

分类号: TM407

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220340107



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于改进牵制一致性的并网微电
网分层分布式优化控制策略研究

论 文 作 者 吴文泰

校 内 导 师 张春 教授

校 外 导 师

专业学位类别 控制科学与工程

研究方向 (领域) 检测技术与自动化装置

论文提交日期: 2025 年 5 月 8 日

分类号: TM407

单位代码: 10363

密级: 公开

学号: 2220340107

目 录 基于改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制策略研究

目 录 Research On Hierarchical Distributed Optimal Control
Strategy For Grid-Connected Microgrids Based On Improved
Pinning Consistency

学 生 姓 名: 吴文泰
指 导 教 师: 张春 教授
专 业: 控制科学与工程
研 究 方 向: 检测技术与自动化装置

论文答辩日期: 2025 年 5 月 8 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：吴文泰

日期：2025 年 5 月 8 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：吴文泰

指导教师签名：张春

日期：2025 年 5 月 8 日

日期：2025 年 5 月 8 日

基于改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制策略研究

摘要

随着经济的迅速增长，人类面临着日益严峻的能源需求和环境危机。传统化石燃料能源如煤炭、石油和天然气的使用，导致全球气候变暖和生态环境破坏等问题日益突出。因此，人们开始关注太阳能、风能等清洁能源的发展，这些能源具有较小的规模和较低的运行成本，被称为分布式电源(Distributed Generation, DG)。为适应分布式电源种类多样、数量庞大且分散的特点，“微电网”这一概念应运而生，其集成了 DG、负荷和储能等设备，通过公共连接点与大电网连接，建立了分布式电源与大电网的桥梁。由于各 DG 的出力具有随机性、波动性和不确定性，会给电力系统带来功率、频率和电压的扰动，影响电能质量和微电网优化调度，严重时会影响电力系统的稳定性和安全性。因此协同各 DG 的出力、保证电压和频率的稳定、实现微电网稳定经济运行具有重要意义。本文以并网交流微电网为研究对象，提出基于二层邻居牵制一致性算法的并网微电网经济优化调度策略与基于改进牵制一致性算法的并网微电网电压频率二次控制策略。在此基础上，提出分层分布式优化控制策略，该策略能够实现电压频率的快速恢复与稳定、微电网的经济优化运行以及有功功率的合理分配。具体研究如下：

(1) 首先介绍了课题的研究背景和意义。随后详细介绍了微电网的调度策略、控制策略、主要控制方法和各 DG 逆变器的控制方法，同时对图论知识进行简单概述。最后对多智能体一致性进行简述，介绍了多智能体的概念和多智能体一致性理论以及目前已有的一些一致性协议。

(2) 为提高并网微电网系统经济优化响应速度,降低整体发电运行成本,提出二层邻居牵制一致性算法。该算法将成本微增率(Incremental Cost Rate, ICR)定义为状态变量,引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差,利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR,计算得到各 DG 的最优有功出力参考值,从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。仿真结果表明,所提算法能完成有功出力的经济分配,且系统响应性能优,在负荷突增、功率越限、分时电价、拓扑切换、计及线路损耗、即插即用等因素对系统运行影响时,所提方法能使微电网快速达到经济优化状态。

(3) 针对并网微电网电压频率跌落的快速恢复问题,提出基于改进牵制一致性算法的并网微电网电压频率二次控制策略。改进牵制一致性算法在传统牵制一致性的基础上引入前置项,实现算法的快速收敛,并对该算法的稳定性和收敛性进行证明。随后针对如何同时实现微电网电压频率的快速恢复和稳定、微电网的经济优化运行以及有功出力的合理分配,提出并网微电网分层分布式优化控制策略,该策略分为三层,第一控制层是双闭环反馈的下垂控制。第二控制层为电压频率优化控制,利用改进牵制一致性算法和 PI 控制,得出电压频率补偿项,将电压频率补偿项反馈至第一控制层,实现电压频率的快速恢复和稳定。第三调度层为经济优化调度层,利用二层邻居牵制一致性算法得出各 DG 最优有功出力,随后将各 DG 的最优有功出力发送至第一控制层中,让各 DG 按最优有功出力运行,从而实现微电网的经济优化运行。最后,通过算例与仿真验证了本文所提微电网分层分布式优化控制策略的有效性与优越性。

关键词: 并网微电网, 牵制一致性, 电压频率优化控制, 经济优化, 分层分布式

RESEARCH ON HIERARCHICAL DISTRIBUTED OPTIMAL CONTROL STRATEGY FOR GRID-CONNECTED MICROGRIDS BASED ON IMPROVED PINNING CONSISTENCY

ABSTRACT

With rapid economic growth, mankind is facing an increasingly severe energy demand and environmental crisis. The use of traditional fossil fuel energy sources, such as coal, oil and natural gas, has led to increasing problems such as global warming and ecological damage. As a result, attention has been focused on the development of clean energy sources such as solar and wind, which have smaller scale and lower operating costs and are known as Distributed Generation (DG). In order to cope with the characteristics of diverse, large and scattered distributed power sources, the concept of ‘ microgrid ’ has emerged, which integrates DG, loads, energy storage and other equipment, and connects with the power grid through a public connection point to establish a bridge between distributed power sources and the power grid. Due to the randomness, volatility and uncertainty of the output of each DG, it will bring power, frequency and voltage disturbances to the power system, affecting the power quality and optimal scheduling of the microgrid, and seriously affecting the stability and security of the power system. Therefore, it is of great significance to synergise the power output of each

DG, ensure the stability of voltage and frequency, and achieve stable and economic operation of microgrid. This paper takes grid-connected AC microgrid as the research object and proposes an economic optimal scheduling strategy for grid-connected microgrid based on the two-layer neighbourhood pinning consistency algorithm and a secondary control strategy for voltage and frequency of grid-connected microgrid based on the improved pinning consistency algorithm. On this basis, a hierarchical distributed optimal control strategy is proposed, which is able to achieve rapid recovery and stabilisation of voltage and frequency, economic optimisation of microgrid operation, and reasonable distribution of active power. The specific studies are as follows:

(1) The research background and significance of the topic are first introduced. Subsequently, the control strategy of microgrid, the main control methods and the control methods of each DG inverter are introduced in detail, while a brief overview of the knowledge of graph theory is given. Finally, a brief description of multi-intelligent body consistency is given, introducing the concept of multi-intelligent body and the theory of multi-intelligent body consistency as well as some existing consistency protocols.

(2) In order to improve the economic optimization response speed of the grid-connected microgrid system and reduce the overall generation operation cost, a second-order neighbor pinning consensus algorithm is proposed. The incremental cost rate (ICR) is defined as a state variable, the power deviation elimination term is introduced to quickly eliminate the total power deviation, and the second-order neighbor term and pin term are used to achieve fast convergence to the optimal ICR. The

optimal active output reference value for each distributed generation is calculated, so as to achieve the system economic optimization as well as the balance of load power supply and demand. The simulation results show that the proposed method can complete the economic distribution of active power output, and the system has excellent response performance. When the system is affected by factors such as sudden load increase, power overlimit, time-of-use tariffs, topology switching, line loss and plug and play, etc., the proposed method can make the microgrid reach the economic optimization state quickly.

(3) Aiming at the rapid recovery of voltage frequency drop in grid-connected microgrid, a secondary control strategy for voltage-frequency of grid-connected microgrids based on improved pinning consistency is proposed. The improved algorithm introduces a predicate term on the basis of traditional pinning consistency to achieve fast convergence of the algorithm, and the stability and convergence of the algorithm are proved. Subsequently, for how to simultaneously achieve rapid recovery and stabilisation of microgrid voltage and frequency, economic and optimal operation of the microgrid, and rational allocation of active output, a hierarchical distributed optimal control strategy for grid-connected microgrids is proposed, which is divided into three layers, with the first control layer being a dual closed-loop feedback droop control. The second control layer is voltage-frequency optimal control, which uses the improved pinning consistency algorithm and PI control to derive the voltage-frequency compensation term, and feeds the voltage-frequency compensation term back to the first control layer to achieve the fast recovery and stabilisation of voltage frequency. The third control layer is

the economic optimization dispatch layer, which uses the second-order neighbour pinning consistency algorithm to derive the optimal active output of each DG, and then sends the optimal active output of each DG to the first control layer to allow each DG to operate at the optimal active output, thus realizing the economic optimization of the microgrid. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed hierarchical distributed optimal control strategy for microgrids are verified through examples and simulations.

KEY WORDS: Grid-connected microgrids, Pinning consistency, Voltage-frequency optimal control, Economic optimal, Hierarchical distributed

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.2.1 微电网优化调度.....	2
1.2.2 微电网控制策略.....	4
1.2.3 微电网主要控制方法.....	8
1.2.4 分布式电源逆变器控制方法.....	10
1.3 本文主要研究工作.....	15
第 2 章 预备知识.....	18
2.1 图论.....	18
2.2 多智能体一致性.....	23
2.2.1 多智能体简述.....	19
2.2.2 一致性理论.....	20
2.2.3 一致性协议.....	20
2.3 本章小结.....	22
第 3 章 基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化调度.....	23
3.1 微电网源侧经济优化成本模型.....	23
3.2 二层邻居牵制一致性算法.....	24
3.2.1 算法描述.....	24
3.2.2 算法收敛性分析.....	26
3.2.3 算法收敛快速性分析.....	27
3.3 分布式经济优化调度策略.....	28
3.4 算例与仿真.....	29
3.4.1 负荷突增时系统响应性能对比分析.....	30
3.4.2 功率越限影响研究.....	32
3.4.3 全天分时电价影响研究.....	34
3.4.4 拓扑切换影响研究.....	36
3.4.5 计及线路损耗影响研究.....	39
3.4.6 即插即用影响研究.....	40
3.5 本章小节.....	41
第 4 章 基于改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制.....	43
4.1 改进牵制一致性算法.....	44
4.1.1 算法描述.....	44
4.1.2 算法收敛性分析.....	44
4.2 微电网的一次控制策略.....	45
4.3 基于改进牵制一致性的微电网二次控制.....	47
4.4 分层分布式优化控制.....	49

4.5 算例与仿真50

 4.5.1 负荷改变时系统响应性能对比分析 52

 4.5.2 通信中断影响研究54

 4.5.3 即插即用影响研究55

4.6 本章小节 56

第 5 章 总结与展望 58

 5.1 结论58

 5.2 展望59

参考文献 61

攻读学位期间发表的学术论文目录 67

致谢 69

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着全球经济的快速发展，能源危机和环境污染问题成为全球关注的焦点。在此背景下，开发绿色、清洁的可再生能源成为全球能源发展的新趋势^[1,2]。根据《中国能源大数据报告(2024)》的数据，过去十年间，中国原煤和原油的生产占比总体呈下降趋势，而太阳能、水能、风能等清洁能源的产量占比逐年上升。其中太阳能、水能、风能等清洁能源因其具有较小的规模和较低的运行成本，被称为分布式电源(Distributed Generation, DG)^[3]。由于 DG 的出力具有随机性、波动性和不确定性，会给电力系统带来功率、频率和电压的扰动^[4,5]，严重时会影响电力系统的稳定性和安全性。为了消除 DG 带来的影响，“微电网”这一概念应运而生。

微电网^[6]分为交流、直流及交直流混合微电网，通常由 DG、电力变换器、负荷、储能、静态开关和断路器等构成。它可以实现内部功率的动态平衡和潮流优化^[7]，同时确保各 DG 之间的协调稳定运行和即插即用功能^[8]。通过采用分层分布式控制，微电网能够实现供需平衡、电压频率的快速恢复以及高质量电能的提供，有助于提高新能源的利用率和减少不可再生能源的消耗。

在提高新能源的发电效率、实现微电网的经济优化运行以及电压频率的快速恢复等挑战中，最迫切需要解决的是实现微电网的经济优化运行^[9-12]以及电压频率的快速恢复问题^[13,14]。在传统微电网的协调控制中，主要运用集中式或分散式控制策略^[15,16]来解决上述问题。集中式控制需要一个中央控制单元来搜集并处理整个系统的数据，这样可以完成更为复杂的整体控制任务，但如果中央控制器发生故障，整个控制体系也会失效，因此其可靠性相对较低。分散式控制减少了对中央控制单元的依赖，其控制决策是基于本地信息做出的，即使某个控制单元发生故障，也不会影响到其他部分的正常运行，从而提高整个系统的可靠性，但分散式控制通常只能基于局部信息做出决策，无法实现整个系统的最优性能。

与集中式和分散式控制相比，分布式控制^[17]不仅消除了单点故障的风险，而且可以实现整个系统的最优性能。因此，使用分布式控制来研究并网微电网的经济优化调度以及电压频率跌落问题具有重大意义。

1.2 研究现状

1.2.1 微电网优化调度

微电网优化调度的核心是在满足系统各种约束的前提下，实现供需平衡和运行总成本最小化。集中式优化调度依赖调度中心来搜集关键数据，然后构建模型并求解得到最佳调度方案，将求解出的最佳调度结果传达给各 DG，各 DG 按调度指令运行。然而，随着越来越多的新型可控单元，它们分布在不同地区且具有不同的特性，这种传统的集中式优化调度面临着计算压力大、单点故障易导致系统崩溃等问题。分散式优化调度不需要调度中心，各 DG 仅需依赖自身的本地信息，无需与其他 DG 进行通信即可实施优化调度，但由于分散式优化调度缺少各 DG 之间的通信，会导致各 DG 之间难以实现有效的协同操作，进而影响整个系统的协调性和经济性。为弥补集中式优化调度和分散式优化调度存在的不足，一些学者提出分布式优化调度，分布式调度方法强调各单元进行自主决策，实现个体智能，通过通信网络与相邻单元进行信息交互，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多智能体系统(Multi-Agent Systems, MAS)以及微电网经济优化调度中。

(1) 集中式优化调度

目前，国内外学者针对集中式优化调度进行了许多研究，文献[18]构建了同时考虑分布式储能系统(Distributed Energy Storage Systems, DESSs)和集中式储能系统(Centralized Energy Storage System, CESS)的微电网负荷优化调度模型，与单一的 DESSs 微电网系统相比，同时含有 DESSs 和 CESS 的微电网系统可以进一步降低微电网的经济成本，并提高微电网的稳定性。文献[19]在文献[18]的基础上，构建分布式与集中式储能并存的微电网架构，分析储能协同优化规划求解算法与负荷优化调度模型，最后采用 24 节点和 33 节点系统进行验证，与

传统集中式系统对比,改进的分布式与集中式储能并存的微电网架构总体经济效益更佳。文献[20]针对微电网负荷点的可靠性和电能质量问题,提出一种集中式微电网优化调度模型,该模型以综合运行成本最小化为目标,利用拉格朗日松弛法将其分解为单个优化调度问题,通过对集中式微电网系统的模拟,展示所提模型的优点和有效性。文献[21]针对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[22]针对微电网系统中央控制器(Microgrid Global Central Controller, MGCC)满足客户需求的同时,如何保持最低成本发电的问题,提出一种新型电力供需管理方案,并建立一种新的不确定性模型,该模型根据过去的观察和经验引入一个参考分布,并定义一个分布不确定性集来限制可再生能源的不确定性,允许可再生能源围绕参考分布波动。最后提出一种两阶段优化方法,以确定最佳的电力消耗和发电调度,从而使燃料成本最小化。

(2) 分散式优化调度

针对分散式优化调度,文献[23]针对系统能否实现分散式的全局最优调度,提出一种分散式下垂控制方法来实现系统全局最优调度和一种改进分散调度方法来实现次优调度。文献[24]针对微电网中各类电源特性各异,网络通信能力不足,集中式控制难以实现经济优化运行,提出同步型交替方向乘子算法,该算法仅需交换电压相角信息,通过各区域并行求解,实现各区域独立同步优化。文献[25]针对电动汽车接入的随机性,提出有序充放电分散式优化调度方法,实现充储电站的经济优化。

(3) 分布式优化调度

因集中式优化调度存在计算压力大、单点故障易导致系统崩溃等问题。分散式优化调度缺少各 DG 之间的通信,会导致各 DG 之间难以实现有效的协同操作,进而影响整个系统的协调性和经济性。众多学者针对集中式优化调度和分散式优化调度的缺点,提出分布式优化调度。文献[26]提出一种完全分布式的改进多智能体一致性算法,该算法将增量成本定义为一致性变量,在所有节点后加入功率偏差消除项,使得各 DG 的发电功率能够满足总负荷需求,在实现供需平衡的同时,也能保证功率的优化分配,从而降低微电网的整体发电运

行成本。文献[27]提出一种考虑线损和时延的分布式协同控制微电网优化调度方法,该方法同样将增量成本定义为一致性变量,利用线损模型参数和各 DG 的发电功率求出各 DG 的线路损耗,在线损和时延对系统运行影响时,该方法可同时实现优化调度和频率调节。文献[28]针对微电网源侧和荷侧的优化调度问题,分别提出改进牵制一致性算法和改进领导跟随一致性算法,改进牵制一致性算法在传统牵制一致性算法的基础上,加入功率偏差消除项,在实现发电功率优化分配的同时,也能快速收敛至最优牵制值。改进领导跟随一致性算法同样加入功率偏差消除项,领导一致性算法的功率偏差消除项系数比跟随一致性算法的功率偏差消除项系数要小,从而实现微电网荷侧的经济优化调度。文献[29]针对微电网的电压频率跌落和经济优化调度问题,提出基于改进有限时间一致性的分层分布式优化控制策略,该策略可同时实现电压频率的快速恢复和微电网的经济优化调度。文献[30]针对孤岛微电网群的经济优化调度问题,提出分层分布式优化调度方法,该方法分为两层,第一层是子微网间调度层,第二层是子微网内调度层,分别采用平均一致性算法和领导跟随一致性算法,两种算法基于分布式求解,实现孤岛微电网群的经济优化调度。文献[31]为实现微电网的高效率和经济性,提出一种二阶多智能体一致性算法,该算法是完全分布式算法,与统一阶多智能体一致性算法相比,所提改进算法能够更快的实现微电网的经济优化调度,满足供需平衡。

1.2.2 微电网控制策略

微电网通过公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)与外部主电网进行电能交换^[32]。当各 DG 的发电量大于总负荷值时,微电网将电能传输至主电网,当各 DG 的发电量小于总负荷值时,微电网从主电网中吸收电能。微电网可以通过 PCC 与主电网实现并网运行,在主电网发生故障时,微电网能够与主电网断开连接,独立运行。这两种不同的运行方式被称为并网模式和孤岛模式^[33,34]。在并网模式下,微电网的电压频率由外部主电网调控,而在孤岛模式下,选取一个或多个 DG 作为主 DG,微电网的电压频率由主 DG 调控,实现电压频率的稳定。因此,制定科学合理的控制策略,实现微电网的经济优化和电压频率稳定,是当前微电网领域面临的关键挑战^[35,36]。目前,微电网的控制策略^[37-39]主要包括:(1)主从控制;(2)对等控制;(3)分层控制。

(1) 主从控制

在并网模式下，微电网中的分布式电源都采用 PQ 控制，意味着它们的有功和无功输出会严格按照预设的参考值进行，不受系统频率、电压波动或负荷变化的影响。相反，在孤岛模式下，微电网必须依靠一个或多个 DG 切换到 U/f 控制模式，充当主 DG 的角色，以维持系统的频率和电压。当孤岛运行的微电网切换至并网运行时，必须对主 DG 的控制策略进行调整，使其回到 PQ 控制模式。一旦 PCC 处的频率和电压达到并网要求，主 DG 就可以重新与主电网同步运行。主从控制构成简单，易于操作，但对于通信网络条件的要求较高，如果通信链路发生故障或数据传输中断，可能会导致微电网的控制体系失去稳定性，控制作用无法正常发挥，需确保主 DG 与从 DG 之间的通信是稳定、低延迟且不受干扰的。并网微电网主从控制架构如图 1-1 所示。

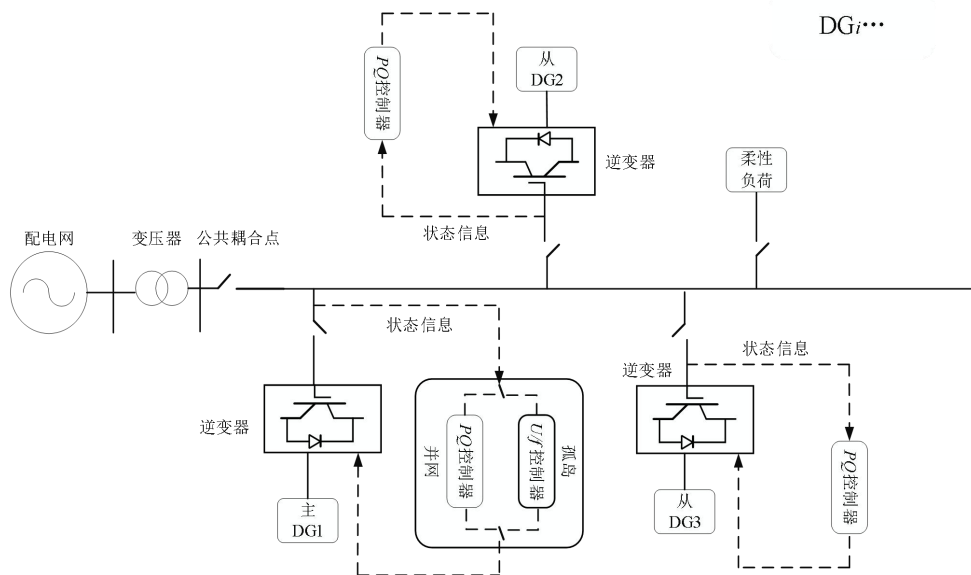


图 1-1 并网微电网主从控制架构

针对主从控制存在的缺点，国内外学者提出改进措施。文献[40]在微电网中设定多个主 DG，并且为每一个主 DG 设定不同的频率和电压，若当前的主 DG 无法满足负荷变化的需求，就会启动其他的主 DG 来共同满足负荷的需求。该方法虽然可以满足负荷需求，但若主 DG 发生切换，频率无法恢复至标准值。文献[41]针对微电网并网和孤岛模式的快速平滑切换问题，提出主从控制微电网系统无缝切换策略研究，对主逆变器的无功下垂环路、电压电流双闭环等进行改进，使得在切换的过程中，微电网的电压频率满足并网或孤岛的要求，从

而实现微电网并网和孤岛模式的快速平滑切换。

(2) 对等控制

在对等控制策略中，系统中的各 DG 都采用下垂控制方法，共同分担整个系统的负荷需求。各 DG 在系统中的地位是平等的，它们之间相互独立，DG 的加入或退出不会对其他 DG 造成影响，实现了所谓的“即插即用”功能。但下垂控制存在固有调节偏差，当微电网负荷变化时，会导致电压和频率的跌落，难以恢复至参考值。且各 DG 的线路阻抗存在差异，会在系统中产生环流，导致功率分配的精度降低。目前，已有大量文献对对等控制的上述问题进行研究。文献[42-44]提出一种基于增量成本(Incremental Cost Rate, ICR)的下垂控制，各 DG 根据 ICR 来分配功率，其下垂控制采用线性下垂函数，实现电压和频率的恢复。文献[45]提出了一种基于改进一致性的分布式分层控制方法，用于实现微电网各层级的控制任务。该方法减少了由下垂控制引起的电压和频率波动，确保微电网的电压和频率保持在规定的稳定水平。同时，它还优化了各 DG 之间的有功和无功负荷分配。通过这种控制策略，微电网能够在不同的运行条件下实现更高效和稳定的电能管理。并网微电网对等控制架构如图 1-2 所示。

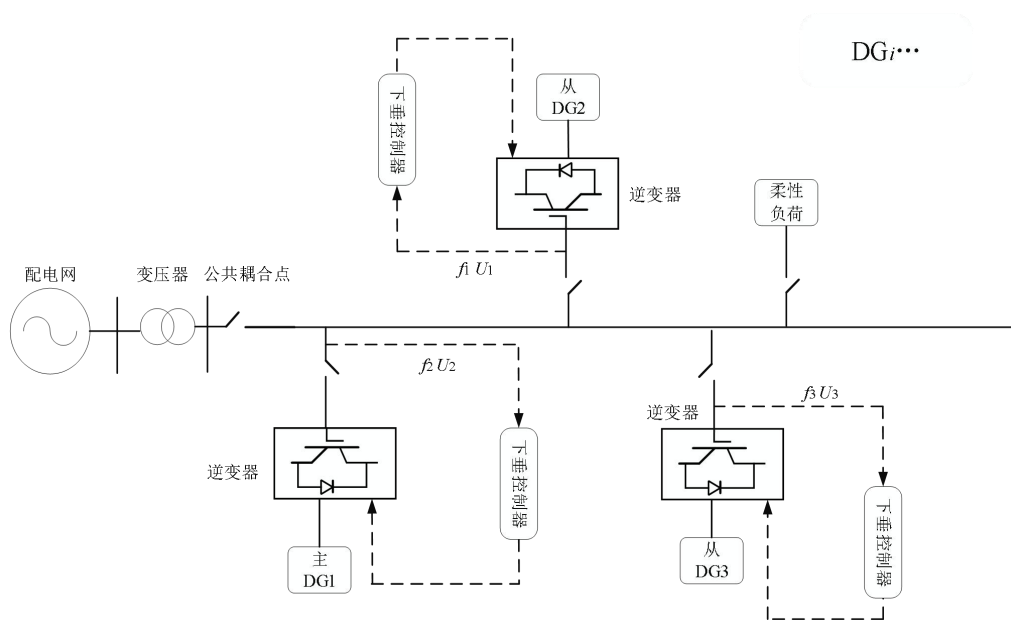


图 1-2 并网微电网对等控制架构

(3) 分层控制

国内外学者综合主从控制和对等控制的特点，提出分层控制^[46,47]。分层控制分为三层，分别为第一控制层、第二控制层和第三调度层，如图 1-3 所示。

提出基于改进一致性的微电网分层分布式控制策略，利用改进算法求出系统的电压频率偏移值，将其代入至底层控制中，实现电压频率的稳定。文献[50]提出主动配电网分层分布式协调控制，第二控制层设计了一种二级优化控制器，实现电压频率的快速恢复。

在微电网的分层分布式优化控制中，第一控制层技术相对比较成熟，采用下垂控制。而对第二控制层的电压频率优化问题以及第三调度层的经济优化调度问题研究较少，因此，对微电网的分层分布式优化控制进行研究具有重大意义。

1.2.3 微电网主要控制方法

微电网主要控制方法分为集中式控制、分散式控制和分布式控制等^[51-54]。

(1) 集中式控制

集中式控制能够收集整个系统的全部信息，并监控系统的整体动态。通过 MGCC 收集各 DG 的信息，根据控制目标制定控制决策，再将此决策作为控制指令发送给各 DG，使其动作。集中式控制如图 1-4^[55]所示。当大量分布不均且分布较广的 DG 参与集中式控制时，集中式控制存在以下弊端：

1) 集中式控制系统中，因 MGCC 依赖所有本地 DG 的信息来做出决策，若一个 DG 或多个 DG 发生故障，MGCC 可能无法制定正确的控制指令，会导致系统不稳定或控制功能失效，因此集中式控制系统的可靠性和鲁棒性较差。

2) 随着集中式控制系统中 DG 数量的增加，所需的双向串行通信线路数量也随之增多，导致通信网络变得复杂。这不仅增加了系统通信基础设施的建设难度，而且会消耗更多的成本。

3) 在 DG 接入或退出微电网时，MGCC 需实时调整控制算法和策略，这使得系统难以迅速响应 DG 的即时接入和断开，从而无法满足快速即插即用的功能。

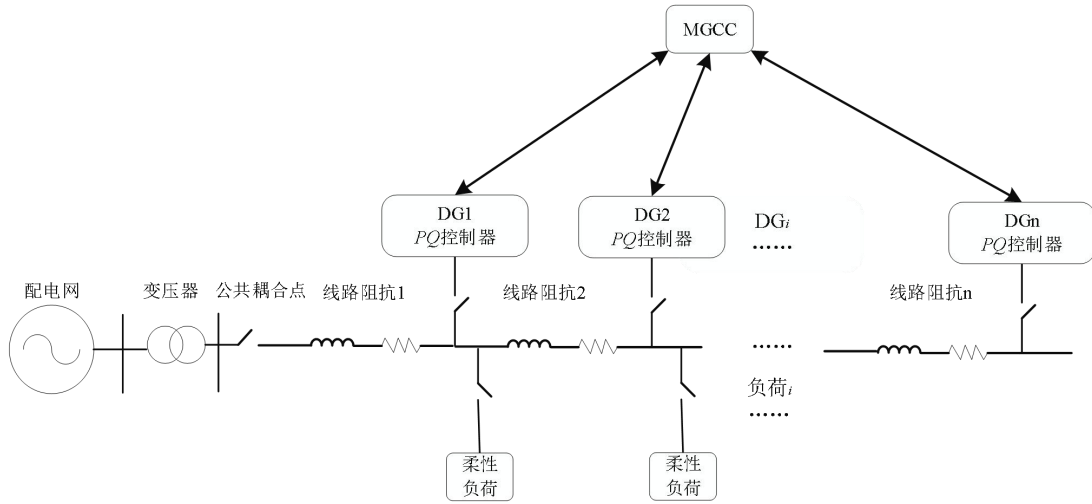


图 1-4 集中式控制架构

(2) 分散式控制

分散式控制不依赖于 MGCC，仅依靠各 DG 的本地信息即可实现自治运行与控制。这种控制方式具有较高的稳定性，但难以满足复杂的控制需求，且系统整体协调性较差。随着接入微电网的 DG 数量增加，各 DG 采集本地信息的能力受限，难以有效协调各 DG 之间的关系。分散式控制如图 1-5 所示。

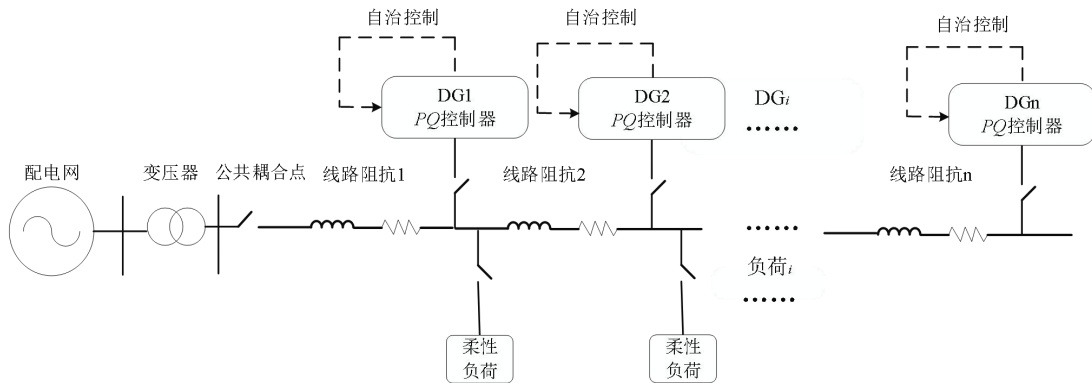


图 1-5 分散式控制架构

(3) 分布式控制

由于集中式控制的局限性以及其与分布式发电的分散特性存在一定的冲突，使集中式控制难以适应微电网中各 DG 的特性。分散式控制难以满足复杂的控制需求，且系统整体协调性较差。因此，结合了集中式控制和分散式控制特点的分布式控制应运而生，分布式控制为解决集中式控制和分散式控制的不足提供新的解决方案，并有助于实现微电网的智能化能量管理。分布式控制同样不依赖于 MGCC，通过依靠相邻智能体之间的信息交互来获取全局信息，通过这些信息制定控制决策，各 DG 根据这些决策运行，从而实现系统电压和频率的

稳定、供需平衡以及功率的合理分配等协调控制目标。分布式控制的原理图如图 1-6 所示。

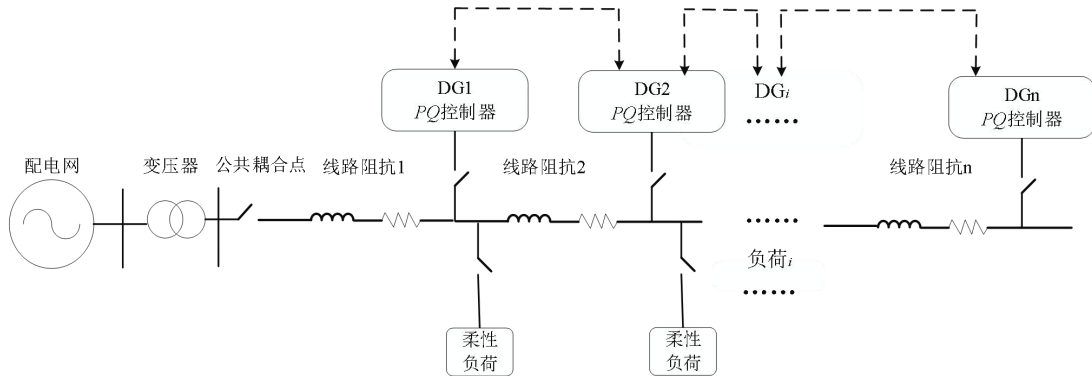


图 1-6 分布式控制架构

1.2.4 分布式电源逆变器控制方法

文献[56]将微电网的运行控制划分为单元级和系统级两类。单元级控制主要涉及分布式电源的控制，包括恒功率控制(PQ 控制)、恒压恒频控制(U/f 控制)、下垂控制(Droop 控制)和虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制。这些控制策略是针对微电网内单个 DG 的具体实施方法。

(1) PQ 控制

PQ 控制由功率外环和电流内环组成。功率外环的主要作用是设定有功功率参考值和无功功率参考值，调节逆变器的输出功率，使其与参考值保持一致，此外还有功率调节、生成电流参考值、解耦控制等作用。电流内环的主要任务是根据功率外环生成的电流参考值，快速调节逆变器的输出电流，以实现精确的功率输出，此外还有电流跟踪、动态响应、稳定输出等作用。 PQ 控制下 P/f 和 Q/U 的特性曲线如图 1-7^[57-59]所示。

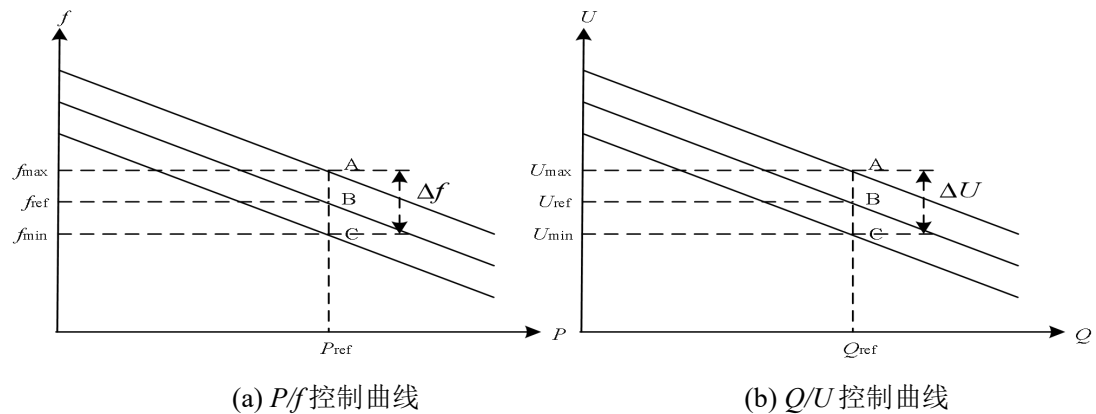
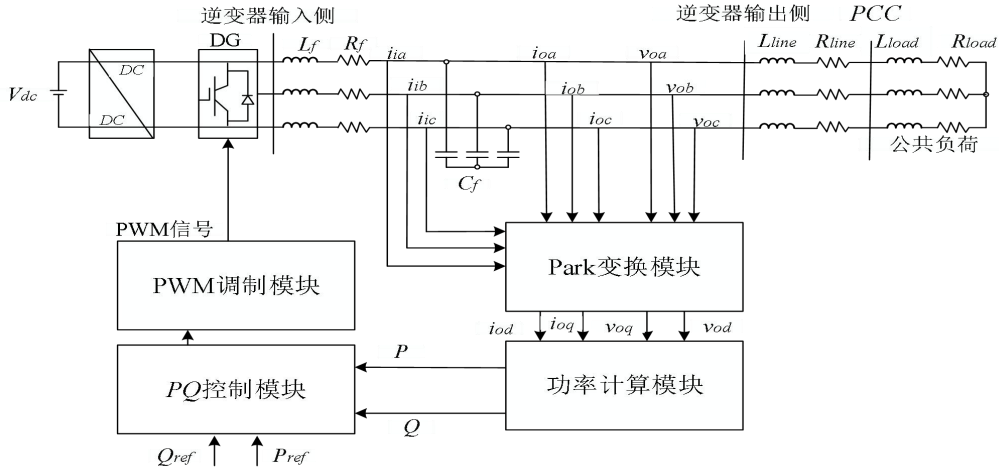
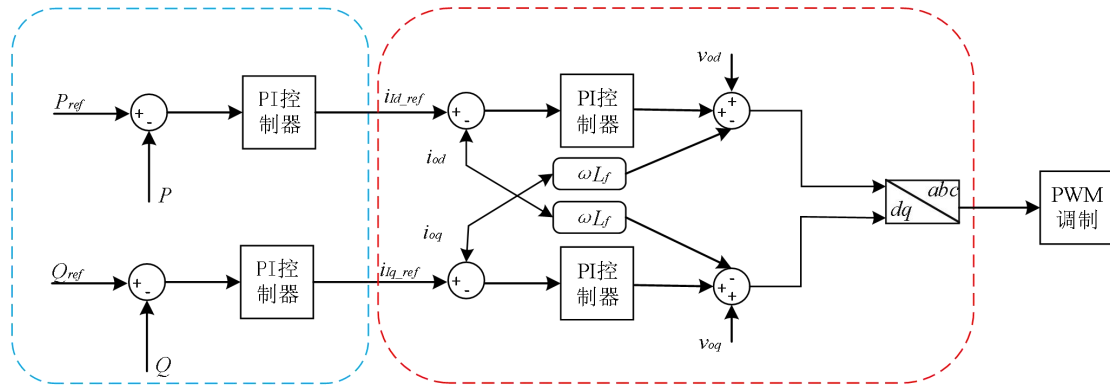


图 1-7 P/f 、 Q/U 特性曲线

由图 1-7 可知, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率参考值和无功功率参考值; f_{ref} 、 U_{ref} 分别为电压参考值和频率参考值; f_{max} 、 f_{min} 分别为频率的最大值和最小值; U_{max} 、 U_{min} 分别为电压的最大值和最小值。在 PQ 控制的作用下, 设定有功功率参考值和无功功率参考值, 使微电网系统的有功功率 P 和无功功率 Q 达到有功功率参考值和无功功率参考值。微电网的 PQ 控制结构示意图如图 1-8 所示。


 图 1-8 PQ 控制结构

逆变器利用 PQ 控制调节交流侧电压, 影响输出电流, 进而控制有功功率和无功功率, 实现有功与无功的解耦。 PQ 控制通常由功率外环和电流内环组成, 构成双环控制系统。 PQ 控制的内部示意图如图 1-9 所示。


 图 1-9 PQ 控制内部结构

(2) U/f 控制

图 1-10 所示的是 U/f 控制下 P/f 和 Q/U 的特性曲线, DG 初始运行点为 B 点, 通过调节有功功率和无功功率来改变频率和电压, 使其输出频率和电压稳定在额定值。在分布式发电场景中, 采用 U/f 控制技术的 DG 能够在并网运行时,

根据电网的实际需求动态调整自身的输出频率和电压，以实现与电网的同步运行。当电网中其他分布式发电系统出现频率或电压波动时，该 DG 能够迅速响应，利用其 U/f 控制功能提供必要的补偿，从而维持整个电网的频率和电压在额定水平，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有力保障^[60-62]。 U/f 控制的内部示意图如图 1-11 所示。

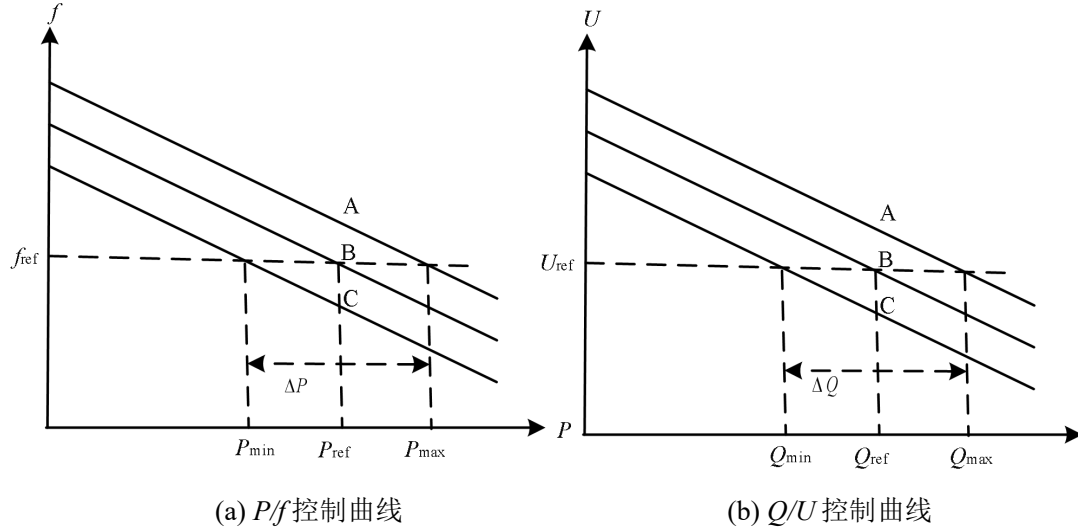


图 1-10 P/f 、 Q/U 特性曲线

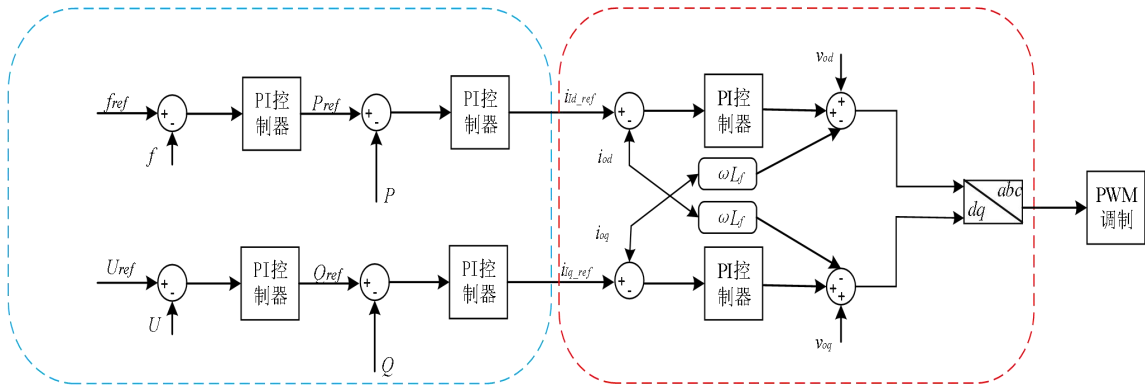


图 1-11 U/f 控制内部结构

(3) 下垂控制

下垂控制模仿传统发电机的工作特性，在电网允许的范围内调节电压和频率，以此来控制各 DG，使其按比例分担负荷。通常认为，当电压在 U_1 和 U_2 之间、频率在 f_1 和 f_2 之间时，微电网能够保持稳定运行。目前，国内外已有大量学者对下垂控制进行研究。文献[63]针对传统下垂控制因各 DG 的出力具有随机性、波动性和不确定性而存在的一系列问题，提出一种改进的下垂控制策略，该策略在传统下垂控制的基础上构建一种更高维度的下垂表面，使得在各 DG

接入微电网时，微电网系统的母线电压可以保持稳定。文献[64]为解决分布式能源发电以及孤岛微电网在负荷变化时电压频率的跌落问题，提出改进下垂控制策略，实现电压频率的快速恢复。文献[65]针对传统下垂控制会造成母线电压发生跌落的问题，提出基于 SOC 的自适应下垂控制策略，该策略在系统存在负荷改变、光伏光照强度改变等情况时，可以维持母线电压的稳定。文献[66]为实现低压微电网的精确反应能力和电压频率恢复能力，提出基于分布式二级功率优化控制的改进下垂控制策略，将改进下垂控制与分布式二级功率优化控制结合在一起，各 DG 的主动和反应性能力通过提取负荷信息和利用功率共享比率来计算的，使得改进策略可以自适应的调节功率和电压，实现低压微电网的精确反应和电压频率的快速恢复。文献[67]针对负荷变化、并离网切换导致的电压频率跌落问题，提出电压频率自恢复型下垂控制策略，采用 PI 控制引入电压频率补偿项，实现电压频率的自恢复，具有较好的动态调整能力。

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。Droop 控制原理曲线如图 1-12 所示。

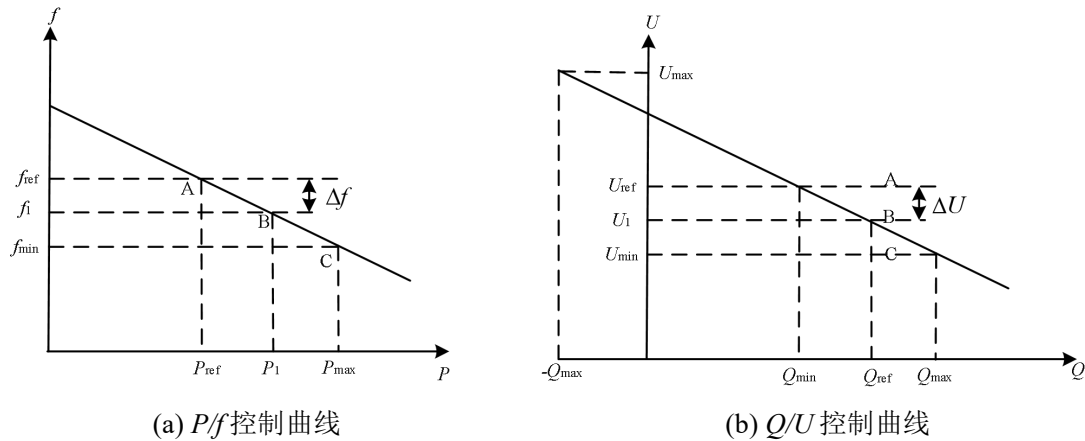


图 1-12 P/f 、 Q/U 特性曲线

在系统面临负载变化导致功率供应不足时，下垂控制会依据其特性曲线，在允许的频率和电压波动范围内进行调整，以确保各 DG 的发电量能够满足负载需求。通过这种方式，系统能够维持电压和频率的稳定，实现功率平衡并保持稳定运行。然而，下垂控制的一个不足之处在于，通过调整频率和电压以达到新的平衡状态时，可能会导致系统的频率和电压偏离额定值，这在一定程度上可能会影响系统设备的稳定运行。下垂控制的控制框图如图 1-13^[68,69]所示。

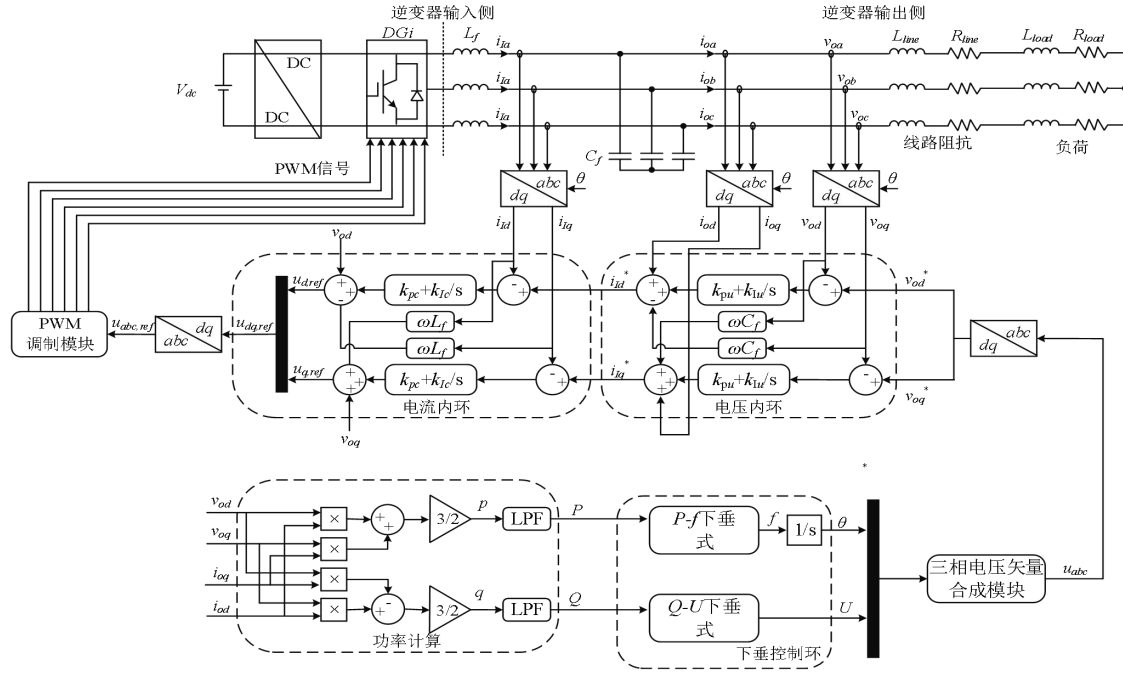


图 1-13 下垂控制框图

由图 1-13 可知，下垂控制的控制原理^[70,71]为：采样逆变器输出的三相电压和三相电流，输出至 abc-dq0 模块进行 Park 变换，得到 d-q 坐标下的直流量，经瞬时功率计算得到有功功率 P 和无功功率 Q 。然后将 P 、 Q 输出至下垂控制模块中，由下垂控制模得到指定电压，作为电压电流环的输入信号，与变换后的电容端电压电流合成 SPWM 的驱动信号，最后生成脉冲信号输入至逆变器中。

(4) VSG 控制

传统的下垂控制虽然能够模拟同步发电机的部分运行特性，但它并不具备模拟传统发电机的阻尼惯性和转子惯性的能力。为解决这一问题，VSG 技术被提出并应用于各 DG 的逆变器中。VSG 控制通过将同步发电机的运行机制和控制理论集成到逆变器中，模拟其转子和定子的动态方程，使得逆变器能够模拟同步发电机的运行特性和输出特性，从而提升逆变器的控制性能。VSG 控制的系统结构示意图如图 1-14 所示。

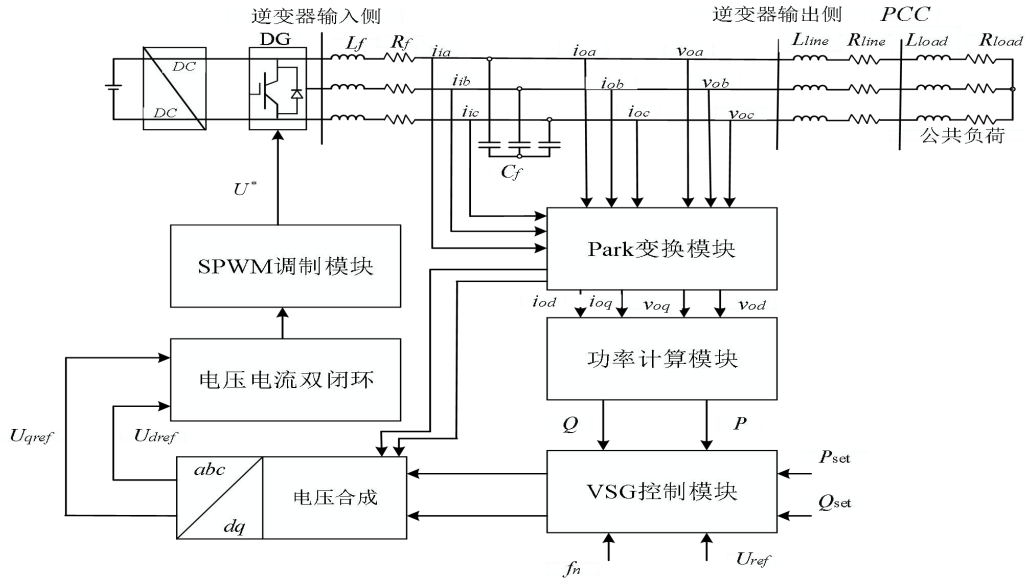


图 1-14 VSG 控制结构

与下垂控制不同的是，VSG 控制集成了励磁和调速器模型，使得在特定条件下，下垂控制可视为 VSG 控制的一个特殊情况。作为一种新兴技术，VSG 控制的研究在取得进展的同时，也面临着一些挑战，包括 VSG 的稳定性控制^[72]、二次调频调压控制策略^[73,74]的开发，以及多 VSG 并联运行时的协调控制问题，这些都是未来研究需要深入探讨的关键领域。

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。因 DG 的出力具有随机性、波动性和不确定性，会影响微电网优化调度。研究了一种二层邻居牵制一致性算法，利用图论、矩阵论等知识验证了所提算法的收敛性和稳定性。引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差，利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR，实现微电网的经济优化运行。当微电网负荷变化时，电压频率会发生跌落，需要依靠自身的控制策略来维持电压和频率的稳定，如果控制策略不能迅速响应并恢复系统的电压和频率，则会影响电能质量和负荷的稳定运行，严重时会影响电力系统的稳定性和安全性。针对上述问题研究了一种改进牵制一致性算法，利用改进一致性算法和 PI 控制求出电压频率补偿项，补偿下垂控制环节的频率和电压参数，实现电压和频率的快速恢复。基于改进牵制一致性算法和二层邻居牵制一致性算法，研究了一种分层分布式优化控制策略。第一控制层为双闭环反馈的下垂控制，第二控制层为电压频率优化控制，利用

改进牵制一致性算法实现电压频率的恢复和稳定，第三调度层为经济优化调度层，利用二层邻居牵制一致性算法实现有功功率的合理分配和微电网的经济优化运行。本文整体研究思路框图如图 1-15 所示。

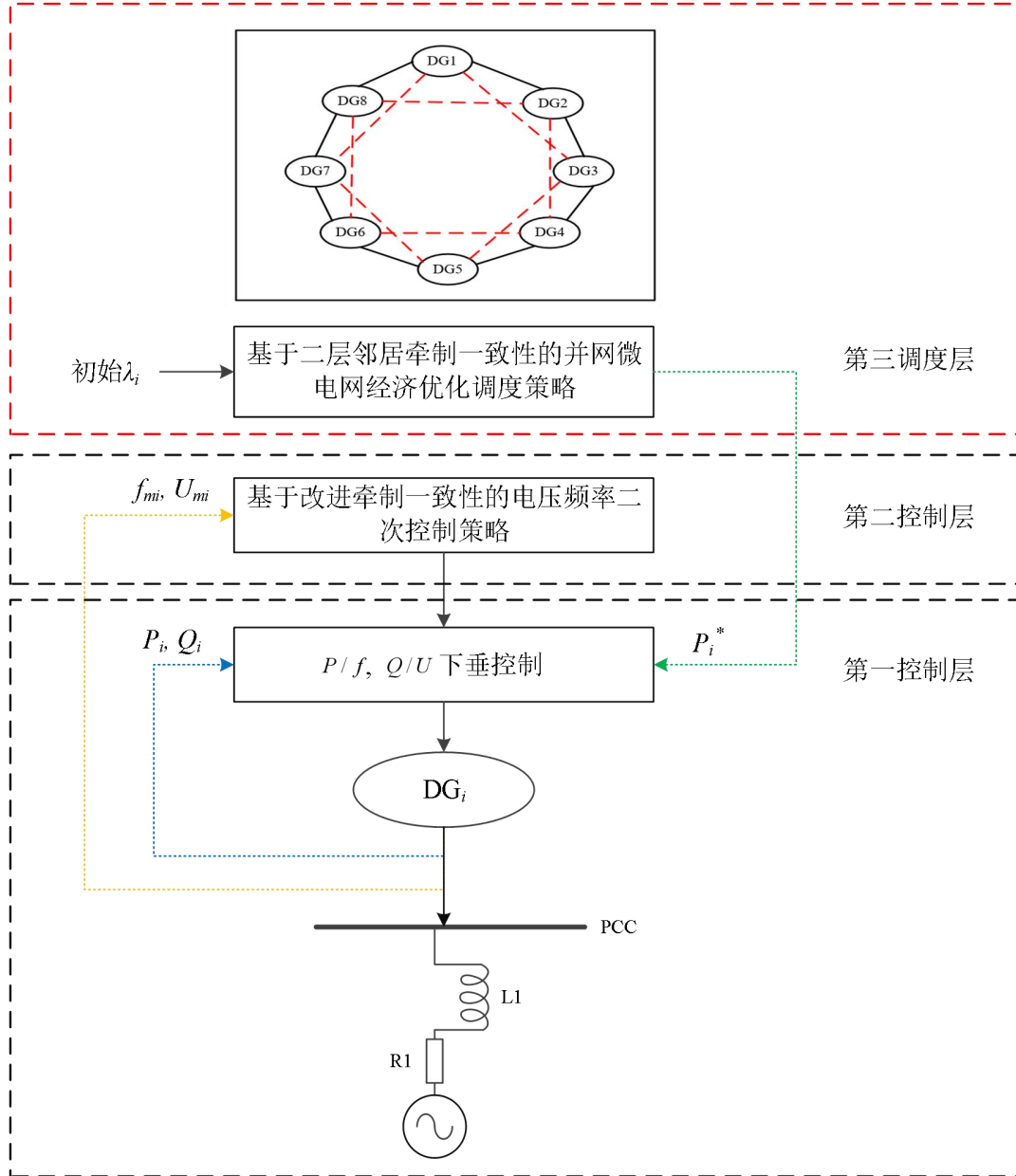


图 1-15 本文整体研究思路框图

本文主要研究内容为：

第 1 章：首先，阐述了课题的研究背景和意义，详细介绍了微电网的调度策略、控制策略、主要控制方法和各 DG 逆变器的控制方法，指出各种策略中的不足和优点，从而确定本文所采用的控制策略。随后，说明了微电网经济优化调度和电压频率优化控制的重要性，以及将分层分布式优化控制与微电网经

济优化调度和电压频率优化控制相结合的必要性。最后阐述本文的研究工作和章节安排。

第 2 章：首先对图论知识进行简单概述，然后介绍了邻接矩阵 A 、度矩阵 D 和拉普拉斯矩阵 L 的概念以及三者之间的关系。随后对多智能体一致性进行简述，介绍了多智能体的概念和多智能体的一致性理论。最后，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：研究基于二层邻居牵制一致性算法的并网微电网经济优化调度方法。为提高并网微电网系统经济优化响应速度，降低整体发电运行成本，提出二层邻居牵制一致性算法。该算法将 ICR 定义为状态变量，引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差，利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR，计算得到各 DG 的最优有功出力参考值，从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。

第 4 章：针对微电网中电压频率的跌落问题，研究了一种改进牵制一致性算法，基于该算法和二层邻居牵制一致性算法，研究了一种并网微电网分层分布式优化控制策略。该策略能够实现电压频率的恢复和稳定以及微电网的经济优化运行。

第 5 章：总结与展望，总结全文内容，阐明相关的研究和结论，说明本文研究的不足以及对未来研究工作的展望。

第2章 预备知识

2.1 图论

图论为研究分布式一致性问题提供了基础框架。在这一理论中，系统中各个体间的联系通常用图进行描述，个体当做图中的节点，个体间的通信联系当做图中的边。基于这种图形结构，可以构建数学模型，进而根据图的特性对模型进行深入分析和求解。图论的应用已经扩展到了控制理论、人工智能等多个领域^[75]。

通常用图 $G=(V,E)$ 来描述多智能体系统，其中节点 $V=\{1,2,\dots,N\}$ 表示多智能体系统中的智能体， E 表示各个智能体之间的有向通信。 a_{ij} 为智能体 i 到智能体 j 的边的数量，图 G 的边表示为 (i,j) ，若图 G 中智能体 i 和智能体 j 相连，且 $\forall i \neq j$ ，则 $a_{ij} > 0$ ，否则 $a_{ij} = 0$ ^[76,77]。 A 为邻接矩阵，用来描述智能体间的关系，定义 A 中 a_{ij} 的表达式如式(2-1)所示：

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

式中： $j \in N_i$ 表示智能体 i 与智能体 j 相连； $j \notin N_i$ 表示智能体 i 与智能体 j 没有相连。

与智能体 i 相连的数目之和为 d_i ，称为智能体 i 的度。度矩阵 D 的表达式如式(2-2)所示：

$$D = \begin{cases} \sum_{j=1}^N a_{ij} & \text{对角线元素} \\ 0 & \text{非对角线元素} \end{cases} \quad (2-2)$$

式中： N 为智能体总数。

结合邻接矩阵 A 和度矩阵 D 可得到拉普拉斯矩阵 L ，拉普拉斯矩阵 L 的表达式如式(2-3)所示：

$$L = D - A = \begin{cases} \sum_{j=1}^N a_{ij} & \text{对角线元素} \\ -a_{ij} & \text{非对角线元素} \end{cases} \quad (2-3)$$

MAS 的通信拓扑结构图如图 2-1 所示。

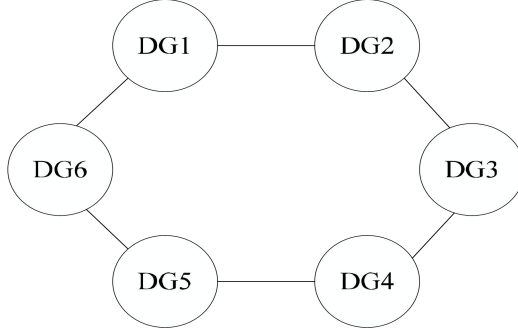


图 2-1 通信拓扑结构

由上述图论知识可以得到拉普拉斯矩阵 L 、邻接矩阵 A 和度矩阵 D 。

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

2.2 多智能体一致性

2.2.1 多智能体简述

随着互联网和人工智能技术快速发展，MAS^[78,79]在控制理论领域的应用受到广泛关注。MAS 是由多个自治或半自治的智能体组成的复杂系统，这些智能体通过相互协作与交互来完成特定任务或解决复杂问题。多智能体一致性问题是指通过通信和交互，使各个智能体的状态(如位置、速度、方向等)达到同步。

目前，多智能体一致性的研究热点集中在以下几个方面：首先是对一致性协议的优化，以适应不同的网络拓扑和动态变化；其次是将一致性算法应用于实际工程问题，解决实际中的挑战；再者是设计基于一致性的混合算法，以实现复杂系统的多目标优化。这些研究努力解决由切换拓扑^[80]、高阶系统^[81]等不同因素带来的新问题，同时也致力于将这些算法应用于更广泛的工程领域，并开发出具有优异性能和特性的混合算法。此外，随着多智能体系统在多个领域的应用不断拓展，如无人机编队、机器人协作^[82,83]等，一致性算法的实际应用

和理论发展也在不断深化。

2.2.2 一致性理论

众多学者受到生物群体行为的启发，提出了 MAS 协同一致性问题。协同一致性意味着在 MAS 中，各个智能体遵循制定的协议，通过相互通信和作用，使得它们的状态信息趋于一致^[84]。MAS 通过一致性协议来实现复杂的协同控制任务，通过多智能体的协同控制，使得选定的状态信息变量达到一致，从而完成预定的协同控制目标。在微电网下垂控制中，将各 DG 定义为多智能体，通过采集各 DG 实际输出的电压和频率，将电压和频率作为状态变量代入至 MAS 协同一致性中，实现电压和频率的快速恢复，保持电压和频率的稳定。同理也可将源侧的 DG 和荷侧的负荷作为多智能体，通过建立 MAS 并应用一致性理论，可以使源侧和荷侧系统中的状态信息向量趋于一致。这样可以实现系统中输出功率的协调分配、经济成本和响应成本的优化、ICR 的一致性^[85,86]。

2.2.3 一致性协议

一致性协议可形成一致性算法，各智能体的状态更新不仅依赖于自身的当前状态，还受到其相邻智能体状态的影响。大量国内外学者针对不同问题提出一阶一致性协议、二阶一致性协议、高阶一致性协议、主从一致性协议、牵制一致性协议、事件触发一致性协议等，其中传统一阶连续一致性算法^[87]如式(2-4)所示：

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (2-4)$$

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (2-5)$$

式中： $x_i(t)$ 表示智能体 i 在 t 时刻的一致性状态量； $u_i(t)$ 表示智能体 i 在 t 时刻的控制输入量。

当式(2-6)满足时，则称式(2-5)收敛一致。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_j(t) - x_i(t)) = 0 \quad (2-6)$$

将式(2-4)和式(2-5)结合并写成矩阵形式，得到一致性算法的矩阵形式，如式(2-7)所示：

$$\dot{x}'(t) = -Lx(t) \quad (2-7)$$

传统一阶离散一致性算法如式(2-8)所示：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)) \quad (2-8)$$

式中： $x_i(k+1)$ 表示智能体 i 在第 $k+1$ 次迭代时的一致性状态量。

传统一阶离散一致性算法也可写成如式(2-9)所示：

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) \quad (2-9)$$

引理：当 L 有一个零特征值且其余特征值均具有正实部，离散一致性算法收敛^[88]。

传统二阶连续一致性算法如式(2-10)所示：

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (2-10)$$

式中： $x_i \in R^m$ 、 $v_i \in R^m$ 分别表示第 i 个多智能体的位置状态和速度状态， $u_i(t) \in R^m$ 表示为控制输入。

当式(2-11)满足时，则称式(2-10)收敛一致。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (x_j(t) - x_i(t)) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (v_j(t) - v_i(t)) = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

传统二阶离散一致性算法如式(2-12)所示：

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k) \\ v_i(k+1) = u_i(k) \end{cases} \quad (2-12)$$

在式(2-8)的基础上，加入牵制项，得到传统的离散牵制一致性协议^[89]，如式(2-13)所示：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)) + \xi_i(x_0 - x_i(k)) \quad (2-13)$$

式中： ξ_i 为牵制项系数，表示对状态信息的参考度； x_0 为状态信息参考值。当 k 趋于无穷时，若 $|x_i(k) - x_{ref}| = 0$, $i = 1, \dots, n$ ，则称系统实现牵制一致性。

为提高一致性算法的快速收敛，文献[90]提出二层邻居一致性算法，传统一阶二层邻居一致性算法如式(2-14)所示：

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{h=1}^N a_{ih}(x_h(t) - x_i(t)) \quad (2-14)$$

式中： $\sum_{j \in N_i^2} a_{ih}(x_h(t) - x_i(t))$ 为二层邻居项； $j \in N_i^2$ 表示智能体 i 的二层邻居集。

所谓二层邻居是指智能体邻居的邻居，即智能体 i 与智能体 j 相连，智能体 j 又与智能体 h 相连，那么智能体 i 与智能体 h 相互联系，加入二层邻居项可以

使一致性算法具有更快的收敛速度和更好的收敛性能。

传统二阶二层邻居一致性算法如式(2-15)所示：

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t) + (v_j(t) - v_i(t))) + \sum_{h=1}^N a_{ih}(x_h(t) - x_i(t) + (v_h(t) - v_i(t))) \quad (2-15)$$

在实际的传输过程中，系统会受到通信时延和控制时延^[91]的影响。考虑时延的影响，传统一阶连续一致性算法、传统一阶牵制一致性算法和传统一阶二层邻居一致性算法分别如式(2-16)、式(2-17)和式(2-18)所示：

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ii})) \quad (2-16)$$

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ii})) + \xi_i(x_{ref} - x_i(t - \tau_{ii})) \quad (2-17)$$

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ii})) + \sum_{h=1}^N a_{ih}(x_h(t - \tau_{ih}) - x_i(t - \tau_{ii})) \quad (2-18)$$

式中： τ_{ij} 为通信时延； τ_{ii} 为控制时延； τ_{ih} 为二层邻居的控制时延。

2.3 本章小结

本章首先对图论知识进行简单概述，然后介绍了邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 、度矩阵 $\mathbf{D}$ 和拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 的概念以及三者之间的关系。随后对多智能体一致性进行简述，介绍了多智能体的概念和多智能体的一致性理论。最后，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 基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化调度

目前，分布式算法中的一致性算法已广泛应用于微电网源侧的功率协调控制和电压频率优化控制中，以确保微电网的稳定运行。在本章中，首先假设负荷侧的功率协调控制系统已经达到稳定状态^[92,93]，使得负荷侧的负荷表现出恒定的负荷需求特性。在此基础上，进一步研究源侧功率协调控制系统的运行特性。

为提高并网微电网系统经济优化响应速度，降低整体发电运行成本，本章提出二层邻居牵制一致性算法。该算法将 ICR 定义为状态变量，引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差，利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR，计算得到各 DG 的最优有功出力参考值。仿真结果表明，所提方法能完成有功出力的经济分配，且系统响应性能优，在负荷突增、功率越限、分时电价、拓扑切换、计及线路损耗、即插即用等因素^[94,95]对系统运行影响时，所提方法能使微电网快速达到经济优化状态。

3.1 微电网源侧经济优化成本模型

并网微电网系统经济优化目标是在满足总负荷需求的前提下，实现运行总成本最小化。其中，光伏等不可控型 DG 的运行和维护成本低且光伏发电不需要燃料，因此，只考虑可控型 DG 的运行成本^[96,97]，可控型 DG 的运行成本主要由燃料成本和运行维护成本构成。其中燃料成本^[98]为二次函数，运行维护成本为一次函数。定义 DG 的有功出力为自变量，得到各可控型 DG 的运行成本模型，如式(3-1)所示：

$$C_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3-1)$$

式中： C_i 为各 DG 的运行成本； P_i 为各 DG 的有功出力； α_i 、 β_i 、 γ_i 为发电成本模型的常数项、一次项和二次项系数。

在微电网稳定运行时，功率平衡约束如式(3-2)所示：

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_G = P_D \quad (3-2)$$

式中： P_D 为系统总负荷需求； P_G 为微电网与电网交互功率， $P_G > 0$ 时，微电网从电网中吸收电能， $P_G < 0$ 时，微电网馈送电能至电网。

令电网电力价格为 p_r ，经济优化的目标就是实现并网微电网运行成本 C_{total} 最小化，即：

$$\min C_{\text{total}} = \min \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + p_r \cdot P_G \quad (3-3)$$

且各 DG 有功出力极限约束为：

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (3-4)$$

式中： $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为各 DG 有功出力的上限和下限。

当所有 DG 都在发电约束下运行时，利用式(3-2)和式(3-3)构建如式(3-5)所示的拉格朗日函数。

$$F = p_r \cdot P_G + \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \lambda(P_D - P_G - \sum_{i=1}^N P_i) \quad (3-5)$$

式中： F 为拉格朗日函数； λ 为拉格朗日系数。

将式(3-5)分别对 P_i 和 P_G 求微分，并对公式进行变换，进而得到经济优化目标函数的最优解为：

$$\begin{cases} P_i^* = \frac{\lambda - \beta_i}{2\alpha_i} \\ \lambda = p_r \\ P_G^* = P_D - \sum_{i=1}^N P_i^* \end{cases} \quad (3-6)$$

式中： P_i^* 为各 DG 的最优有功出力参考值； P_G^* 为经济优化状态下微电网与电网交互功率值。

3.2 二层邻居牵制一致性算法

3.2.1 算法描述

在式(2-9)上加入功率偏差消除项，得到文献[99]提出的改进一致性算法(下文简称传统算法)，如式(3-7)所示：

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) + \mu \Delta P \quad (3-7)$$

式中： μ 为功率偏差消除项系数； ΔP 为总功率偏差， $\Delta P = P_D - \sum_{i=1}^N P_i - P_G$ 。

定义各 DG 的 ICR 为其成本函数对其有功出力的导数。若各 DG 有功出力在约束范围内，则并网微电网实现经济优化运行时，各 DG 的 ICR 均收敛于最优值，记为 λ^* 。将式(3-1)对 P_i 求偏导，并令 $dC_i(P_i) / dP_i = \lambda_i$ ，则：

$$\lambda_i = 2\alpha_i P_i + \beta_i \quad (3-8)$$

当各 DG 的 ICR 收敛于 λ^* ，即 $\lambda_i = \lambda^*$ ，且各 DG 的有功出力在约束范围内时，得到系统运行总成本最小化时的 P^* ，如式(3-9)所示：

$$P^* = \frac{\lambda_i^* - \beta_i}{2\alpha_i} \quad (3-9)$$

式中： λ_i^* 表示智能体 i 的最优一致性状态量。

选取各 DG 的 ICR 为一致性变量，并对式(3-7)进行变换，得到基于 ICR 的一致性协议，如式(3-10)所示：

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \mu \Delta P \quad (3-10)$$

$$d_{ij} = |l_{ij}| / \sum_{j=1}^N |l_{ij}| \quad (3-11)$$

式中： $\lambda_i(k+1)$ 表示智能体 i 在迭代 $k+1$ 次时的一致性状态量； d_{ij} 是由拉普拉斯矩阵确定的系数。

引理：各 DG 间的通信拓扑对应的拉普拉斯矩阵是行随机矩阵，则式(3-10)的一致性算法稳态收敛。通信线路增加，对应拓扑的代数连通度增加，算法收敛速度加快^[88,100]。

为实现快速收敛于最优 ICR，达到供需平衡，本章引入二层邻居项和牵制项。传统二层邻居算法如式(2-14)所示。选取各 DG 的 ICR 为一致性变量，对式(2-14)进行变换，得到基于 ICR 的二层邻居一致性协议，如式(3-12)所示：

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \sum_{h=1}^N d_{ih} \cdot \lambda_h(k) \quad (3-12)$$

在式(3-12)中加入牵制项，如式(3-13)所示：

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \sum_{h=1}^N d_{ih} \cdot \lambda_h(k) + \xi_i(p_r - \lambda_i(k)) \quad (3-13)$$

由式(3-10)和式(3-13)得到改进的二层邻居牵制一致性算法(下文简称改进算法)，如式(3-14)所示：

$$\lambda_i(k+1) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^N d_{ih} \cdot \lambda_h(k) + \mu \Delta P + \xi_i(p_r - \lambda_i(k)) \quad (3-14)$$

$$d_{ij} = |l_{ij}| / \left| \sum_{j=1}^N |l_{ij}| \right| \quad d_{ih} = |l_{ih}| / \left| \sum_{h=1}^N |l_{ih}| \right| \quad (3-15)$$

式中： $\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^N d_{ih} \cdot \lambda_h(k)$ 满足行随机矩阵。由式(3-14)可得， λ_i 收敛于 λ^* 时，各 DG 的有功出力参考值 $P^*(k+1)$ 如式(3-16)所示：

$$P^*(k+1) = \frac{\lambda_i^*(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} \quad (3-16)$$

式中： $\lambda_i^*(k+1)$ 表示智能体 i 在迭代 $k+1$ 次时的最优一致性状态量。

考虑功率传输过程中的线路损耗，则需要将式(3-2)的功率平衡约束变换为如式(3-17)所示：

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_G = P_D + P_{\text{loss}} \quad (3-17)$$

式中： P_{loss} 为线路损耗。

为方便求解 P_{loss} ，文献[101]将线损模型简写为如式(3-18)所示形式：

$$P_{\text{loss}} = \eta_1 P_1^2 + \eta_2 P_2^2 + \cdots + \eta_n P_n^2 \quad (3-18)$$

式中： $\eta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为线损模型参数。根据式(3-14)和式(3-17)，系统运行总成本最小时 P^* 如式(3-19)所示：

$$P^* = \frac{\lambda_i^* - \beta_i}{2\alpha_i + 2\eta_i \lambda_i^*} \quad (3-19)$$

3.2.2 算法收敛性分析

结合式(2-8)和式(3-14)，本章改进算法如式(3-20)所示：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) + \sum_{h=1}^N a_{ih} \cdot x_h(k) \right) + \mu \Delta P + \xi(p_r - x_i(k)) \quad (3-20)$$

令 $\sum_{q=1}^n a_{iq} \cdot x_j(k) = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) + \sum_{h=1}^N a_{ih} \cdot x_h(k) \right)$ ，则式(3-20)可写为式(3-21)的形式：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{q=1}^N a_{iq} \cdot x_j(k) + \mu \Delta P + \xi(p_r - x_i(k)) \quad (3-21)$$

当 $\lim_{k \rightarrow \infty} |x_i(k) - p_r| = 0 \quad (i=1, \dots, N)$ 成立时，称系统式(3-21)实现了牵制一致性

控制。

定理 1^[81]：考虑一般连通拓扑结构的离散多智能体系统，即式(3-21)所示，

当如下条件成立时，系统能够实现牵制一致性。

$$0 \leq \xi_i \leq 2 - 2l_{ii}, i = 1, \dots, N \quad (3-22)$$

式中： l_{ii} 表示拉普拉斯矩阵的对角线元素。

证明：定义 $e_i(k) = x_i(k) - p_r$ ，则式(3-21)对应的误差系统方程为：

$$e_i(k+1) = e_i(k) - \sum_{q=1}^N l_{iq} \cdot e_q(k) - \xi_i e_i(k) + \mu \Delta P, i = 1, \dots, N \quad (3-23)$$

令 $e(k) = (e_1^T(k), \dots, e_n^T(k))^T$ ，则式(3-23)可以写成如下矩阵形式：

$$e(k+1) = [I_n - (L + S)]e(k) + \mu \Delta P \quad (3-24)$$

式中： $S = \text{diag}\{\xi_i\}, i = 1, \dots, N$ ， ΔP 在理论上为 0，故 $\mu \Delta P$ 忽略不计。

假设 δ_i 为矩阵 $[I_n - (L + S)]$ 的特征值，当且仅当 $|\delta_i| < 1$ ($i = 1, \dots, N$) 成立时，式(3-24)能够渐进稳定。

矩阵 $[I_n - (L + S)]$ 的特征值满足如下条件：

$$|\delta_i - (1 - (\xi_i + l_{ii}))| \leq \sum_{q=1}^N |l_{iq}| \quad (3-25)$$

根据拉普拉斯矩阵定义可知：

$$|\delta_i - (1 - (\xi_i + l_{ii}))| \leq l_{ii} \quad (3-26)$$

经整理可得：

$$1 - \xi_i - 2l_{ii} \leq \delta_i \leq 1 - \xi_i \quad (3-27)$$

因为 $|\delta_i| < 1$ ($i = 1, \dots, N$)，可得 $\xi_i \leq 2 - 2l_{ii}$ ，且 $\xi_i \geq 0$ 。即 $0 \leq \xi_i \leq 2 - 2l_{ii}$ 成立，

式(3-22)成立，则系统(3-21)可实现牵制一致性。

3.2.3 算法收敛快速性分析

根据文献[88]可知，对于对称连通有向图，假设 L 的特征值为：

$$0 = \lambda_1 < \lambda_2, \dots, \leq \lambda_N \quad (3-28)$$

则一致性算法的收敛速度与 λ_2 有关，代数连通度越大，收敛速度越快。改进一致性算法的拉普拉斯矩阵为：

$$\tilde{L} = L + \dot{L} \quad (3-29)$$

式中： $\dot{L}$ 为二层邻居项对应的拉普拉斯矩阵。 $\tilde{G} = G \cup \dot{G} = (V, E \cup \dot{E})$ ， $\dot{G}$ 为二层邻居项对应的图。

定理 2^[88]：若 G 是对称且连通的，则 $\lambda_2(L) \leq \lambda_2(\tilde{L})$ 。

证明：对于任意向量 x ，有

$$x^T \tilde{L} x = x^T L x + x^T \dot{L} x = \sum_{(i,j) \in E} a_{ij}^2 (x_i - x_j)^2 + \sum_{(i,j) \in \dot{E}} a_{ij}^2 (x_i - x_j)^2 \quad (3-30)$$

式中： $(i,j) \in E$ 、 $(i,j) \in \dot{E}$ 分别表示在图 G 、 $\dot{G}$ 下智能体 i 与智能体 j 相互连接。

若 x 为单位向量且正交于 1，可得：

$$\frac{x^T L x}{x^T x} = \frac{\sum_{(i,j) \in E} a_{ij}^2 (x_i - x_j)^2}{\sum_{i \in E} x_i^2} \geq \lambda_2(L) \quad (3-31)$$

当且仅当 x 是与 $\lambda_2(L)$ 相关的特征向量时，式(3-31)成立。

综上所述，假设 x 为 $\tilde{L}$ 的单位特征向量，与 1 正交，且与特征值 $\lambda_2(L)$ 相关，则：

$$\lambda_2(\tilde{L}) = \frac{x^T \tilde{L} x}{x^T x} = \frac{x^T (L + \dot{L}) x}{x^T x} \geq \lambda_2(L) + \frac{x^T \dot{L} x}{x^T x} \quad (3-32)$$

由上述证明可知，加入二层邻居项，系统具有更快的收敛速度。

3.3 分布式经济优化调度策略

与微电网经济调度目标是使微电网运行经济成本最低。本章采用基于多智能体的二层邻居牵制一致性算法，将 ICR 作为分布式发电单元的一致性变量。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，最后收敛至最优的牵制值。在整个调度过程中，各 DG 利用局部通信获取邻近 DG 的有功出力信息，并通过传感器获取自身的有功出力信息。这些信息被输送到智能体的处理器中，利用式(3-8)计算出 ICR。然后，利用式(3-14)对 ICR 进行更新，并利用式(3-16)计算出优化的有功出力参考值，实现 DG 有功出力的经济分配，从而使得并网微电网系统处于经济优化运行状态。这样可以降低各 DG 的运行成本和电网购电成本，同时满足负荷总功率需求。在负荷发生变化时，系统能够快速响应负荷变化，保持系统稳定性，并达到经济优化目的。改进算法流程图如图 3-1 所示。

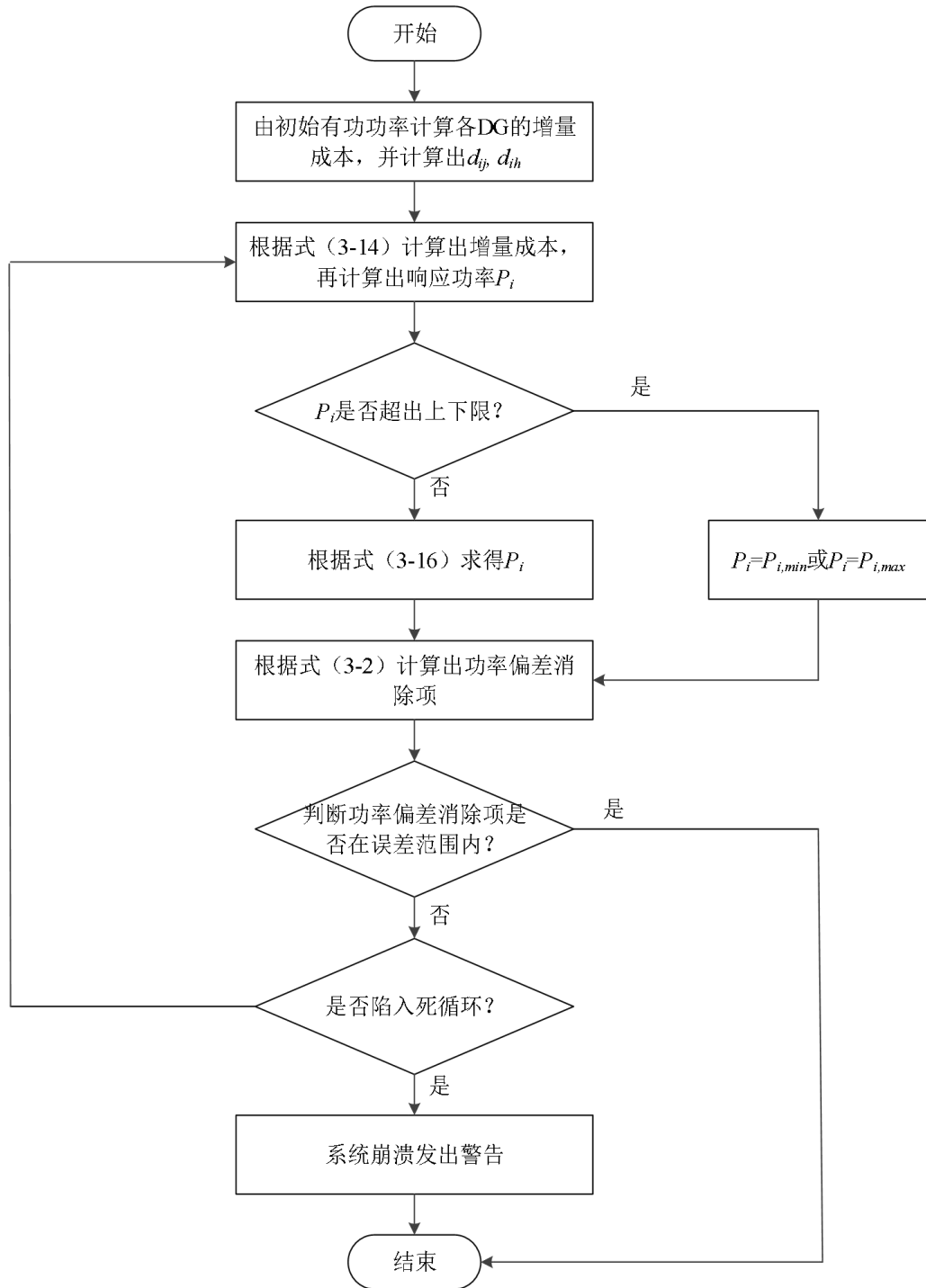


图 3-1 改进算法流程图

3.4 算例与仿真

为验证本章所提二层邻居牵制一致性算法的优越性, 本章选取 8 个分布式电源的 8 节点系统进行调度性能研究。系统拓扑图如图 3-2 所示, 实线表示智

能体的原来通信，虚线表示智能体间的二层邻居通信。系统各 DG 参数如表 3-1 所示。

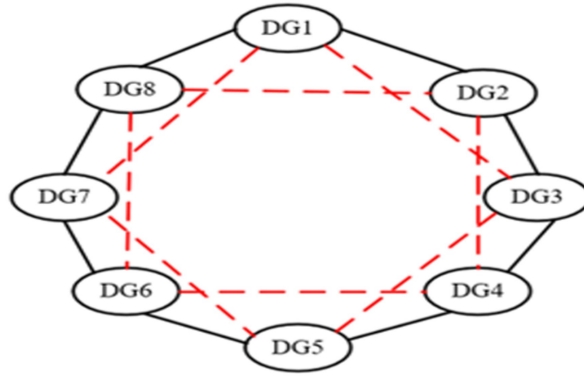


图 3-2 8 节点系统拓扑

表 3-1 各 DG 参数一览表

节点	α	β	初始有功 P_0/kW	$P_{\min}/\text{kW}$	$P_{\max}/\text{kW}$
DG1	0.0009	3.2256	2	0.5	5.040
DG2	0.0014	3.2344	1	0.5	2.436
DG3	0.0011	3.2968	3	1.0	3.780
DG4	0.0012	3.2624	2	1.0	4.200
DG5	0.0012	3.3304	1	0.3	2.352
DG6	0.0015	3.2344	2	0.5	3.780
DG7	0.0014	3.2044	1	0.3	4.200
DG8	0.0012	3.2344	1	0.5	5.040

3.4.1 负荷突增时系统响应性能对比分析

在实际生活中，系统总负荷是实时变化的，使得系统的调度指令也是实时变化的。为验证改进算法的优越性，在负荷突增的情形下分别采用传统算法和改进算法对系统性能进行仿真实验。假设在 $t=0\text{s}$ 时，系统总负荷为 18.285kW ，在 $t=8.26\text{s}$ 时，系统总负荷增加 2.94kW 。图 3-3 和图 3-4 分别为采用传统算法和改进算法时各变量变化情况。

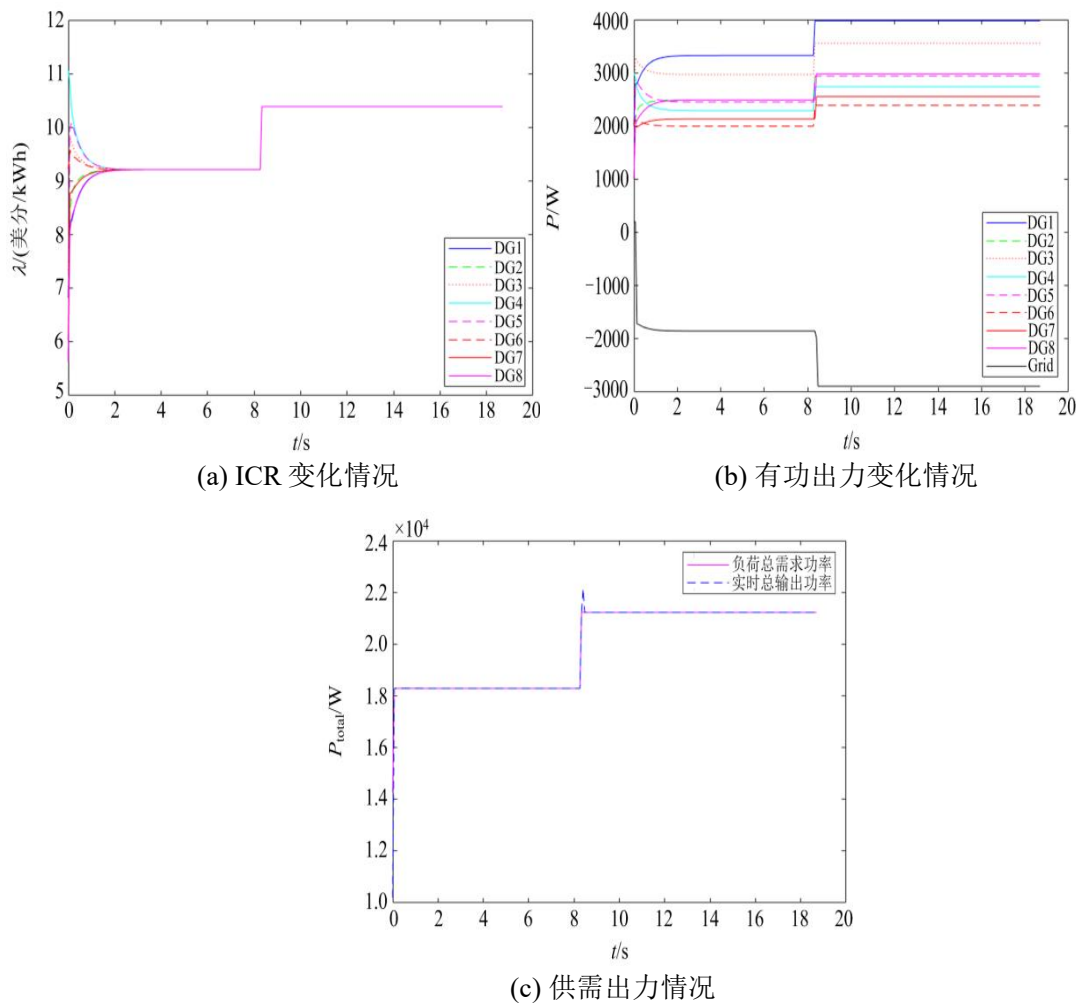
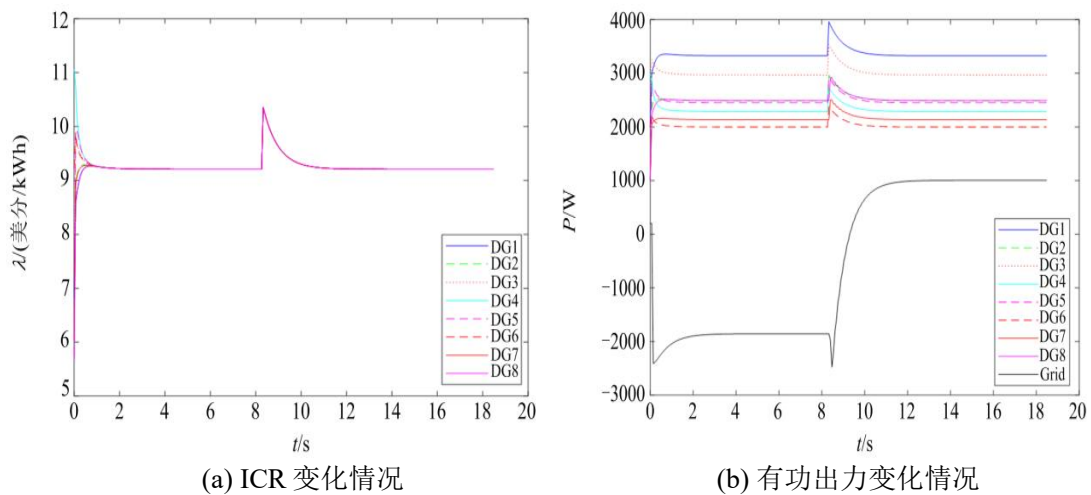
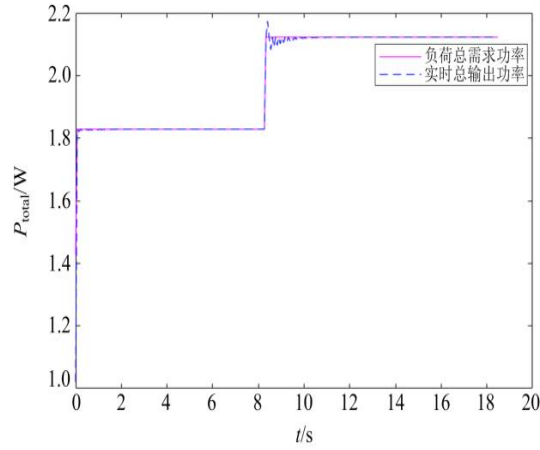


图 3-3 负荷突增下采用传统算法时各变量变化情况





(c) 供需出力情况

图 3-4 负荷突增下采用改进算法时各变量变化情况

由图 3-3(a)可知, 传统算法在负荷加入前后增量成本分别为 9.21 美分/kWh 和 10.33 美分/kWh, 不等于最优 ICR, 源侧系统无法实现经济优化运行。在初始响应时刻, 传统算法经 2.24s 收敛至 9.21 美分/kWh。在负荷增加时, 传统算法经 0.82s 收敛至 10.33 美分/kWh。由图 3-4(a)可知, 在初始响应时刻, 改进算法经 1.45s 收敛至 9.21 美分/kWh。在负荷加入后各 DG 的 ICR 先增后减, 最后达到 9.21 美分/kWh, 运行成本降低, 源侧系统实现经济优化运行。由图 3-3(b)、图 3-4(b)可知, 传统算法在初始响应时刻各 DG 的有功出力能够达到最优, 在负荷加入后, 各 DG 的有功出力和电网输出功率随负荷增加而增加, 但此时传统算法计算出的有功出力并不是最优的。改进算法在初始响应时刻各 DG 的有功出力能够达到最优, 在负荷加入后, 各 DG 的有功出力快速增加, 随着电网输出功率逐渐增加而降低, 最终电网承担了增加的总负荷需求, 改进算法计算出的各 DG 的有功出力能够达到最优。由图 3-3(c)、图 3-4(c)可知, 传统算法和改进算法都可以实现供需平衡。由此可知, 采用改进算法时收敛速度更快, 能实现供需平衡, 系统可实现运行成本最小化等目的。

3.4.2 功率越限影响研究

各 DG 的有功出力都存在其上下限值, 当各 DG 的有功出力长时间超过其上下限值时, 会对电网的稳定性、安全性和经济性产生影响。图 3-5 和图 3-6 分别为不考虑各 DG 有功出力上下限约束和考虑各 DG 有功出力上下限约束时各变量变化情况。

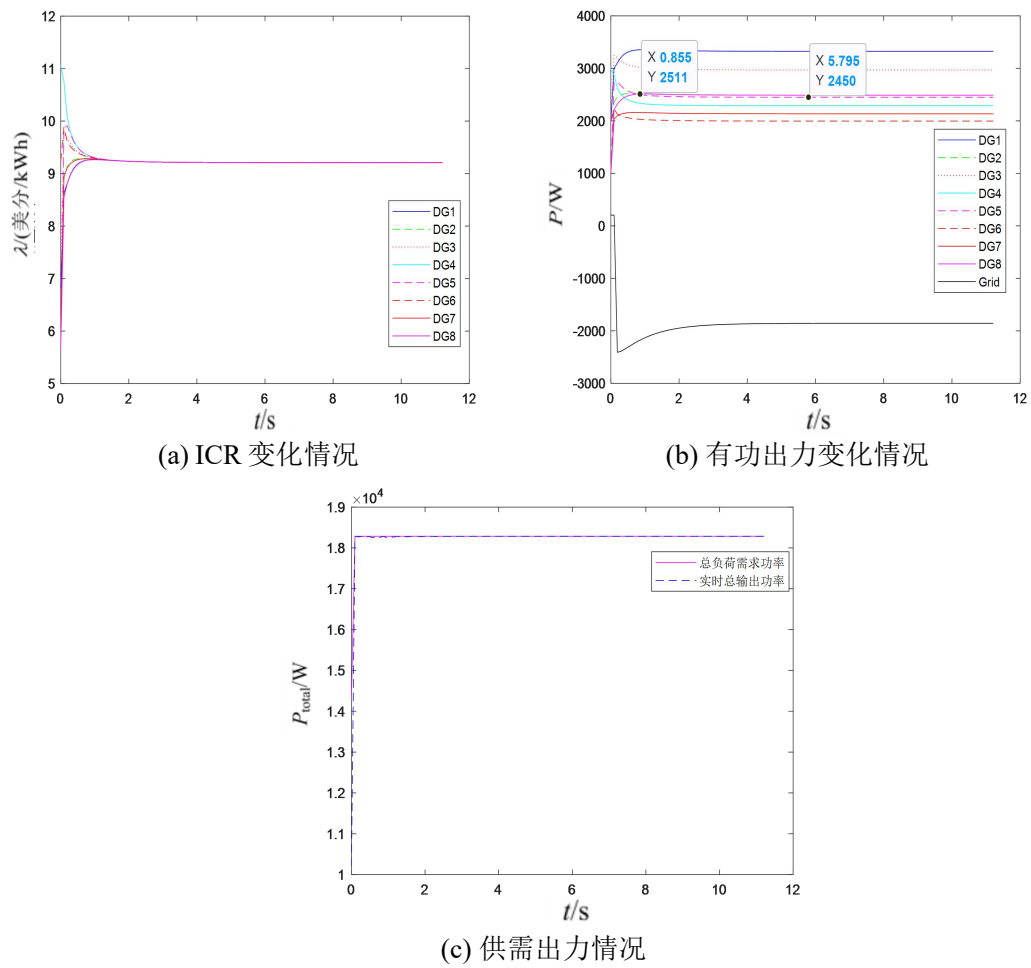
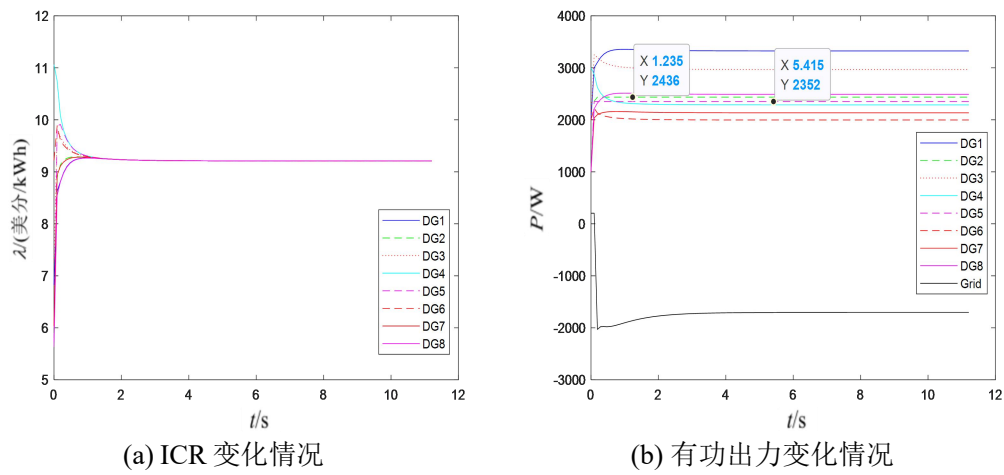
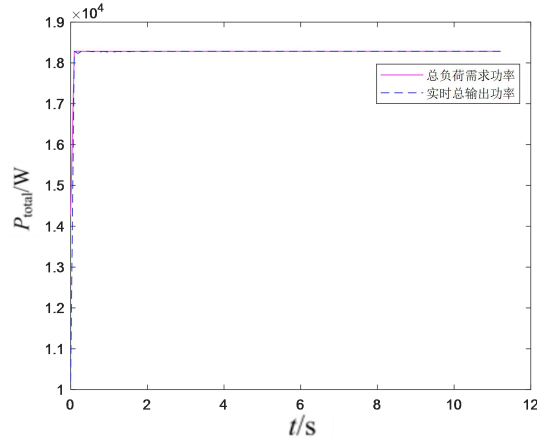


图 3-5 不考虑各 DG 有功出力上下限约束时各变量变化情况





(c) 供需出力情况

图 3-6 考虑各 DG 有功出力上下限约束时各变量变化情况

由图 3-5(a)、图 3-6(a)可知，改进算法在考虑各 DG 有功出力上下限约束和不考虑各 DG 有功出力上下限约束时都可以收敛至 9.21 美分/kWh，实现源侧系统经济优化运行。由图 3-5(b)、图 3-6(b)可知，在不考虑各 DG 有功出力上下限约束时，DG2 和 DG5 分别可以发电 2.511kW 和 2.45kW，而在考虑各 DG 有功出力上下限约束时，DG2 和 DG5 的上限值分别为 2.436kW 和 2.352kW，DG2 和 DG5 发生越限，DG2 和 DG5 取其上限值，分别发电 2.436kW 和 2.352kW。由图 3-5(c)、图 3-6(c)可知，改进算法在两种情况下都可以实现供需平衡。由此可知，在有功出力约束存在的情况下，各 DG 有功出力超出上下限时，被约束等于功率上下限值，以满足不等式约束，多出或减少的负荷需求在其余 DG 之间进行经济分配，实现经济运行。

3.4.3 全天分时电价影响研究

基于分时电价机制^[102-104]，电网电价在高峰、平谷、低谷分别取值 13.21 美分/kWh、9.21 美分/kWh、7.21 美分/kWh。在源侧系统实现经济优化运行时，各 DG 的 ICR 都会收敛于电价，随着负荷需求的增大，各 DG 的 ICR 和有功出力的收敛值会逐渐增大，呈上升趋势。如图 3-7 所示，本章将全天分为 00:00-08:00、08:00-09:00、09:00-12:00、12:00-17:00、17:00-22:00、22:00-24:00 这 6 个时间段，每个时间段因其负荷需求不同，ICR 收敛于不同的电价。图 3-8 为全天分时电价下各变量变化情况。

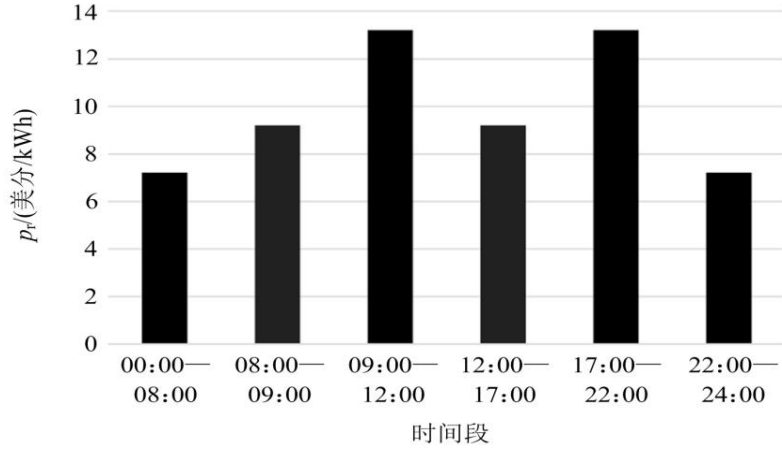
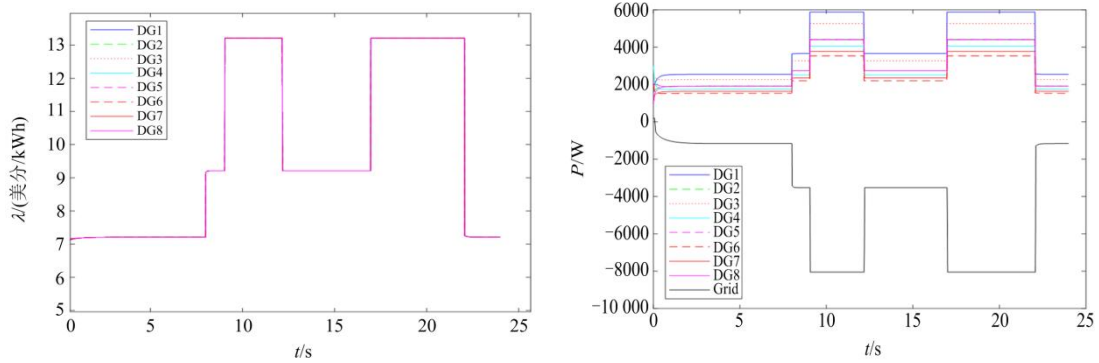
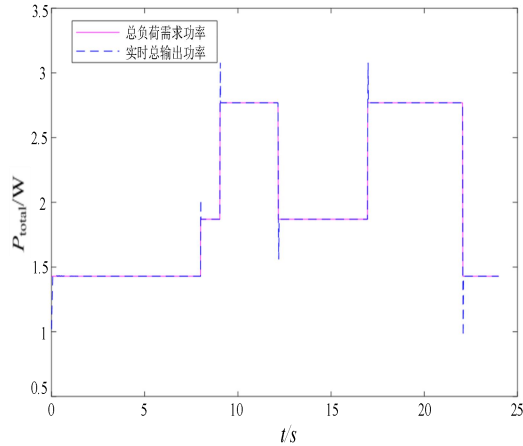


图 3-7 全天分时电价示意图



(a) ICR 变化情况

(b) 有功出力变化情况



(c) 供需出力情况

图 3-8 分时电价下采用改进算法时各变量变化情况

由图 3-7 可知，源侧系统在 0-8h 和 22-24h 的最优电价为 7.21 美分/kWh，在 8-9h 和 12-17h 的最优电价为 9.21 美分/kWh，在 9-12h 和 17-22h 的最优电价为 13.21 美分/kWh。由图 3-8(a)、图 3-8(b)可知，源侧系统在 0-8h 时处于初始零响应状态，电价恒定在 0h 之前的源侧系统响应状态，ICR 收敛于 7.21 美分/kWh；在 8-9h 时，负荷总需求从 14.285kW 增加至 18.285kW，各 DG 的 ICR 随着负荷需求的增加快速收敛至 9.21 美分/kWh，各 DG 的有功出力和电网的输出

功率增加以满足 4kW 负荷的增加，从而达到供需平衡，且动态响应速度较快；在 9-12h 时，负荷需求继续增加，从 18.285kW 增加至 27.685kW，进入用电高峰期，各 DG 的 ICR 随着负荷需求的增加快速收敛至 13.21 美分/kWh，各 DG 的有功出力和电网的输出功率继续增加以满足 9.4kW 负荷的增加；在 12-17h 时，负荷总需求从 27.685kW 减少至 18.285kW，各 DG 的 ICR 随着负荷需求的减少快速收敛至 9.21 美分/kWh，各 DG 的有功出力和电网的输出功率减少以满足 9.4kW 负荷的减少；在 17-22h 时，负荷总需求从 18.285kW 增加至 27.685kW，各 DG 的 ICR 随着负荷需求的增加快速收敛至 13.21 美分/kWh，各 DG 的有功出力和电网的输出功率继续增加以满足 9kW 负荷的增加；在 22-24h 时，负荷总需求从 27.685kW 减少至 14.285kW，各 DG 的 ICR 随着负荷需求的减少快速收敛至 7.21 美分/kWh，各 DG 的有功出力和电网的输出功率减少以满足 13.4kW 负荷的减少，源侧系统在负荷的实时改变下可以实现经济优化运行。由图 3-8(c)可知，在用电高峰、平谷和低谷时，改进算法能快速实现供需平衡。由此可知，本章提出的改进算法能够高效快速地响应负荷总功率的变化，具有较优的动态和静态性能。

3.4.4 拓扑切换影响研究

考虑拓扑切换情况，如图 3-9 所示，从 Ga、Gb、Gc 任一拓扑开始切换，每隔 3.53s 切换到下一状态，分别研究从 Ga 到 Gb 到 Gc、Gb 到 Gc 到 Ga、Gc 到 Ga 到 Gb 三种情况下各变量变化情况，如图 3-10-图 3-12 所示。

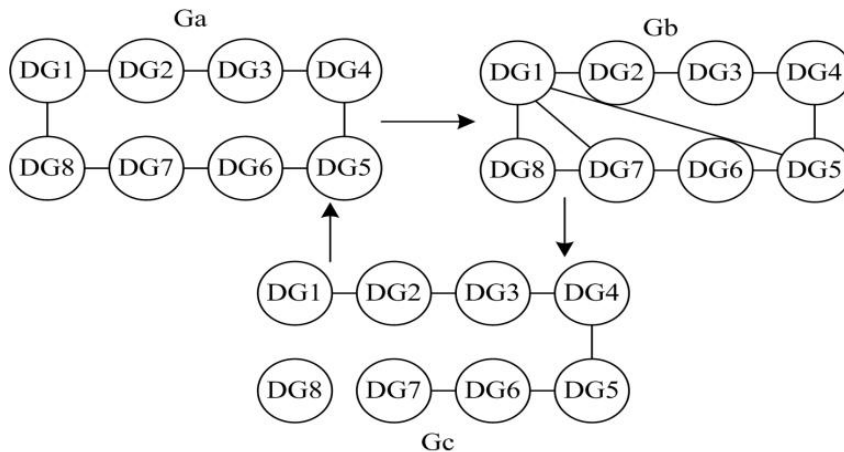


图 3-9 拓扑切换示意图

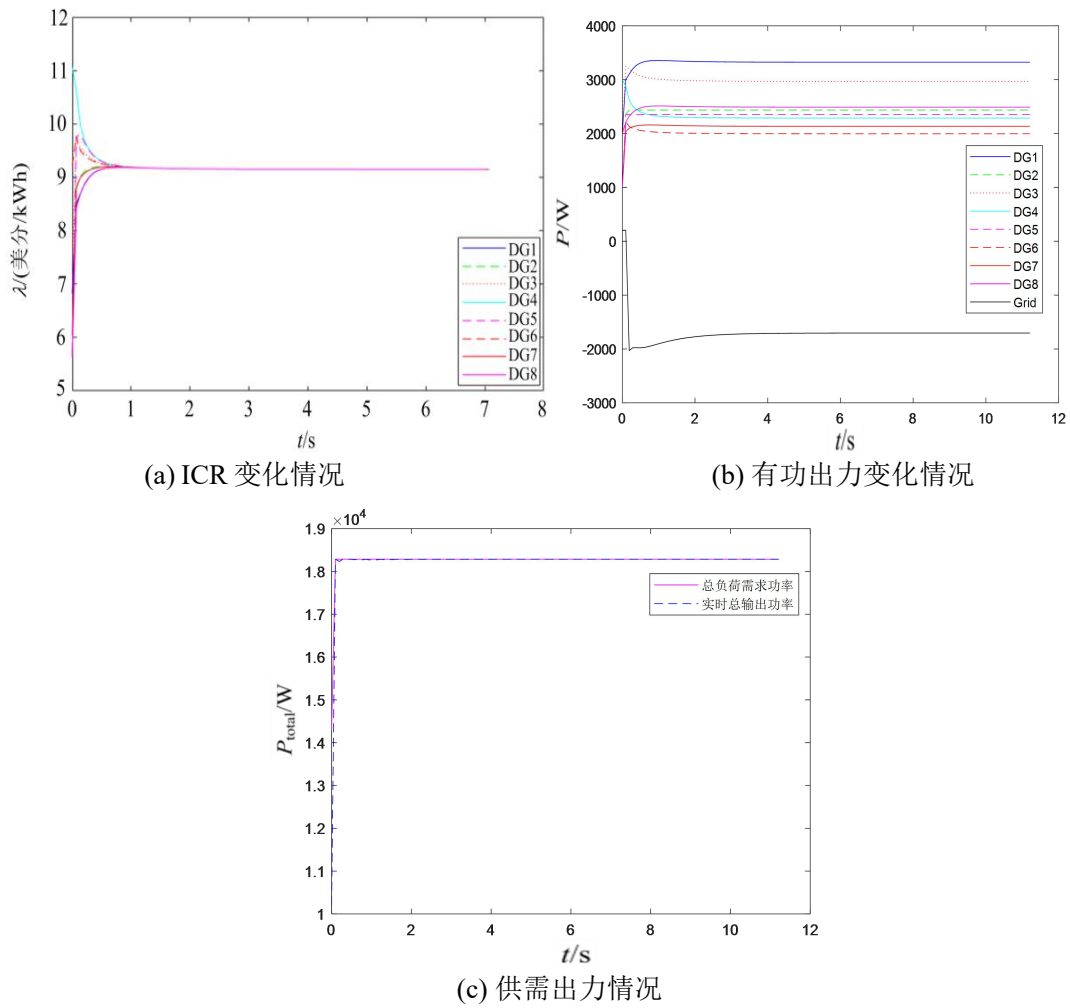
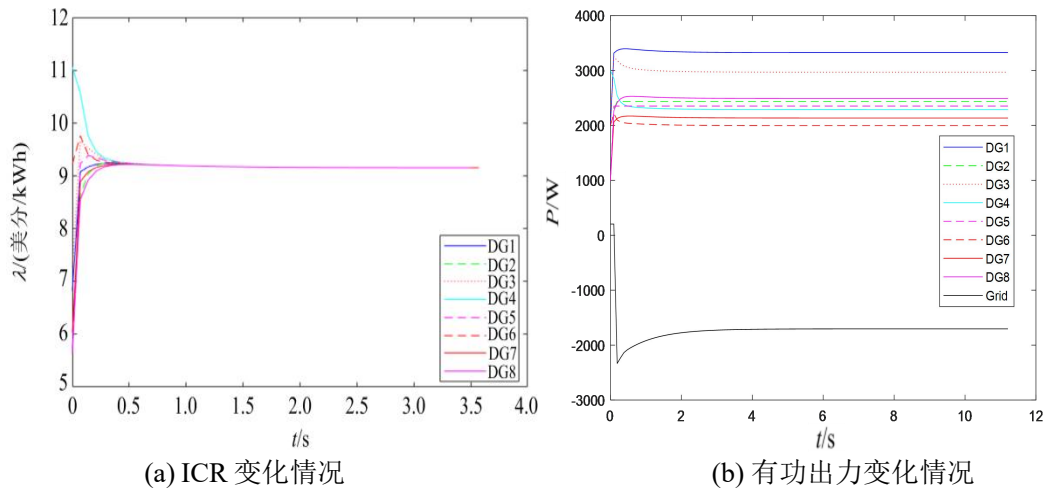
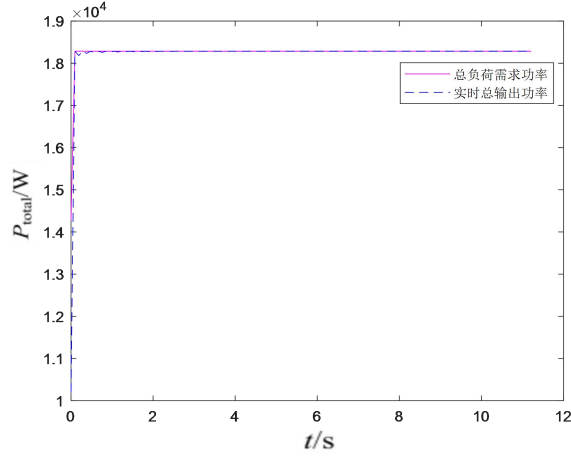


图 3-10 从 Ga 到 Gb 到 Gc 下各变量变化情况





(c) 供需出力情况

图 3-11 从 Gb 到 Gc 到 Ga 下各变量变化情况

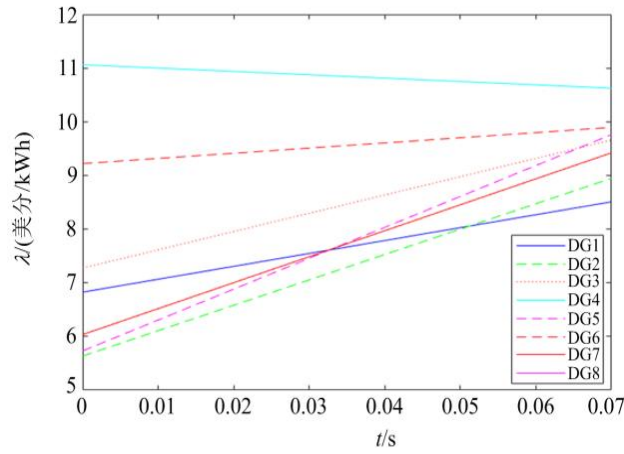


图 3-12 从 Gc 到 Ga 到 Gb 下 ICR 变化情况

由图 3-9 可知，Gb 与 Ga 相比，Ga 中的 DG1 与 DG2 和 DG8 相连，Gb 中的 DG1 不仅与 DG2 和 DG8 相连，与 DG5 和 DG7 也相连，Gb 的代数联通度要大于 Ga，Gc 中 DG8 断开连接。由图 3-10(a)、图 3-11(a)和图 3-12 可知，基于改进算法能使各 DG 的 ICR 快速收敛于最优值，即 9.21 美分/kWh。拓扑切换由 Ga 到 Gb 到 Gc 需要 1.45s 收敛于最优值，而 Gb 到 Gc 到 Ga 仅需要 0.9s 就可以收敛于最优值，拓扑切换由 Gc 到 Ga 到 Gb 因 DG8 断开，矩阵 L 不满足行随机矩阵，导致源侧系统失稳，控制失效。由图 3-10(b)、图 3-11(b)可知，各 DG 和电网共同出力满足 18.285kW 的负荷，拓扑切换由 Ga 到 Gb 到 Gc 需要 1.45s 实现有功出力的合理分配，而 Gb 到 Gc 到 Ga 仅需要 0.9 s 就可以实现有功出力的合理分配。由图 3-10(c)、图 3-11(c)可知，改进算法可以实现供需平衡。由此可知，当 L 不满足行随机矩阵，会导致源侧系统失稳，控制失效，当 L 满足行随机矩阵时，代数连通度越高，源侧系统具有更快的响应速度和更优的稳态响应性能。

3.4.5 计及线路损耗影响研究

设线损模型参数为: $\eta_1 = 0.000001$, $\eta_2 = 0.000002$, $\eta_3 = 0.000003$, $\eta_4 = 0.000004$, $\eta_5 = 0.000005$, $\eta_6 = 0.000006$, $\eta_7 = 0.000007$, $\eta_8 = 0.000008$, 由式(3-18)可得 $P_{\text{loss}} = 0.098 \text{ kW}$ 。图 3-13、图 3-14 分别为不计及线损和计及线损时各变量变化情况。

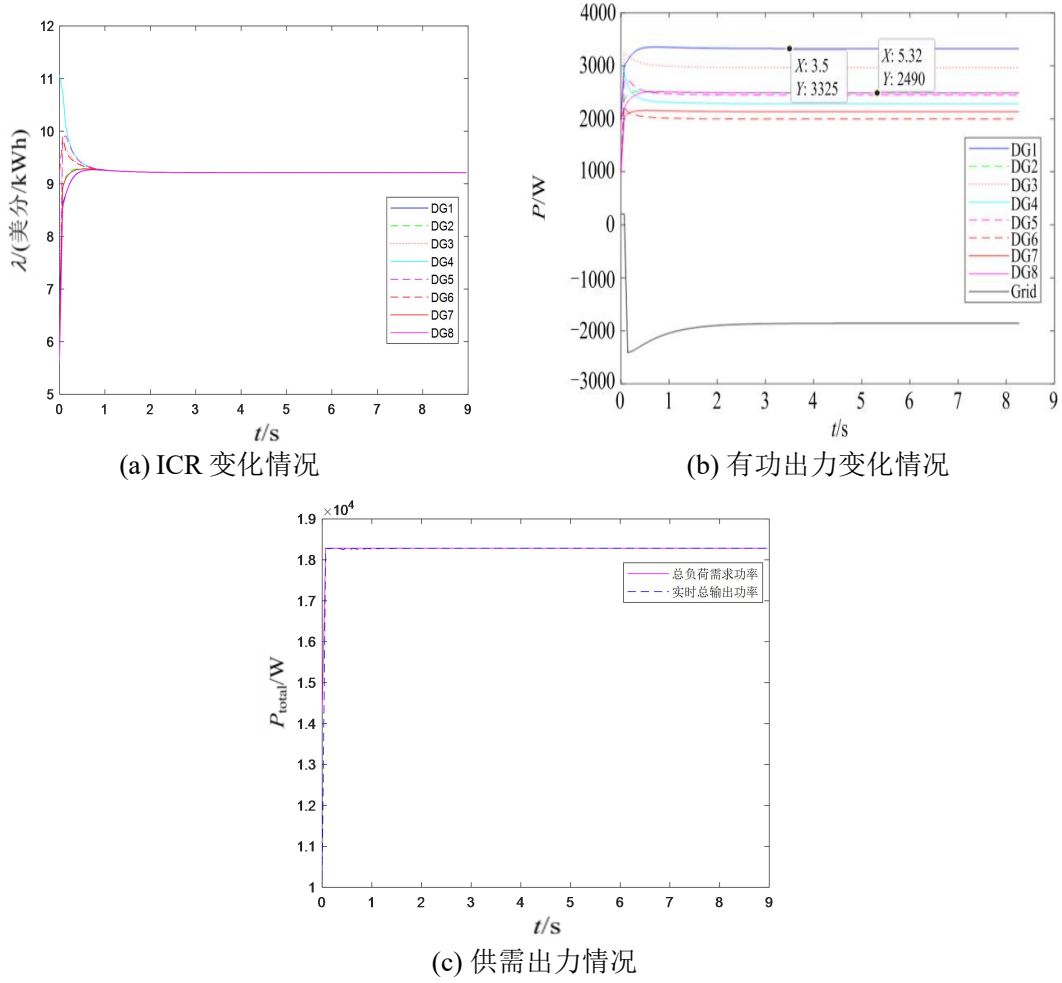
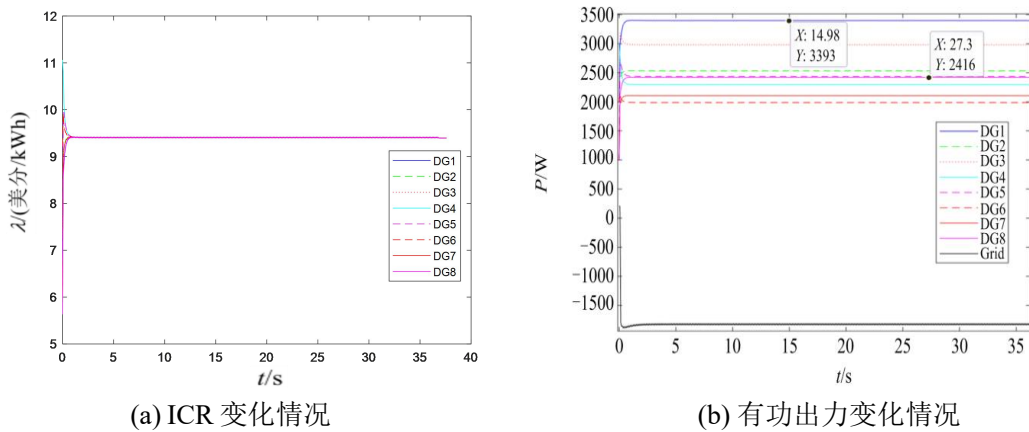
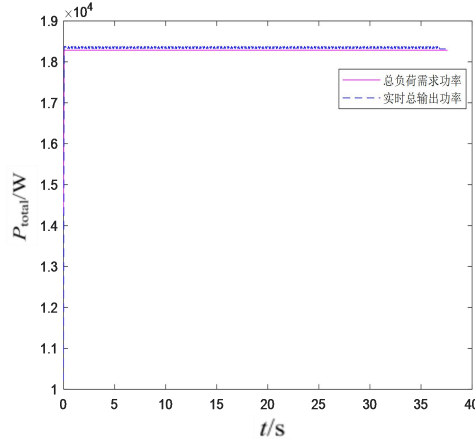


图 3-13 不计及线损时各变量变化情况





(c) 供需出力情况

图 3-14 计及线损时各变量变化情况

由式(3-18)可知, η_i 越大, 产生相同功率时第 i 个 DG 造成的线损越大, 本文中 η_1 最小、 η_8 最大, 即 DG1 与 DG8 相比, 产生相同功率时 DG1 的线损要小于 DG8 的线损。由图 3-13(a)、图 3-14(a)可知, 在不计及线损和计及线损时改进算法都可以收敛至 9.21 美分/kWh, 源侧系统实现经济优化运行。由图 3-13(b)、图 3-14(b)可知, DG1 在不计及线损时发电 3325W, DG8 在不计及线损时发电 2490W, 在计及线损时, DG1 发电 3393W, DG8 发电 2416W。由此可知, 线损参数最小的 DG 在算法优化后有功出力增加最多, 线损参数最大的 DG 在算法优化后有功出力减少最多, 使优化结果更贴合经济性目标, 由此验证了在计及线损时本章经济优化运行算法的有效性。由图 3-13(c)、图 3-14(c)可知, 在不计及线损时, 各 DG 和电网发电 18.285kW, 满足负荷需求, 实现供需平衡; 在计及线损时, 各 DG 和电网发电 18.383kW, 在线路损耗后满足 18.285kW 的负荷需求, 实现供需平衡。由此可知, 改进算法可以实现计及线损时的经济优化运行, 满足供需平衡。

3.4.6 即插即用影响研究

DG 的投入和退出都会影响电网的输送功率和微电网的有功出力, 使得经济运行总成本发生变化。图 3-15 为 DG8 在 3.36s 退出连接, 7s 重新连接时各变量变化情况

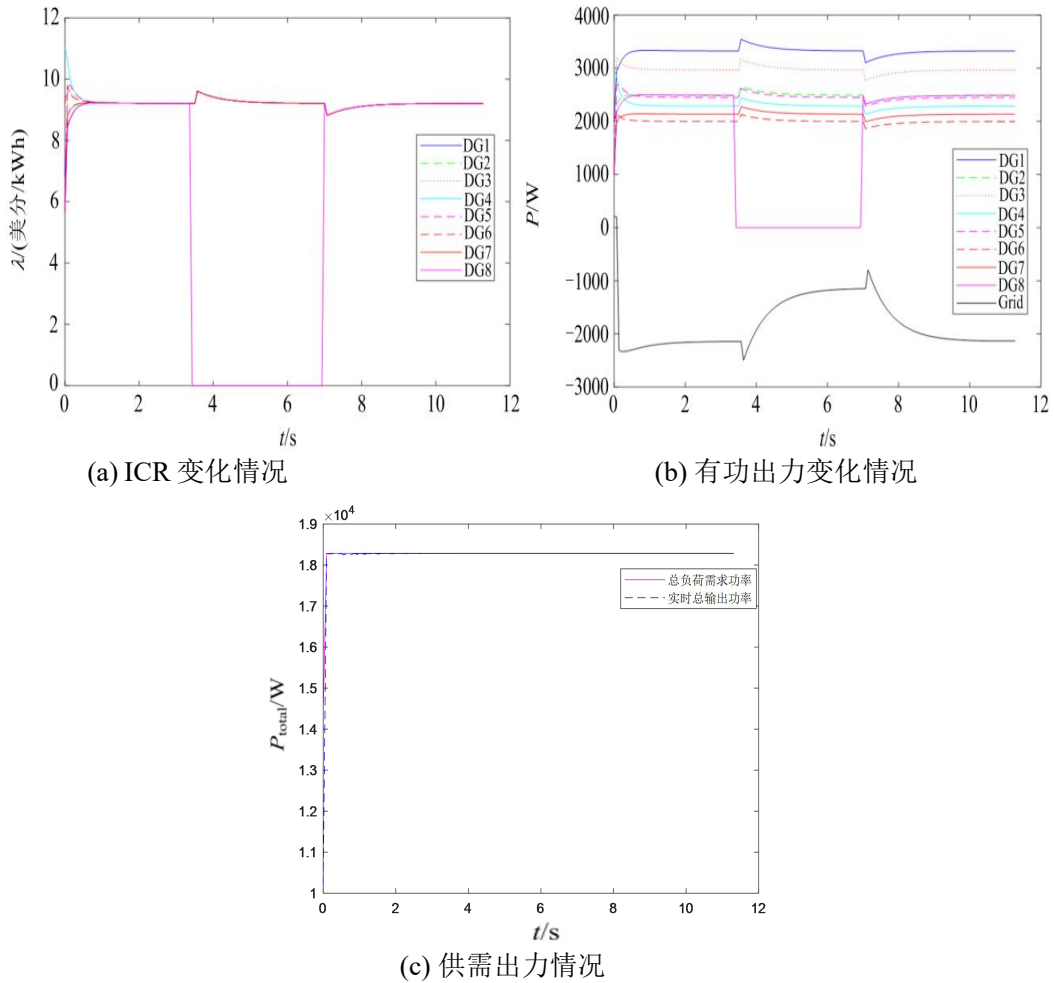


图 3-15 DG8 投入、退出时各变量变化情况

由图 3-15(a)、图 3-15(b)可知,在初始响应时刻,改进算法经 1.45s 收敛至 9.21 美分/kWh,各 DG 的有功出力和电网输出功率共同满足负荷需求。在 3.36s 时, DG8 退出, DG8 的 ICR 和有功出力降至 0, DG1-DG7 为了满足负荷需求, ICR 和有功出力开始增加,随着电网输出功率逐渐增加而降低,最后在 5.26s 时各 DG 的 ICR 重新稳定在 9.21 美分/kWh。在 7s 时, DG8 重新连接, DG8 的 ICR 和有功出力迅速增加, DG1-DG7 为了满足负荷需求, ICR 和有功出力开始减少,随着电网输出功率逐渐减少而增加,最后在 8.9s 时各 DG 的 ICR 又重新稳定在 9.21 美分/kWh。由图 3-15(c)可知,在 DG8 投入、退出时,改进算法进行优化调度, DG1-DG7 和电网的有功出力满足负荷需求,实现供需平衡。由此可知,采用改进算法能使并网微电网源侧系统在 DG 投入和退出时动态响应速度快,源侧整体响应性能较优。

3.5 本章小节

本章研究了一种二层邻居牵制一致性算法，在传统一致性算法的基础上引入二层邻居项、功率偏差消除项和牵制项，在实现系统快速收敛的同时，能够满足供需平衡，通过图论和矩阵论等知识验证了本章改进算法的收敛性、快速性和稳定性。随后，针对微电网的经济优化调度问题，研究了一种基于二层邻居牵制一致性算法的并网微电网经济优化调度策略，用于实现微电网的经济优化调度。二层邻居牵制一致性算法以增量成本作为一致性变量，引入二层邻居项和牵制项，使得增量成本快速收敛于最优值，各 DG 有功出力能够达到最优且收敛速度较快，实现 DG 有功出力的经济分配，从而使得并网微电网系统处于经济优化运行状态。最后，通过将该算法应用于 8 节点系统验证算法的优越性。该算法在各 DG 有功出力超出上下限时，强制约束各 DG 有功出力等于功率上下限值，以满足不等式约束，多出或减少的负荷需求在其余 DG 之间进行经济分配，实现经济运行；该算法在满足行随机矩阵的前提下，代数连通度越高，系统的响应速度越快；在考虑线损时，能根据线损模型参数实现各 DG 的最优有功出力，使优化结果更贴合经济性目标；在多智能体投入退出时动态响应速度快，源侧整体响应性能较优。

第 4 章 基于改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制

目前, 由于集中式控制和分散式控制存在很多缺点, 因此结合了集中式控制和分散式控制特点的分布式控制应运而生。为实现微电网电压频率的恢复和稳定、有功出力的合理分配以及微电网的经济优化运行, 一些学者提出一种分层分布式优化控制策略, 即能在负荷变化时实现电压频率的稳定, 又能实现微电网的经济优化运行。已有大量文献对此进行研究, 文献[105]为实现微电网的有功出力优化分配, 提出三层分布式协同控制, 第二层采用电压频率修正策略实现电压频率的快速恢复, 第三层在满足供需平衡的基础上设计多智能体一致性算法实现经济优化运行。文献[106]提出一种基于虚拟领导节点改进的孤岛微电网完全分布式二次调频策略, 结合一致性算法对调频控制器进行改进, 实现频率的恢复。文献[107]针对采用下垂控制的孤岛微电网在负荷突增、通信中断和即插即用等情况时电压频率跌落问题, 设计了一种新型的双重优化控制方案, 该方案将下垂系数作为一级控制变量, 下垂控制环的电压和频率设定值作为二级控制目标, 并以下垂控制环的稳定性余量作为约束条件。通过实施这种双重优化控制策略, 能够在确保系统具备充足的稳定性余量的同时, 实现 PCC 点电压和频率的零偏差。以上研究虽然取得了一些成果, 但仍存在电压频率的跌落问题, 无法实现电压频率的快速恢复和稳定。

为解决上述问题, 本章研究了一种改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制方法。该方法基于三层分布式分层架构, 第一控制层为双闭环反馈的下垂控制, 第二控制层为电压频率优化控制层, 利用改进牵制一致性算法求出参考频率和参考电压, 将其与实际输出频率和输出电压进行比较, 计算出误差项。然后, 通过 PI 控制器对误差项进行处理, 生成补偿项。随后将这些补偿项输出至第一控制层, 用于补偿下垂控制环节的频率和电压参数, 实现电压和频率的快速恢复和稳定。第三控制层为经济优化调度层, 采用第 3 章研究的二层邻居牵制一致性算法, 计算得到各 DG 的最优有功出力参考值, 随后将各 DG

最优有功出力参考值输出至第一控制层，从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。

4.1 改进牵制一致性算法

4.1.1 算法描述

为提高收敛速度，在式(2-13)的牵制一致性算法上进行改进，得到改进牵制一致性算法，如式(4-1)所示：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \left(\frac{1}{\lambda_2(W - w_0 - w)} + 1 \right) \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) + \xi_i(x_0 - x_i(k)) \right) \quad (4-1)$$

式中： W 为收敛时间， w_0 为初始时刻， λ_2 为拉普拉斯矩阵 L 的最小非零特征值； $w \in [w_0, w_0 + W]$ 。由文献[108]可知，减小 W 的值可以提高收敛速度，但不能将 W 设为过小的值。本文设定 W 的值为0.3。

4.1.2 算法收敛性分析

式(4-1)可以写成如式(4-2)所示的动力学方程：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + c \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(k) + \xi_i(x_0 - x_i(k)) \right) \quad (4-2)$$

式中： $c = \frac{1}{\lambda_2(W - w_0 - w)} + 1$ ， c 为前置项，合理地调节 c 的取值可实现上述算法的快速收敛。

当式(4-3)成立时，则称改进牵制一致性算法实现牵制一致性，达到稳态收敛：

$$0 \leq \xi_i \leq \frac{2}{c} - 2l_{ii}, \quad i = 1, \dots, N \quad (4-3)$$

式中： l_{ii} 表示 L 的对角线元素。

证明：定义 $e_i(k) = x_i(k) - \xi_i$ ，则式(4-2)对应的误差方程如式(4-4)所示：

$$e_i(k+1) = e_i(k) - c \sum_{j=1}^N l_{ij} \cdot e_j(k) - c \xi_i e_i(k), \quad i = 1, \dots, N \quad (4-4)$$

令 $e(k) = (e_1^T(k), \dots, e_n^T(k))^T$ ，则式(4-4)的矩阵形式如式(4-5)所示：

$$e(k+1) = [I_n - c(L + S)]e(k) \quad (4-5)$$

式中： $S = \text{diag}\{\xi_i\}, i = 1, \dots, N$ 。

假设 δ_i 为矩阵 $[I_n - c(L + S)]$ 的特征值，若要使式(4-5)渐进收敛，则需使

$|\delta_i| < 1$ ($i=1, \dots, N$) 成立。

易知 $[I_n - c(L + S)]$ 的特征值满足如下条件：

$$|\delta_i - (1 - c(\xi_i + l_{ii}))| \leq c \sum_{j=1}^N |l_{ij}| \quad (4-6)$$

根据 L 定义可知：

$$|\delta_i - (1 - c(\xi_i + l_{ii}))| \leq cl_{ii} \quad (4-7)$$

由式(4-7)可得：

$$1 - c\xi_i - 2cl_{ii} \leq \delta_i \leq 1 - c\xi_i \quad (4-8)$$

因为 $|\delta_i| < 1$ ($i=1, \dots, N$)，可得 $\xi_i \leq \frac{2}{c} - 2l_{ii}$ ，且 $\xi_i \geq 0$ 。即 $0 \leq \xi_i \leq \frac{2}{c} - 2l_{ii}$ 成立，式(4-3)成立，则系统(4-2)可实现牵制一致性，达到稳态收敛。

4.2 微电网的一次控制策略

在多台 DG 设备并联运行的情况下，下垂控制技术能够模拟同步发电机的下垂特性来分配电力系统功率。这种控制方法不需要依赖通信网络，允许各个 DG 单元依据自身的局部信息进行动态调整，以维持电压和频率的稳定以及实现功率的均衡分配。图 4-1 展示了微电网下垂控制仿真框图。

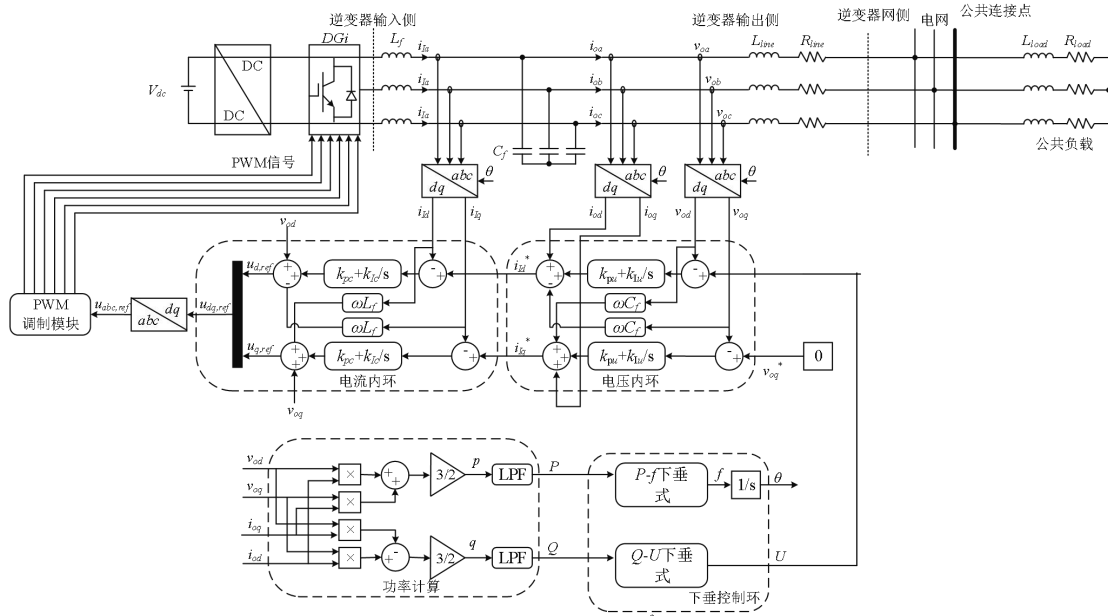


图 4-1 微电网下垂控制仿真框图

由图 4-1 可以推导出滤波电感和电容的电路方程式，分别如式(4-9)和式(4-10)所示：

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{la}}{dt} = u_{la} - u_a \\ L_f \frac{di_{lb}}{dt} = u_{lb} - u_b \\ L_f \frac{di_{lc}}{dt} = u_{lc} - u_c \end{cases} \quad (4-9)$$

$$\begin{cases} C_f \frac{du_a}{dt} = i_{la} - i_a \\ C_f \frac{du_b}{dt} = i_{lb} - i_b \\ C_f \frac{du_c}{dt} = i_{lc} - i_c \end{cases} \quad (4-10)$$

式中： C_f 为滤波电容； L_f 为滤波电感； u_{la} 为 a 相滤波电感上的电压； i_{la} 为 a 相滤波电感上的电流。

采用 Park 变换将 abc 坐标系下的瞬时三相值转换至 dq0 旋转坐标系中，得到 dq0 旋转坐标系下的电流和电压方程式，分别如式(4-11)和式(4-12)所示：

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{ld}}{dt} = u_{ld} + w^* L_f i_{lq} - v_{od} \\ L_f \frac{di_{lq}}{dt} = u_{lq} + w^* L_f i_{ld} - v_{oq} \end{cases} \quad (4-11)$$

$$\begin{cases} C_f \frac{du_{ld}}{dt} = i_{ld} + w^* C_f u_{lq} - i_{od} \\ C_f \frac{du_{lq}}{dt} = i_{lq} + w^* C_f u_{ld} - i_{oq} \end{cases} \quad (4-12)$$

式中： w^* 为角频率； i_{ld} 、 i_{lq} 分别为滤波电感电流经 Park 变换后转换的 d 轴与 q 轴分量； u_{ld} 、 u_{lq} 分别为滤波电感电压经 Park 变换后转换的 d 轴与 q 轴分量； v_{od} 、 v_{oq} 分别为滤波电容电压经 Park 变换后转换的 d 轴与 q 轴分量； i_{od} 、 i_{oq} 分别为逆变器输入到交流母线的电流经 Park 变换后转换的 d 轴与 q 轴分量。

经过 Park 变换后，进入功率计算模块，有功功率 P 和无功功率 Q 的表达式如式(4-13)和式(4-14)所示：

$$P = \frac{3}{2} (v_{od} \times i_{od} + i_{oq} \times v_{oq}) \quad (4-13)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{oq} \times i_{od} - v_{od} \times i_{oq}) \quad (4-14)$$

将有功功率 P 和无功功率 Q 代入传统下垂控制中，计算出系统的电压和频率，传统下垂控制^[109]如式(4-15)和式(4-16)所示：

$$f_i = f_{ref} - m_i(P_i - P_i^*) \quad (4-15)$$

$$u_i = u_{ref} - n_i(Q_i - Q_i^*) \quad (4-16)$$

式中： f_i 、 u_i 、 P_i 、 Q_i 分别表示频率、电压、有功功率和无功功率； m_i 、 n_i 分别表示有功下垂系数和无功下垂系数； f_{ref} 、 u_{ref} 分别表示频率、电压参考值； P_i^* 、 Q_i^* 分别表示参考有功功率、参考无功功率。

图 4-1 中的电压内环和电流内环为双环控制，是确保系统稳定性的关键环节。双环控制策略有效地融合了电流环和电压环的优势，既确保了输出电压的高精确度和稳定特性，也实现了对电流变化的快速和灵敏响应，显著增强了电力电子系统的综合控制能力。

4.3 基于改进牵制一致性的微电网二次控制

当系统存在负荷变化、通信中断、即插即用等情况时，电压频率会发生跌落，系统存在明显的电压频率偏差。采用如式(4-15)和式(4-16)所示的传统下垂控制时，系统不能迅速响应并恢复电压和频率，不仅会影响电能质量和负荷的稳定运行，严重时甚至会影响电力系统的稳定性和安全性。微电网的电压频率二次控制如图 4-2 所示。

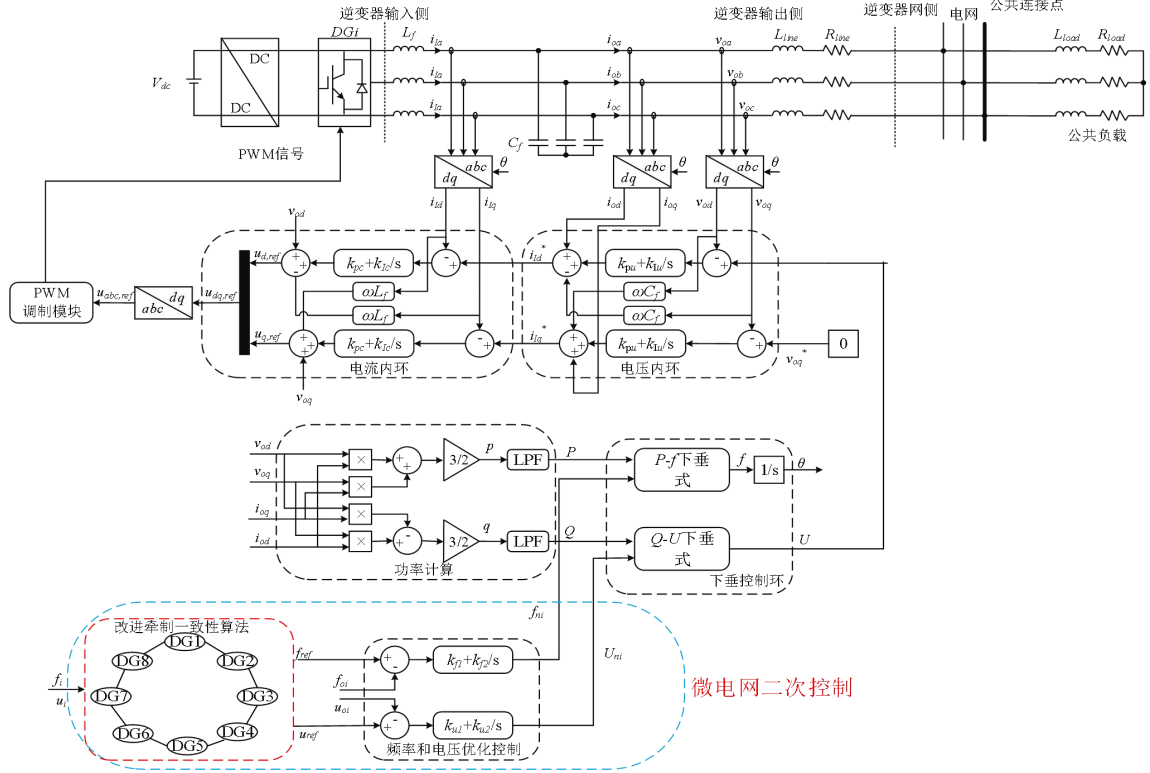


图 4-2 微电网电压频率二次控制

为解决并网微电网电压频率跌落的快速恢复问题，提出基于改进牵制一致性的并网微电网电压频率二次控制策略(下文简称改进二次控制)，该策略首先利用改进牵制一致性算法求出参考频率和参考电压，将其与实际输出频率和输出电压进行比较，当实际输出频率和输出电压小于参考频率和参考电压时，两者比较生成一个正的误差项；当实际输出频率和输出电压大于参考频率和参考电压时，两者比较生成一个负的误差项。然后，通过 PI 控制器对误差项进行处理，生成补偿项。这些补偿项随后被输出到第一控制层，用于补偿下垂控制环节电压频率偏差，实现电压频率的快速恢复以及对电压频率参考值的跟踪。选取各 DG 的电压和频率为一致性变量，改进二次控制如式(4-17)-式(4-22)所示：

$$f_i = f_{ref} - m_i P_i + f_{ni} \quad (4-17)$$

$$f_i(k+1) = f_i(k) + \left(\frac{1}{\lambda_2(W - w_0 - w)} + 1 \right) \times \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot f_j(k) + r_i(f_{ref} - f_i(k)) \right) \quad (4-18)$$

$$f_{ni} = k_{i,f1}(f_{ref} - f_i) + k_{i,f2} \int (f_{ref} - f_i) dt \quad (4-19)$$

$$u_i = u_{ref} - n_i Q_i + u_{ni} \quad (4-20)$$

$$u_i(k+1) = u_i(k) + \left(\frac{1}{\lambda_2(W - w_0 - w)} + 1 \right) \times \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot u_j(k) + r_i(u_{ref} - u_i(k)) \right) \quad (4-21)$$

$$u_{ni} = k_{i,u1}(u_{ref} - u_i) + k_{i,u2} \int (u_{ref} - u_i) dt \quad (4-22)$$

式中： f_{ni} 、 u_{ni} 分别表示频率、电压补偿项； $k_{i,f1}$ 、 $k_{i,f2}$ 、 $k_{i,u1}$ 、 $k_{i,u2}$ 分别表示频率优化 PI 控制器的比例系数、积分系数和电压优化 PI 控制器的比例系数、积分系数。

4.4 分层分布式优化控制

本文研究的分层分布式控制一共分为三层。第一控制层为双闭环反馈的下垂控制，第二控制层为电压频率优化控制层，利用改进牵制一致性算法求出参考频率和参考电压，将其与实际输出频率和输出电压进行比较，计算出误差项。然后，通过 PI 控制器对误差项进行处理，生成补偿项。随后将这些补偿项输出至第一控制层，用于补偿下垂控制环节的频率和电压参数，实现电压和频率的快速恢复和稳定。第三调度层为经济优化调度层，采用第 3 章所提的二层邻居牵制一致性算法，该算法将 ICR 定义为状态变量，引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差，利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR，计算得到各 DG 的最优有功出力参考值。将各 DG 最优有功出力参考值输出到 P/f 下垂控制层，从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。微电网分层分布式优化控制框图如图 4-3 所示。

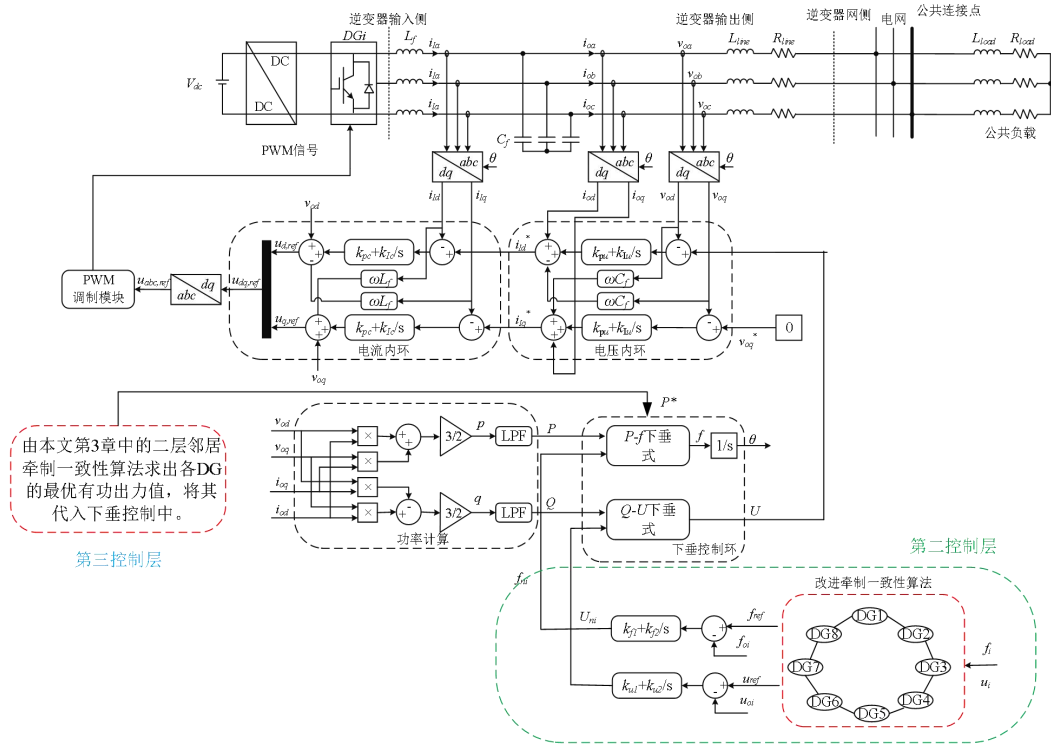


图 4-3 微电网分层分布式优化控制框图

4.5 算例与仿真

在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建八个多智能体的并联仿真模型。第二控制层采用由 8 个分布式电源组成的 8 节点系统进行研究。系统的电力连接拓扑和通信拓扑如图 4-4 所示。各 DG 成本参数如表 4-1 所示，系统参数如表 4-2 所示。

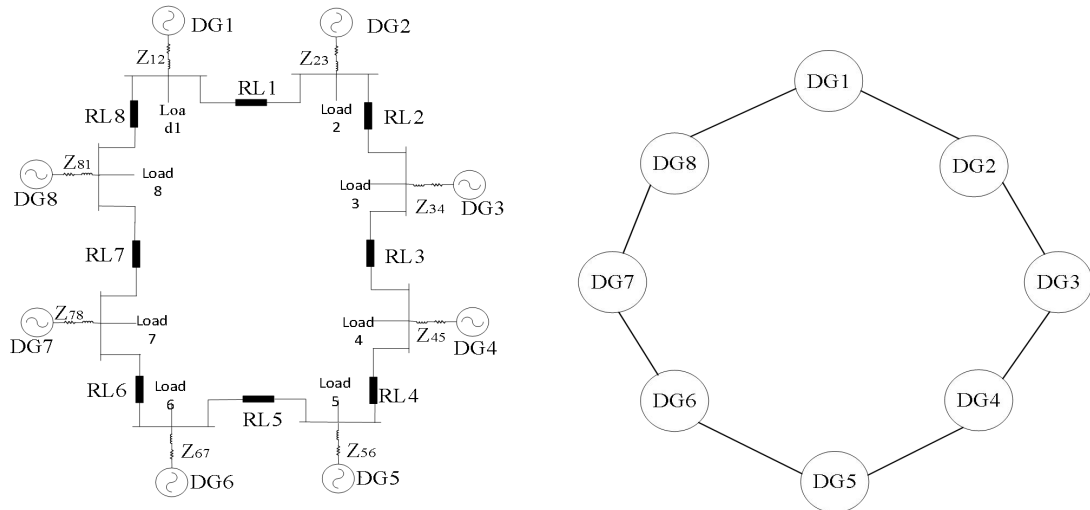


图 4-4 电力连接拓扑和通信拓扑

表 4-1 各 DG 参数一览表

DG _i	1	2	3	4	5	6	7	8
-----------------	---	---	---	---	---	---	---	---

最小有功功率 $P_{i,\min}/\text{KW}$	0.5	0.5	1	1	0.3	0.5	0.3	0.5
最大有功功率 $P_{i,\max}/\text{KW}$	5.04	2.436	3.78	4.2	2.352	3.78	4.2	5.04
初始有功功率 P_0/KW	2	1	3	2	1	2	1	1
滤波电阻 R_f/Ω	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
滤波电感 L_f/mH	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
有功下垂系数 $m_i/(\text{Hz/KW})$	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
无功下垂系数 $n_i/(\text{V/Kvar})$	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}
电压控制比例参数 k_{pu}	1	1	1	1	1	1	1	1
电压控制积分参数 k_{Iu}	10	10	10	10	10	10	10	10
电流控制比例参数 k_{pc}	20	20	20	20	20	20	20	20
电流控制积分参数 k_{Ic}	500	500	500	500	500	500	500	500
频率优化比例参数 k_{f1}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
频率优化积分参数 k_{f2}	15	15	15	15	15	15	15	15
电压率优化比例参数 k_{u1}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
电压率优化积分参数 k_{u2}	15	15	15	15	15	15	15	15
成本模型二次项系数 α_i	0.0009	0.0014	0.0011	0.0012	0.0012	0.0015	0.0014	0.0012
成本模型二次项系数 β_i	3.2256	3.2344	3.2968	3.2624	3.3304	3.2344	3.2044	3.2344

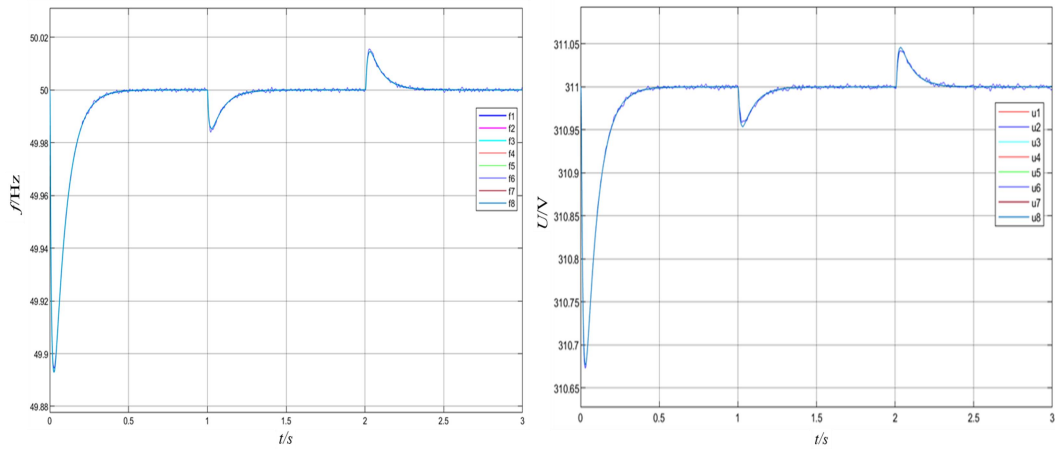
表 4-2 系统模型参数

变量	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	800
线电压 U_{ab}/V	380
频率 f/Hz	50
阻抗 $Z_{12}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{23}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{34}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{45}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{56}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{67}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{78}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
阻抗 $Z_{81}/(\Omega+\text{mH})$	0.641+0.0264
负荷 $P_{\text{load}1}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}1}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}2}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}2}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}3}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}3}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}4}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}4}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}5}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}5}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}6}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}6}/\text{KW}$	2700, 1000

负荷 $P_{\text{load}7}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}7}/\text{KW}$	2700, 1000
负荷 $P_{\text{load}8}/\text{KW}$, $Q_{\text{load}8}/\text{KW}$	2700, 1000

4.5.1 负荷改变时系统响应性能对比分析

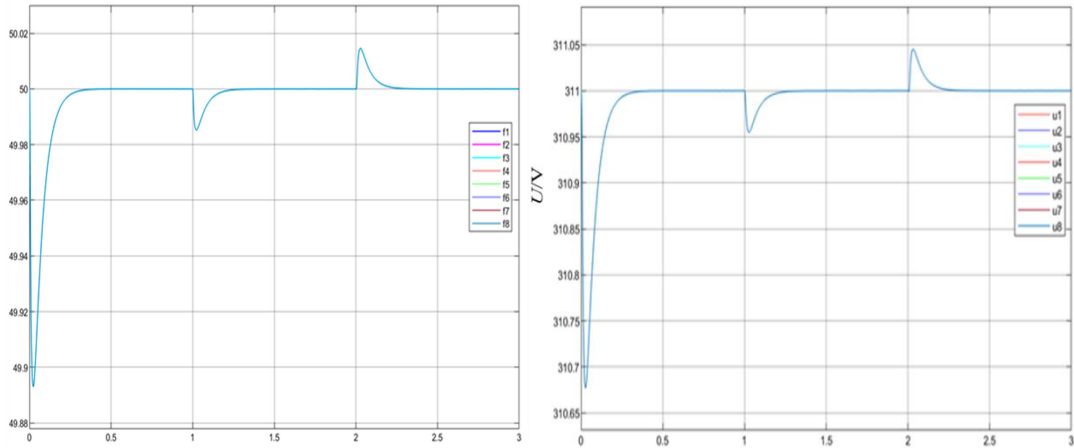
假设在 1s 时加入负荷 6，在 2s 时负荷 6 退出，采用传统下垂控制和改进二次控制对系统电压频率响应性能进行仿真对比实验。图 4-5 和图 4-6 分别为采用传统下垂控制和改进二次控制时各 DG 的频率、电压变化曲线。图 4-7 为 DG6 的有功出力变化曲线。系统在负荷改变时基于传统下垂控制和改进二次控制的性能分析如表 4-3 所示。



(a) DG 频率变化曲线

(b) DG 电压变化曲线

图 4-5 负荷改变时采用传统下垂控制各 DG 的频率、电压变化曲线



(a) DG 频率变化曲线

(b) DG 电压变化曲线

图 4-6 负荷改变时采用改进二次控制各 DG 的频率、电压变化曲线

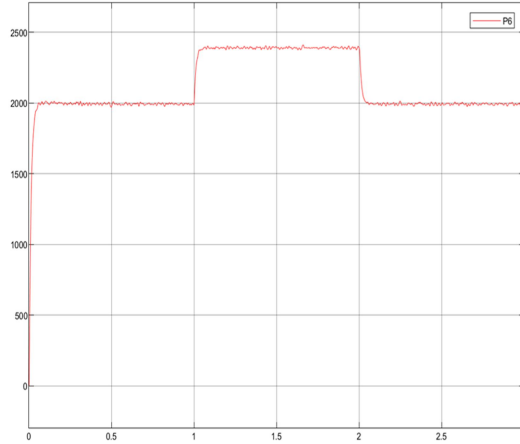


图 4-7 负荷改变时 DG6 的有功出力变化曲线

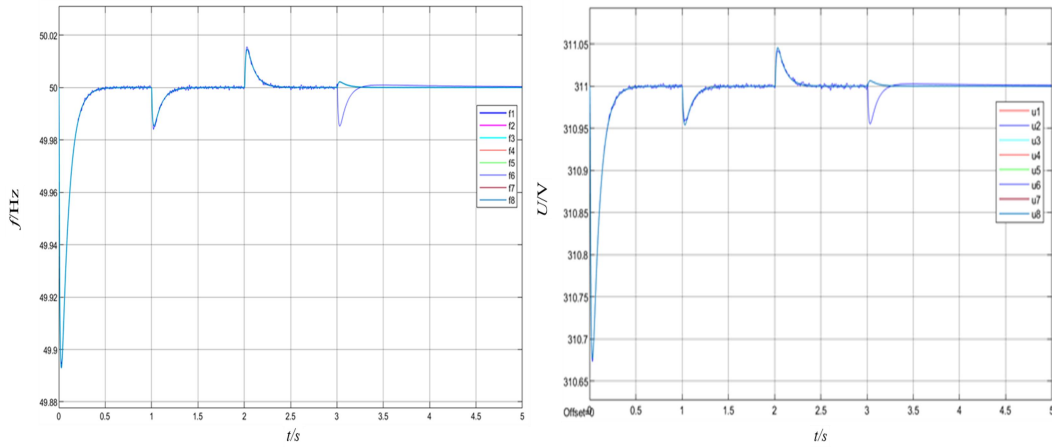
表 4-3 负荷改变时基于传统下垂控制和改进二次控制的系统性能分析一览表

特性	性能分析
传统下垂控制电压频率快速性	电压频率需 0.5s 恢复至参考电压和参考频率。
传统下垂控制电压频率稳定性	电压频率变化曲线存在波动，但在允许范围内，能实现电压频率的稳定。
改进二次控制电压频率快速性	电压频率需 0.25s 恢复至参考电压和参考频率。
改进二次控制电压频率稳定性	电压频率变化曲线平滑，能实现电压频率的稳定。

由图 4-5、图 4-6 可知，系统在 0s 时下垂控制开始响应，传统下垂控制频率跌落至 49.83Hz，电压跌落至 306.75V，在大电网和传统下垂控制的作用下，各 DG 频率和电压经 0.5s 分别恢复至 50Hz 和 311V。在 1s 时加入负荷 6，频率跌落至 49.82Hz，电压跌落至 310.94V，各 DG 频率和电压经 0.45s 分别恢复至 50Hz 和 311V。在 2s 时负荷 6 退出，频率上升至 50.18Hz，电压上升至 311.06V，各 DG 频率和电压经 0.45s 分别恢复至 50Hz 和 311V。改进二次控制在初始时刻频率跌落至 49.83Hz，电压跌落至 306.75V，在大电网和改进下垂控制的作用下，各 DG 经 0.25s 恢复至 50Hz，电压经 0.25s 恢复至 311V。在 1s 时加入负荷 6，频率跌落至 49.82Hz，电压跌落至 310.94V，各 DG 经 0.25s 恢复至 50Hz，电压经 0.25s 恢复至 311V。在 2s 时负荷 6 退出，频率上升至 50.18Hz，电压上升至 311.06V，各 DG 经 0.25s 恢复至 50Hz，电压经 0.25s 恢复至 311V。由图 4-7 可知，在负荷未加入前，由第三控制层得出 DG6 的最优有功出力为 2kW，在负荷 6 加入后，最优 ICR 发生变化，DG6 的最优有功出力增长为 2.38kW。负荷 6 退出后，DG6 的有功出力再次变为 2kW。由表 4-3 和上述描述可知，分层分布式优化控制不仅可以实现电压频率的快速恢复和稳定，还可以实现系统经济优化运行。

4.5.2 通信中断影响研究

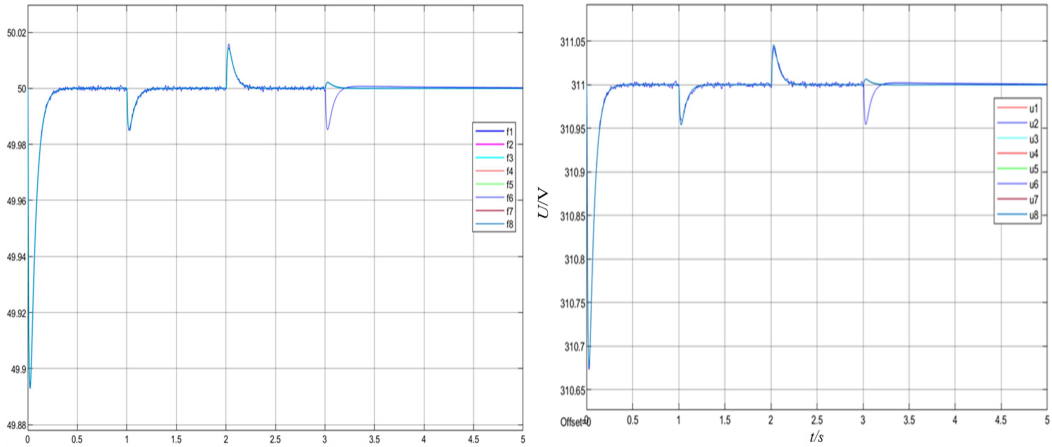
为验证通信中断时所提方法的有效性。假设系统在 1s 时加入负荷 6，在 2s 时负荷 6 退出，在 3s 时 DG6 的通信链路中断，采用传统下垂控制和改进二次控制对系统电压频率响应性能进行仿真对比实验。图 4-8 和图 4-9 分别为通信中断时采用传统下垂控制和改进二次控制各 DG 的频率、电压变化曲线。图 4-10 为 DG6 的有功出力变化曲线。



(a) DG 频率变化曲线

(b) DG 电压变化曲线

图 4-8 通信中断时采用传统下垂控制各 DG 的频率、电压变化曲线



(a) DG 频率变化曲线

(b) DG 电压变化曲线

图 4-9 通信中断时采用改进二次控制各 DG 的频率、电压变化曲线

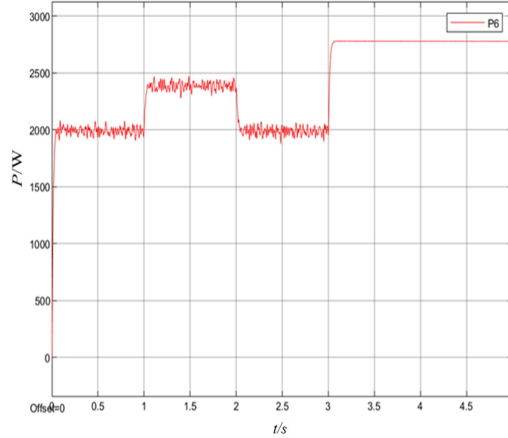
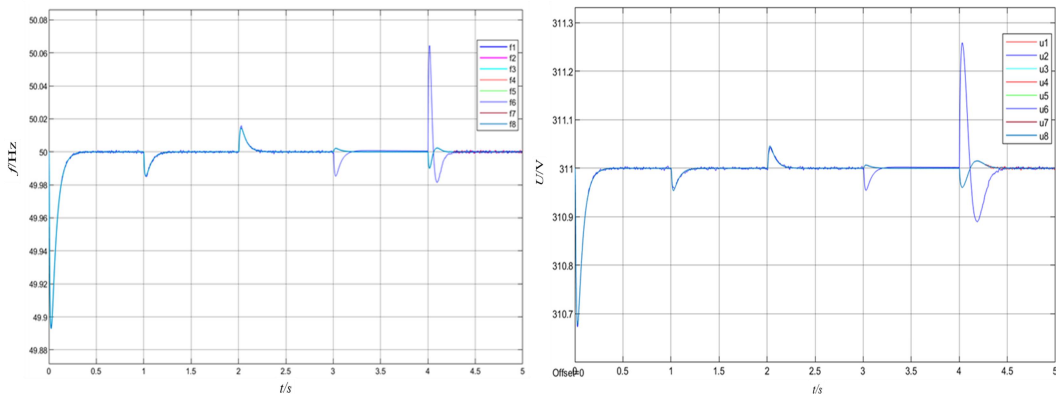


图 4-10 通信中断时 DG6 的有功出力变化曲线

由图 4-8、图 4-9 和图 4-10 可知，在 3s 前电压频率波形与 4.5.1 中一致，在 3s 时 DG6 的通信链路中断，DG6 由并网变为孤岛运行，独自承担 2.7kW 的负荷。传统下垂控制 DG6 的频率下降至 49.98Hz，电压下降至 310.94V，除 DG6 的其余 DG 频率上升至 50.004Hz，电压上升至 311.01V，经过 1.5s 后频率恢复至 50Hz，电压恢复至 311V，频率和电压出现波动，但频率和电压的变化都在误差允许的范围内。而改进二次控制 DG6 的频率下降至 49.98Hz，电压下降至 310.94V，除 DG6 的其余 DG 频率上升至 50.004Hz，电压上升至 311.01V，经过 0.75s 后频率恢复至 50Hz，电压恢复至 311V。由此可知，改进二次控制在通信中断时具有较优的电压频率恢复能力，能实现电压频率的快速恢复和稳定。

4.5.3 即插即用影响研究

为进一步验证即插即用改进二次控制的有效性。假设系统在 1s 时加入负荷 6，在 2s 时负荷 6 退出，在 3s 时 DG6 退出连接，在 4s 时 DG6 恢复连接。图 4-11 为采用改进二次控制时各 DG 的频率、电压变化曲线。图 4-12 为 DG6 的有功出力变化曲线。



(a) DG 频率变化曲线

(b) DG 电压变化曲线

图 4-11 DG6 退出和投入时各 DG 的频率、电压变化曲线

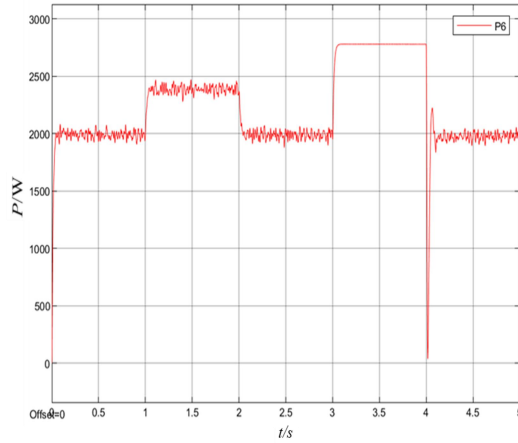


图 4-12 DG6 退出和投入时 DG6 的有功出力变化曲线

由图 4-11、图 4-12 可知，在 3s 时 DG6 退出连接，DG6 由并网变为孤岛运行，独自承担 2.7kW 的负荷，在 4s 时 DG6 投入连接，DG6 由孤岛变为并网运行，DG6 按照第三控制层的经济优化调度指令继续出力 2kW，满足经济优化运行。在 3s 时 DG6 退出连接，DG6 的频率下降至 49.98Hz，电压下降至 310.94V，除 DG6 的其余 DG 频率上升至 50.004Hz，电压上升至 311.01V，经过 0.5s 后频率恢复至 50Hz，电压恢复至 311V。在 4s 时 DG6 投入连接，电压和频率经过 0.5s 恢复至参考值。由此可知，在 DG 投入和退出时，采用改进二次控制电压和频率的动态响应速度快，响应性能优，能够实现系统的经济优化运行。

4.6 本章小节

本章首先介绍了改进牵制一致性算法，并对本章所提算法的稳定性和收敛性进行了证明，随后，深入阐述了下垂控制的基本原理以及如何构建相应的控制模型。在此基础上，研究了一种微电网的分层分布式优化控制策略。该分层分布式控制共分为三层，第一控制层是双闭环反馈的下垂控制，因系统在负荷突增、通信中断和即插即用时会发生电压频率的跌落，若不能及时实现电压频率的快速恢复和稳定，会对系统的稳定性造成影响，因此研究了微电网的二次控制。微电网的二次控制为第二控制层，针对第一控制层中频率、电压偏差的电压跌落问题，研究了一种改进牵制一致性算法，利用改进牵制一致性算法求出参考频率和参考电压，将其与实际输出频率和输出电压进行比较，计算出误差项。然后，通过 PI 控制器对误差项进行处理，生成补偿项。随后将这些补偿项输出至第一控制层，用于补偿下垂控制环节的频率和电压参数，实现电压频

率的快速恢复和稳定。第三调度层为经济优化调度层，针对有功出力的合理分配以及微电网的经济优化运行等问题，研究了一种二层邻居牵制一致性算法，利用该算法得出各 DG 的最有功出力，将各 DG 的最优有功出力应用到分层分布式控制中，从而实现微电网的经济优化运行。最后，通过算例与仿真验证了本文所提微电网分层分布式优化控制策略的有效性与优越性。

第 5 章 总结与展望

5.1 结论

为实现电压频率的优化控制、提高并网微电网系统经济优化响应速度，降低整体发电运行成本。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。研究了二层邻居牵制一致性和改进牵制一致性算法，设计了基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化调度策略和基于改进牵制一致性的并网微电网分层分布式优化控制策略，实现微电网的经济优化运行和电压频率的快速恢复。本文主要研究内容与成果阐述如下：

(1) 本课题首先介绍了微电网技术的研究背景及其重要性，接着分析了微电网控制策略和逆变器控制技术的最新研究进展，强调了并网微电网的经济优化调度、电压频率的快速恢复和稳定以及分层分布式优化控制的重要性。同时，本文还涉及了图论和多智能体系统（MAS）理论的基础知识，并深入研究了一致性理论及一致性协议。

(2) 为提高并网微电网系统经济优化响应速度，降低整体发电运行成本。提出二层邻居牵制一致性算法。该算法将 ICR 定义为状态变量，引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差，利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR，计算得到各 DG 的最优有功出力参考值，从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。算例结果表明本文提出的二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化调度方法相比传统方法具有更快的收敛速度，能实现供需平衡，系统可实现运行成本最小化等目的。本文提出的改进算法在负荷突增、分时电价、即插即用下能够高效快速地响应负荷总功率的变化，具有较优的动态和静态性能。同时研究了不同因素对经济优化调度的影响，在有功出力约束存在的情况下，各 DG 有功出力超出上下限时，被约束等于功率上下限值，以满足不等式约束，多出或减少的负荷需求在其余 DG 之间进行经济分配，实现经济运行；在满足行随机矩阵的前提下，代数连通度越高，系统的响应速度越快；在

考虑线损时，能根据线损模型参数实现各 DG 的最优有功出力，使优化结果更贴合经济性目标；在多智能体投入退出时动态响应速度快，源侧整体响应性能较优。

(3) 针对系统存在负荷变化、通信中断、即插即用等情况时，电压频率会发生跌落的问题，研究了一种改进牵制一致性算法，并证明了改进算法稳定性和收敛性。然后，基于该改进算法，研究了一种微电网分层分布式优化控制策略。该策略基于三层分布式分层架构，第一控制层为双闭环反馈的下垂控制，第二控制层为电压频率优化控制层，利用改进牵制一致性算法求出参考频率和参考电压，将其与实际输出频率和输出电压进行比较，计算出误差项。然后，通过 PI 控制器对误差项进行处理，生成补偿项。随后将这些补偿项输出至第一控制层，用于补偿下垂控制环节的频率和电压参数，实现电压和频率的快速恢复和稳定。第三调度层为经济优化调度层，采用第 3 章研究的二层邻居牵制一致性算法，计算得到各 DG 的最优有功出力参考值，随后将各 DG 最优有功出力参考值输出至第一控制层，从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目的。

5.2 展望

并网微电网的经济优化调度以及电压频率优化控制问题是具有实际意义及前景的研究方向。该方向涉及的优化目标、内容、约束条件和解决方案范围广泛。鉴于本人的知识水平和本文的研究重点，本文的研究工作还存在一些不足之处：

(1) 本文研究的荷侧系统负荷值为固定值，源侧系统为可变值。后续可研究源侧系统发电总量为固定值时，在微电网荷侧建立 MAS 并运用一致性算法实现 EVs 集群间响应功率的协调控制，提高用户电能质量的同时，优化荷侧系统的响应成本、实现荷侧系统总功率偏差快速消除等问题。

(2) 本文研究的线路损耗情况是利用公式和损耗系数来实现系统的经济优化运行，而实际情况下线损所涉及的参数较多，可以涉及计及线路损耗的自治型微电网群分布式经济控制方法，通过实现各分布式电源线损边际成本一致，来降低系统发电成本。

(3) 针对微电网经济优化调度下的时延问题，可以实施多种时延补偿技术，

并利用事件驱动机制来制定有效的时延补偿方案。具体来说，可以从以下几个层面着手：首先，通过算法层面的预测和前馈控制来补偿时延，即在算法层面，可以通过预测控制策略，提前计算并补偿可能的时延，从而提高系统的响应速度和稳定性；其次，针对硬件设备固有的时延特性进行处理，即通过优化硬件设计，减少处理和传输过程中的时延；最后，通过算法、硬件以及通信协议的综合优化来减少时延。此外，事件触发机制可以根据系统状态的实际变化来触发控制动作，而不是固定的时间间隔，这样可以减少不必要的通信和计算，从而降低时延。通过这种机制，只有当系统状态发生显著变化时才进行数据的传输和处理，这样可以有效地减少因频繁通信和计算而引入的时延。

本文在探讨微网中的分布式优化问题时，并未考虑微网内各设备相互连接的稀疏通信网络所引发的通信安全问题，分布式电源具有资源分散的特点，相应的通信网络可靠性欠佳，比较容易被攻破，如此一来，微网内的信息数据乃至配电网都有遭受攻击的风险。而关于怎样保障信息安全，以及如何保护各设备主体或者各微网主体的隐私数据，这些都是今后值得进一步深入研究的关键所在。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Lasseter R H. Smart Distribution: Coupled Microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1074-1082.
- [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] 汪超, 赵婵娟, 程志友, 等. 基于协同强化学习的微电网分布式两级电压优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 22-32.
- [5] 邓寅曦. 基于虚拟同步发电机的新能源微电网频率优化控制[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- [6] Dan W, Tang F, Dragicevic T, et al. Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids with Photovoltaic Generation and Energy Storage System[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2014, 29(4): 882-892.
- [7] 刘奕彤. 交直流混合微电网的分布式潮流计算和优化方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [8] 陈洁. 基于优化一致性算法的微电网稳定运行控制策略[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- [9] Tong Z J, Zhang C, Wu S, et al. Distributed Hierarchical Economic Optimization Approach of Microgrid Based on Multi-Agent Leader-Following Consensus[J]. Energy Reports, 2023, 9(2): 638-645.
- [10] Tong Z J, Zhang C, WU X T, et al. Economic Optimization Control Method of Grid-Connected Microgrid Based on Improved Pinning Consensus[J]. Energies, 2023, 16(3): 1203.
- [11] 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.
- [12] 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]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(07): 38-48.
- [13] 张玉芳, 赵婵娟, 程志友, 等. 考虑通信拓扑切换的微电网有限时间分布式二级控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(08): 149-159.
- [14] 李志军, 苗庆玉, 张家安. 基于虚拟领导节点改进的孤岛微电网完全分布式二次调频策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(05): 333-342.
- [15] Li Q, Chen F X, Chen M Y, et al. Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 637-649.
- [16] 张东, 卓放, 师洪涛, 等. 基于下垂系数步长自适应的下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 20-25+47.
- [17] 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(2): 112-117.
- [18] 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.
- [19] 李宇昕. 分布式与集中式储能并存的微电网负荷优化调度分析[J]. 光源与照明, 2023,

- (11): 114-116.
- [20] Albaker A, Majzoobi A, Zhao G S, et al. Privacy-Preserving Optimal Scheduling of Integrated Microgrids[J]. Electric power Systems Research, 2018, 163: 164-172.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Liu Z, Su M, Sun Y, et al. Optimal Criterion and Global/Sub-Optimal Control Schemes of Decentralized Economical Dispatch for AC Microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 38-42.
- [24] 欧阳聪, 刘明波, 林舜江, 等. 采用同步型交替方向乘子法的微电网分散式动态经济调度算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(05): 134-142.
- [25] 程杉, 魏昭彬, 赵子凯, 等. 考虑电动汽车时空接入随机性的充储电站有序充放电分散式优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(06): 28-35+44+36-38.
- [26] Luo S N, Peng K X, Hu C B, et al. Consensus-Based Distributed Optimal Dispatch of Integrated Energy Microgrid[J]. Electronics, 2023, 12(6): 1468.
- [27] Zeng S M, Wang L, Li T C, et al. Stability and Distributed Optimization for AC Microgrid Considering Line Losses and Time Delay[J]. Electronics, 2023, 12(7): 1698.
- [28] 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.
- [29] 李浩宇. 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[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.
- [30] 管俊杰, 陈根, 颜毅斌. 基于一致性算法的微电网群分布式经济调度[J]. 电工电气, 2024, (08): 64-70.
- [31] 胡南. 基于一致性算法的微电网经济调度方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [32] 许晓慧, 苏义荣, 施勇, 等. 并网运行模式下微电网能量优化调度算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(08): 117-122+128.
- [33] 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.
- [34] 王浩, 仵哲, 康博阳, 等. 考虑电动汽车和蓄电池联合储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6085-6103.
- [35] Katiraei F, Iravani M R. Power Management Strategies for A Microgrid With Multiple Distributed Generation Units[J]. IEEE Transactions on power systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [36] Li P, Zheng M. Multi-Objective Optimal Operation of Hybrid AC/DC Microgrid Considering Source-Network-Load Coordination[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7: 1229-1240.
- [37] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132+18.
- [38] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(02): 1-12.
- [39] 韩培洁, 张惠娟, 李贺宝, 等. 微电网控制策略分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 25-30.
- [40] 张项安, 张新昌, 唐云龙, 等. 微电网孤岛运行的自适应主从控制技术研究[J]. 电力系统

- 保护与控制, 2014, 42(02): 81-86.
- [41] 葛康. 主从控制微电网系统无缝切换策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [42] Nutkani I U, Loh P C, Wang P, et al. Cost-prioritized Droop Schemes for Autonomous AC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 1109-1119.
- [43] Nutkani I U, Loh P C, Wang P, et al. Linear Decentralized Power Sharing Schemes for Economic Operation of AC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 225-234.
- [44] Xin H H, Zhao R, Zhang L Q, et al. A Decentralized Hierarchical Control Structure and Self-Optimizing Control Strategy for F-P Type DGs in Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 3-5.
- [45] 苏晨, 吴在军, 周力, 等. 计及线路损耗的自治型微电网群分布式经济控制[J]. 电网技术, 2017, 41(06): 1839-1846.
- [46] 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.
- [47] Bidram A, Davoudi A. Hierarchical Structure of Microgrids Control System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [48] 孙铂皓, 汤涌, 叶林, 等. 基于分层分布式模型预测控制的多时空尺度协调风电集群综合频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(01): 155-167+330.
- [49] 周烨, 汪可友, 李国杰, 等. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 142-149.
- [50] 高扬, 艾芊. 含多微网稀疏通信优化的主动配电网分层分布式协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(04): 135-141.
- [51] 石梦璇. 基于多智能体一致性算法的微电网协同控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [52] 吴潇雨. 自主运行的互联微电网系统分层分布式控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [53] 李红. 微网群多智能体协调控制与延时补偿方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [54] 赵婵娟. 基于无线传感网络的微电网分布式协同优化控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [55] Hatziargyriou N, Asano H, Iravani R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [56] 何永菁. 基于多智能体的微网经济优化运行策略及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [57] 吕振宇. 基于 MAS 的孤立微电网分布式协同功率优化控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [58] 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, 2020.
- [59] 郑明丽. 微电网自适应下垂控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [60] 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.
- [61] 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.

- [62] 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.
- [63] Kaitlyn J B, Wayne W W. Optimal Multidimensional Droop Control for Wind Resources in DC Microgrids[J]. *Energies*, 2018, 11(7), 1818.
- [64] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(01): 72-84+344.
- [65] 代丽, 王君瑞, 谭露, 等. 基于自适应下垂控制的光储直流微网控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(08): 154-163.
- [66] Li D M, Zhao B, Wu Z J, et al. An Improved Droop Control Strategy for Low-Voltage Microgrids Based on Distributed Secondary Power Optimization Control[J]. *Energies*, 2017, 10(9): 1347.
- [67] 田春胜, 任永峰, 胡志帅, 等. 基于自恢复型下垂控制的微电网运行控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(08): 71-77.
- [68] 余志文, 艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(12): 150-156.
- [69] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17): 4397-4407.
- [70] 纪明伟, 张兴, 杨淑英. 基于电压源逆变器的微电网控制策略[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(11): 1678-1682.
- [71] 苏晨, 吴在军, 吕振宇, 等. 孤立微电网分布式二级功率优化控制[J]. *电网技术*, 2016, 40(09): 2689-2697.
- [72] 陈来军, 王余阳, 郑天文, 等. 基于一致性的并联虚拟同步发电机分布式协同控制[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(08): 1084-1091.
- [73] 涂春鸣, 杨义, 兰征, 等. 含多虚拟同步发电机的微电网二次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(10): 2186-2195.
- [74] 李斌, 周林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算法的微网逆变器二次调频方案[J]. *电网技术*, 2017, 41(08): 2680-2687.
- [75] 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.
- [76] Shahamatkhah E, Tabatabaei M. Leader-Following Group Consensus of Discrete-Time Fractional-Order Double-Integrator Multi-Agent Systems[J]. *ISA Transactions*, 2020, 106: 262-270.
- [77] Shahamatkhah E, Tabatabaei M. Containment Control of Linear Discrete-Time Fractional-Order Multi-Agent Systems with Time-Delays[J]. *Neurocomputing*, 2020, 385: 42-47.
- [78] Silva M A L, Souza S R D, Souza M J F, et al. Hybrid Metaheuristics and Multi-Agent Systems for Solving Optimization Problems: A Review of Frameworks and a Comparative Analysis[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 71: 433-459.
- [79] 杨立炜, 付丽霞, 李萍. 多智能体系统编队控制发展综述[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(24): 18-27.
- [80] 庞强伟, 朱拥勇, 陈晔, 等. 切换拓扑下多智能体时变编队控制方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2024, 32(05): 511-520.
- [81] 纪良浩. 多智能体网络的一致性问题的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- [82] 郑长兵, 庞中华, 董燕飞, 等. 复杂通信约束下网络化多智能体系统的时变编队控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3513-3520.
- [83] 夏家伟, 朱旭芳, 张建强, 等. 基于多智能体强化学习的无人艇协同围捕方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(05): 1438-1447.
- [84] Ma Z, Schultz M J, Christensen K, et al. The Application of Ontologies in Multi-Agent Systems in the Energy Sector: A Scoping Review[J]. Energies, 2019, 12:3200.
- [85] 张步云, 王晋宁, 梁定康, 等. 采用一致性算法的自治微电网群分布式储能优化控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1705-1713.
- [86] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
- [87] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95 (1): 215-233.
- [88] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time- Delays[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [89] Li L, Han Y, Li Q, et al. Event-Triggered Decentralized Coordinated Control Method for Economic Operation of an Islanded Electric-Hydrogen Hybrid DC Microgrid[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103704.
- [90] 潘欢. 二阶多智能体一致性算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [91] 赵华荣, 彭力, 吴治海, 等. 随机时延下多输入多输出多智能体系统事件触发双向编队[J]. 控制与决策, 2024, 39(04): 1251-1259.
- [92] 边晓燕, 张菁娴, 丁炆, 等. 基于 DFIG 虚拟惯量的微电网双维自适应动态频率优化控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(05): 1476-1485.
- [93] Zhou J, Kim S, Zhang H, et al. Consensus-Based Distributed Control for Accurate Reactive, Harmonic, and Imbalance Power Sharing in Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2453-2467.
- [94] Zhang Q, Li P, Yang Z. Adaptive Flocking of Non-Linear Multi-Agents Systems with Uncertain Parameters[J]. IET Control Theory Applications, 2015, 9: 351-357.
- [95] 贺杰. 面向主动配电网的电池储能即插即用与协同控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [96] Chen F, Chen M, Li Q, et al. Cost-Based Droop Schemes for Economic Dispatch in Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(1): 63-74.
- [97] 凌伟方. 计及运行成本的微网优化控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [98] 陈刚, 李志勇, 赵中原. 微电网系统的分布式优化下垂控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(8): 999-1006.
- [99] 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.
- [100] Olfati-Saber R. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [101] Qiao L, Gao W Z, Zhang H G, et al. Consensus-Based Distributed Economic Dispatch Control Method in Power Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 941-954.
- [102] 李艳梅, 任恒君, 张致远, 等. 考虑储能系统调度与风电消纳的峰谷分时电价优化模型研

- 究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4141-4149.
- [103]Wang L, An X, Xu H, et al. Multi-Agent-Based Collaborative Regulation Optimization for Microgrid Economic Dispatch under a Time-Based Price Mechanism[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108760.
- [104]Shuai H, Fang J, Ai X, et al. Stochastic Optimization of Economic Dispatch for Microgrid Based on Approximate Dynamic Programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2440-2452.
- [105]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.
- [106]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.
- [107]赵巍, 齐磊, 孙孝峰, 等. 孤岛微电网电压及频率双重优化控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(06): 1567-1576..
- [108]梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.
- [109]Jiang K, Wu F, Zong X, et al. Distributed Dynamic Economic Dispatch of an Isolated AC/DC Hybrid Microgrid Based on a Finite-Step Consensus Algorithm[J]. Energies, 2019, 12: 463.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 吴文泰, 张春, 栾惟聪, 等. 基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 73-84.
- [2] Wu W T, Zhang C, Hu T C. Fast Consistency of Second-order Multi-agent Systems based on Two-layer Neighbor Algorithm[C]. 2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Xi'an, China, 2024, 562-1567.

致谢

时光荏苒，岁月如梭，转眼间，我在研究生阶段的学习生活即将画上圆满的句号。回首这段充实而难忘的时光，心中充满了感激与感动。在论文即将完成之际，我怀着感恩的心情，向所有给予我帮助和支持的人致以最诚挚的感谢。

首先，我要向我的导师张春教授致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。导师不仅在学术上给予了我悉心的指导，更在生活中给予了我无微不至的关怀。从论文的选题、研究方法的确定，到写作过程中的反复修改，导师都倾注了大量的时间和精力。他严谨的治学态度、渊博的专业知识和敏锐的学术洞察力，让我受益匪浅，也为我今后的学术研究奠定了坚实的基础。在遇到困难和挫折时，导师总是鼓励我勇敢面对，给予我信心和力量。我将永远铭记导师的教诲，努力在未来的学术道路上不断前行。

同时，我也要感谢我的家人。是你们的理解和支持，让我能够在研究生阶段全身心地投入到学习和研究中。感谢你们在我遇到困难时的鼓励，感谢你们在我取得成绩时的骄傲。你们是我永远的坚强后盾，是我不断前进的动力。

此外，我还要感谢同窗好友欧阳昌乐、栾惟聪、胡添诚、李涛、夏祥子。在研究生的学习生活中，我们一起度过了许多难忘的时光。我们一起讨论学术问题，一起分享生活中的喜怒哀乐。你们的支持和鼓励，让我在面对困难时不再孤单。感谢你们在我需要帮助时伸出援手，感谢你们为我创造的欢乐和谐的学习环境。

最后，我要感谢所有给予我帮助和支持的人。感谢你们在我研究生阶段的每一步成长中留下的足迹。你们的帮助和支持，让我在学术的道路上更加坚定和自信。

研究生阶段是我人生中一段宝贵的经历，它不仅让我在学术上取得了进步，更让我在个人成长上收获颇丰。在未来的学习和工作中，我将带着这段经历给予我的勇气和力量，继续努力，不断前行。

尚德敏学 唯实惟新

