(r) = |r|^M sign(r)$, 其中 $r \in R$, $M > 0$ 。符号函数 $sign$ 定义为:

$$sign(r) = \begin{cases} 1, r > 0 \\ 0, r = 0 \\ -1, r < 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

式中, M 为定义函数中的指数。

有关领导-跟随有限时间一致性算法, 文献[71]提出了一种一致性协议, 协议如下所示:

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} sign^a(x_j(t) - x_i(t)) - a_{i0} sign^a(x_i(t) - x_0(t)) \quad (2-5)$$

式中, a_{ij} 是 A 中智能体 i 与智能体 j 之间的连接权值; a_{i0} 是 A_0 中智能体 i 与领导者之间的连接权值; $x_i(t)$ 为跟随智能体 i 的位置状态; $x_0(t)$ 为领导智能体的位置状态; a 为符号函数中的指数, $0 < a < 1$ 。

为加快系统收敛速度, 文献[62]在式 (2-5) 的基础上引入总体代价函数梯度算法项, 得到:

$$\begin{aligned} u_i(t) = & \sum_{j \in N_i} a_{ij} sign^a(x_j(t) - x_i(t)) + a_{i0} sign^a(x_0(t) - x_i(t)) \\ & + \eta_1 \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) + \eta_2 a_{i0} (x_0(t) - x_i(t)) \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中, η_1 、 η_2 为增益系数, $\eta_1 > 0$, $\eta_2 > 0$ 。

(2) 平均有限时间一致性协议

有关平均有限时间一致性算法, 文献[72]提出典型的有限时间一致性协议为:

$$u_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} sign(x_j - x_i) |x_j - x_i|^a \quad (2-7)$$

为加快系统收敛速度, 文献[11]提出一种改进平均有限时间一致性。协议如下所示:

$$u_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^n a_{ij} sign(x_j - x_i) |x_j - x_i|^a \quad (2-8)$$

式中， a 为控制因子，其取值范围为 $0 < a < 1$ 。

(3) 含时延一致性协议

考虑到智能体间的通信延迟以及其自身的控制延迟影响，引入了包含时延的一致性协议，其数学表达式为：

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i}^n a_{ij} \left[x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ii}) \right] \quad (2-9)$$

式中， τ_{ij} 为第 i 个节点和第 j 个节点间的通信时延； τ_{ii} 为第 i 个节点的控制时延。

2.4 本章小结

本章首先对图论知识进行简单概述，然后介绍了图论中通信拓扑图与拉普拉斯矩阵的相关知识，并对拉普拉斯矩阵中邻接矩阵与度矩阵的概念以及拉普拉斯矩阵的构成进行了说明。接着介绍了李雅普诺夫稳定性理论。最后，针对多智能体一致性中多智能体的概念、特点以及一致性理论进行说明，介绍了目前已有的一些一致性协议，并对其进行阐述。

第3章 基于领导-跟随改进有限时间一致性的微电网经济优化调度

根据等微增率准则,微电网经济调度问题可转换为功率分配过程中增量成本一致性的问题^[31]。目前,多智能体一致性理论应用广泛,特别是在微电网经济调度^[73,74]、协同控制方面^[75,76],已有大量文献对其进行研究。文献[73]针对网络攻击下微电网经济调度问题,基于多智能体一致性算法研究了一种完全分布式经济调度策略,在降低微电网运行成本的同时,有效减少了网络攻击带来的影响。文献[74]针对微电网优化调度问题,研究了基于多智能体一致性的微电网分布式经济调度策略,该策略以发电成本最小为目标,对比了一阶一致性算法和二阶一致性算法在微电网中的响应性能,并采用事件触发机制来优化通信方式,从而节约通讯带宽,达到经济性要求。

基于以上研究,本章将多智能体一致性理论运用于微电网经济优化调度中,将每个 DG 与可控负荷看作一个智能体,建立通信拓扑图,设定每个 DG 与可控负荷的一致性变量,基于多智能体一致性理论研究了一种领导-跟随改进有限时间一致性算法,该算法在提升系统收敛速度的同时,能够使系统内供需功率达到动态平衡。最后,基于该领导-跟随改进有限时间一致性算法提出了一种分布式经济优化调度策略,使微电网的运行经济性最优。

3.1 领导-跟随改进有限时间一致性算法

3.1.1 算法描述

在多智能体系统中,选取代数连通度最大的智能体为领导智能体,其余为跟随智能体。设每个智能体只能从本身相邻智能体处获取信息,由此建立领导-跟随一阶多智能体系统的动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = u_i(t), & i \in V \\ \dot{x}_h(t) = u_h(t), & h \in V_0 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中, $x_i(t)$ 和 $u_i(t)$ 分别为跟随智能体 i 在时间 t 时的位置状态和输入; $x_h(t)$

和 $u_h(t)$ 分别为领导智能体 h 在时间 t 时的位置状态和输入； V_0 为领导智能体顶点的集合。

定义 3.1^{[62][71]}：如果对于任意初始状态 $x_h(0)$ ， $h \in V_0$ 和 $x_i(0)$ ， $i \in V$ ，存在控制输入 $u_i(t)$ 和一个时间 $T \in [0, +\infty)$ ，使得系统式 (3-1) 的解满足：

$$\lim_{t \rightarrow T} \|x_i(t) - x_h(t)\| = 0 \quad (3-2)$$

并且对于所有的 i 、 h 和 $\forall t \geq T$ 都成立， T 为系统临界收敛时间，则称系统式 (3-1) 在有限时间内达到领导-跟随一致。

有关领导-跟随有限时间一致性算法，文献[71]提出了一种一致性协议，协议如式 (2-5) 所示。为进一步加快系统收敛速度，文献[62]在式 (2-5) 的基础上引入总体代价函数梯度算法项，协议如式 (2-6) 所示。

但上述协议均存在一些问题，例如文献[62]中领导节点的状态固定不变，不能满足智能体“即插即用”要求，为了将有限时间一致性算法运用到微电网经济优化调度中，本文对文献[62]中传统有限时间一致性算法进行改进，在其基础上引入增益系数和功率偏差消除项，以此来加快系统收敛速度、解决系统供需功率不平衡等问题。

根据动力学模型中智能体位置状态 $x_i(t)$ 与其输入 $u_i(t)$ 之间的关系以及等微增率准则，并将其应用到微电网优化调度中，则位置状态 $x_i(t)$ 可等效为经济调度中的一致性变量 $\lambda_i(t)$ ，其输入 $u_i(t)$ 可等效为一致性变量的变化量 $\dot{\lambda}_i(t)$ ，改进算法为：

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_i(t) = & r_1 \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + a_{i0} \text{sign}^a(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) \right) \\ & + \eta_1 \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + \eta_2 a_{i0} (\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) + \sigma \Delta P \end{aligned} \quad (3-3)$$

式中， $\lambda_0(t)$ 和 $\lambda_i(t)$ 分别表示系统中领导节点和跟随节点的一致性变量； r_1 为增益系数， $r_1 > 0$ ； σ 为收敛系数， $\sigma > 0$ ，它会影响算法迭代收敛的速度和系统的稳定性； ΔP 为系统中负荷总需求功率与分布式发电单元和储能总出力之间的供需功率偏差。

3.1.2 算法收敛性分析

利用李雅普诺夫稳定性理论与图论定理来证明多智能体系统式 (3-1) 在所

提改进算法式 (3-3) 的条件下能够使系统在有限时间内实现收敛, 下面给出一些引理。

引理 3.1^[62]: 对于系统中给定的无向拓扑图 G , 若存在某个函数 $\varphi: R^2 \rightarrow R$ 满足条件 $\varphi(x_i, x_j) = -\varphi(x_j, x_i)$, $\forall i, j \in V, i \neq j$, 则存在一组数列 $\{y_b\}$, $b=1, 2, \dots, B$, B 为智能体数量。满足条件:

$$\sum_{i=1}^B \sum_{j \in N_i} a_{ij} y_i \varphi(x_j, x_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^B \sum_{j \in N_i} a_{ij} (y_j - y_i) \varphi(x_j, x_i) \quad (3-4)$$

引理 3.2^[62]: 对于给定的一组数列 $\{y_b\} \geq 0$, 若指数 p 满足 $0 < p \leq 1$, 则

$$\sum_{i=1}^B y_i^p \geq (\sum_{i=1}^B y_i)^p。$$

引理 3.3^[62]: 系统给定一个无向拓扑图 G , $L = [l_{ij}] \in R^{n \times n}$ 表示此图的拉普拉斯矩阵, 矩阵具有下列性质:

$$1) \quad c^T L c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (c_j - c_i)^2。$$

式中, c 为每一个跟随节点与领导节点之间的跟踪误差, 为一 n 维列向量; c_i 为节点 i 与领导节点之间的跟踪误差; c_j 为节点 i 的邻居节点 j 与领导节点之间的跟踪误差。

2) 如果系统的无向拓扑图 G 为连通图, 则图的拉普拉斯矩阵的第二特征值 θ_2 大于 0, 并且当 $c \neq 0_n$, $\mathbf{1}_n^T c = 0$ 时, 拓扑图的代数连通度为 $\min \frac{c^T L c}{c^T c}$, 满足 $c^T L c \geq \theta_2 c^T c$ 。 $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$ 为拉普拉斯矩阵特征值对应的右特征向量。

3) 如果系统的无向拓扑图 G 为连通图, 且领导与跟随智能体之间的通信连接用矩阵 $A_0 = \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$ 表示。则 $L + \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$ 是正定的。

引理 3.4^[62]: 非利普希茨连续非线性系统 $\dot{x} = f(x)$, $f(0) = 0$ 。若存在函数 $I(x)$ 定义在原点区域 $C > 0$, $a \in (0, 1)$, 有 $\dot{I}(x) + C I^a(x) \leq 0$, 则原点是有限时间稳定的, 并且有限时间 $T(x(0))$ 取决于初始状态 $x(0)$, 满足条件:

$$T(x(0)) \leq \frac{I(0)^{1-a}}{C(1-a)} \quad (3-5)$$

假设一阶多智能体系统的通信拓扑图无向且连通，且系统具有领导智能体和跟随智能体，则系统式（3-1）在改进算法式（3-3）的作用下能够在有限时间内实现收敛一致。主要证明过程如下：

证明：令 t 时刻跟随节点 i 与领导节点之间的跟踪误差 c_i 为：

$$c_i(t) = \lambda_i(t) - \lambda_0(t) \quad (3-6)$$

由式（3-1）、式（3-3）、式（3-6）得：

$$\begin{aligned} \dot{c}_i(t) &= r_1 \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sign}^a(c_j(t) - c_i(t)) + a_{i0} \text{sign}^a(c_0(t) - c_i(t)) \right) \\ &\quad + \eta_1 \sum_{j \in N_i} a_{ij} (c_j(t) - c_i(t)) + \eta_2 a_{i0} (c_0(t) - c_i(t)) + \sigma \Delta P \\ &= r_1 \sum_{j=0}^n a_{ij} \text{sign}^a(c_j(t) - c_i(t)) + \eta_1 \sum_{j \in N_i} a_{ij} (c_j(t) - c_i(t)) \\ &\quad - \eta_2 a_{i0} (c_i(t)) + \sigma \Delta P \end{aligned} \quad (3-7)$$

式中， $c_j(t)$ 为 t 时刻跟随节点 i 邻居节点的跟踪误差； $\dot{c}_i(t)$ 为 t 时刻跟随节点 i 与领导节点之间跟踪误差的变化量； $c_0(t)$ 为 t 时刻领导节点的跟踪误差。

设 Lyapunov 函数为 $I(t) = \sum_{i=0}^n c_i^2(t)$ ，由式（3-7）和引理 3.1 得：

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) &= 2 \sum_{i=0}^n c_i(t) \dot{c}_i(t) = 2 \sum_{i=0}^n c_i(t) \left(r_1 \sum_{j=0}^n a_{ij} \text{sign}^a(c_j(t) - c_i(t)) \right. \\ &\quad \left. + \eta_1 \sum_{j=0}^n a_{ij} (c_j(t) - c_i(t)) - \eta_2 a_{i0} (c_i(t)) + \sigma \Delta P \right) \\ &= 2r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} c_i(t) \text{sign}^a(c_j(t) - c_i(t)) + 2\eta_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} c_i(t) (c_j(t) - c_i(t)) \\ &\quad - 2\eta_2 \sum_{i=0}^n c_i(t) a_{i0} c_i(t) + 2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t) \Delta P \\ &= -r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} (c_j(t) - c_i(t)) \text{sign}^a(c_j(t) - c_i(t)) \\ &\quad - \eta_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} (c_j(t) - c_i(t)) (c_j(t) - c_i(t)) - 2\eta_2 \sum_{i=0}^n a_{i0} c_i^2(t) + 2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t) \Delta P \\ &= -r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} |c_j(t) - c_i(t)|^{a+1} - \eta_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} (c_j(t) - c_i(t))^2 \\ &\quad - 2\eta_2 \sum_{i=0}^n a_{i0} c_i^2(t) + 2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t) \Delta P \\ &\leq -r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} |c_j(t) - c_i(t)|^{a+1} + 2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t) \Delta P \end{aligned} \quad (3-8)$$

现在, 讨论 $2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t)\Delta P$ 的正负性, 由式 (3-1) 得: $\lambda_0(t) = \int \dot{\lambda}_0(t)dt + C_1$,

$$\lambda_i(t) = \int \dot{\lambda}_i(t)dt + C_2。$$

$$\begin{aligned} \text{令 } F(t) &= \lambda_0(t) - \lambda_i(t), \text{ 故 } \dot{F}(t) = \dot{\lambda}_0(t) - \dot{\lambda}_i(t); \quad \text{令 } \dot{\lambda}_0(t) = a(t) + \sigma_1 \Delta P, \\ \dot{\lambda}_i(t) &= b(t) + \sigma_2 \Delta P, \quad a(t) = r_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)) + \eta_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j}(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)), \\ b(t) &= r_1 \left(\sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + a_{i0} \text{sign}^a(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) \right) \\ &\quad + \eta_1 \sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + \eta_2 a_{i0}(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) \end{aligned}$$

式中, C_1 、 C_2 为常数; $\dot{\lambda}_0(t)$ 、 $\dot{\lambda}_i(t)$ 分别为 t 时刻领导节点、跟随节点一致性变量的变化量; $\lambda_j(t)$ 为 t 时刻跟随节点 i 邻居节点的一致性变量; N_0 表示领导节点的邻居节点集合。

假设初始时刻智能体的状态相同。讨论如下:

1) 当 $\dot{\lambda}_0(t) - \dot{\lambda}_i(t) > 0$ 时, $\dot{F}(t) > 0$, 所以 $F(t) > F(0) = 0$, $\lambda_0(t) > \lambda_i(t)$ 。则 $r_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)) < r_1 \sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_i(t))$, 式中 a_{0j} 为节点 j 与领导节点之间的连接权值; $\eta_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j}(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)) < \eta_1 \sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t))$, $r_1 a_{i0} \text{sign}^a(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) > 0$, $\eta_2 a_{i0}(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) > 0$ 。则 $a(t) < b(t)$, $\dot{\lambda}_0(t) - \dot{\lambda}_i(t) = a(t) - b(t) + (\sigma_1 - \sigma_2)\Delta P > 0$, $\Delta P > \frac{b(t) - a(t)}{\sigma_1 - \sigma_2} > 0$, 又因为 $c_i(t) = \lambda_i(t) - \lambda_0(t) < 0$, 故 $2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t)\Delta P < 0$ 。

2) 当 $\dot{\lambda}_0(t) - \dot{\lambda}_i(t) < 0$ 时, $\dot{F}(t) < 0$, 所以 $F(t) < F(0) = 0$, $\lambda_0(t) < \lambda_i(t)$ 。则 $r_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)) > r_1 \sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij} \text{sign}^a(\lambda_j(t) - \lambda_i(t))$, $\eta_1 \sum_{j \in N_0} a_{0j}(\lambda_j(t) - \lambda_0(t)) > \eta_1 \sum_{i \neq 0, j \in N_i} a_{ij}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t))$, $r_1 a_{i0} \text{sign}^a(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) < 0$, $\eta_2 a_{i0}(\lambda_0(t) - \lambda_i(t)) < 0$, 则 $a(t) > b(t)$, $\dot{\lambda}_0(t) - \dot{\lambda}_i(t) = a(t) - b(t) + (\sigma_1 - \sigma_2)\Delta P < 0$, $\Delta P < \frac{b(t) - a(t)}{\sigma_1 - \sigma_2} < 0$, 又因为 $c_i(t) = \lambda_i(t) - \lambda_0(t) > 0$, 故 $2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t)\Delta P < 0$ 。

3) 当 $\lambda_0(t) - \lambda_i(t) = 0$ 时, $2\sigma \sum_{i=0}^n c_i(t) \Delta P = 0$ 。

由以上讨论可得:

$$\dot{I}(t) \leq -r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} |c_j(t) - c_i(t)|^{a+1} = -r_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left[a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (c_j(t) - c_i(t))^2 \right]^{\frac{1+a}{2}} \quad (3-9)$$

由引理 3.2 得:

$$\dot{I}(t) \leq -r_1 \left[\sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^n a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (c_j(t) - c_i(t))^2 \right) \right]^{\frac{1+a}{2}} \quad (3-10)$$

令 $B = L + \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$, 由引理 3.3 得:

$$\frac{\sum_{i=0}^n \left[\sum_{j=0}^n a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (c_j(t) - c_i(t))^2 \right]}{I(t)} = \frac{2c_i^T(t) B^T B c_i(t)}{c_i^T(t) B c_i(t)} \geq 2\theta_2(L_B) \quad (3-11)$$

式中, L_B 为 B 的拉普拉斯矩阵, θ_2 为 B 的拉普拉斯矩阵的第二特征值。

由式 (3-10) 和式 (3-11) 联立得:

$$\dot{I}(t) + r_1 \left[2\theta_2(L_B) \right]^{\frac{1+a}{2}} I(t)^{\frac{1+a}{2}} \leq 0 \quad (3-12)$$

结合式 (3-12) 和引理 3.4 得:

$$T(x(0)) \leq \frac{2I(0)^{\frac{1-a}{2}}}{r_1 \left[2\theta_2(L_B) \right]^{\frac{1+a}{2}} (1-a)} \quad (3-13)$$

由以上证明可得, 在 $t \geq T(x(0))$ 时, 系统式 (3-1) 能够在改进算法式 (3-3) 的作用下在有限时间内实现收敛一致性。

3.2 数学模型建立与求解

3.2.1 分布式发电、储能、可控负荷成本模型

分布式发电单元、储能和可控负荷的成本模型均采用二次函数模型。

分布式发电单元的发电成本模型为^[77]:

$$F_i(P_{Fi}) = \alpha_i + \beta_i P_{Fi} + \gamma_i P_{Fi}^2 \quad i \in S_F \quad (3-14)$$

储能的放电成本模型为^[77]:

$$C_j(P_{Cj}) = \kappa_j + w_j P_{Cj} + g_j P_{Cj}^2 \quad j \in S_C \quad (3-15)$$

可控负荷削减成本模型为^[77]:

$$X_g(P_{Xg}) = \ell_g + q_g P_{Xg} + s_g P_{Xg}^2 \quad g \in S_X \quad (3-16)$$

式中, α_i 、 β_i 、 γ_i , κ_j 、 w_j 、 g_j , ℓ_g 、 q_g 、 s_g 分别为分布式发电单元、储能、可控负荷成本模型的常数项、一次项和二次项系数; P_{Fi} 为分布式发电单元 i 所输出的功率; P_{Cj} 为储能 j 的放电功率; P_{Xg} 为可控负荷 g 所削减的功率; S_F 为分布式发电单元集合; S_C 为储能集合; S_X 为可控负荷集合。

3.2.2 目标函数

本文所研究的经济调度问题是在分布式发电单元、储能和可控负荷满足一定约束条件时, 使整个系统运行成本最小的优化问题, 即:

$$\min \left(\sum_{g \in S_X} X_g(P_{Xg}) + \sum_{i \in S_F} F_i(P_{Fi}) + \sum_{j \in S_C} C_j(P_{Cj}) \right) \quad (3-17)$$

$$s.t. \quad \sum_{g \in S_X} (P_L + P_{LL} - P_{Xg}) - \sum_{i \in S_F} P_{Fi} - \sum_{j \in S_C} P_{Cj} = 0 \quad (3-18)$$

$$P_{Fi, \min} \leq P_{Fi} \leq P_{Fi, \max} \quad i \in S_F \quad (3-19)$$

$$P_{Cj, \min} \leq P_{Cj} \leq P_{Cj, \max} \quad j \in S_C \quad (3-20)$$

$$P_{Xg, \min} \leq P_{Xg} \leq P_{Xg, \max} \quad g \in S_X \quad (3-21)$$

式中, $P_{Fi, \min}$ 和 $P_{Fi, \max}$ 分别为分布式发电单元 i 的最小、最大输出功率; $P_{Cj, \min}$ 和 $P_{Cj, \max}$ 分别表示储能 j 的最小、最大放电功率; $P_{Xg, \min}$ 和 $P_{Xg, \max}$ 分别表示可控负荷 g 的最小、最大削减功率; P_L 为固定负荷量; P_{LL} 为可控负荷初始负荷量。

3.2.3 分布式经济调度求解

利用经典拉格朗日乘子法求解, 在不考虑不等式约束的情况下, 约束优化问题式 (3-17) 和式 (3-18) 可以转化为:

$$\begin{aligned} \Psi = & \sum_{g \in S_X} X_g(P_{Xg}) + \sum_{i \in S_F} F_i(P_{Fi}) + \sum_{j \in S_C} C_j(P_{Cj}) \\ & + \xi \left(\sum_{g \in S_X} (P_L + P_{LL} - P_{Xg}) - \sum_{i \in S_F} P_{Fi} - \sum_{j \in S_C} P_{Cj} \right) \end{aligned} \quad (3-22)$$

式中， ξ 为与等式约束相对应的拉格朗日乘子。

由于需要满足电力系统中功率供需平衡，令 ΔP 为：

$$\Delta P = \sum_{g \in S_X} (P_L + P_{LL} - P_{Xg}) - \sum_{i \in S_F} P_{Fi} - \sum_{j \in S_C} P_{Cj} \quad (3-23)$$

将 Ψ 对变量 P_{Fi} 、 P_{Cj} 、 P_{Xg} 、 ξ 分别求偏导，即可求得最优化条件为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial P_{Fi}} = \frac{\partial F_i}{\partial P_{Fi}} - \xi = 0 & i \in S_F \\ \frac{\partial \Psi}{\partial P_{Cj}} = \frac{\partial C_j}{\partial P_{Cj}} - \xi = 0 & j \in S_C \\ \frac{\partial \Psi}{\partial P_{Xg}} = \frac{\partial X_g}{\partial P_{Xg}} - \xi = 0 & g \in S_X \\ \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = \Delta P = 0 \end{cases} \quad (3-24)$$

对式 (3-24) 进行移项分析后可得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial P_{F1}} = \frac{\partial F_2}{\partial P_{F2}} = \dots = \frac{\partial F_f}{\partial P_{Ff}} = \frac{\partial C_1}{\partial P_{C1}} = \frac{\partial C_2}{\partial P_{C2}} \\ = \dots = \frac{\partial C_r}{\partial P_{Cr}} = \frac{\partial X_1}{\partial P_{X1}} = \frac{\partial X_2}{\partial P_{X2}} = \dots = \frac{\partial X_k}{\partial P_{Xk}} = \xi \end{aligned} \quad (3-25)$$

$$\sum_{g \in S_X} (P_L + P_{LL} - P_{Xg}) = \sum_{i \in S_F} P_{Fi} + \sum_{j \in S_C} P_{Cj} \quad (3-26)$$

由式 (3-25)、式 (3-26) 可得，当分布式发电单元、储能和可控负荷的一致性变量三者相等时，可得系统最优解，同时系统供需功率也能达到平衡。式中 f 、 r 、 k 分别为分布式发电单元、储能和可控负荷数量； F_f 、 C_r 、 X_k 分别为第 f 、 r 、 k 个分布式发电单元、储能和可控负荷的成本模型； P_{Ff} 、 P_{Cr} 、 P_{Xk} 分别为第 f 、 r 、 k 个分布式发电单元、储能和可控负荷的响应功率。

在功率约束范围内，假设全部的分布式发电单元、储能和可控负荷都正常运行。在本章改进有限时间一致性算法中，可以将分布式发电单元的增量成本 IF 、储能的增量成本 IC 、可削减负荷的增量效益 IX 定义为：

$$IF_i = \frac{\partial F_i(P_{Fi})}{\partial P_{Fi}} = \lambda_i \quad i \in S_F \quad (3-27)$$

$$IC_j = \frac{\partial C_j(P_{Cj})}{\partial P_{Cj}} = \lambda_j \quad j \in S_C \quad (3-28)$$

$$IX_g = \frac{\partial X_g(P_{Xg})}{\partial P_{Xg}} = \lambda_g \quad g \in S_X \quad (3-29)$$

由式(3-25)可得, 当系统达到收敛一致时, $\lambda_i = \lambda_j = \lambda_g = \xi$, 此时系统经济最优。式中, λ_i 、 λ_j 、 λ_g 分别为分布式发电、储能和可控负荷的一致性变量。

采用本文领导-跟随改进有限时间一致性算法进行迭代计算, 可得:

领导节点的一致性变量更新公式为:

$$\lambda_z(t+1) = \lambda_z(t) + \dot{\lambda}_z(t) \quad (3-30)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_z(t) = & r_1 \left(\sum_{m \in N_z} a_{zm} \text{sign}^a(\lambda_m(t) - \lambda_z(t)) \right) \\ & + \eta_1 \sum_{m \in N_z} a_{zm} (\lambda_m(t) - \lambda_z(t)) + \sigma_1 \Delta P \\ & z \in (S_{FZ}, S_{CZ}, S_{XZ}) \end{aligned} \quad (3-31)$$

式中, N_z 表示领导节点 z 邻居节点的集合; a_{zm} 是 A_0 中节点 m 与领导节点 z 之间的连接权值; σ_1 为领导节点收敛系数, $\sigma_1 > 0$; S_{FZ} 、 S_{CZ} 、 S_{XZ} 分别为分布式发电单元、储能和可控负荷中领导节点的集合; $\lambda_z(t)$ 为分布式发电单元、储能或可控负荷中领导节点 z 的一致性变量; $\dot{\lambda}_z(t)$ 为领导节点一致性变量的变化量; $\lambda_m(t)$ 为跟随节点 ς 或领导节点 z 邻居节点 m 的一致性变量。

跟随节点的一致性变量更新公式为:

$$\lambda_\varsigma(t+1) = \lambda_\varsigma(t) + \dot{\lambda}_\varsigma(t) \quad (3-32)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_\varsigma(t) = & r_1 \left(\sum_{m \in N_\varsigma} a_{\varsigma m} \text{sign}^a(\lambda_m(t) - \lambda_\varsigma(t)) + a_{\varsigma z} \text{sign}^a(\lambda_z(t) - \lambda_\varsigma(t)) \right) \\ & + \eta_1 \sum_{m \in N_\varsigma} a_{\varsigma m} (\lambda_m(t) - \lambda_\varsigma(t)) + \eta_2 a_{\varsigma z} (\lambda_z(t) - \lambda_\varsigma(t)) + \sigma_2 \Delta P \\ & \varsigma \in (S_F, S_C, S_X), \varsigma \notin (S_{FZ}, S_{CZ}, S_{XZ}), z \in (S_{FZ}, S_{CZ}, S_{XZ}) \end{aligned} \quad (3-33)$$

式中, N_ς 表示跟随节点 ς 邻居节点的集合; $a_{\varsigma m}$ 是 A 中节点 m 与跟随节点 ς 之间的连接权值; σ_2 为跟随节点收敛系数, $0 < \sigma_2 < \sigma_1$; $\lambda_\varsigma(t)$ 为分布式发电单元、储能或可控负荷中跟随节点 ς 的一致性变量, $\dot{\lambda}_\varsigma(t)$ 为跟随节点一致性变量的变

化量。

由式 (3-14) -式 (3-16) 和式 (3-27) -式 (3-29) 可得：

$$P_{Fi} = \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \quad i \in S_F \quad (3-34)$$

$$P_{Cj} = \frac{\lambda_j - w_j}{2\vartheta_j} \quad j \in S_C \quad (3-35)$$

$$P_{Xg} = \frac{\lambda_g - q_g}{2s_g} \quad g \in S_X \quad (3-36)$$

则分布式发电单元、储能和可控负荷削减量的功率约束变换为：

$$P_{Fi}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} & P_{Fi,\min} \leq \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq P_{Fi,\max} \\ P_{Fi,\min} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq P_{Fi,\min} \\ P_{Fi,\max} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \geq P_{Fi,\max} \end{cases} \quad (3-37)$$

$$P_{Cj}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_j - w_j}{2\vartheta_j} & P_{Cj,\min} \leq \frac{\lambda_j - w_j}{2\vartheta_j} \leq P_{Cj,\max} \\ P_{Cj,\min} & \frac{\lambda_j - w_j}{2\vartheta_j} \leq P_{Cj,\min} \\ P_{Cj,\max} & \frac{\lambda_j - w_j}{2\vartheta_j} \geq P_{Cj,\max} \end{cases} \quad (3-38)$$

$$P_{Xg}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_g - q_g}{2s_g} & P_{Xg,\min} \leq \frac{\lambda_g - q_g}{2s_g} \leq P_{Xg,\max} \\ P_{Xg,\min} & \frac{\lambda_g - q_g}{2s_g} \leq P_{Xg,\min} \\ P_{Xg,\max} & \frac{\lambda_g - q_g}{2s_g} \geq P_{Xg,\max} \end{cases} \quad (3-39)$$

由以上分析可得改进算法运行步骤如下：首先，初始化系统各种参数。接着，判断该智能体是否为领导智能体，若为领导智能体则采用式 (3-30)、式 (3-31) 计算一致性变量的值。否则，采用式 (3-32)、式 (3-33) 计算一致性变量的值。然后，判断该智能体的功率是否超过上下限，根据不同的条件，对应采用式 (3-

37)、式 (3-38)、式 (3-39) 计算多智能体的响应功率。最后, 采用式 (3-23) 计算系统供需功率偏差 ΔP , 若 ΔP 满足系统设定条件, 则运行完成, 系统达到收敛状态。否则, 将当前数据重新代入算法继续运行。改进有限时间一致性算法流程图如图 3-1 所示。

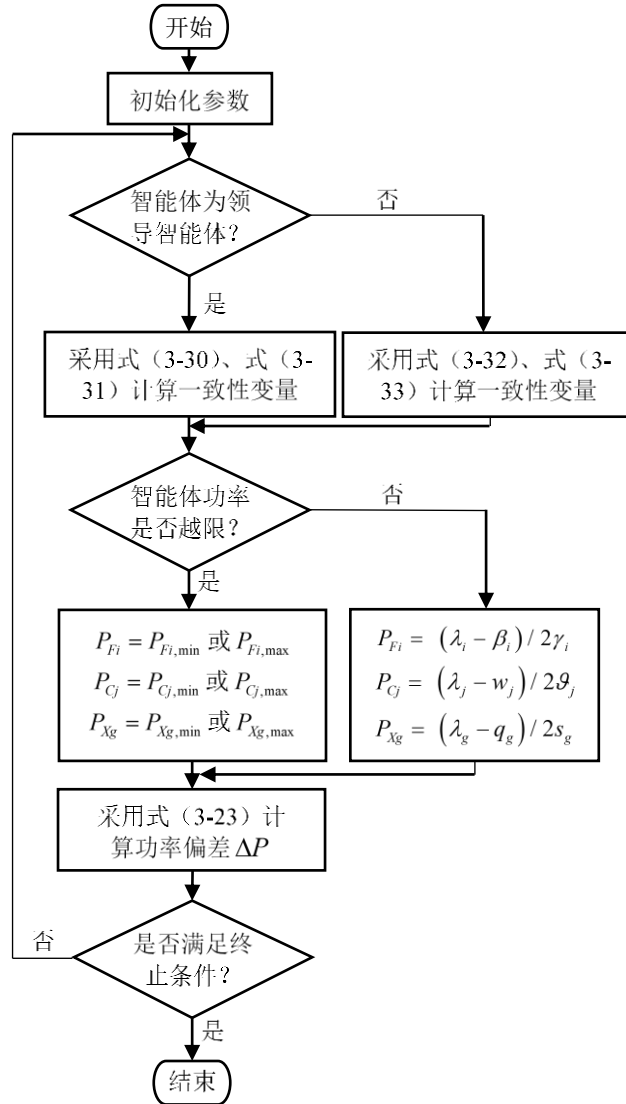


图 3-1 改进有限时间一致性算法流程图

3.3 分布式经济优化调度策略

微电网经济调度目标是使微电网运行经济成本最低。本文采用基于多智能体的领导-跟随改进有限时间一致性算法, 将 IF 、 IC 、 IX 分别作为分布式发电单元、储能、可控负荷等智能体的一致性变量。在多智能体系统中, 每个智能体通过与邻居智能体进行信息交互来更新自身的一致性变量, 并通过选择领导智能体

来控制全局一致性变量的变化。对于分布式发电单元和储能来说，当分布式发电单元和储能的总出力大于总负荷需求功率时，系统中的 $\Delta P < 0$ ，其对应的一致性变量 IF 、 IC 减小，使得分布式发电单元和储能的出力减小，反之增大。当总负荷需求功率大于分布式发电单元和储能总出力时，系统中的 $\Delta P > 0$ ，可控负荷的 IX 增大，使得可控负荷的削减量增大，系统总负荷减小；反之削减量减小，系统总负荷增大。在这个过程中，系统会逐渐实现功率动态平衡，达到收敛一致。分布式经济调度流程图如图 3-2 所示。

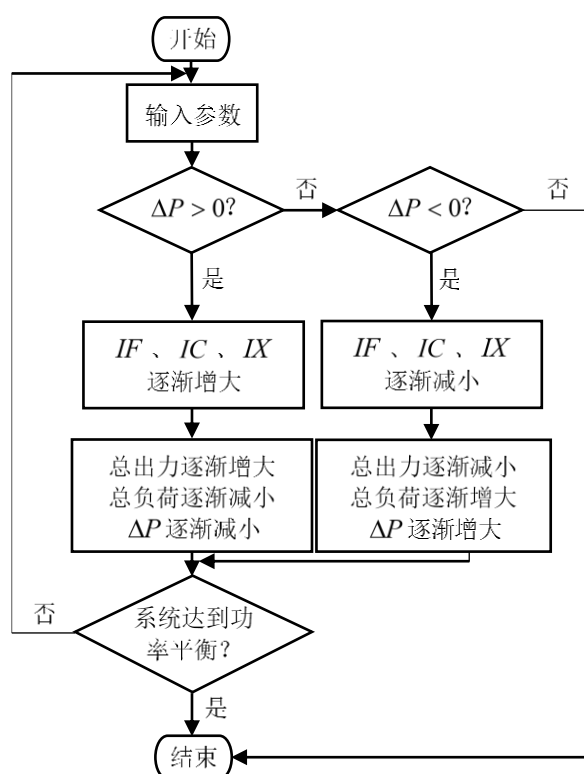


图 3-2 分布式经济调度流程图

3.4 算例与仿真

为验证本文所提领导-跟随改进有限时间一致性算法的优越性，本文分别选取少节点（以 9 节点为例）和多节点（以 39 节点为例）系统进行调度性能研究。

3.4.1 基于改进算法的少节点系统性能研究

3.4.1.1 系统动态响应性能研究

为验证本文所提分布式经济优化调度策略和领导-跟随改进有限时间一致性算法的动态响应性能，本文先采用 9 节点（少节点）系统进行仿真分析，系统采样步长设置为 0.01s。系统中含有分布式发电单元、可控负荷和储能等智能体，

为方便仿真验证,将每个智能体视为一个节点,邻近智能体之间通过相互连接的无向线段进行通信。其中节点 1、2、4 为分布式发电单元,节点 3、5、7、9 为可控负荷单元,节点 6、8 为储能单元。其中,选择节点 2、节点 3 和节点 8 分别作为领导节点。系统拓扑图如图 3-3 所示,系统各节点参数如表 3-1 所示。

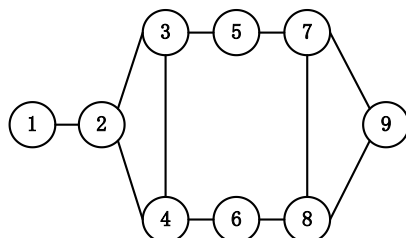


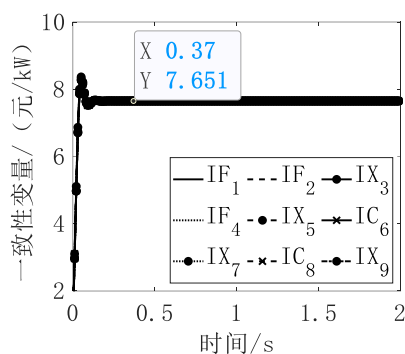
图 3-3 9 节点系统拓扑图

表 3-1 系统各节点参数

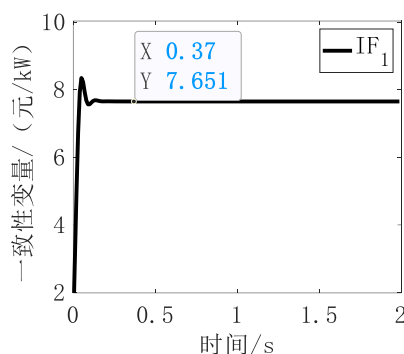
节点	常数项系数	一次项系数	二次项系数	功率下限 /kW	功率上限 /kW
1	0.81	1.30650	0.09600	0	300
2	0.92	1.29500	0.01334	0	300
3	0.79	1.62750	0.08100	0	50
4	0.80	1.13700	0.36453	0	300
5	0.71	2.05900	0.18420	0	50
6	0.85	5.27950	0.01040	0	300
7	0.74	2.76300	0.15100	0	50
8	0.88	3.36000	0.00950	0	300
9	0.65	2.83650	0.21210	0	50

图 3-3 所示系统参数设置为 $\partial=0.95$, $\sigma_1=0.30$, $\eta_1=20$, $\eta_2=2$, $\sigma_2=0.28$, $r_1=11$ 。系统中增量成本一致性变量收敛情况如图 3-4 所示。

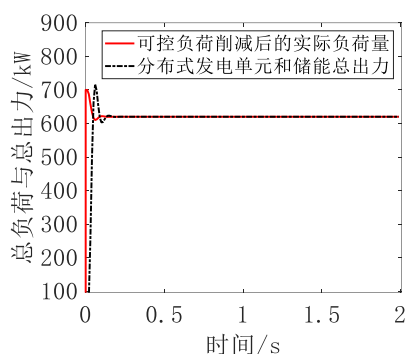
由图 3-3 分析可知,智能体 1 的代数连通度最小,是系统中最迟收敛到最优状态的智能体,将智能体 1 的收敛时间作为整个系统收敛到最优状态的时间。为简化图形和便于对比分析,除图 3-4 (d) 以及后文中图 3-6 (d)、图 3-9 和图 3-10 对图中给出的 (X,Y) 值进行特殊说明以外,其余图中给出的 (X,Y) 值均表示智能体 1 对应的横坐标和纵坐标的值,X 代表收敛时间,Y 代表一致性变量收敛值。



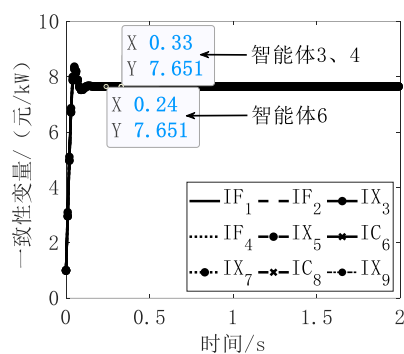
(a) 一致性变量收敛情况



(b) 图 (a) 中智能体 1 的一致性变量收敛情况



(c) 总负荷与总出力情况

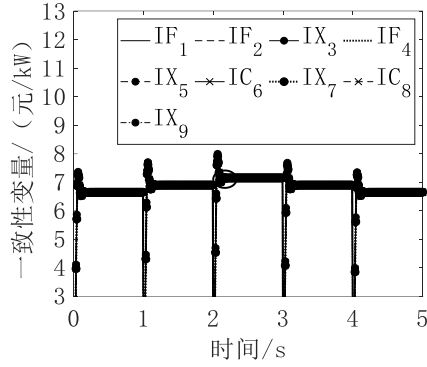


(d) 智能体 3、4、6 一致性变量收敛情况

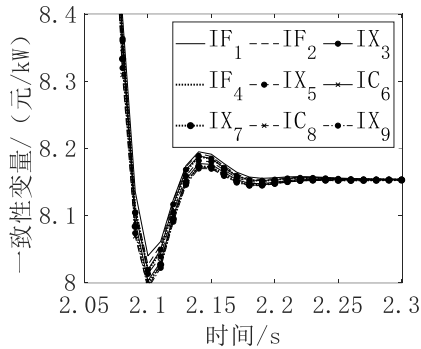
图 3-4 增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-4 (a) 和图 3-4 (b) 可知, 系统在 0.37 秒达到收敛一致, 收敛到最优状态时一致性变量的值为 7.651 元/kW, 系统中各智能体均能收敛到最优值, 验证了本章改进算法的有效性。由图 3-4 (c) 可知, 系统中供需功率可以达到平衡; 图 3-4 (d) 中分别给出了智能体 3、4、6 对应的 (X,Y) 值, 其中 X 代表收敛时间, Y 代表一致性变量收敛值, 由图 3-4 (d) 可知, 智能体 3、4、6 分别在 0.33 秒、0.33 秒、0.24 秒达到最优收敛状态。

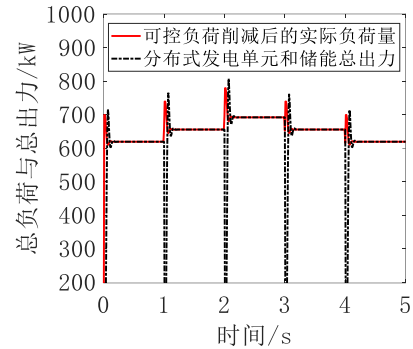
实际上, 系统总负荷是实时变化的, 使得系统调度指令也随之变化, 为验证算法的实时性, 设在 $t=1$ 秒时, 系统总负荷增加 40kW; 设在 $t=2$ 秒时, 系统总负荷增加 80kW; 设在 $t=3$ 秒时, 系统总负荷减小 40kW; 设在 $t=4$ 秒时, 系统总负荷恢复到初始值。多次调度指令中增量成本一致性变量收敛情况如图 3-5 所示。



(a) 一致性变量收敛情况



(b) 图 (a) 中一致性变量局部放大图



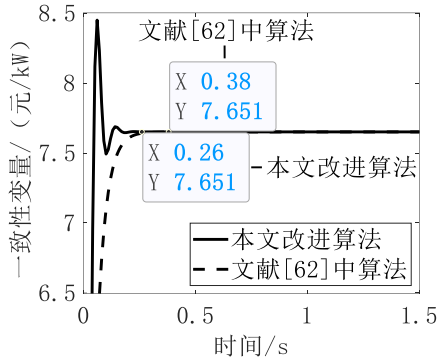
(c) 总负荷与总出力情况

图 3-5 多次调度指令中增量成本一致性变量收敛情况

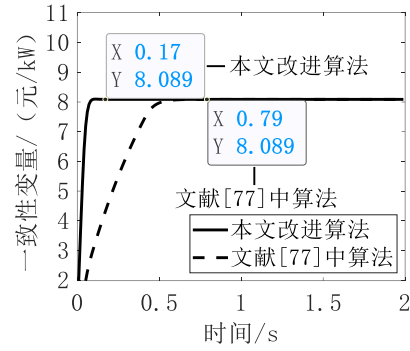
由式 (3-23)、图 3-2、图 3-5 (a) 可知, 各智能体一致性变量值先变大后变小, 系统中供需功率偏差以及总出力也先变大后变小, 但各智能体最终都能快速收敛到最优状态, 系统依然能达到收敛一致; 图 3-5 (b) 为各智能体收敛前的暂态过程局部放大图, 由图可以看出各智能体的收敛过程相同, 在经过一段时间后, 都趋于一致; 由图 3-5 (c) 可知, 调度指令改变时, 系统中总负荷与总出力之间不能平衡, 此时可控负荷根据 DG 与储能的出力情况改变自身削减负荷量, 系统总负荷量增大时, 可控负荷削减量增加, 总负荷量减小时, 可控负荷削减量减小。DG 与储能根据系统中实际负荷量的大小, 改变自身出力, 系统中实际负荷量增大时, DG 与储能总出力增大, 实际负荷量减小时, DG 与储能总出力减小, 直到系统中供需功率重新达到平衡。

为验证改进算法的优越性, 本文将所提改进算法与文献[62]所提传统有限时间一致性算法、文献[77]所提经典主从一致性算法以及文献[78]所提有限时间一致性算法进行对比。其中, 在文献[77]场景下, 图 3-3 系统包含 4 个分布式发电单元和 5 个可控负荷, 其中节点 2、8 为领导节点, 将本文所提改进算法与文献

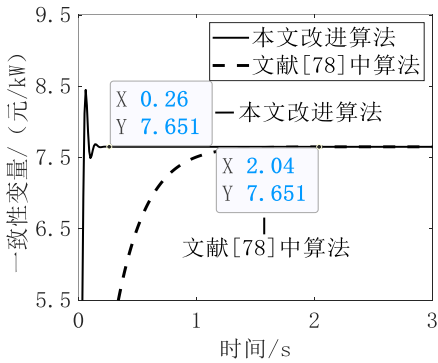
[77]所提算法进行比较；在本文场景下，将本文所提改进算法与文献[62]、[78]所提算法进行比较。为方便对比观察，图中仅给出各算法中智能体 1 之间的一致性变量比较，一致性变量比较结果如图 3-6 所示，与文献[62]中供需功率偏差对比结果如图 3-6 (d) 所示。同前文，取智能体 1 的收敛时间作为系统收敛时间。图 3-6 (d) 中，X 表示时间，Y 表示供需功率偏差值。



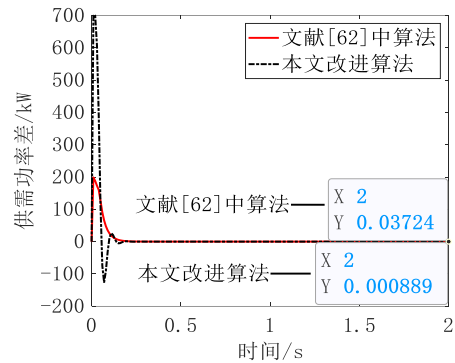
(a) 与文献[62]所提算法一致性变量对比结果



(b) 与文献[77]所提算法一致性变量对比结果



(c) 与文献[78]所提算法一致性变量对比结果



(d) 与文献[62]所提算法供需功率偏差对比结果

图 3-6 本文改进算法与其它算法对比结果

由图 3-6 (a)、(b)、(c) 可知，本文所提改进算法比文献[62]、[77]、[78]所提算法收敛性能更优，系统达到相同收敛状态的用时分别减少 0.12 秒、0.62 秒、1.78 秒，分别减少了 31.6%、78.5%、87.3%。并且文献[62]中领导节点的状态一直固定不变，不能满足智能体“即插即用”的要求。由图 3-6 (d) 可知，文献[62]所提算法计算出的供需功率偏差绝对值为 37.24W，并且成本模型参数改变会影响系统供需功率平衡。而本文所提改进算法计算出的供需功率偏差值为 0.889W，相较于文献[62]中算法计算所得供需功率偏差值降低了 97.6%。

3.4.1.2 DG “即插即用” 特性研究

系统参数设置与 3.4.1.1 中相同。固定负荷设置在节点 3、5、7、9 处，负荷量为固定的 75kW，可控负荷的初始负荷量设置为 100kW。假设在 2 秒时智能体 3 退出系统，在 4 秒时重新投入系统。“即插即用”情形下增量成本一致性变量收敛情况如图 3-7 所示。

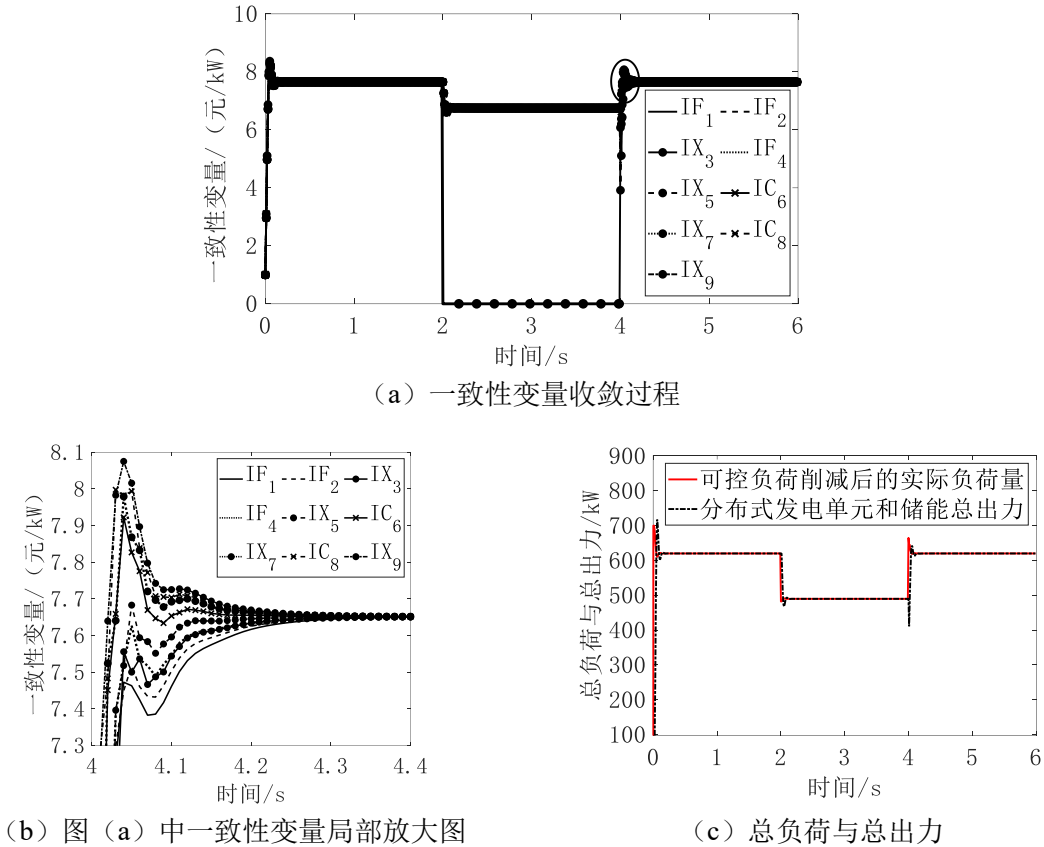


图 3-7 “即插即用”情形下增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-7 (a) 可知，系统在 2 秒前已达到稳态；在 2 秒时，智能体 3 切出系统，此时系统总负荷减小，总出力在切出时刻保持不变，由式 (3-23) 可得，供需功率偏差 $\Delta P < 0$ ，使得各智能体对应的一致性变量和响应功率减小，供需功率再次达到平衡，此时整个系统收敛到新的状态。在 4 秒时，智能体 3 重新投入系统，系统再次恢复到之前的收敛状态。图 3-7 (b) 为各智能体收敛前的暂态过程，可以看出各智能体在经过一段时间后，都趋于一致；由图 3-7 (c) 可知，在智能体 3 切出前，实际负荷量曲线与总出力曲线重合，系统供需功率能达到平衡；在智能体 3 切出系统后，此时由式 (3-23) 可知，系统供需功率偏差项 $\Delta P < 0$ ，使得 DG 与可控负荷对应的一致性变量减小，进而使得 DG 出力减小，可控负荷削

减量减小，直到系统中供需功率重新达到平衡状态；在智能体 3 重新投入系统后，系统恢复到初始状态，系统供需功率恢复到初始平衡状态。综上所述，本文所提改进算法能满足智能体“即插即用”要求。

3.4.1.3 增益系数对系统收敛速度影响研究

在其余参数设置与 3.4.1.1 中相同的情况下，改变增益系数 r_1 的大小，探究其对系统的影响，分别设置 $r_1=1$ 和 $r_1=15$ ，系统中增量成本一致性变量收敛情况如图 3-8 所示。

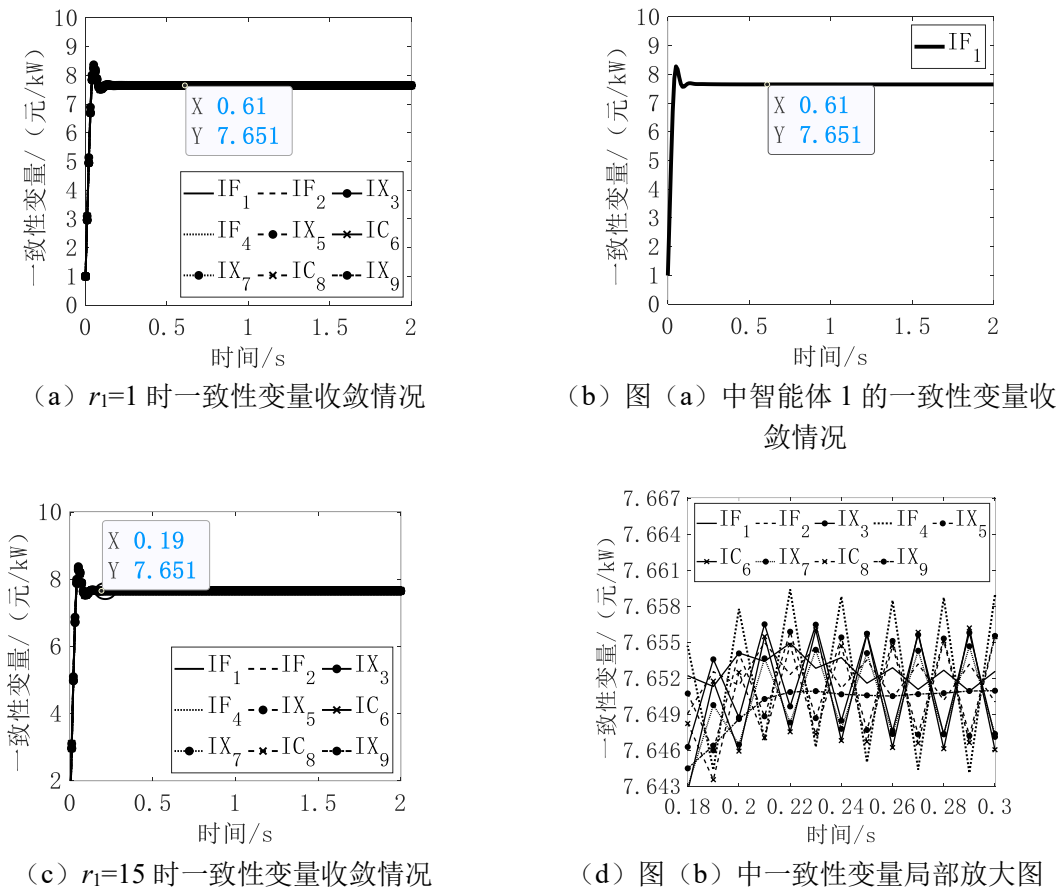


图 3-8 不同增益系数时增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-8 (a)、图 3-8 (b) 可知，智能体 1 在 0.61 秒收敛到最优状态，由前文所述，系统在 0.61 秒收敛到最优状态，与图 3-4 (a) 相比系统收敛时间增加 0.24 秒，增加了 39.3%。因为由式 (3-13) 可得，当增益系数 r_1 减小时，分母减小，因此收敛时间增加；同理，当增益系数 r_1 增大时，式 (3-13) 中的分母增大，收敛时间减少。但增益系数 r_1 不能无限扩大，由图 3-8 (c) 可知，当增益系数 r_1 为 15 时，系统在 0.19 秒收敛到最优状态，与图 3-4 (a) 相比系统收敛时间减少

0.18 秒，减少了 48.6%，但由图 3-8 (d) 可知，系统稳态性能变差，不能准确收敛到一个稳定状态。因为增益系数过大时，由式 (3-3) 可得，一致性变量的变化量会变大，导致每次一致性变量的更新值差异很大，使得一致性变量不能收敛到一个稳定值。

3.4.1.4 系统拓扑结构改变影响研究

将智能体 3 与智能体 4 所在节点、智能体 4 与智能体 6 所在节点之间的通信线路断开，则系统拓扑结构如图 3-9 所示。设系统参数设置与 3.4.1.1 相同。系统拓扑改变时增量成本一致性变量收敛情况如图 3-10 所示。图中给出了智能体 3、4、6 对应的 (X,Y) 值，X 代表收敛时间，Y 代表一致性变量收敛值。

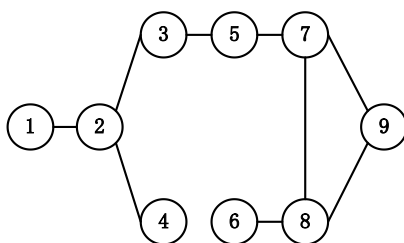
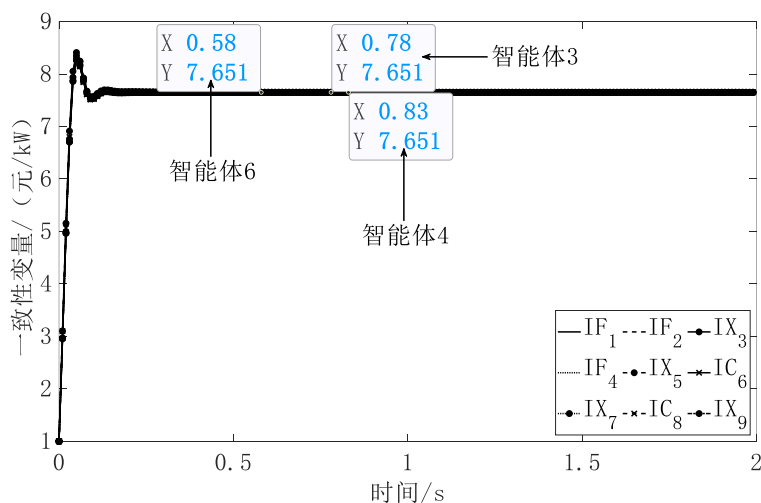
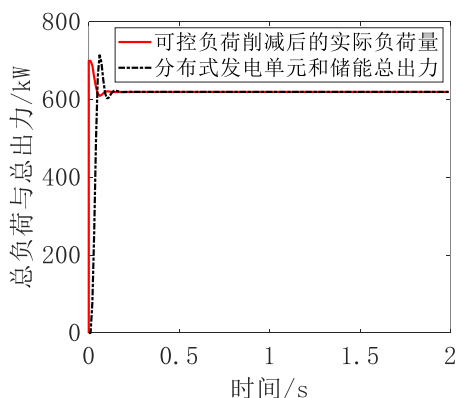


图 3-9 系统拓扑结构图



(a) 一致性变量收敛情况



(b) 总负荷与总出力情况

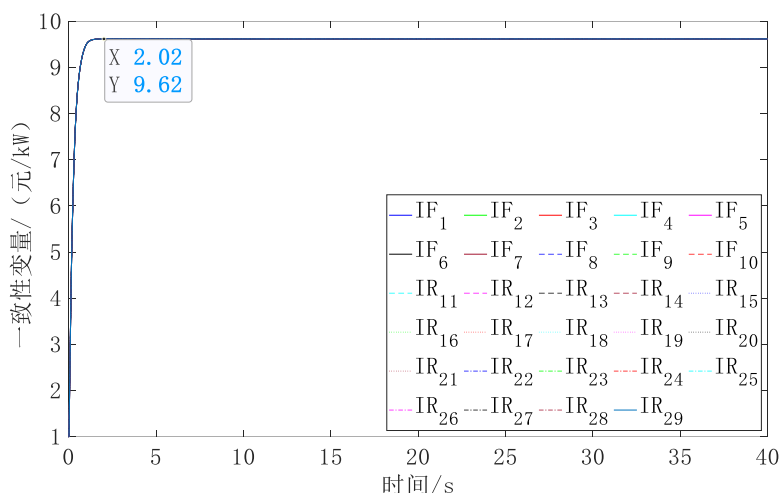
图 3-10 系统拓扑结构改变时增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-9 和图 3-10 (a) 可知, 在智能体 3 与 4, 4 与 6 之间的通信线路断开时, 整个系统拓扑图的代数连通度降低, 系统达到收敛一致性的速度变慢, 并且智能体 3、4、6 所在节点的代数连通度也同样减少, 使这三个智能体达到收敛一致性的速度变慢, 达到收敛状态用时分别为 0.78 秒、0.83 秒、0.58 秒。在智能体 4 达到收敛一致性时, 整个系统才达到收敛状态, 用时 0.83 秒。对比图 3-4(a) 可知, 系统收敛时间比图 3-3 通信线路正常时增加 0.46 秒, 增加了 55.4%; 对比图 3-4 (d) 可知, 智能体 3、4、6 达到收敛分别多用时 0.45 秒、0.50 秒、0.34 秒。同时, 将图 3-10 (b) 与图 3-4 (c) 对比可知, 通信线路断开只是影响系统达到收敛一致性的速度, 并不干扰系统中供需功率的动态平衡。

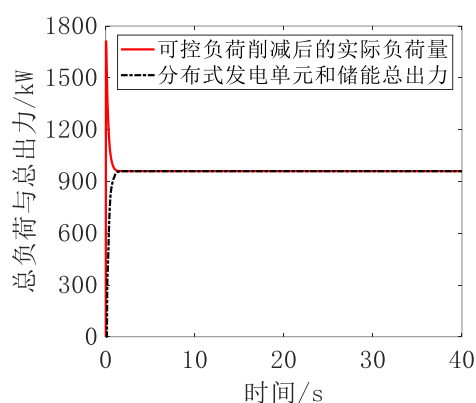
3.4.2 基于改进算法的多节点系统性能研究

3.4.2.1 系统动态响应性能研究

为研究本文领导-跟随改进有限时间一致性算法在多节点系统中的响应性能, 本文采用文献[77]中 IEEE39 节点系统进行仿真分析, 系统采样步长设置为 0.01s。系统中包含 10 个 DG 与 19 个柔性负荷, 将 DG 按照 1-10 顺序编号, 柔性负荷按照 11-29 顺序编号, 并将其看作智能体, 分别选取 DG1 与柔性负荷 11 为领导智能体, 增量成本一致性变量收敛情况如图 3-11 所示。



(a) 一致性变量收敛情况

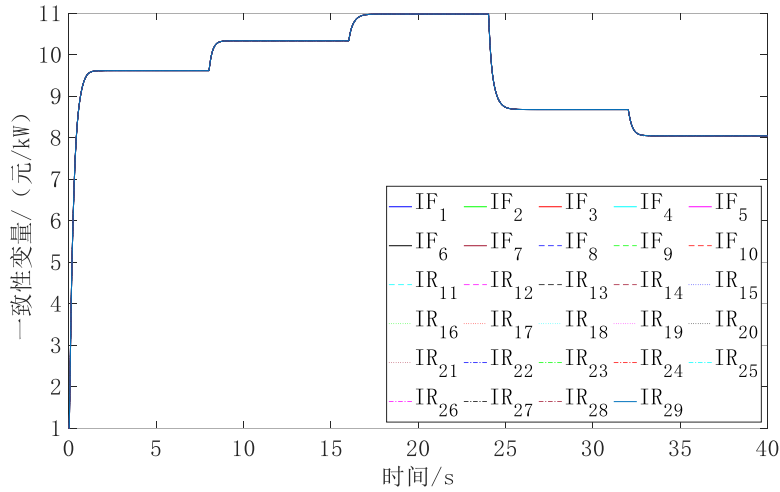


(b) 总负荷与总出力情况

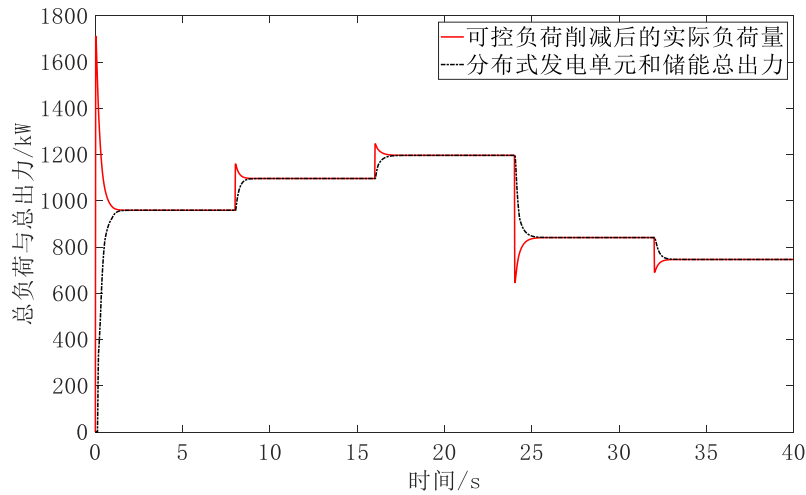
图 3-11 增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-11 (a) 可知, 系统在 2.02 秒时达到收敛一致性, 收敛到最优状态时一致性变量的值为 9.62 元/kW, 系统中各智能体均能收敛到最优值, 验证了本文改进算法在多节点系统中的有效性。由图 3-11 (b) 可知, 可控负荷根据 DG 与储能出力情况削减自身负荷量, DG 与储能根据削减负荷量调整自身出力, 直到实际负荷量曲线与总出力曲线重合, 系统中供需功率达到平衡。

随着系统总负荷改变, 其对应的调度指令也发生相应改变, 为验证算法的实时性, 设在 $t=8$ 秒时, 系统总负荷增加 200kW; 设在 $t=16$ 秒时, 系统总负荷增加 350kW; 设在 $t=24$ 秒时, 系统总负荷减少 200kW; 设在 $t=32$ 秒时, 系统总负荷减少 350kW。调度指令改变时增量成本一致性变量收敛情况如图 3-12 所示。



(a) 一致性变量收敛情况



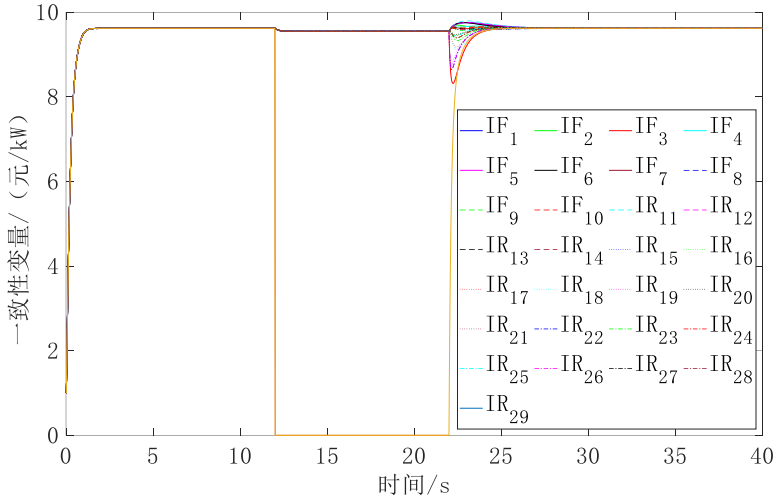
(b) 总负荷与总出力情况

图 3-12 调度指令改变时增量成本一致性变量收敛情况

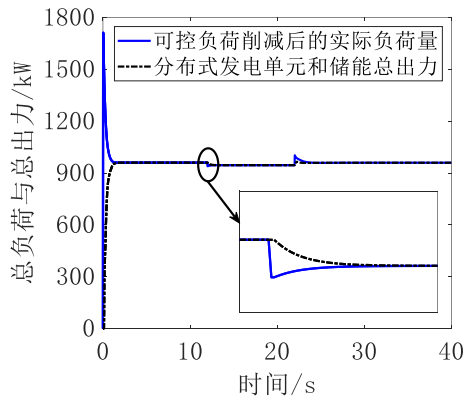
由图 3-12 (a) 可知, 在 $t=8$ 秒和 $t=16$ 秒时, 系统总负荷增大, 系统此时供需功率未达到平衡, 供需功率偏差项 $\Delta P > 0$, 使得各智能体对应的一致性变量和响应功率增大; 在 $t=24$ 秒和 $t=32$ 秒时, 系统总负荷减小, 供需功率偏差项 $\Delta P < 0$, 使得各智能体对应的一致性变量和响应功率减小。在这个过程中, 运用本章改进算法能使系统快速达到新的最优收敛状态, 系统动态响应性能较好。由图 3-12 (b) 可知, 在 $t=8$ 秒和 $t=16$ 秒时, 系统总负荷增大, 可控负荷的削减量增大, 实际负荷量减小, DG 与储能总出力增大; 在 $t=24$ 秒和 $t=32$ 秒时, 可控负荷的削减量减小, 实际负荷量增大, DG 与储能总出力减小。在这个过程中, 系统中供需功率均能快速达到平衡。

3.4.2.2 DG “即插即用” 特性研究

系统参数设置与 3.4.2.1 相同。为了研究 IEEE39 节点系统 DG “即插即用” 特性，设在 $t=12$ 秒时负荷 29 切出，在 $t=22$ 秒时负荷 29 重新投入系统，“即插即用” 情形下增量成本一致性变量收敛情况如图 3-13 所示。



(a) 一致性变量收敛情况



(b) 总负荷与总出力情况

图 3-13 “即插即用” 情形下增量成本一致性变量收敛情况

由图 3-13 可知，系统在负荷 29 未切出前，增量成本一致性变量能够收敛一致，并且供需功率也能达到平衡，说明了本章改进算法在多节点系统中的有效性；当 $t=12$ 秒时，负荷 29 退出，使得系统中供需功率偏差项 $\Delta P < 0$ ，系统中各智能体一致性变量减小，系统中 DG 与可削减负荷的响应功率减小，直到系统供需功率再次达到平衡，系统收敛到新的稳定状态；当 $t=22$ 秒时，负荷 29 重新投入，系统中各智能体一致性变量又恢复到退出前的值，并且在这个过程中系统供需功

率均能达到平衡，说明本章改进算法能满足多节点系统中智能体“即插即用”的要求。

3.5 本章小结

本章研究了一种领导-跟随改进有限时间一致性算法，在传统有限时间一致性算法的基础上引入增益系数与功率偏差消除项，加快系统收敛速度的同时，满足了系统中供需功率动态平衡的要求，并采用李雅普诺夫稳定性理论与图论定理分析了本章改进算法的收敛性与稳定性。随后，针对微电网经济优化调度问题，基于该改进算法提出了一种微电网分布式经济优化调度策略，该策略从分布式优化的角度去解决经济调度问题，结合多智能体一致性理论，让每个智能体通过与邻居智能体进行信息交互来更新自身的一致性变量，并通过选择领导智能体来控制全局一致性变量的变化，进而影响各智能体的响应功率，使系统达到供需功率平衡与收敛一致。最后，通过将该改进算法应用于 9 节点系统和 39 节点系统验证了本章所提改进算法与分布式经济优化调度策略的有效性与优越性以及能够满足微电网“即插即用”等要求。

第 4 章 基于改进平均有限时间一致性的微电网分布式分层优化控制

目前,集中式控制存在很多缺点,分布式控制要在满足微电网功率合理分配、频率和电压稳定的同时,保证微电网运行的经济性。针对这些要求,一些学者提出一种分布式分层优化控制策略,既能保证微电网稳定,又可以使微电网的经济性最优。已有大量文献对此进行研究,文献[79]面向串联光伏微电网系统,提出了一种统一并离网模式的双层分布式控制策略,其中频率同步和功率协调在底层一次控制实现,并网下功率优化、并离网模式管理和离网下电压频率恢复在上层二次控制实现,其研究的分层分布式控制能够保证微电网在并离网双模式及无缝切换下的稳定运行。文献[80]为了满足微电网系统稳定经济运行时的功率精确分配要求,提出一种基于分层微电网的分布式协同控制策略,以下垂控制作为一级基础控制层,二级控制层用于克服一级电压偏差问题,三级控制层以各 DG 综合发电成本为目标函数,实现 DG 与负荷供需功率匹配。文献[81]针对微电网的能量管理和控制,提出一种双层结构的孤岛微电网分布式控制模型,底层为由 DG 和负载组成的微电网,上层为由多智能体组成的通信网络。文献[82]针对公共连接点处的三相电压不平衡问题,提出一种微电网公共连接点电压双极补偿控制方法,上层控制发送与电压正序和负序分量有关的控制信号,采用双电流环控制器得到电流给定值,下层控制通过双电流环控制器进行动作。

以上研究虽然取得了一些成果,但均存在频率、电压偏移问题。针对这些问题,将多智能体有限时间一致性理论与分布式分层控制相结合可以很好地解决下垂控制带来的频率、电压偏移问题。

本文在第 3 章研究了一种领导-跟随改进有限时间一致性算法,用于微电网经济优化调度,改善了微电网调度性能。为保证在微电网控制中系统功率合理分配以及频率和电压稳定,本章基于传统平均有限时间一致性算法,提出了一种改进平均有限时间一致性算法用于微电网分布式分层优化控制中,并将第 3 章所提经济优化调度策略得出的调度结果用于微电网分布式分层优化控制中,使微电网

在保证系统功率合理分配以及频率与电压稳定的同时，实现最优经济运行。

4.1 改进平均有限时间一致性算法

4.1.1 算法描述

设各智能体只能从邻居处获取信息，则一阶多智能体系统的动力学模型为：

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad i \in V \quad (4-1)$$

式中， $x_i(t)$ 和 $u_i(t)$ 分别为智能体 i 在时间 t 时的位置状态和输入。

有关平均有限时间一致性算法，文献[72]提出了一种一致性协议，可以使系统在有限时间内达到平均收敛一致性，协议如式 (2-7) 所示。为进一步提高系统收敛速度，文献[11]在式 (2-7) 的基础上提出一种快速有限时间平均一致性算法，协议如式 (2-8) 所示。但上述协议依然存在收敛速度慢的问题，这会导致系统响应性能差。为了加快算法收敛速度，本文对文献[11]中传统平均有限时间一致性算法进行改进，在其基础上引入增益系数，以此来加快算法收敛速度，解决系统收敛速度慢的问题。

同 3.1.1 所述，根据动力学模型中智能体位置状态 $x_i(t)$ 与其输入 $u_i(t)$ 之间的关系，将其应用到微电网协调控制中，则位置状态 $x_i(t)$ 可等效为协调控制中的一致性变量 $\lambda_i(t)$ ，其输入 $u_i(t)$ 可等效为一致性变量的变化量 $\dot{\lambda}_i(t)$ ，则改进平均有限时间一致性算法为：

$$\dot{\lambda}_i(t) = r_2 \sum_{j=1}^n a_{ij} (\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + \sum_{j=1}^n a_{ij} \text{sign}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) |\lambda_j(t) - \lambda_i(t)|^a \quad (4-2)$$

式中， r_2 为增益系数， $r_2 > 0$ 。

假设多智能体系统是无向连通的，其对应的 Laplacian 矩阵 L 一定是实对称矩阵，则算法 (4-2) 可以使系统在有限时间内达到平均收敛一致性^[83]，即：

$$\lambda_{1\infty} = \lambda_{2\infty} = \dots = \lambda_{n\infty} \approx \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{i\text{cs}}}{n} \quad (4-3)$$

式中， $\lambda_{n\infty}$ 为第 n 个智能体最终收敛的一致性变量值； $\lambda_{i\text{cs}}$ 为第 i 个智能体的初始一致性变量值； n 为智能体总数。

4.1.2 算法收敛性分析

定理 4.1^[11]：假设 MAS 的通信拓扑结构为无向连通的，那么它对应的拉普

拉斯矩阵 L 为实对称矩阵, 此时, 协议式 (4-2) 可以使系统在有限时间内达到平均收敛一致性。

证明: 由于 MAS 的通讯拓扑是无向连通的, 则:

$$\sum_{i=1}^n \dot{\lambda}_i(t) = 0 \quad (4-4)$$

令 $\partial = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$, 由式 (4-4) 可得, ∂ 为常数。

定义 $\varepsilon(t) = [\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_n(t)]^T$, 且 $\lambda_i(t) = \partial + \varepsilon_i(t)$, 则:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\lambda}_i(t) \quad (4-5)$$

由式 (4-5) 可得:

$$\mathbf{1}^T \varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) - n\partial = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) - \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = 0 \quad (4-6)$$

设 Lyapunov 函数为 $V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)$, 对 t 求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= \dot{V}(t) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(t) \dot{\varepsilon}_i(t) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(t) \left[r_2 \sum_{j=1}^n a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=1}^n a_{ij} \text{sign}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) |\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)|^a \right] \\ &= \varepsilon_i(t) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(r_2 a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) + a_{ij} \text{sign}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) |\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)|^a \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(r_2 a_{ij} \varepsilon_i(t) (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) + r_2 a_{ij} \varepsilon_j(t) (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t)) \right. \\ &\quad \left. + a_{ij} \varepsilon_i(t) \text{sign}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) |\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)|^a \right. \\ &\quad \left. + a_{ij} \varepsilon_j(t) \text{sign}(\varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t)) |\varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t)|^a \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(r_2 a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t)) \right. \\ &\quad \left. + a_{ij} \text{sign}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) |\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)|^a (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t)) \right) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} |\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)|^{a+1} \right) - \frac{1}{2} r_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij}^{\frac{2}{a+1}} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right)^{\frac{a+1}{2}} - \frac{1}{2} r_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$

$$\text{令 } \psi_1 = -\frac{1}{2}r_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right), \quad \psi_2 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right)^{\frac{1+a}{2}},$$

由引理 3.2 和引理 3.3 得:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= -\frac{r_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right)}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} V(t) = -\frac{2r_2 \varepsilon^T(t) L_A \varepsilon(t)}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} V(t) \\ &= \frac{-2r_2 \varepsilon^T(t) L_A \varepsilon(t)}{\varepsilon^T(t) \varepsilon(t)} V(t) \leq -2r_2 \partial_2(L_A) V(t) \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\psi_2 \leq -\frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right) V(t)}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} \right)^{\frac{1+a}{2}} \quad (4-9)$$

设 $C = [c_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 其中 $c_{ij} = (a_{ij})^{\frac{2}{1+a}}$ 。由于相连节点之间的权重为 1, 则 $C = A$, 可得:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij}^{\frac{2}{1+a}} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t))^2 \right)}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} = \frac{2\varepsilon^T(t) L_C \varepsilon(t)}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} = \frac{4\varepsilon^T(t) L_C \varepsilon(t)}{\varepsilon^T(t) \varepsilon(t)} \geq 4\partial_2(L_C) \quad (4-10)$$

由式 (4-6) - 式 (4-10) 可得:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \dot{V}(t) \leq -2r_2 \partial_2(L_A) V(t) - \frac{1}{2} (4\partial_2(L_C))^{\frac{1+a}{2}} V^{\frac{1+a}{2}}(t) \quad (4-11)$$

令 $p = -2r_2 \partial_2(L_A)$, $q = -\frac{1}{2} (4\partial_2(L_C))^{\frac{1+a}{2}}$, 代入 (4-11) 可得:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \dot{V}(t) \leq pV(t) + qV^{\frac{1+a}{2}}(t) \quad (4-12)$$

对式 (4-12) 变换并对其取等号积分处理可得:

$$\int \frac{dV(t)}{pV(t) + qV^{\frac{1+a}{2}}(t)} = \int dt \quad (4-13)$$

$$\frac{2}{p(1-a)} \ln \left(pV^{\frac{1-a}{2}}(t) + q \right) = t + d \quad (4-14)$$

当 $t=0$ 时, 可得:

$$d = \frac{2}{p(1-a)} \ln \left(pV^{\frac{1-a}{2}}(0) + q \right) \quad (4-15)$$

由以上分析可得，系统能在有限时间内实现平均一致性收敛，且收敛时间满足：

$$t \leq \frac{2 \ln \left(pV^{\frac{1-a}{2}}(0) + q \right)}{p(1-a)} \quad (4-16)$$

综上所述，定理 4.1 的结论成立，改进算法式（4-2）能使系统式（4-1）在有限时间内达到平均收敛一致性。

4.2 微电网的一次控制策略

4.2.1 下垂控制原理

下垂控制应用在台 DG 并联场景中，模仿同步发电机下垂特性分配系统功率，其无需通信即可使各 DG 按照本地信息动态调整，实现电压、频率稳定及功率平衡。单台 DG 逆变器并联等效电路图如图 4-1 所示。

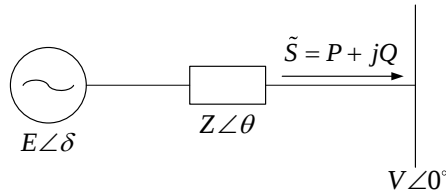


图 4-1 单台 DG 逆变器并联等效电路图

将 DG 等效为一个电压为 $E\angle\delta$ 的交流电源，并假设交流母线电压为 $V\angle 0^\circ$ ，线路阻抗为 $Z\angle\theta = R + jX$ ，则 DG 输出的有功功率和无功功率可以表示为：

$$\begin{cases} P = \frac{EV \cos(\theta - \delta)}{Z} - \frac{V^2}{Z} \cos \theta \\ Q = \frac{EV \sin(\theta - \delta)}{Z} - \frac{V^2}{Z} \sin \theta \end{cases} \quad (4-17)$$

若输出阻抗为纯感性，则 $\theta = 90^\circ$ ，且一般情况下逆变器输出电压与交流母线电压之间的相位差较小，有 $\sin \delta \doteq \delta$ ， $\cos \delta \doteq 1$ ，则式（4-17）可以转换为：

$$\begin{cases} \delta \doteq \frac{ZP}{EV} \\ E - V \doteq \frac{ZQ}{V} \end{cases} \quad (4-18)$$

由式 (4-18) 可得, 有功功率 P 与无功功率 Q 分别决定电压相位差 δ 与电压幅值差, 又因为 δ 与电压角频率 ω 之间存在微分关系, 故调节 DG 的 P 和 Q 即可调节频率 f 和电压 V 。

由以上分析可得, 下垂控制表达式为:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_i^* - m_i P_i \\ E_i = E_i^* - n_i Q_i \end{cases} \quad (4-19)$$

式中, E_i 、 ω_i 分别表示式 (4-19) 计算得到的第 i 台 DG 输出电压幅值参考值和输出电压角频率, 其目的是为了生成参考控制信号。 E_i^* 、 ω_i^* 分别表示第 i 台 DG 在功率基准点下的输出电压幅值和输出电压角频率, 将其作为系统的额定电压和角频率。 m_i 和 n_i 分别表示下垂控制中的有功、无功下垂系数, 其是由 DG 额定有功功率 P_{iN} 、额定无功功率 Q_{iN} 与所允许频率偏差 $\Delta\omega$ 、电压偏差 ΔE 的比值得出, 即 $m_i = \Delta\omega / P_{iN}$, $n_i = \Delta E / Q_{iN}$ 。 P_i 、 Q_i 分别为第 i 个 DG 实时输出的有功、无功功率。

通常使用低通滤波器消除逆变器输出功率 P 、 Q 中含有的高频分量, 可得:

$$\begin{cases} P_i = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} p_i \\ Q_i = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} q_i \end{cases} \quad (4-20)$$

式中, ω_c 为截止频率, 通过 $abc/dq0$ 变换可得瞬时有功功率 p_i 与瞬时无功功率 q_i 为:

$$\begin{cases} p_i = \frac{3}{2} (V_{odi} i_{odi} + V_{oqi} i_{oqi}) \\ q_i = \frac{3}{2} (V_{oqi} i_{odi} - V_{odi} i_{oqi}) \end{cases} \quad (4-21)$$

式中, V_{odi} 、 V_{oqi} 为输出电压的 dq 分量; i_{odi} 、 i_{oqi} 为输出电流的 dq 分量。

4.2.2 一次控制模型建立

(1) LC 滤波器设计

设计 LC 滤波器时要考虑其在开关频率处会产生谐波的问题。LC 滤波器的一般设计原则如式 (4-22)、式 (4-23) 所示。

$$10f_n \leq f_c \leq f_s / 10 \quad (4-22)$$

$$f_c = 1 / (2\pi\sqrt{L_f C_f}) \quad (4-23)$$

式中， f_n 为调制波频率，即微电网频率， f_c 为LC滤波器的谐振频率， f_s 为SPWM载波信号的频率。

在设计过程中，考虑到LC滤波器本身易出现振荡的情况，通常会选择串联一个较小的电阻，这样可以抑制滤波器的振荡现象。LC滤波器结构图如图4-2所示。

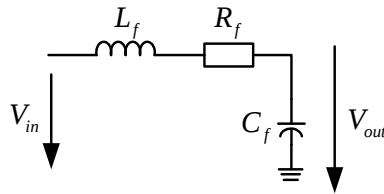


图 4-2 LC 滤波器结构图

由图 4-2 可知，滤波器输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 的传递函数表达式如式(4-24)所示。

$$G(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1/j\omega C_f}{j\omega L_f + 1/j\omega C_f + R_f} = \frac{\omega_0^2}{(j\omega)^2 + 2j\omega\xi\omega_0 + \omega_0^2} \quad (4-24)$$

$$\text{式中，} \omega_0 = 1/\sqrt{L_f C_f}, \quad \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}。$$

在设计滤波器时，通常会用一些数学模型和公式来确定滤波器参数，例如式(4-22)-式(4-24)。其中，电阻值、电容值和电感值等参数会影响滤波器的滤波效果，而且为了保证滤波器性能以及系统正常运行，在设计时还应确保电流通过滤波电感时产生的电压降要低于系统电压的3%。

(2) 功率外环控制器

功率外环控制器工作过程为：①输出电压 V_{oi} 与输出电流 i_{oi} 经 $abc/dq0$ 变换得到 V_{odi} 与 V_{oqi} ；②采用式(4-21)计算得出 p 与 q ；③经功率滤波环节计算出 P_i 与 Q_i ；④经下垂控制环节计算出频率参考值 f_i' 与电压参考值 V_i' ；⑤经电压合成模块计算出电压参考值 V_{odi}^* 和 V_{oqi}^* 。功率外环控制器框图如图 4-3 所示。

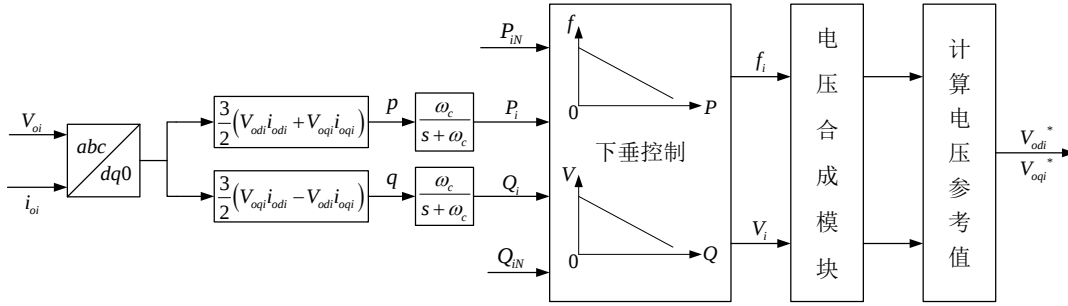


图 4-3 功率外环控制器框图

(3) 电压电流双环控制器

保持系统稳定的必要条件是电压电流双环控制（以下简称双环控制），双环控制策略巧妙地结合了电流环和电压环的优点，既保证了输出电压的高精度稳态特性，又实现了对电流变化的快速、灵敏的动态响应，极大地提升了电力电子系统的综合控制性能。

在现代电力电子控制系统中，特别是在电机驱动、逆变器控制等领域，经常会遇到在两相旋转坐标系（ dq 坐标系）下的控制问题。由于在实际应用中， d 轴和 q 轴往往存在一定的耦合现象，这会导致控制效果受到制约，无法实现理想的独立控制目标。为了解决这一问题，并提高系统的控制性能和稳定性，一种有效的解决策略是在传统双环控制前引入前馈解耦控制环节，并通过设计合理的前馈解耦控制器去消除这种耦合效应^[84]。电压电流双环控制器框图如图 4-4 所示。

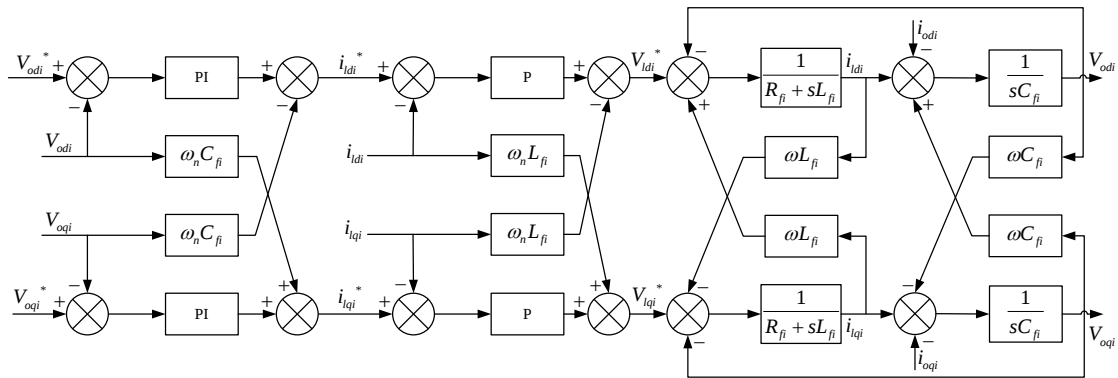


图 4-4 电压电流双环控制器框图

图 4-4 中， i_{ldi}^* 和 i_{lqi}^* 为经电压环输出参考电流的 dq 轴分量， V_{ldi}^* 和 V_{lqi}^* 为经电流环输出参考电压的 dq 轴分量。

4.2.3 基于下垂控制的输出功率分配

下垂控制的主要目的之一是使并联逆变器按照要求合理分配输出功率。在理

想情况下，通过调节下垂系数 m_i 与 n_i 去实现这一目的。

设角频率为额定角频率 $\omega_n = 2\pi \times 50 \text{ rad/s}$ ，则可得：

$$\omega_{n1} = \omega_{n2} = \dots = \omega_{nn} = 100\pi \quad (4-25)$$

选取 m_i 使得

$$m_1 P_1^* = m_2 P_2^* = \dots = m_n P_n^* = K_1 \quad (4-26)$$

式中， K_1 为常数。此时各 DG 空载角频率相同，可得：

$$m_1 P_1 = m_2 P_2 = \dots = m_n P_n = C_1 \quad (4-27)$$

变换后得：

$$P_i = \frac{C_1}{m_i} \quad (4-28)$$

由式 (4-28) 可得， P_i 与 m_i 成反比。由此可知，在满足式 (4-19) 的前提下，只需调节 m_i 就可对目标进行控制。

同理，设定电压为 311V，可得：

$$U_{n1} = U_{n2} = \dots = U_{nn} = 311V \quad (4-29)$$

选取 n_i 使得

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_n Q_n = C_2 \quad (4-30)$$

变换后得：

$$Q_i = \frac{C_2}{n_i} \quad (4-31)$$

由以上分析可知，在满足式 (4-19) 的前提下，调节 n_i 就可对目标进行控制。

但以上分析只是在理想情况下，实际情况中，无功功率因为线路阻抗不相同等原因并不能按照式 (4-31) 成比例分配，同时也存在电压、频率不能稳定在额定值的问题。这些问题在接下来的研究中得到有效解决。

4.3 基于改进平均有限时间一致性的微电网二次控制

本节将介绍基于改进平均有限时间一致性算法的频率、电压二次控制策略，

并通过仿真验证其控制性能。微电网频率、电压二次控制框图如图 4-5 所示。

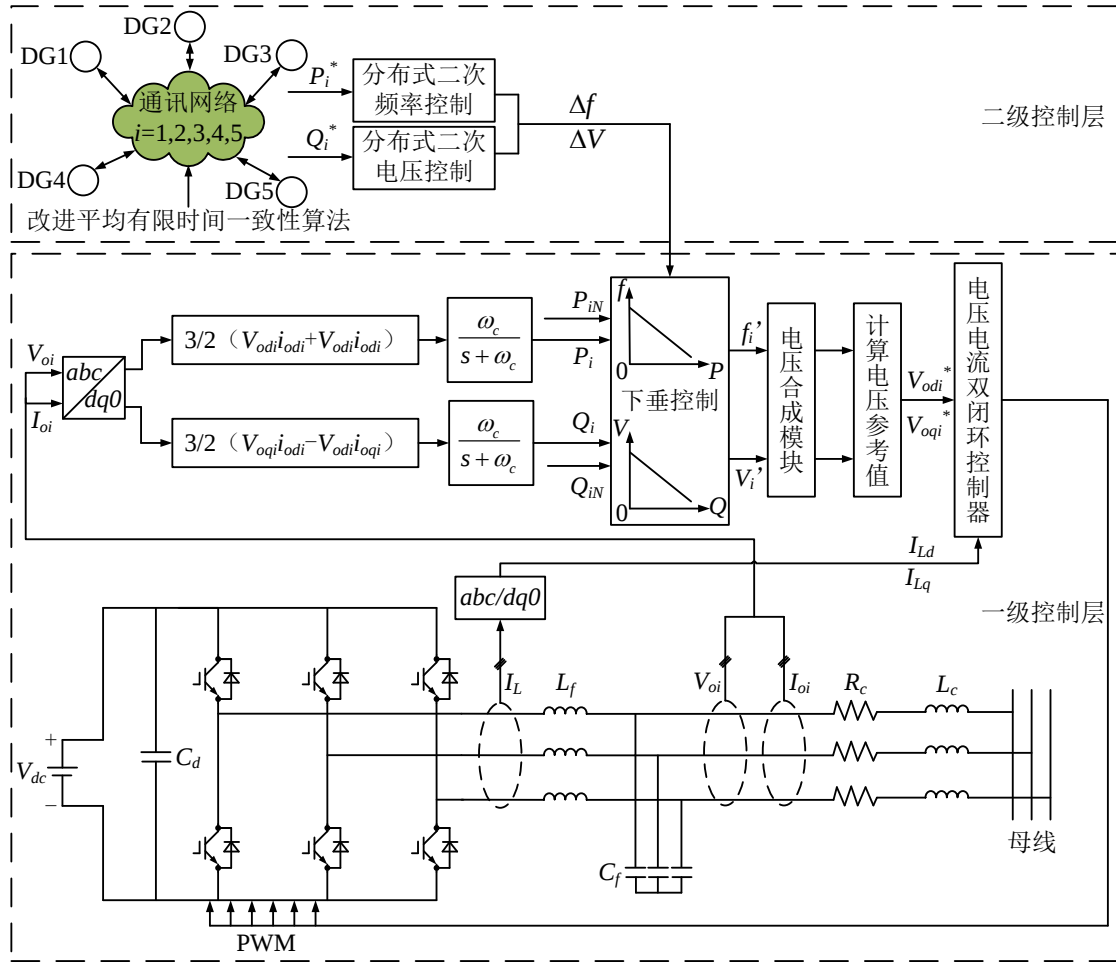


图 4-5 微电网频率、电压二次控制框图

4.3.1 系统频率二次控制策略

为了修正一级控制层中下垂控制策略带来的频率偏差，引入第 i 个 DG 所需的频率补偿量 Δf_i ，可表示为 $m_i(P_i - P_{iN})$ 。为了使微电网在运行过程中各 DG 的频率补偿量一致，将各 DG 频率补偿量的平均值作为其频率补偿量，即：

$$\Delta f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i(P_i - P_{iN})) \quad (4-32)$$

式中， Δf 为频率补偿量的平均值； P_i 为第 i 个 DG 实际输出的有功功率； P_{iN} 为第 i 个 DG 的额定有功功率。

对式 (4-32) 进行化简，可得：

$$\Delta f = m_i P_{iN} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{iN}} - 1 \right) \right) = m_i P_{iN} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^* - 1) \right) \quad (4-33)$$

式中, $P_i^* = \frac{P_i}{P_{IN}}$ 为第 i 个 DG 实际输出的有功功率标么值。

把 P_i^* 作为一致性变量, 代入式 (4-1)、式 (4-2) 中可得 P_i^* 的一致性算法表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{P}_i^*(t) = & r_2 \sum_{j=1}^n a_{ij} (P_j^*(t) - P_i^*(t)) + \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij} \text{sign}(P_j^*(t) - P_i^*(t)) |P_j^*(t) - P_i^*(t)|^\alpha \end{aligned} \quad (4-34)$$

将最终的收敛值作为有功功率标么值的平均值代入式 (4-33) 中, 得到系统频率的补偿量 Δf 。

将二级控制层计算得出的频率补偿量 Δf 反馈到下垂控制层中, 下垂控制方程中频率相关部分变换为:

$$f_i' = f_N - m_i(P_i - P_{IN}) + \Delta f \quad (4-35)$$

式中, f_i' 为第 i 个 DG 补偿后的频率值。一级控制层中下垂控制模块输出频率加上反馈补偿量后, 即能使频率稳定在额定值。

4.3.2 系统电压二次控制策略

为了修正一级控制层中下垂控制策略带来的电压偏差, 引入第 i 个 DG 所需的电压补偿量 ΔV_i , 可表示为 $n_i(Q_i - Q_{IN})$ 。为了使微电网在运行过程中各 DG 的电压补偿量一致, 将各 DG 电压补偿量的平均值作为其电压补偿量, 即:

$$\Delta V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n_i(Q_i - Q_{IN})) \quad (4-36)$$

式中, ΔV 为电压补偿量的平均值; Q_i 为第 i 个 DG 实际输出的无功功率; Q_{IN} 为第 i 个 DG 的额定无功功率。

对式 (4-36) 进行化简, 可得:

$$\Delta V = n_i Q_{IN} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q_{IN}} - 1 \right) \right) = n_i Q_{IN} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^* - 1) \right) \quad (4-37)$$

式中, $Q_i^* = \frac{Q_i}{Q_{IN}}$ 为第 i 个 DG 实际输出的无功功率标么值。

把 Q_i^* 作为一致性变量, 代入式 (4-1)、式 (4-2) 中可得 Q_i^* 的一致性算法表

达式为：

$$\begin{aligned}\dot{Q}_i^*(t) = & r_2 \sum_{j=1}^n a_{ij} (Q_j^*(t) - Q_i^*(t)) + \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij} \text{sign}(Q_j^*(t) - Q_i^*(t)) |Q_j^*(t) - Q_i^*(t)|^a\end{aligned}\quad (4-38)$$

将最终的收敛值作为无功功率标幺值的平均值代入式（4-37）中，得到系统电压的补偿量 ΔV 。

将二级控制层计算得出的电压补偿量 ΔV 反馈到下垂控制层中，下垂控制方程中电压相关部分变换为：

$$V_i' = V_N - n_i(Q_i - Q_{iN}) + \Delta V \quad (4-39)$$

式中， V_i' 分别为第 i 个 DG 补偿后的电压值。一级控制层中下垂控制模块输出电压加上反馈补偿量后，即能使电压稳定在额定值。

4.4 分布式分层优化控制策略

本文所提分布式分层控制共分为三层。其中，三级控制层为经济优化调度层，该层根据等微增率准则，分别设置了各智能体的一致性变量 λ_i ，建立了经济调度模型，采用拉格朗日乘子法对经济调度模型进行求解，求得经济最优条件，并采用领导-跟随改进有限时间一致性算法，计算出各智能体的一致性变量 λ_i^{opt} 以及最优响应功率值 P_i^{opt} ，最后将求得的最优响应功率值 P_i^{opt} 作为调度指令下发给一级控制层，使各智能体按照调度指令动作；二级控制层为频率、电压偏差控制层，该层是为了修正一级控制层中下垂控制策略带来的频率、电压偏差，采用改进平均有限时间一致性算法，将每个 DG 实际输出有功、无功功率的标幺值作为一致性变量代入到改进算法中，计算出各 DG 频率、电压的补偿量，将该补偿量反馈到一级控制层中的下垂控制模块，其输出的频率、电压加上对应的反馈补偿量后，系统频率、电压可以稳定在额定值；一级控制层为下垂控制层，二级频率、电压偏差控制和经济优化调度是在一级控制层的基础上进行的，该层通过接收三级控制层下发的调度指令，使各 DG 按照调度指令快速动作，可控负荷根据调度指令进行负荷削减，使系统运行在经济最优的情况下，并接收二级控制层反馈的频率、电压补偿量，用来补偿频率、电压偏移量。以上三个控制层，既保证了微电网运行在经济最优的情况下，又使得微电网中有功、无功功率能够合理分配以及频率、

电压稳定在额定值。微电网分布式分层优化控制策略框图如图 4-6 所示。

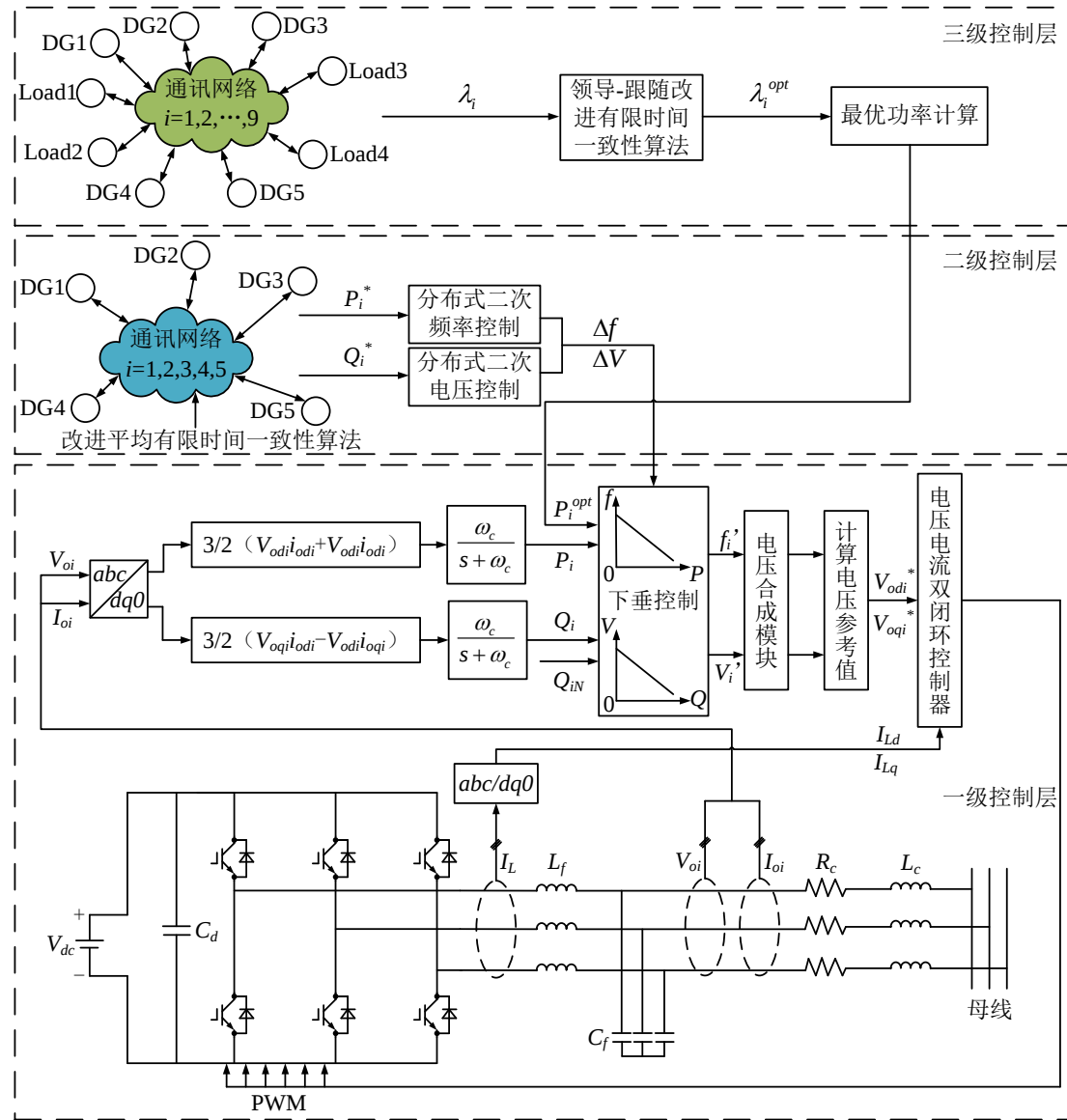


图 4-6 微电网分布式分层优化控制策略框图

4.5 算例与仿真

为了研究本文改进平均有限时间一致性算法与分布式分层优化控制策略的有效性，本文基于图 4-6 在 Matlab2020a 仿真平台上搭建仿真模型进行研究。将每个智能体视为一个节点，三级控制层中依旧采用 3.4.1.1 中的少节点系统拓扑结构。本文未详细考虑储能装置特性，仅把储能装置当作 DG 来看待，并且二级控制层仅考虑 5 个 DG 的频率、电压偏差问题。因此在仿真模型中仅搭建含有 5 个 DG 的仿真模型，这 5 个 DG 从 DG1-DG5 分别对应图 4-7 中 1、2、4、6、8 节点中的智能体。二级控制层中 DG 通信拓扑连线图如图 4-7 所示，系

统中各 DG 参数如表 4-1 所示，各可削减负荷削减量如表 4-2 所示，各智能体成本参数如表 4-3 所示。

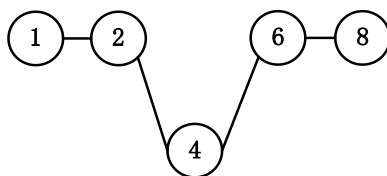


图 4-7 二级控制层中 DG 通信拓扑连线图

表 4-1 各 DG 仿真参数

节点	P_{in}/kW	$Q_{in}/kvar$	m_i	n_i
1	38.36	2	$8.19e-5$	$7.80e-3$
2	135.7	5	$2.32e-5$	$3.12e-3$
4	16.64	1	$1.89e-4$	$1.56e-2$
6	59.31	3	$5.30e-5$	$5.20e-3$
8	61.38	4	$5.12e-5$	$3.90e-3$

表 4-2 各可削减负荷仿真参数

节点	削减量/kW
3	19.678
5	7.4819
7	6.7957
9	4.6648

表 4-3 各智能体成本参数

节点	α_i	β_i	γ_i	$P_{i,min}/kW$	$P_{i,max}/kW$
1	0.84	1.2865	0.04600	0	300
2	0.80	1.1950	0.01334	0	300
3	0.70	1.6275	0.08100	0	50
4	0.85	1.3370	0.10453	0	300
5	0.72	2.0590	0.18420	0	50
6	0.83	1.2095	0.03040	0	300
7	0.73	2.7630	0.15100	0	50
8	0.82	1.1936	0.02950	0	300
9	0.75	2.8365	0.21210	0	50

4.5.1 算法收敛性能研究

设 $a=0.95$ ， $r_2=11$ ，假设各智能体的初始状态为 $\lambda_1(0)=-10$ ， $\lambda_2(0)=-30$ ， $\lambda_4(0)=10$ ， $\lambda_6(0)=40$ ， $\lambda_8(0)=10$ 。系统中增量成本一致性变量收敛情况如图 4-8 所示。图中给出的 (X,Y) 为智能体对应的横坐标和纵坐标的值，X 表示收敛时间，Y 表示一致性变量的收敛值。

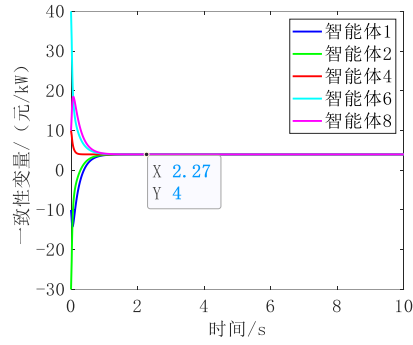


图 4-8 一致性变量收敛情况

由式 (4-3) 可得, 各智能体一致性变量的最终收敛值与其初始状态有关, 并且等于各智能体一致性变量初始状态值之和的平均值, 即:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{收敛}} &= \frac{\lambda_1(0) + \lambda_2(0) + \lambda_4(0) + \lambda_6(0) + \lambda_8(0)}{5} \\ &= \frac{-10 - 30 + 10 + 40 + 10}{5} = 4\end{aligned}\quad (4-40)$$

由图 4-8 可知, 智能体最终收敛值为 4, 与式 (4-40) 计算得出的最终收敛值相同。综上所述, 本文所提改进平均有限时间一致性算法是有效的, 能使系统达到平均收敛一致性。

为进一步验证本文所提改进平均有限时间一致性算法的优越性, 将本文所提改进算法与文献[83]所提算法进行对比, 本文所提改进算法与文献[83]所提算法一致性变量对比情况如图 4-9 所示。为简化和便于对比分析, 图中仅给出智能体 1 之间的一致性变量对比, 由图 4-7 分析可得, 智能体 1 或 8 的代数连通度最小, 是系统中最迟收敛到最优状态的智能体, 将智能体 1 的收敛时间作为整个系统收敛到最优状态的时间, 图中 (X,Y) 值为智能体 1 对应的横坐标和纵坐标的值, X 代表收敛时间, Y 代表一致性变量收敛值。

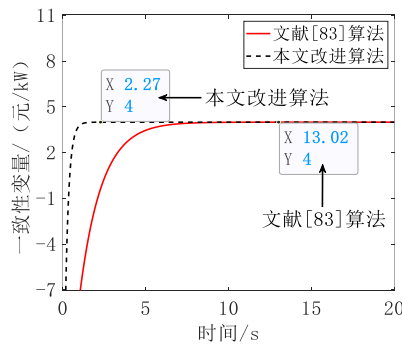
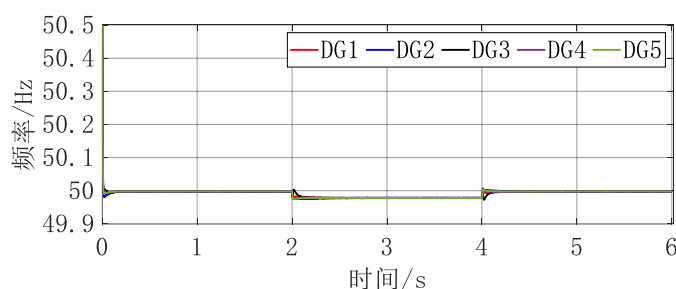


图 4-9 本文改进算法与文献[83]所提算法一致性变量对比情况

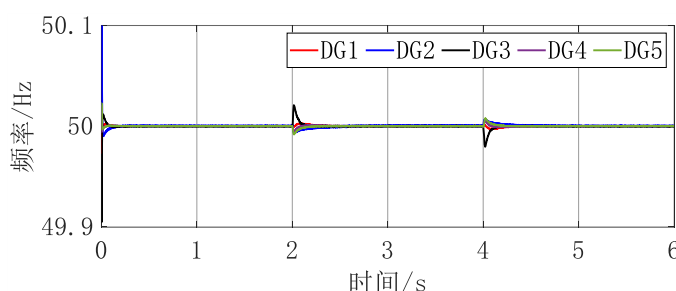
由图 4-9 可知, 采用本章所提改进算法时, 系统达到收敛一致性所需时间为 2.27 秒, 而采用文献[83]所提传统平均有限时间一致性算法时, 系统达到收敛一致性所需时间为 13.02 秒, 采用本章改进算法比采用文献[83]所提算法系统达到收敛一致性时间减少 9.3 秒, 减少了 82.57%。综上所述, 本章所提改进算法的动态性能更优。

4.5.2 频率与电压二次控制性能研究

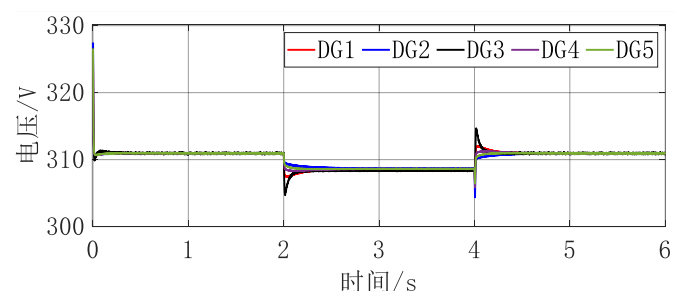
设置有功负荷量为 350kW, 其中包括固定负荷 150kW 与可控负荷 200kW; 无功负荷量为 150kvar。在 2 秒时有功负荷量与无功负荷量各增加 20kW、20kvar, 在 4 秒时有功负荷量恢复到 350kW, 无功负荷量恢复到 150kvar。二级控制层中频率、电压恢复情况如图 4-10 所示, 二级控制层中频率、电压补偿情况如图 4-11 所示, 有功与无功一致性变量收敛情况如图 4-12 所示。



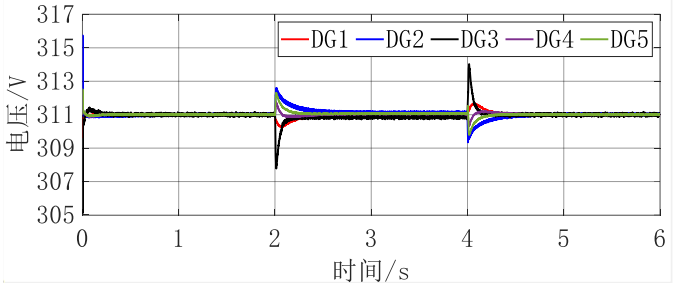
(a) 未加入二次控制频率变化情况



(b) 加入二次控制频率变化情况

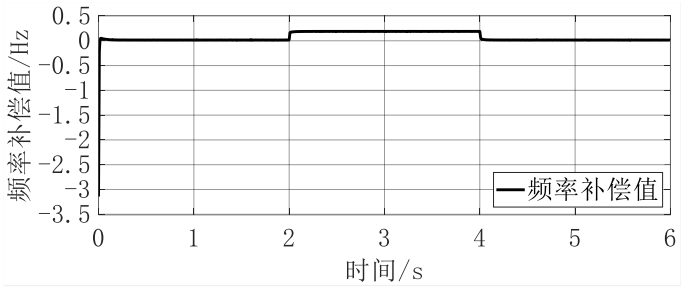


(c) 未加入二次控制电压变化情况

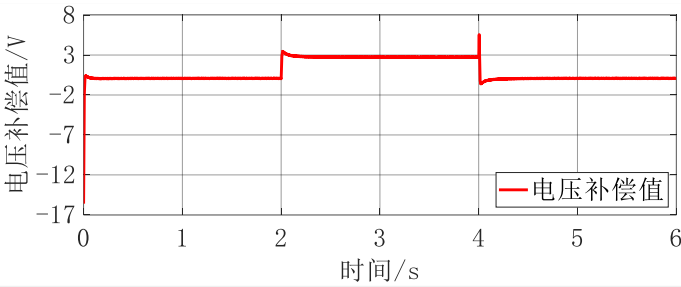


(d) 加入二次控制电压变化情况

图 4-10 二级控制层中频率、电压恢复情况

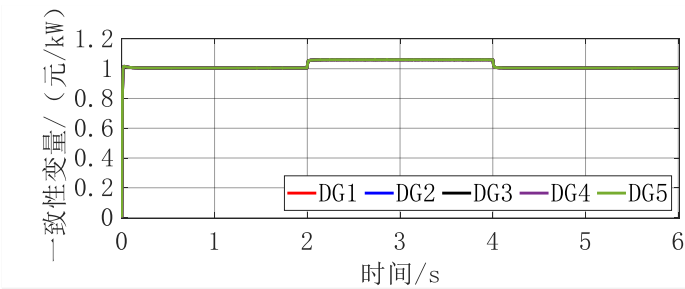


(a) 频率补偿情况

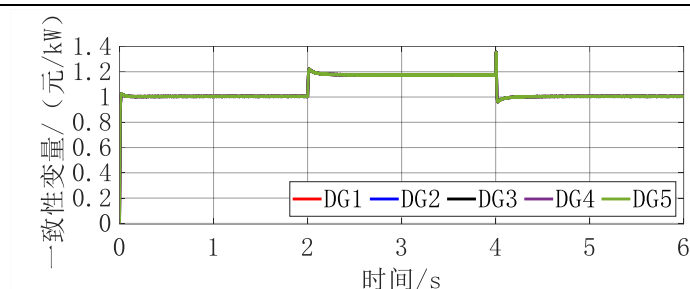


(b) 电压补偿情况

图 4-11 二级控制层中频率、电压补偿情况



(a) 有功一致性变量收敛情况



(b) 无功一致性变量收敛情况

图 4-12 有功与无功一致性变量收敛情况

由图 4-10 (a) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 系统中有功负荷量未变化, 系统频率稳定在 50Hz; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 由于未加入频率二次控制, 当系统中有功负荷量增加 20kW 时, 系统频率下降, 稳定在新的状态, 并且由图 1-10 下垂特性曲线可知, 当有功出力增加时, 系统频率下降, 此时实际仿真情况与理论分析一致; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中有功负荷量恢复到初始值, 有功负荷量减少, 系统频率上升, 稳定在 50Hz。

由图 4-10 (b) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 由于系统有功负荷量未变化, 系统频率保持在 50Hz; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 当系统中有功负荷量增加 20kW 时, 由图 1-10 下垂特性曲线可知, 系统频率应下降, 但由于加入了频率二次控制, 补偿了有功负荷量增加导致频率下降的偏差值, 使得在有功负荷量发生突变时, 系统频率仍能稳定在 50Hz; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中有功负荷量恢复到初始值, 系统频率稳定在 50Hz。

由图 4-10 (c) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 系统中无功负荷量不变, 系统电压稳定在 311V; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 由于未加入电压二次控制, 当系统中无功负荷量增加 20kvar 时, 系统电压下降, 稳定在新的状态, 并且由图 1-10 下垂特性曲线可知, 无功出力增加, 系统电压下降, 此时实际仿真情况与理论分析一致; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中无功负荷量恢复到初始值, 无功负荷量减少, 系统电压上升, 稳定在 311V。

由图 4-10 (d) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 系统中无功负荷量不变, 系统电压稳定在 311V; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 当系统中无功负荷量增加 20kvar 时, 由图 1-10 下垂特性曲线可知, 系统电压应下降, 但由于加入了电压二次控制, 补偿了无功负荷量增加导致电压下降的偏差值, 使得在无功负荷量发生突变时, 系统电压仍能稳定在 311V; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中无功负荷量恢复到初始值, 系统电压

稳定在 311V。

由图 4-11 (a) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 系统中有功负荷量未增加, 系统频率保持在 50Hz, 此时频率补偿值为 0; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 系统中有功负荷量增加 20kW, 此时二次控制中频率补偿值与系统频率下降值相同, 二者相互抵消, 使系统频率稳定在 50Hz; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中有功负荷量恢复到初始值, 系统频率稳定在 50Hz, 此时频率补偿值为 0。

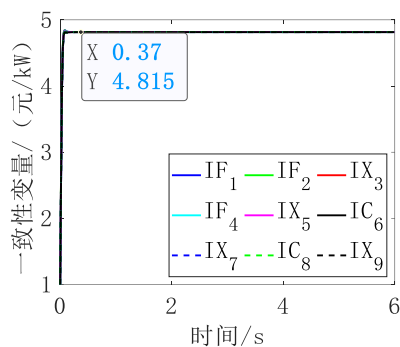
由图 4-11 (b) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 系统中无功负荷量未增加, 系统电压稳定在 311V, 此时电压补偿值为 0; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 系统中无功负荷量增加 20kvar, 此时二次控制中电压补偿值与系统电压下降值相同, 二者相互抵消, 使系统电压稳定在 311V; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中无功负荷量恢复到初始值, 系统电压稳定在 311V, 此时电压补偿值为 0。

由图 4-12 (a) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 由于系统有功负荷量未突变, 系统频率保持在 50Hz, 频率补偿值为 0, 系统有功一致性变量保持不变; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 系统有功负荷量增加 20kW, 频率补偿值增大, 此时系统有功一致性变量增大, 并收敛到新的状态; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中有功负荷量恢复到初始值, 频率补偿量减小为 0, 系统有功一致性变量恢复到初始收敛状态。

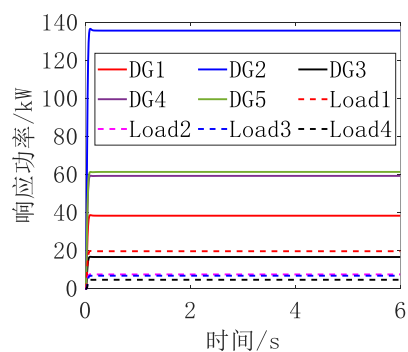
由图 4-12 (b) 可知, 在 $t=0\sim 2$ 秒期间, 由于系统无功负荷量未突变, 系统电压保持在 311V, 电压补偿值为 0, 系统无功一致性变量保持不变; 在 $t=2\sim 4$ 秒期间, 系统无功负荷量增加 20kvar, 电压补偿值增大, 此时系统无功一致性变量增大, 并收敛到新的状态; 在 $t=4\sim 6$ 秒期间, 系统中无功负荷量恢复到初始值, 电压补偿量减小为 0, 系统无功一致性变量恢复到初始收敛状态。

4.5.3 分布式分层优化控制性能研究

仿真模型搭建与 4.5.2 相同, 设置有功总负荷为 350kW, 无功总负荷为 150kvar, 其中无功功率按照其容量比 2: 5: 1: 3: 4 的比例分配。三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况及最优响应功率情况如图 4-13 所示, 一级控制层中有功、无功功率分配及电压与频率变化情况如图 4-14 所示。

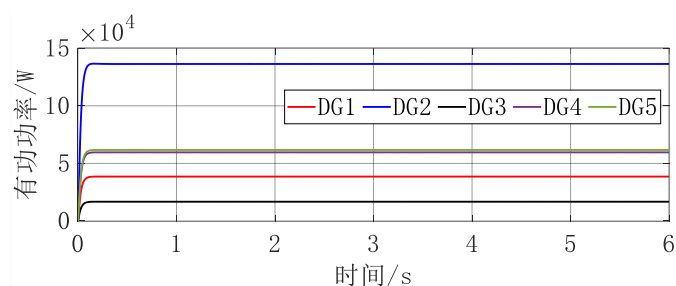


(a) 三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况

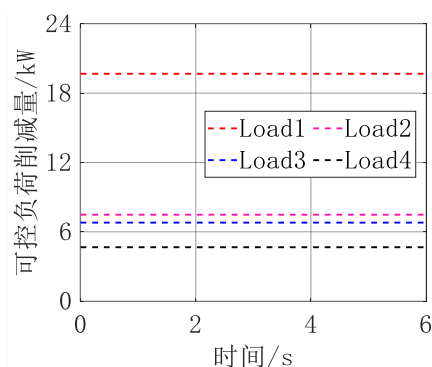


(b) 三级控制层中计算出的最优响应功率情况

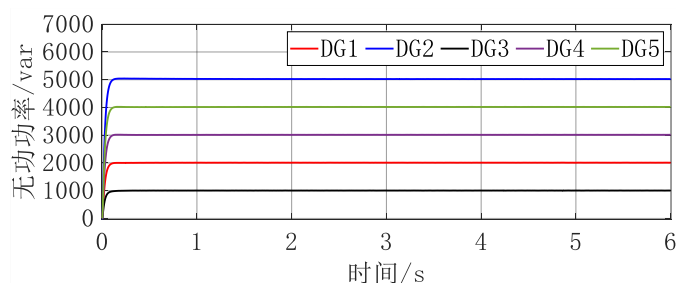
图 4-13 三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况及最优响应功率情况



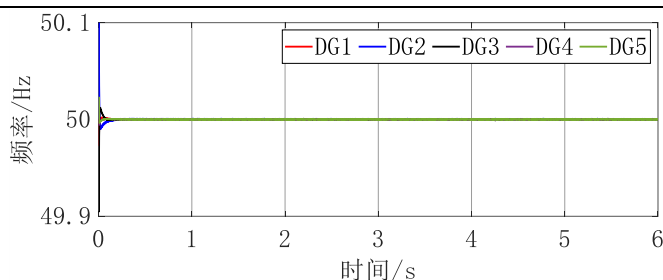
(a) 一级控制层中有功功率分配情况



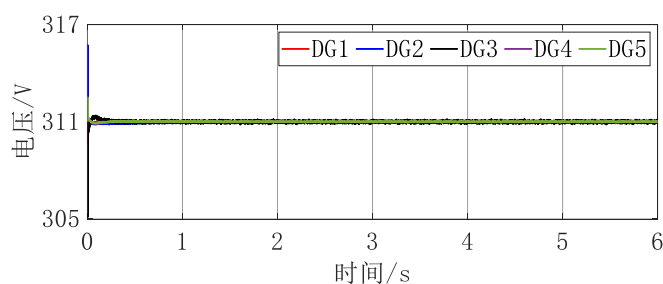
(b) 一级控制层中可控负荷削减功率情况



(c) 一级控制层中无功功率分配情况



(d) 一级控制层中频率变化情况



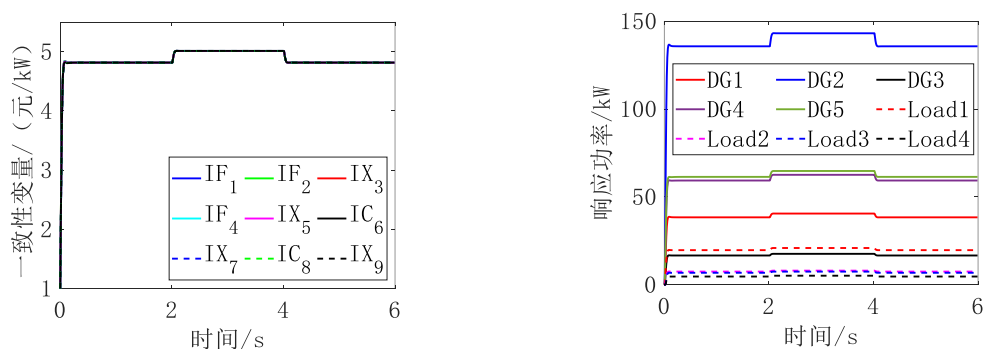
(e) 一级控制层中电压变化情况

图 4-14 一级控制层中有功、无功功率分配及电压与频率变化情况

由图 4-13 (a) 可知，三级控制层采用第 3 章领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出各智能体一致性变量，各智能体一致性变量均能收敛到最优值 4.815 元/kW，系统在 0.37 秒达到收敛一致。由图 4-13 (b) 可知，在采用第 3 章领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出各智能体一致性变量后，将计算出的各智能体一致性变量值代入式 (3-37)、式 (3-38) 和式 (3-39) 中，计算出各 DG 对应的最优输出功率值与各可控负荷对应的最优削减功率值，并将其作为调度指令，发送到一级控制层中。由图 4-14 (a) 和图 4-14 (b) 可知，一级控制层在接收到三级控制层发送的调度指令后，能迅速做出反应，使一级控制层中的各智能体按照调度指令动作，实现系统的经济最优运行。由图 4-14 (c) 可知，一级控制层中无功功率能按照其容量比 2: 5: 1: 3: 4 的比例进行分配，有效解决了下垂控制中因线路阻抗导致无功功率不能合理分配的问题。由图 4-14 (d) 可知，由于各智能体都能按照三级控制层中计算出的最优响应功率进行有功功率分配，因此系统频率能稳定在 50Hz。由图 4-14 (e) 可知，由于各智能体都能按照其容量比 2: 5: 1: 3: 4 的比例进行无功功率分配，因此系统电压能稳定在 311V。综上所述，本文所提分布式分层优化控制策略是可行的。

为进一步研究分布式分层优化控制策略的经济性，本文将所提分布式分层优化控制策略与传统下垂控制策略进行了比较。负荷设置与 4.5.2 中情况相同。传

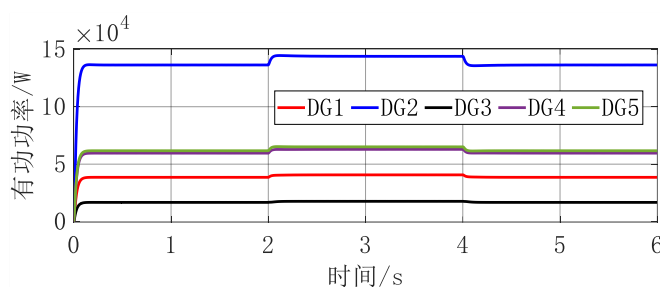
统下垂控制策略中的 5 个 DG 按照其容量比 2: 5: 1: 3: 4 的比例进行有功功率分配。三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况及最优响应功率情况如图 4-15 所示, 一级控制层接收调度指令后有功功率分配及可控负荷削减功率情况如图 4-16 所示, 传统下垂控制策略有功功率分配情况如图 4-17 所示, 两种控制策略经济性对比情况如图 4-18 所示。



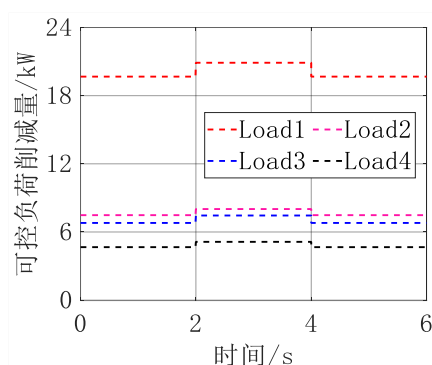
(a) 三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况

(b) 三级控制层中计算出的最优响应功率情况

图 4-15 三级控制层中计算出的一致性变量收敛情况及最优响应功率情况



(a) 一级控制层中有功功率分配情况



(b) 一级控制层中可控负荷削减功率情况

图 4-16 一级控制层接收调度指令后有功功率分配及可控负荷削减功率情况

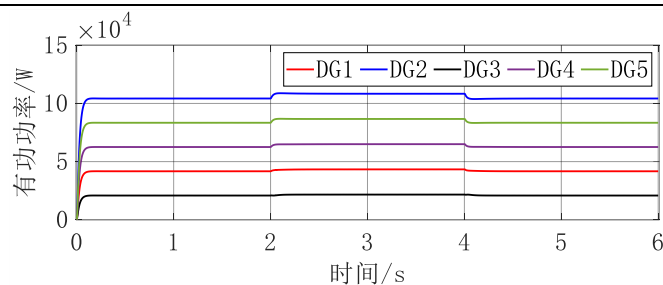


图 4-17 传统下垂控制策略有功功率分配情况

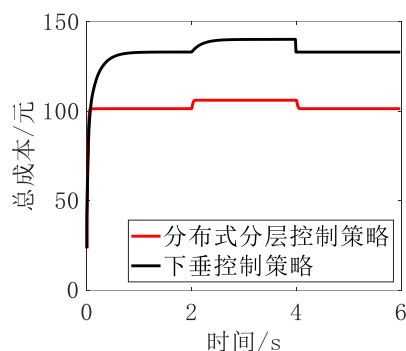


图 4-18 两种控制策略经济性对比情况

由图 4-15 (a) 可知, 系统中各智能体一致性变量能收敛到最优值, 并且在总负荷变化时, 能够快速收敛到新的状态; 由图 4-15 (b) 可知, 三级控制层采用本文领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出各 DG 的最优响应功率, 当总负荷发生突变时, 同样采用本文领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出突变后的最优响应功率, 并将其作为调度指令下发给一级控制层; 由图 4-16 (a) 可知, 一级控制层可以迅速控制各 DG 按照调度指令运行; 由图 4-16 (b) 可知, 一级控制层中各可控负荷能按照调度指令进行负荷削减; 由图 4-17 可知, 传统下垂控制策略能按照 2: 5: 1: 3: 4 的比例进行有功功率分配, 并且有功总负荷突变时, 每个 DG 分配有功功率的增量也能按照这个比例变化; 由图 4-18 可知, 分布式分层控制策略、传统下垂控制策略在负荷未突变时的总成本分别为 101.5 元、133.1 元, 前者与后者相比总成本降低 31.6 元, 降低了 23.74%; 在负荷突变时的总成本分别为 106.2 元、140.2 元, 前者与后者相比总成本降低 34 元, 降低了 24.25%。综上所述, 本文所提分布式分层控制策略的经济性更优。

4.6 本章小结

本章首先介绍了改进平均有限时间一致性算法, 并采用李雅普诺夫稳定性理论对本章所提改进算法的收敛性与稳定性进行分析, 通过数学分析与仿真算例结

合的方式验证了本章所提改进算法的有效性与优越性。接着，详细介绍了下垂控制原理及其控制模型的建立。然后，基于改进平均有限时间一致性算法研究了一种微电网分布式分层优化控制策略，并将微电网经济优化调度结果应用于微电网分布式分层优化控制中，该分布式分层控制共分为三层，包括三级控制层（经济优化调度层）、二级控制层（频率、电压偏差控制层）和一级控制层（下垂控制层）。其中，三级控制层中采用领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出最优响应功率，将该功率作为调度指令发送到一级控制层中，以满足系统的运行经济性最优。二级控制层针对一级控制层中下垂控制策略带来的频率、电压偏差问题，采用改进平均有限时间一致性算法计算出频率、电压补偿量，将该补偿量反馈到一级控制层中，可以保证系统频率、电压稳定。一级控制层接收三级控制层下发的调度指令以及二级控制层反馈的频率、电压偏差补偿量，控制各智能体按照调度指令快速响应。最后，通过算例与仿真验证了本文所提微电网分布式分层优化控制策略的有效性与优越性。

第5章 结论与展望

5.1 总结

未来,随着微电网中可再生能源的渗透率不断提高以及其内部整合了大量储能和不同负荷,可显著提高可再生能源利用率以及灵活消纳 DG 产生的电能。但对微电网的稳定性与经济性带来了巨大挑战。因此,为满足未来微电网中的各种要求,本文针对微电网经济优化调度与协调控制问题展开了研究,为更好地求解系统模型、加快系统收敛速度、满足系统频率、电压稳定以及内部供需功率动态平衡,提出了基于多智能体的领导-跟随改进有限时间一致性算法和改进平均有限时间一致性算法,设计了基于领导-跟随改进有限时间一致性的微电网经济优化调度策略和基于改进平均有限时间一致性的微电网分布式分层优化控制策略,并将两种策略相互结合运用。本文主要研究内容与成果阐述如下:

(1) 首先,详细阐述了本文的研究背景、意义,分析了微电网调度策略、控制方法以及分布式电源逆变器控制技术的国内外研究现状,突出强调了研究微电网分布式经济优化调度、分布式分层优化控制的重要性。然后,对图论的基本概念以及图论中通信拓扑图与拉普拉斯矩阵的相关知识进行介绍。最后,对李雅普诺夫稳定性理论、多智能体系统理论、一致性理论以及不同的一致性协议进行了详细阐述。

(2) 针对集中式调度过度依赖于MGCC以及采用的智能算法存在收敛精度低、易陷入局部最优以及分布式算法中传统一致性算法收敛速度慢、不能满足系统供需功率动态平衡等问题,研究了一种领导-跟随改进有限时间一致性算法,在传统有限时间一致性算法的基础上引入增益系数与供需功率偏差消除项,并采用李雅普诺夫稳定性理论与图论定理对该改进算法的收敛性与稳定性进行分析。接着,将多智能体一致性理论运用到微电网经济优化调度中,基于该改进算法,研究了一种分布式经济优化调度策略。该策略将DG与可控负荷看作智能体,并给每个智能体设置其相应的一致性变量,然后建立经济调度数学模型,采用拉格朗日乘子法求得系统经济最优条件。该分布式经济调度策略不需要MGCC,仅需

相邻智能体间进行信息传递即可更新自身的一致性变量,并通过选取领导智能体引导全局一致性变量的变化,在加快系统收敛速度的同时还能保证系统内供需功率保持动态平衡以及满足智能体“即插即用”等要求。最后,通过算例与仿真验证了本文所提领导-跟随改进有限时间一致性算法以及分布式经济优化调度策略的有效性与优越性。

(3) 针对传统下垂控制策略会带来电压和频率偏差、系统内功率不能合理分配、如何同时满足系统稳定运行与经济性最优以及传统平均一致性算法收敛速度慢等问题,研究了一种改进平均有限时间一致性算法,加快了算法收敛速度,并采用李雅普诺夫稳定性理论证明了改进平均有限时间一致性算法的稳定性和收敛性。然后,基于该算法,研究了一种微电网分布式分层优化控制策略,并将微电网经济优化调度结果应用于微电网分布式分层优化控制中,该分布式分层控制共分为三层,包括三级控制层(经济优化调度层)、二级控制层(频率、电压偏差控制层)以及一级控制层(下垂控制层)。其中,三级控制层采用领导-跟随改进有限时间一致性算法计算出各智能体最优响应功率,将其作为调度指令发送给一级控制层。然后,二级控制层采用改进平均有限时间一致性算法计算出频率、电压补偿量,将其反馈给一级控制层。接着,一级控制层通过接收二级控制与三级控制层的反馈信号,不仅能使各智能体按照调度指令运行,实现微电网经济优化调度,而且保证了系统频率、电压稳定在额定值以及功率合理分配。最后,通过算例与仿真验证了本文所提改进平均有限时间一致性算法与分布式分层优化控制策略的有效性与优越性,能够满足微电网经济优化调度与控制要求。

5.2 展望

本文研究内容虽然有一定的创新点,取得了一些成果,但由于本人时间和精力有限,还存在诸多不足,对有限时间一致性算法、分布式经济调度策略、分布式分层优化控制策略的研究还有待完善,依然有许多方面需要进行更深入的研究。

(1) 本文没有考虑时延问题,在多智能体系统中,各智能体进行信息传递时会产生时延,时延会对系统的稳定性产生影响,甚至导致系统崩溃。因此,在后续的研究工作中可以重点研究带有时延的多智能体系统。

(2) 本文所研究的智能体仅是一阶智能体,但目前实际情况中高阶智能体居多,并且都是异构型。因此,在后续研究工作中,针对异构高阶多智能体系统

进行研究符合实际情况，并且更有研究价值。

（3）本文对微电网经济调度、控制策略的研究均未考虑线路损耗，然而实际情况下能量在传输过程中是必然存在损耗的。因此，在后续的研究工作中，可以进一步考虑带线路损耗的微电网调度、控制策略，这样得出的结论更符合实际情况。

（4）本文所研究的分布式经济优化调度策略中，仅把储能装置当作一个放电电源来看，没有深入考虑储能的充放电特性、SOC 约束等指标。因此，在后续的研究工作中，可以进一步研究储能装置的特性以及如何在微电网调度、控制中应用。

参考文献

- [1] 李得民. 多微电网系统协调控制与分布式优化调度研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [2] 辛保安, 陈梅, 赵鹏等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6931.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(02): 10-14+23.
- [4] 赵鹏杰, 吴俊勇, 张文浩, 等. 考虑配网潮流和源荷不确定性的多微电网点对点合作调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4885-4896.
- [5] 孙佳航, 黄景光, 徐慧鑫, 等. 基于改进线性二次调节器的微电网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 120-132.
- [6] 杨炜晨, 苗世洪, 张世旭, 等. 交直流混合微电网群分布式自治经济控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(03): 857-868.
- [7] 葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(06): 2219-2238.
- [8] 董璐, 边晓燕, 周波, 等. 计及调频备用效益的主动配电网分层分布式协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(01): 55-63.
- [9] 李军徽, 马得轩, 朱星旭, 等. 基于 ADMM 算法的主动配电网分层优化经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(08): 76-86.
- [10] 梁海平, 王岩, 刘英培, 等. 计及源荷不确定性的混合交直流主动配电网分层分布式优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 62-69+77.
- [11] 唐彬峰. 基于多智能体有限时间一致性的微电网优化策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [12] 余莹莹. 多智能体系统一致性若干问题的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [13] 陈凯旋. 基于多智能体一致性的智能电网调度策略[D]. 南京: 南京邮电大

- 学, 2017.
- [14] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(05): 602-615.
- [15] 刘天琪, 卢俊, 何川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(08): 261-268.
- [16] 乐健, 柳永妍, 叶曦, 等. 含高渗透率分布式电能资源的区域电网市场化运营模式[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3343-3354.
- [17] 董志辉, 林凌雪, 管霖, 等. 基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05): 22-29.
- [18] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(03): 44-54.
- [19] 刘林鹏. 基于强化学习的微电网优化调度策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [20] 殷辉, 陆信辉, 周开乐. 分布式与集中式储能并存的微电网负荷优化调度[J]. 中国管理科学, 2023, 31(02): 118-128.
- [21] Wang R, Wang P, Xiao G, et al. Power Demand and Supply Management in Microgrids with Uncertainties of Renewable Energies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(1): 260-269.
- [22] 张柳芳. 含冷热电联供型多微网的主动配电网优化调度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [23] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25-31.
- [24] Li L, Zhang S. Techno-Economic and Environmental Assessment of Multiple Distributed Energy Systems Coordination under Centralized and Decentralized Framework[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103076.
- [25] Chen Y, He L, Li J. Stochastic Dominant-Subordinate-Interactive Scheduling Optimization for Interconnected Microgrids with Considering Wind-Photovoltaic-Based Distributed Generations under Uncertainty[J]. Energy, 2017, 130: 581-598.
- [26] Hou J, Yu W, Xu Z, et al. Multi-Time Scale Optimization Scheduling of Microgrid

- Considering Source and Load Uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109037.
- [27] Duan Y, Zhao Y, Hu J. An Initialization-Free Distributed Algorithm for Dynamic Economic Dispatch Problems in Microgrid: Modeling, Optimization and Analysis[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 34: 101004.
- [28] Bai C, Li Q, Zhou W, et al. Weighted Matrix Based Distributed Optimization Method for Economic Dispatch of Microgrids Via Multi-Step Gradient Descent[J]. Energy Reports, 2022, 8(15): 177-187.
- [29] Huang L, Sun W, Li Q, et al. Distributed Real-Time Economic Dispatch for Islanded Microgrids with Dynamic Power Demand[J]. Applied Energy, 2023, 342: 121156.
- [30] 聂涌泉, 彭超逸, 胡亚平, 等. 基于边缘计算的高渗透率微电网并行分布式优化经济调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(01): 114-124.
- [31] 米阳, 彭建伟, 陈博洋, 等. 基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 1-10.
- [32] 郭方洪, 何通, 吴祥, 等. 基于分布式深度强化学习的微电网实时优化调度[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(10): 1881-1889.
- [33] 曹正斐, 张忠辉, 董治成, 等. 基于区块链的多互联微电网分布式协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(09): 138-145.
- [34] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [35] Zuo K, Wu L. A Review of Decentralized and Distributed Control Approaches for Islanded Microgrids: Novel Designs, Current Trends, and Emerging Challenges[J]. The Electricity Journal, 2022, 35(5): 107138.
- [36] Li H, Mao M, Guo K, et al. A Decentralized Optimization Method Based Two-Layer Volt-Var Control Strategy for The Integrated System of Centralized PV Plant and External Power Grid[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123625.
- [37] 陈郁林. 抵御虚假数据注入攻击的微电网分布式二次控制策略研究[D]. 杭

- 州: 浙江大学, 2021.
- [38] 邹唯薇. 基于一致性理论的孤岛微电网分布式控制研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- [39] 张治强. 基于下垂特性的孤岛微电网综合控制策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [40] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(09): 2756-2767.
- [41] Wang G, Song Y, Cao S, et al. Novel Adaptive Power Distribution Master-Slave Control Strategy for A Biogas-Solar-Wind Battery Islanded Microgrid Based on A Microturbine[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 109743.
- [42] 张运, 姜望, 张超, 等. 基于储能荷电状态的主从控制微电网离网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(04): 180-187.
- [43] 张纯江, 徐菁远, 庆宏阳, 等. 主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 125-133.
- [44] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆. 对等控制孤岛微电网的静态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4837-4846+5107.
- [45] 童泽军. 基于多智能体一致性的微电网功率协调控制[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2023.
- [46] 张朝霞. 基于多智能体一致性的孤岛微电网分布式优化控制研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2021.
- [47] 伦春仁. 基于改进下垂和一致性算法的微电网分布式协调控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [48] 梁建钢. 微电网变流器并网运行及并网和孤岛切换技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [49] 杨博涵. 微电网孤岛模式下的频率控制策略研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [50] 刘昊炆, 赵兴勇, 李贵君, 等. 基于改进自适应分段下垂控制的光伏直流微电网研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(09): 1214-1221.
- [51] Liu Y, Deng W, Yang P, et al. Dispatchable Droop Control Strategy for DC Microgrid[J]. Energy Reports, 2023, 9(12): 98-102.

- [52] Lai H, Xiong K, Zhang Z, et al. Droop Control Strategy for Microgrid Inverters: A Deep Reinforcement Learning Enhanced Approach[J]. Energy Reports, 2023, 9(8): 567-575.
- [53] Zong S, Lyu Y, Wang C. Control Strategy of Multiple Interlinking Converters for Low-Voltage Hybrid Microgrid Based on Adaptive Droop[J]. Energy Reports, 2023, 9(7): 721-731.
- [54] Jiang W, Li P. A Novel Pre-Synchronization Control Strategy for Microgrid Connections Based on Improved Droop Control[J]. Energy Reports, 2022, 8(13): 1257-1264.
- [55] Guo C, Liao J, Zhang Y. Adaptive Droop Control of Unbalanced Voltage in The Multi-Node Bipolar DC Microgrid Based on Fuzzy Control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108300.
- [56] Gong R, Wang W. Improved Current Droop Control Strategy of Parallel Inverters for Microgrid Based on Negative Feedback of Current[J]. Energy Reports, 2023, 9(7): 1389-1399.
- [57] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于储能协调自适应 VSG 控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 410-419.
- [58] Bao F, Guo J, Wang W, et al. Microgrid's Multi-VSGs Cooperative Control Method Based on Distributed Communication[J]. Energy Reports, 2022, 8(5): 384-392.
- [59] Yang Y, Yang P, Lin W, et al. A Decentralized Control for Non-Error Frequency Regulation in An Islanded Microgrid Containing Multiple VSGs[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107337.
- [60] Chen M, Xiao X. Hierarchical Frequency Control Strategy of Hybrid Droop/VSG-Based Islanded Microgrids[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 155: 131-143.
- [61] 李一琳. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [62] 张玉. Multi-agent 有限时间一致性的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.

- [63] 袁猛. 动态环境下多智能体系统的协作研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [64] 王婕, 王鼎华, 吴彤, 等. DoS 攻击下多智能体系统的事件触发编队控制[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(11): 2727-2739.
- [65] 胡鹏林, 潘泉, 郭亚宁, 等. 多智能体编队控制中的迁移强化学习算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(02): 389-399.
- [66] 谭瑶, 梅杰. 利用方位角信息的移动机器人编队控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(07): 1043-1050.
- [67] 田宝国, 吴尚烨. 多智能体备用领导者避障方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 247-252.
- [68] 姚辉, 席建祥, 王成, 等. 二阶多智能体系统自抗扰编队跟踪与避撞控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(05): 960-977.
- [69] 吕冬翔, 张志成, 朱立宏, 等. 基于多智能体的太阳能无人机能源控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(02): 372-378.
- [70] Liu C, Sun S, Tao C, et al. Sliding Mode Control of Multi-Agent System with Application to UAV Air Combat[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96: 107491.
- [71] Sun F L, Zhu W. Finite-Time Consensus for Leader-Following Multi-Agent Systems over Switching Network Topologies[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(11): 110204.
- [72] Wang L, Xiao F. Finite-Time Consensus Problems for Networks of Dynamic Agents[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(4): 950-955.
- [73] 王静. 网络攻击下微电网分布式经济调度方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [74] 徐康良. 基于多智能体一致性的微电网经济调度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [75] 彭超. 基于事件触发的交流微电网分布式二次控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [76] 王恒. 基于事件触发的最优一致性微电网二次控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

- [77] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(02): 112-117.
- [78] 马秀娟, 李范, 赵玫, 等. 基于有限时间一致性的微网分布式二次控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(02): 45-53.
- [79] 李铁成, 胡雪凯, 侯小超, 等. 一种统一并离网模式的串联型光伏微网分层分布式控制策略[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(06): 1-12.
- [80] 马龙飞, 张宝群, 焦然, 等. 基于分层微电网的分布式协同控制策略研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1818-1825.
- [81] 康文发, 李强, 陈民铀, 等. 孤岛微电网多 Agent 分布式双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(03): 770-781.
- [82] 黎金英, 艾欣, 邓玉辉. 微电网电压不平衡的分层补偿控制策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(03): 46-52.
- [83] 魏文军, 唐彬峰, 黄巨龙等. 基于有限时间一致性的微电网分层优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(06): 7-13.
- [84] 熊德超. 基于一致性理论的孤岛微电网分布式控制策略研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.

攻读硕士学位期间的研究成果

- [1] 李浩宇,张春,吴零晨,等.基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度[J/OL].电力系统及其自动化学报:1-12[2024-05-25].
- [2] 李浩宇,张春. 一种基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度方法[P]. 中国专利: CN202311475695.4,2024-02-23.

致 谢

时光荏苒，转眼间我的硕士生涯即将步入尾声，回想这三年，虽有遗憾，但也收获满满。读研的这几年里，是最能磨练我意志力和提高我能力的时期，让我具备了一定的专业知识，开拓了我的眼界。在临别安徽工程大学之际，向帮助过、支持过、鼓励过我的人表达我最诚挚的感谢与祝福。

首先，我要感谢我的导师张春教授。张老师资历深厚、学识渊博，对待科研态度严谨认真、对待学生有足够的耐心，时常关心我的学习与生活情况。在三年的求学生涯里，不论是在学习还是生活中，张老师都给予了我很大的帮助。在确立论文研究方向时，由于我缺乏科研经验，不知从何下手，张老师得知后多次找我讨论，并给予我许多建议，引导我找到自己的研究方向。在科研过程中遇到难题时，张老师总能耐心帮助我分析问题产生的原因，针对问题所在给出指导性意见，为我指明前进方向。不论工作多忙，张老师总会抽出时间召开组会，询问我的科研进度以及学习、生活情况并及时给予帮助，本论文正是在张老师的悉心指导下完成的。在张老师的耐心指导下，我提高了自己的写作水平与分析问题的能力，深刻认识到论文写作过程中语言表达能力的重要性，从深层次上提高了我个人学术能力。

其次，感谢我的课题组的同门与师弟师妹们三年来给予我的帮助与关心，祝你们身体健康、学习进步、前程似锦。

最后，由衷的感谢我的父母、爷爷奶奶、外公外婆，给予我生活上的鼓励与支持，在遇到困难时，是你们一次次的鼓励让我敢于迎难而上。还要真挚的感谢我的女朋友，在读研期间不论是学习还是生活上都给予了我巨大的支持，在遇到困难时，她一直鼓励我不要放弃，明确自己的目标，努力奋斗。这些鼓励与支持，激励着我朝着自己的梦想不断前进，使得自己不断的进步与蜕变，成为一个有理想、敢担当、能吃苦、肯奋斗的新时代好青年。

此外，非常感谢各位专家教授在百忙之中抽出宝贵的时间评审本文，感谢你们对本文所提出的宝贵建议和意见！

尚德敏学 唯实惟新

