

分类号: TM734

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220310102



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于改进动态事件触发一致性的
直流微电网优化运行与控制

论 文 作 者	<u>欧阳昌乐</u>
指 导 教 师	<u>张春 教授</u>
学 科 (专 业)	<u>电气工程</u>
研 究 方 向	<u>微电网优化调度</u>

论文提交日期: 2025 年 5 月 8 日

分类号: TM734

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2220310102

题 目 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网优化运行与
控制

题 目 OPTIMAL OPERATION AND CONTROL OF DC
MICROGRID BASED ON IMPROVED DYNAMIC
TRIGGERED CONSENSUS

学生姓名: 欧阳昌乐

指导教师: 张春 教授

专 业: 电气工程

研究方向: 微电网优化调度

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：张阳昌东

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：张阳昌东 指导教师签名：张春

日期：2025 年 5 月 8 日

日期：2025 年 5 月 8 日

基于改进动态事件触发一致性的直流微电网优化运行与控制

摘 要

直流微电网在能源互联网中的作用至关重要，是实现智能电网、分布式能源管理及灵活调度的重要组成部分。直流微电网凭借其高效的能源传输能力、低能耗的特点、对可再生能源的兼容性以及降低系统复杂性的优势，正在逐渐成为实现能源高效利用、提高能源供应灵活性和可靠性的重要手段。传统时间触发机制按照预定的时间周期进行通信，容易造成资源浪费，且灵活性和鲁棒性差，因此，研究基于事件触发机制的直流微电网经济调度和协调控制具有重要意义。本文主要基于能源互联网背景下信息-物理系统架构(Cyber-Physical Systems, CPS)的直流微电网经济调度、电压协调控制等问题展开以下研究：

(1) 针对直流微电网系统，从网络控制和分层控制两方面进行分析，构建直流微电网 CPS 分层控制系统，主要由物理层、信息层和服务层实现直流微电网分层控制，一次控制和二次控制实现微电网电压稳定控制，三次控制实现微电网经济调度。

(2) 针对直流微电网中分布式单元通信之间存在延时、信息交换次数过多等问题，将事件触发机制(Event-Triggered Control, ETC)与一致性算法结合，提出一种基于改进动态事件触发一致性的直流微电网协调控制算法。将每个分布式单元作为多智能体，应用一致性算法

设计状态观测器，根据每个多智能体的状态信息设计事件触发条件，当满足事件触发条件时，通过网络连接的智能体进行信息交换，从而减少控制器更新次数，降低系统对网络带宽的要求。仿真结果表明，本文改进动态事件触发一致性算法与传统分布式一致性算法相比，不仅能够实现直流微电网系统的稳定，且控制器更新次数少，在各种场景下有良好的鲁棒性。

(3) 针对直流微电网分布式经济调度策略中控制系统的采样次数过多，提出基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略。将改进调度策略与拉格朗日乘子法相结合，以直流微电网中分布式单元的总发电成本最低，在满足功率供需平衡和发电容量限制的约束下，实现各分布式单元的耗量微增率相等，以及获得各分布式单元输出的功率最优值，并且大幅减少通信次数。

(4) 基于传统动态事件触发一致性的直流微电网分布式二次控制策略中存在系统在通信频率高和二次调节误差等问题，本文基于改进动态事件触发一致性算法，提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网二次控制策略，改进二次控制策略可使各分布式单元在满足触发条件时进行信息交换，在有效减少分布式单元间通信次数的同时，实现电压恢复以及有功功率的精确分配。在 Matlab/Simulink 仿真软件中建立仿真模型并进行仿真分析，仿真结果表明改进二次控制策略具有良好的动态性能。

关键词：直流微电网，多智能体一致性算法，动态事件触发机制，分布式控制，经济调度，电压恢复

OPTIMAL OPERATION AND CONTROL OF DC MICROGRID BASED ON IMPROVED DYNAMIC EVENT- TRIGGERED CONSENSUS

ABSTRACT

DC microgrids play a vital role in the energy internet, serving as an essential component for realizing smart grids, distributed energy management, and flexible dispatching. With their high-efficiency energy transmission capabilities, low energy consumption, compatibility with renewable energy sources, and the advantage of reducing system complexity, DC microgrids are increasingly becoming an important means to achieve efficient energy utilization, enhance the flexibility and reliability of energy supply. Traditional time-triggered mechanisms, which operate on predetermined time cycles, are prone to resource wastage and lack flexibility and robustness. Hence, researching event-triggered mechanism-based coordinated control methods for DC microgrids is of significant importance. This paper primarily focuses on the economic dispatch and voltage coordinated control of DC microgrids within the context of the energy internet's Cyber-Physical Systems (CPS) architecture, conducting

the following research:

(1) For the DC microgrid system, analysis is conducted from both network control and hierarchical control perspectives to construct a CPS hierarchical control system for DC microgrids. This system primarily realizes hierarchical control of DC microgrids through the physical layer, information layer, and service layer, with primary and secondary controls achieving microgrid voltage stability control, and tertiary control realizing microgrid economic dispatch.

(2) Addressing issues such as communication delays between distributed units in DC microgrids and excessive information exchanges, an event-triggered control (ETC) mechanism is combined with a consensus algorithm to propose an improved dynamic event-triggered consensus-based coordinated control method for DC microgrids. Each distributed unit is treated as a multi-agent, applying the consensus algorithm to design a state observer. Event trigger conditions are designed based on the state information of each multi-agent, allowing for information exchange among networked agents when conditions are met, thereby reducing the number of controller updates and lowering the system's demand for network bandwidth. Simulation results show that the proposed improved dynamic event-triggered consensus algorithm, compared to traditional distributed consensus algorithms, not only achieves stability in the DC microgrid system but also requires fewer controller updates and demonstrates good

robustness across various scenarios.

(3) To address the issue of excessive sampling times in the control system of distributed economic dispatch strategies for DC microgrids, an improved dynamic event-triggered consensus-based economic dispatch strategy for DC microgrids is proposed. This improved dispatch strategy is combined with the Lagrange multiplier method to minimize the total generation cost of distributed units in the DC microgrid, achieving equal incremental cost rates among distributed units and obtaining the optimal power output values for each unit under the constraints of power supply-demand balance and generation capacity limits, while significantly reducing communication frequency.

(4) Due to issues such as high communication frequency and secondary regulation errors in traditional dynamic event-triggered consensus-based distributed secondary control strategies for DC microgrids, this paper proposes an improved dynamic event-triggered consensus-based secondary control strategy for DC microgrids. This improved secondary control strategy allows distributed units to exchange information when trigger conditions are met, effectively reducing the number of communications between distributed units while achieving voltage recovery and precise allocation of active power. A simulation model is established in Matlab/Simulink for simulation analysis, with results indicating that the improved secondary control strategy exhibits

excellent dynamic performance.

Changle Ouyang(Electrical Engineering)

Supervised by_Prof.Chun Zhang

KEY WORDS: dc microgrid, multi-agent consistency algorithm, dynamic event-triggered mechanism, distributed control, economic dispatch, voltage restoration

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 直流微电网国内外研究现状	3
1.3 直流微电网事件触发控制研究现状	4
1.4 直流微电网经济调度研究现状	6
1.5 直流微电网控制策略研究现状	7
1.6 直流微电网二次控制策略研究现状	12
1.6.1 集中式控制	12
1.6.2 分布式控制	13
1.7 主要研究内容	14
第 2 章 预备知识	17
2.1 图论	17
2.2 李雅普诺夫稳定性理论	18
2.3 多智能体一致性	18
2.3.1 传统分布式一致性协议	18
2.3.2 含时延的一致性协议	19
2.4 事件触发机制	19
2.5 本章小结	20
第 3 章 改进动态事件触发一致性算法	21
3.1 传统事件触发一致性算法	21
3.2 动态事件触发机制	22
3.2.1 改进动态事件触发一致性算法	22
3.2.2 算法稳定性证明	23
3.2.3 算法避免 Zeno 行为证明	24
3.3 仿真分析	25
3.3.1 系统性能仿真分析	25

3.3.2 时延影响下鲁棒性分析	26
3.4 本章小结	27
第 4 章 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度	28
4.1 直流微电网分布式经济调度模型建立与求解	28
4.1.1 DG、储能单元以及负荷成本模型	28
4.1.2 目标函数	29
4.1.3 经济调度模型求解	29
4.2 “即插即用”时使用改进动态事件触发一致性算法性能分析	30
4.2.1 功率恒定性证明	31
4.2.2 收敛性证明	32
4.3 经济调度策略	33
4.4 仿真分析	34
4.4.1 改进经济调度策略性能研究	35
4.4.2 拓扑结构改变时系统性能研究	37
4.4.3 分布式单元“即插即用”特性研究	39
4.4.4 节约通信资源性能研究	41
4.5 本章小结	44
第 5 章 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网分布式二次控制	45
5.1 控制系统设计	45
5.2 改进二次控制策略	46
5.2.1 基于改进动态事件触发一致性的分布式平均电压观测器	46
5.2.2 改进二次控制策略	47
5.3 仿真分析	47
5.3.1 改进二次控制策略控制性能研究	47
5.3.2 改进二次控制策略控制性能对比研究	51
5.3.3 负荷波动时改进二次控制策略鲁棒性研究	54
5.3.4 DG 通信故障时算法鲁棒性研究	57
5.3.5 DG 切除投入时算法鲁棒性研究	60
5.4 本章小结	63
第 6 章 结论与展望	64
6.1 结论	64
6.2 展望	65

参考文献	66
攻读硕士学位期间的研究成果	70
致 谢	71

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着全球能源结构的快速变革以及环保政策的逐步实施,清洁能源的开发与利用成为了各国能源战略的核心内容。微电网是未来智能配用电系统的重要组成部分,对推进节能减排和实现能源可持续发展具有重要意义^[1]。《“十四五”现代能源体系规划》描绘了构建现代能源体系、推动能源高质量发展的总体蓝图:到 2035 年,中国基本建成现代能源体系,新型电力系统建设取得实质性成效^[2]。传统的集中式电力系统已经难以满足现代社会对能源供给的多样性、灵活性和高效性的需求。为此,微电网作为一种新型的电力系统架构,逐渐受到全球范围内的关注与研究^[3]。微电网通过整合分布式能源、储能系统和负荷,在局部区域内实现能源的自给自足,同时具有较高的灵活性、可靠性和经济性^[4]。然而,由于微电网具有高度的分散性、复杂的设备集成和频繁的负载变化,如何实现微电网的高效、安全运行,以及与主电网的协调与互联,成为当前亟待解决的技术难题。

微电网是由多种分布式发电单元(Distributed Generation, DG)(如光伏发电、风力发电、燃气发电等)、储能装置(如电池储能、飞轮储能等)以及负荷(如家庭用户、商业用户等)构成的小型自供电系统^[5-9]。微电网具有显著的灵活性和适应性,能够在满足本地负荷需求的同时,参与主电网的调节和稳定。然而,微电网的运行面临许多挑战,微电网的组成单元分布广泛且种类繁多,且负荷和可再生能源的供给具有高度不确定性,这种特点使得微电网的调度与控制面临着较大的困难;微电网中的电压和频率控制必须保证在多种 DG 和储能装置以及负荷之间实现平衡,尤其在微电网脱离主电网或独立运行时,电压和频率的稳定性控制至关重要^[10-11]。在微电网中,通过实时数据交换和信息共享,确保了能源系统之间的快速反应和配合,而这些系统间的通信可能会受到网络延迟、带宽限制等因素的影响^[12]。如何通过高效的通信协议进行实时协调,确保系统稳定运行,成为微电网控制的一个重要研究方向。当微电网孤岛运行时,如何在确保满足本地

负荷需求的前提下,不影响整个电网的稳定性,是微电网控制中的一大难题,微电网的分层控制策略在这一方面起到重要作用。

微电网的分层控制策略源于层次化的控制理论,目的是通过分层结构的设计,将复杂的控制问题分解为多个层次进行处理。这种方法可以有效地提高控制系统的可扩展性、鲁棒性以及适应性,特别适用于微电网这种复杂且高度动态的环境。微电网的分层控制通常分为三层:一次控制层、二次控制层和三次控制层^[13-17]。

分层控制策略能够将复杂的微电网系统问题分解为多个子问题,每个层次的控制负责不同的目标,使得控制过程更加高效和清晰。各个层次之间通过上下级的通信和信息传递实现协调与配合,从而有效提高系统的可靠性与稳定性。

微电网的控制任务具有高度的复杂性,尤其是在 DG、储能装置和负荷之间的协调问题上。分层控制策略通过将不同的控制任务分配到不同的层级,简化了控制结构,使得每个层次能够专注于自己的目标。一次控制保障了电压和频率的稳定,二次控制通过统一调度保证了各设备之间的协同工作,而三次控制则保证了系统的经济性与资源的优化利用。这样的结构设计能够提高微电网在各种运行条件下的鲁棒性和稳定性,确保系统在局部或孤岛运行状态下依然能够保持稳定^[18]。

微电网的运行环境通常具有较强的不确定性,尤其是在可再生能源波动、负荷变化及外部扰动的情況下。分层控制策略能够根据系统的不同需求,灵活调整各层次的控制策略。例如,三次控制可以在负荷变化或电力价格波动时动态调整 DG 的运行策略,而二次控制可以根据实时信息动态调整 DG 的出力。通过这种灵活的控制方式,微电网能够更好地适应环境变化,提升系统的运行效率。

传统的微电网控制方法通常依赖于集中式的控制策略,这会导致通信负担过重,尤其是在微电网规模较大、设备较多时,通信延迟和带宽需求成为了系统运行的瓶颈。而分层控制通过将控制任务分散到各个层级,减少了信息的传递路径和频率,从而降低了通信负担,提高了控制系统的效率和响应速度。

当微电网与主电网互联时,如何确保微电网的稳定运行同时不对主电网造成影响是一个重大挑战。分层控制可以通过二次控制和三次控制的策略,实时调整微电网的运行状态,使得微电网能够灵活地与主电网进行功率交换,而不影响主电网的稳定性。在微电网脱离主电网或孤岛模式运行时,分层控制又能够确保电

压和频率的稳定。

微电网分层控制策略作为一种高效、灵活的控制策略，能够有效应对微电网在运行过程中面临的复杂问题。通过合理设计和实施分层控制，可以提升微电网系统的稳定性、经济性、灵活性以及适应性，进一步推动微电网在清洁能源利用、能源独立性和智能电网建设中的应用。随着技术的不断进步，分层控制策略将在未来的微电网发展中发挥着越来越重要的作用。

1.2 直流微电网国内外研究现状

随着能源转型和智能电网的快速发展，直流微电网作为一种高效、灵活、可再生能源接入友好的电力系统，直流微电网不仅能提高能源利用效率、减少电能转换损失，还能在高比例可再生能源接入的情况下更好地实现能量管理与协调控制。因此受到了全球范围内的研究学者的广泛关注，并取得了不错的成果。

与传统交流微电网相比，直流微电网具有更高的能效、更低的能量转换损失和更好的可再生能源兼容性，尤其在电力传输和能源管理中具有显著优势。然而，直流微电网的控制面临着诸多挑战，主要包括电压和电流的稳定性、功率调度的优化、系统的协调性与鲁棒性等问题。

国外在直流微电网领域的研究较早，技术比较成熟，在欧洲、美国和日本等发达国家，直流微电网的研究重点更加注重于系统的智能化、高效化。在控制策略方面，主要研究分布式与分散式控制，更加注重直流微电网的可持续性和经济性。通过优化能量管理和运行策略，降低系统的碳排放和运行成本。国外研究机构建立了多个直流微电网实验平台和商业化示范项目，并取得了很多研究成果。例如，欧盟的“Horizon 2020”计划项目、美国的国家可再生能源实验室(NREL)和日本的东京大学等机构在直流微电网领域取得了重要成果。

与外国相比，我国在直流微电网领域的研究起步较晚，但近年来发展迅速，我国政府高度重视可再生能源和微电网技术的发展，发布的《关于推进新能源微电网示范项目建设的通知》推动了多个直流微电网示范工程的建设。我国有关直流微电网控制策略的研究早期主要采用集中式控制策略，通过中央控制器实现系统对各单元的协调控制，但在大规模系统中并不适用。近年来，分布式控制策略成为主要研究热点。通过多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)和一致性算法，

实现各单元之间的协同运行，提高了系统的可靠性和灵活性。目前清华大学、华北电力大学等多所高校和科研院所已经建立了实验型微电网平台，通过仿真与实验结合，推动了相关技术的实际应用。此外，国家电网公司和南方电网公司等电力企业也开始积极投资并开展直流微电网控制的示范项目，进一步验证控制方法的实际效果。

1.3 直流微电网事件触发控制研究现状

随着直流微电网规模的扩大以及各个分布式单元的动态变化，如何高效、稳定地控制直流微电网系统，尤其是如何减少系统对通信带宽和计算资源的依赖，成为了直流微电网研究的重要课题。传统的基于时间触发的控制方法虽然能在一定程度上实现了系统的稳定性和协调性，但往往需要频繁的控制更新和大量的信息交换，导致通信负担过重、系统效率低下。因此，事件触发控制作为一种新兴的控制方法，逐渐成为直流微电网控制中的研究热点。

事件触发控制是一种基于系统状态变化来控制单元是否动作的控制策略。与传统的时间触发控制不同，事件触发控制并不依赖于固定的时间周期来更新控制器，而是当系统的状态变化达到一定阈值时才触发事件。这种机制能够有效减少控制更新的频率，从而降低通信频次和带宽需求，减少控制计算负担，并提高系统的响应速度。

在直流微电网中，事件触发控制通常用于解决 DG、储能系统和负荷之间的协调问题。事件触发机制通过设定触发条件，根据实时的系统状态变化进行动态调整，以实现电压、电流和功率的协调控制，同时确保系统的稳定性和可靠性。

在直流微电网中，电压和功率的稳定是最基本的要求。传统的时间触发控制方法通常会在固定的时间间隔进行控制更新，这在负荷波动较大或可再生能源输出变化时，可能导致系统频繁进行控制更新，进而增加通信和计算负担。为了解决这一问题，事件触发控制被引入到电压和功率控制中。当系统的电压或功率误差超过设定阈值时，控制器才会进行更新，从而避免了不必要的信息交换。

通过事件触发机制，微电网中的每个 DG 能够根据其状态信息自适应地调整输出功率，而不需要每次都进行全局控制。这种基于事件的控制方法能够有效减少计算和通信资源，提高直流微电网的效率和响应速度。

在直流微电网的分布式控制中，一致性算法通常用于确保各个 DG 之间的协调控制。事件触发控制与一致性算法相结合，能够在保证系统稳定性和协调性的前提下，减少信息交换频率，提高系统效率。

近年来，事件触发控制在直流微电网中的研究取得了显著进展。主要的研究方向包括事件触发控制的稳定性分析、优化调度与控制算法的设计以及系统鲁棒性和适应性等问题。

事件触发控制的稳定性分析是当前研究的热点之一。由于事件触发控制在实际应用中涉及到非连续性控制和时变控制等问题，如何保证系统在事件触发条件下的稳定性成为了一个关键课题。研究者们通常通过构造 Lyapunov 函数、马尔科夫过程等方法对事件触发控制系统的稳定性进行分析，确保直流微电网在实际运行过程中能够稳定地调节电压、电流和功率。

Girard 等人将事件触发机制与一致性算法相结合，通过节点的状态信息，设计了多种触发条件，实现多智能体在不同事件触发条件下收敛一致^[19-21]。杨大鹏等人证明了基于事件触发机制多智能体一致性算法的稳定性，并对设计的事件触发条件进行数学分析，证明了事件触发机制在多智能体一致性算法中的可行性^[22]。文献[23]为节省网络攻击下的通信资源，采用基于事件触发的固定时间滑模控制方法，有效抑制了恒功率负载扰动对直流微电网造成的影响。文献[24]通过将事件触发和间歇控制相结合，设计了事件触发的直流微电网非周期间歇控制方案，以实现稳定直流微电网的同时降低系统的控制率。文献[25]针对直流微电网集群控制存在通信资源浪费的问题，提出了基于事件触发机制的直流微电网集群改进分布式控制。文献[26]围绕直流微电网母线电压恢复和 DG 功率分配问题，提出了基于边沿的事件触发机制，对系统的控制策略、采样触发机制以及系统稳定性的判别等方面展开研究。文献[27]为解决直流微电网系统网络负载大，通讯效率低的问题，引入一种新型事件触发机制，能更高效地使用网络资源，有效地减少了网络负载。文献[28]基于等微增率准则和事件触发机制提出一种低通信代价的分布式经济调度策略，通过控制策略的自适应平滑切换，在最小化通信冗余度的情况下维持系统功率的动态平衡，恢复母线电压，提高电能质量。文献[29-32]研究了事件触发机制在微电网系统中的经济分配问题，并分析了基于事件触发机制的一致性算法在微电网系统中的稳定性问题。

尽管事件触发控制在直流微电网中的应用取得了积极进展,但仍面临一些挑战。首先,事件触发控制的阈值选择仍然是一个关键问题。阈值选择过大可能导致系统响应迟缓,而阈值过小则可能增加通信和计算负担。其次,事件触发控制需要在保证系统稳定性和鲁棒性的基础上,设计合理的调度策略,以应对系统中各个 DG 和储能设备的动态变化。最后,如何结合实际应用场景,设计更具实用性的事件触发控制算法,仍是亟待解决的问题。为此,许多学者在事件触发机制的基础上进行改进,提出了一种动态事件触发机制,通过设计中间变量,使事件触发条件根据节点的信息动态变化,从而大幅节约通信资源。文献[33-36]针对静态事件触发机制中存在全局信息以及无法实现完全分布式控制等问题,提出一种基于动态事件触发机制的一致性协议,显著地减少了系统的触发次数,降低了系统的能耗。文献[37-38]将动态事件触发机制应用到直流微电网控制中,用来解决在微电网控制中存在数据冗余和通信资源浪费等问题,这种方法可大幅减少 DG 之间的通信次数,节约通信资源。

事件触发控制为直流微电网的高效运行提供了一种新颖的控制方法。通过减少控制更新频率和信息交换次数,事件触发控制能够有效降低通信负担,提高系统效率。然而,如何进一步提高事件触发控制的鲁棒性、适应性以及优化调度的效率,仍是未来研究的关键挑战。随着智能化控制技术的不断进步,事件触发控制将在直流微电网中发挥越来越重要的作用。

1.4 直流微电网经济调度研究现状

直流微电网的经济调度主要依赖于最优化算法,尤其是一致性算法。这些方法结构简单、实现容易,能够有效地实现功率基本调节。然而,面对负荷波动和可再生能源波动等复杂情况,经典方法的适应性有限,因此需要结合更先进的经济调度算法。

为了提高系统的灵活性和鲁棒性,越来越多的系统采用分布式控制和 MAS。在这种方法中,每个 DG 被视为独立的智能体,利用局部信息交换来协调全局系统。通过一致性算法等方法,各智能体能够自主调整功率输出,实现系统的协调控制。该方法降低了对中央控制的依赖,提高了系统的可扩展性和容错性。

Olfati-Saber 等人首次将 MAS 与一致性算法相结合,并将其应用到微电网控

制中,将微电网中的每个 DG 作为智能体^[38-39]。文献[40-46]将多智能体一致性算法用于解决微电网经济调度问题。谢俊等人为解决微电网经济调度问题中的电力元件“即插即用”技术要求,提出了一种电力系统分布式经济调度策略^[47]。王力等人针对孤岛微电网因功率不平衡导致系统存在失稳的问题,提出了基于 PI 一致性算法的分布式经济调度方法,使各 DG 仅需本地和相邻单元信息,实现有功功率的合理分配^[48]。吴文泰等人为提高并网微电网系统经济优化响应速度,提出了一种二层邻居牵制一致性算法,能使微电网快速达到经济优化状态^[49]。翟镇等人为实现直流微电网多储能单元的荷电状态快速一致,负荷功率合理分配,提出了一种基于一致性算法的直流微电网分布式调度策略,可使每个储能单元输出最优功率^[50]。程勇等人针对现有微电网分布式二次控制器的收敛速度问题,提出了一种基于自适应有限时间的分布式二次控制,从而加快二次控制的速度^[51]。彭子韵等人提出了一种基于固定时间滑模的直流微电网系统一致性控制方法,用于解决直流微电网调度等问题^[52]。肖蕙蕙等人为解决由于线路阻抗不匹配导致电源输出功率无法按容量分配等问题,提出了一种采用一致性算法调节虚拟阻抗的分布式控制策略,所提策略不需要了解线路阻抗值信息,仅需要邻近 DG 的功率信息就可以对虚拟阻抗进行自适应调节,实现功率的精准分配^[53]。文献[54-60]主要研究了一致性算法在直流微电网功率优化以及经济调度中的稳定性问题。

尽管直流微电网的经济调度方法已有很多研究进展,但在实时性、鲁棒性、协调性等方面仍面临许多挑战。随着直流微电网规模的扩大,如何提升经济调度策略的效率、减少计算负担,并增强系统对外部扰动的适应能力,仍然是未来研究的重点。

1.5 直流微电网控制策略研究现状

在直流微电网中,控制策略的设计需要考虑电压稳定、功率调度、系统协调和故障保护等多重需求。为了有效应对这些挑战,控制策略可以根据系统结构和控制要求的不同,采用不同的控制架构^[61]。主从控制、对等控制和分层控制是常见的三种控制策略,它们各有特点,并在直流微电网中得到了广泛的应用。

(1) 主从控制

主从控制是一种经典的集中式控制策略,其中控制系统被划分为一个主控制

单元和多个从控制单元。主控制单元负责全局的电力调度与协调，而从控制单元则依据主控制单元的指令进行局部控制。在直流微电网中，主从控制通常用于协调多个 DG、储能设备和负荷的功率输出，确保系统的功率平衡与电压稳定^[62]。主控制器负责全局的功率调度、电压调节和微电网与外部电网的交互。主控制器通常通过优化算法（如线性规划、遗传算法等）确定每个 DG 和储能设备的功率输出，以实现系统的经济调度和全局电压控制。从控制器负责执行主控制器下达的指令，并调整局部的功率输出，确保电压稳定和负荷的供给。它可以是具体的 DC-DC 变换器、逆变器等设备的控制单元^[63]。

（2）对等控制

对等控制是一种分布式控制策略，微电网中的各个控制单元不依赖于中央控制器，而是通过局部信息交换进行协调。每个控制单元既是“主”又是“从”，通过自主的计算和信息共享来达到全局协调的目的。在对等控制中，系统中的各个控制单元通过局部的交流和协作来实现功率平衡和电压稳定。每个智能体都有自己的控制器，能够基于局部的状态信息和系统需求，通过与其他控制单元的信息交换来调整输出功率。控制单元之间的合作确保了全网的电压稳定和功率平衡。与主从控制不同，对等控制不依赖于单一的主控制器。每个控制单元之间通过一致性算法或协议进行协调，实现分布式的控制^[64]。

（3）分层控制

直流微电网 CPS 分层控制系统主要由物理层、信息层和服务层实现直流微电网分层控制。图 1-1 是一种典型的直流微电网 CPS 架构。

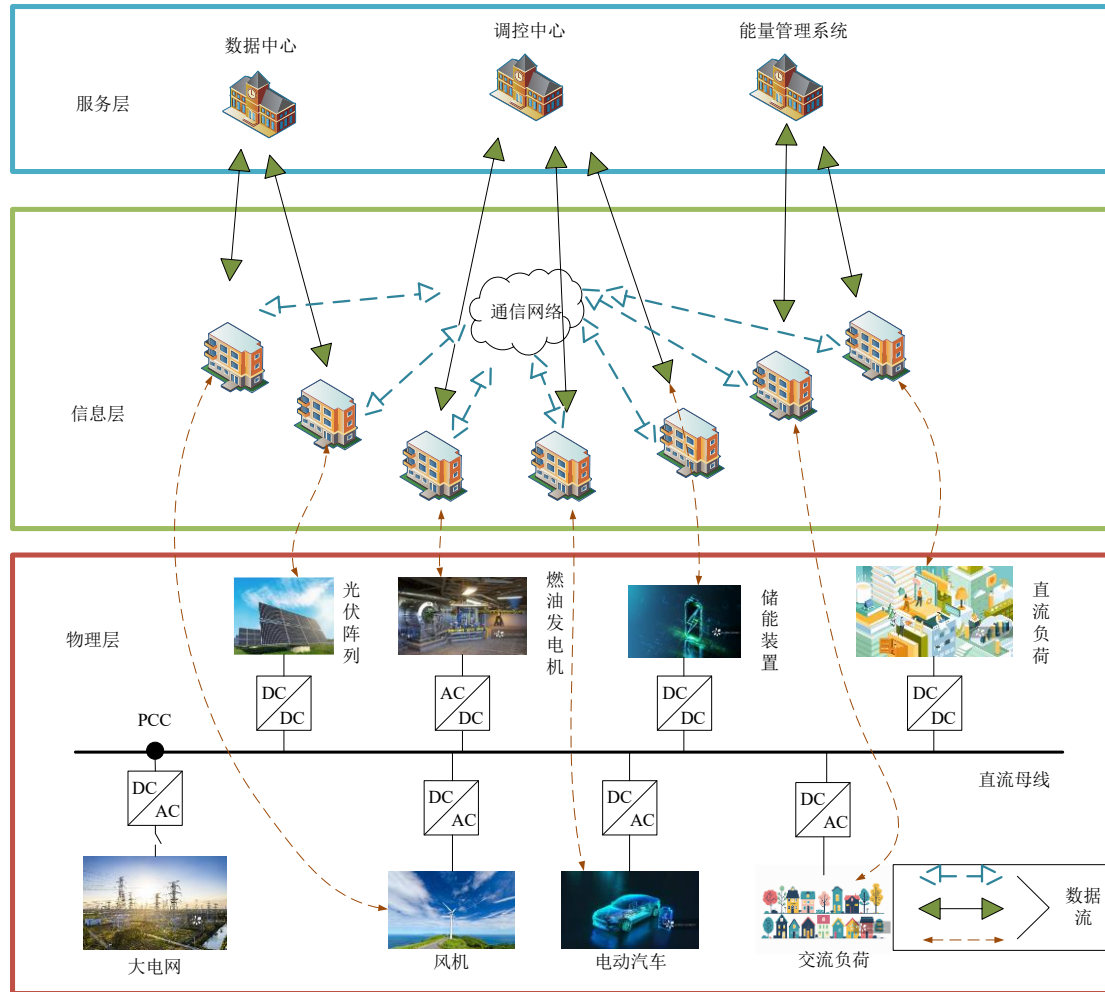


图 1-1 直流微电网 CPS 架构

每一层功能如下：

- （1）物理层：包含光伏阵列、风机、燃油发电机、储能装置以及负荷等。并根据实际需要进行并离网切换。物理层中 DG 以及储能装置接受信息层下达的指令，实现对直流微电网输出电压以及输出功率的调节，从而维持系统稳定运行。
- （2）信息层：包含通信线路组成的通信网络，用于物理层中的装置进行信息交换。通信网络通常采用有线或无线的方式进行系统运行数据和指令的传输。
- （3）服务层：包含数据中心、调控中心和能量管理系统。数据中心用于存储直流微电网实时运行数据，为直流微电网运行提供数据参考。调控中心根据直流微电网系统运行状态进行实时调控。能量管理中心根据运行数据，对 DG 输出功率进行调节，实现经济效益最大化。

分层控制是一种常用于复杂系统中的控制策略，特别是在直流微电网中，它将控制任务分成多个层次，通过不同层次之间的协作和信息传递来实现系统的协调与优化^[65]。典型的分层控制体系包括三个层次：主控制层、中间控制层和局部

控制层。主控制层（三次控制）负责全局调度、优化和协调。该层通常处理系统的功率平衡、电压控制和与外部电网的交互。主控制层通过优化算法或控制策略，确定系统整体的运行目标，并为下层控制提供参考信号。中间控制层（二次控制）负责局部功率调度和电压控制。该层通过调节 DG 和储能装置的功率输出，保证系统局部区域的电压稳定和功率平衡。中间控制层通常实现电压调节、功率协调等任务，并根据主控制层的指令进行优化调整。局部控制层（一次控制）直接控制每个 DG 和负荷。局部控制器负责设备的实时控制，通过电力电子装置（如 DC-DC 变换器、逆变器）来调节功率和电压。一次控制也负责实时监测系统状态，确保系统的稳定运行^[66-67]。直流微电网分层控制架构如图 1-2 所示。

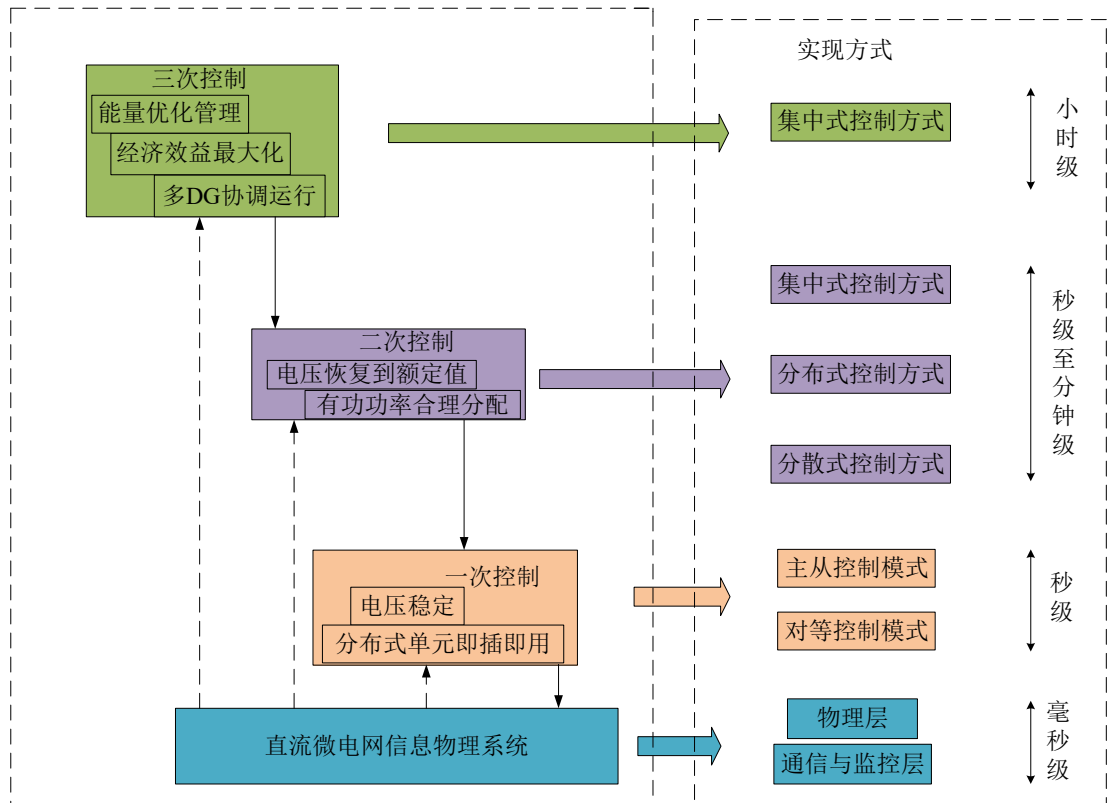


图 1-2 直流微电网分层控制架构

直流微电网是一种集成了可再生能源、储能系统、电力电子设备和负荷的局部电力系统。为了高效、稳定地控制直流微电网，通常采用分层控制架构。分层控制架构可以帮助实现不同控制目标，保障微电网的安全、可靠和灵活运行。常见的直流微电网分层控制架构通常包括以下几个层次：

(1) 局部控制层(Primary Control Layer)

局部控制层即一次控制，主要负责微电网实时、局部控制任务，确保系统稳

定运行^[68]。主要包括：

- 1) 电压控制：通过控制电源的输出电压来保证微电网的电压稳定。
- 2) 电流控制：对于电源系统，确保电流在安全范围内，防止过载或过电流。
- 3) 功率共享：DG 通过功率共享算法来合理分配负荷需求。

该层的控制通常是局部的、直接的控制，不考虑系统的长时间动态优化或协调。主要采用 PID 控制等简单控制方法。

(2) 中间控制层(Secondary Control Layer)

中间控制层即二次控制，主要负责微电网的全局协调，优化各个局部系统的运行，确保系统的全局性能^[69]。对于直流微电网来说，主要包括：

- 1) 电压调节：通过控制系统中的电压、负荷分配等参数，确保系统在动态范围内保持稳定。
- 2) 功率调度：通过对各个电源进行优化调度，提升系统的能效，并确保可再生能源的合理利用。

二次控制通常通过中央控制器来实现，需要考虑系统的状态并通过预测来优化决策。

(3) 主控制层(Tertiary Control Layer)

主控制层即三次控制，主要处理微电网在长期运行中的优化问题，如经济调度、负载预测、系统长期运行稳定性等^[70]。主要包括：

- 1) 经济调度与优化：通过负荷需求和优化算法来优化系统运行，以降低运行成本，提高效率。
- 2) 能源管理：通过更高层次的能源管理，确保 DG 的功率输出与负荷需求功率供需平衡。
- 3) 系统故障与恢复策略：优化系统的应急响应和恢复计划，保障系统在出现故障时能够快速恢复到安全运行状态。

(4) 通信与监控层

通信与监控层主要负责微电网各个部分之间的通信与信息交换，确保各控制层之间的信息流通与同步。主要包括：

- 1) 实时监控：监控微电网的状态，包括电压、电流、功率状态等。
- 2) 数据传输：通过各种通信协议（如 Modbus、CAN、Ethernet）进行数据

交换。

3) 故障诊断：当系统出现异常时，监控层能够快速检测并上报信息，辅助故障恢复。

以上各层级之间需要协同工作。一次控制对局部设备的控制是自动的，只有在二次控制和三次控制的领导下，才能实现全系统的优化，并进行实时调节，通信与监控层作为信息交换的纽带，确保了各层之间的数据交互。能够针对不同的操作需求，动态调整控制策略，并方便根据微电网规模的扩展进行分层控制架构的调整。

根据上述介绍，表 1-1 中给出了 3 种控制策略的优缺点。

表 1-1 3 种控制策略的优缺点

控制策略	特点	优点	缺点
主从控制	集中式控制，主控制单元全局调度，从控制单元局部执行	全局协调能力强，简化信息交互	集中式决策可能成为瓶颈，主控制单元故障可能导致系统失效
对等控制	分布式控制，各控制单元通过信息交换协作	强鲁棒性、可扩展性、自适应能力强	设计复杂，依赖于控制单元的計算和通信能力
分层控制	分为多个层次，层次间通过协调和优化实现系统控制	可管理性强、灵活性高、系统性能较好	需要多层次协调和信息传递，实时性要求高

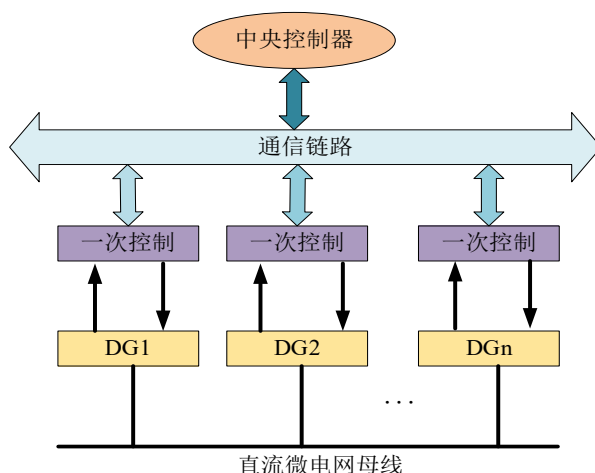
1.6 直流微电网二次控制策略研究现状

直流微电网由于其高效性和适应分布式能源的特点，已成为现代能源系统的重要组成部分。相比一次控制，二次控制更关注全局协调和系统优化，弥补一次控制的不足，确保微电网的长期稳定运行和高效利用。通常采用的策略有两种，一种是集中式控制，另一种是分布式控制。

1.6.1 集中式控制

直流微电网集中式控制框图如图 1-3 所示。集中式控制是依赖中央控制器对整个微电网各个部分进行统一调度和优化的控制策略。中央控制器负责采集各部分的实时数据，并分析做出决策，从而调节系统的运行状态，主要对一次控制产生的偏差进行调整，并将信号通过通信网络传输到一次控制层，将电压恢复到额

定值，达到功率供需平衡的目的。



集中式控制高度依赖通信网络的可靠性，在规模较大的微电网中，通信网络的延迟或中断可能导致控制信息的丢失和延迟，进而影响系统性能。中央控制器一旦发生故障，可能导致整个直流微电网控制系统瘫痪。

1.6.2 分布式控制

分布式控制策略在直流微电网中的应用尤为重要，在面对多个 DG 共同协作时可以有效调节电压、电流和功率输出。分布式控制不仅能减少单点故障的风险，还能提高系统的灵活性和鲁棒性。分布式控制策略是一种基于局部信息交换的控制策略，保证微电网中各个控制器在不依赖全局信息的情况下，每个 DG 可以通过网络连接的相邻单元的信息调整自身输出，从而实现全局目标，如功率调节、电压恢复等。直流微电网分布式控制框图如图 1-4 所示。

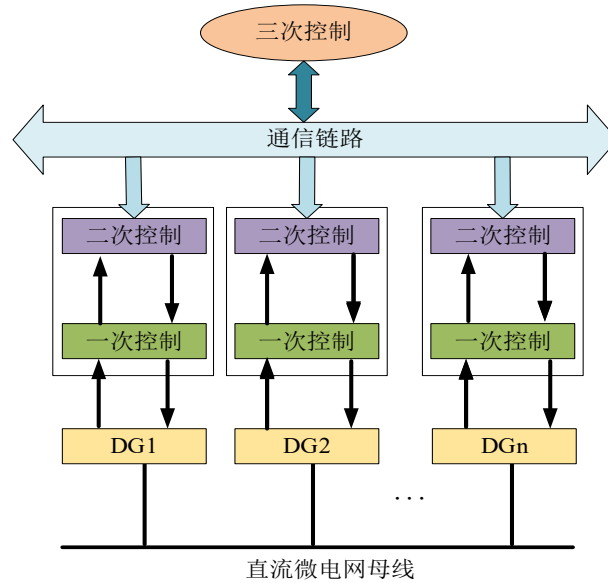


图 1-4 直流微电网分布式控制框图

分布式控制相较于集中式控制的最大优点在于不需要中央控制器，这使得系统更加可靠、灵活且具有更高的鲁棒性。通过将控制任务分散到各个独立的控制单元，分布式控制能有效避免单点故障的风险，减少通信负担，并提高系统的响应速度和适应能力。同时，分布式控制能够在大规模系统中灵活扩展，适应不同的负荷波动，且不依赖于中央控制器，降低了基础设施和维护成本。因此，分布式控制在微电网和分布式能源系统中能够更好地应对复杂环境，提升系统稳定性和能源效率。

1.7 主要研究内容

本文主要基于直流微电网经济调度以及分布式二次控制策略进行研究。首先，针对不同的研究对象建立 MAS 模型，通过运用事件触发一致性算法对问题进行求解，并根据不同的控制目标，对算法进行改进，提出了一种基于改进动态事件触发一致性算法，通过李雅普诺夫稳定性理论对改进算法的收敛性和稳定性进行分析。在此基础上，提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略与二次控制策略。通过仿真实验可知，所提改进策略在满足直流微电网供需平衡、功率合理分配、经济调度以及电压恢复等要求的同时，可大幅降低 DG 间的通信频率，节约通信资源。本文主要研究内容为：

(1) 对本课题的研究背景及意义进行阐述，分析了直流微电网、直流微电网事件触发控制、直流微电网经济调度、直流微电网控制策略以及直流微电

网二次控制的研究现状，并突出了事件触发机制在直流微电网控制中的必要性。

(2) 引入图论、李雅普诺夫稳定性理论、多智能体一致性算法等预备知识，并介绍了事件触发一致性算法，为后续研究奠定基础。

(3) 针对直流微电网系统中存在通信延时、通信频率次数过多等问题进行研究，在事件触发机制基础上，对算法进行改进，提出一种基于改进动态事件触发一致性算法（以下简称“改进算法”），采用李雅普诺夫理论分析了改进算法的稳定性，证明了改进算法能够避免芝诺现象。为验证改进算法的优越性，本文将其与传统分布式一致性算法进行仿真对比，且在考虑延时影响下对两种算法进行性能比较，进一步证明本文改进算法的优势，为直流微电网经济调度与控制研究提供了理论基础。

(4) 建立以直流微电网系统 DG 总发电成本最低为目标函数的经济调度模型。提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略（以下简称“改进调度策略”），分析了改进调度策略在“即插即用”工况下的功率恒定性和收敛性。并研究了改进调度策略在不同实验场景下的有效性。

(5) 针对分布式二次控制中母线电压跌落以及系统抗干扰性能进行研究，结合经济调度问题，设计了基于改进动态事件触发一致性的分布式平均电压观测器，并基于该观测器提出一种基于改进动态事件触发一致性的二次控制策略（以下简称“改进二次控制策略”）。该策略可在实现母线电压恢复的同时，实现了经济调度，降低了通信频率，达到节约通信资源的目的。通过在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建相关仿真模型，通过仿真实验对比验证改进二次控制策略的有效性和优越性。

(6) 对全文内容进行梳理和总结，并对未来工作进行展望。

图 1-5 为基于改进动态事件触发一致性的直流微电网优化运行与控制流程图，介绍了本文主要研究内容。

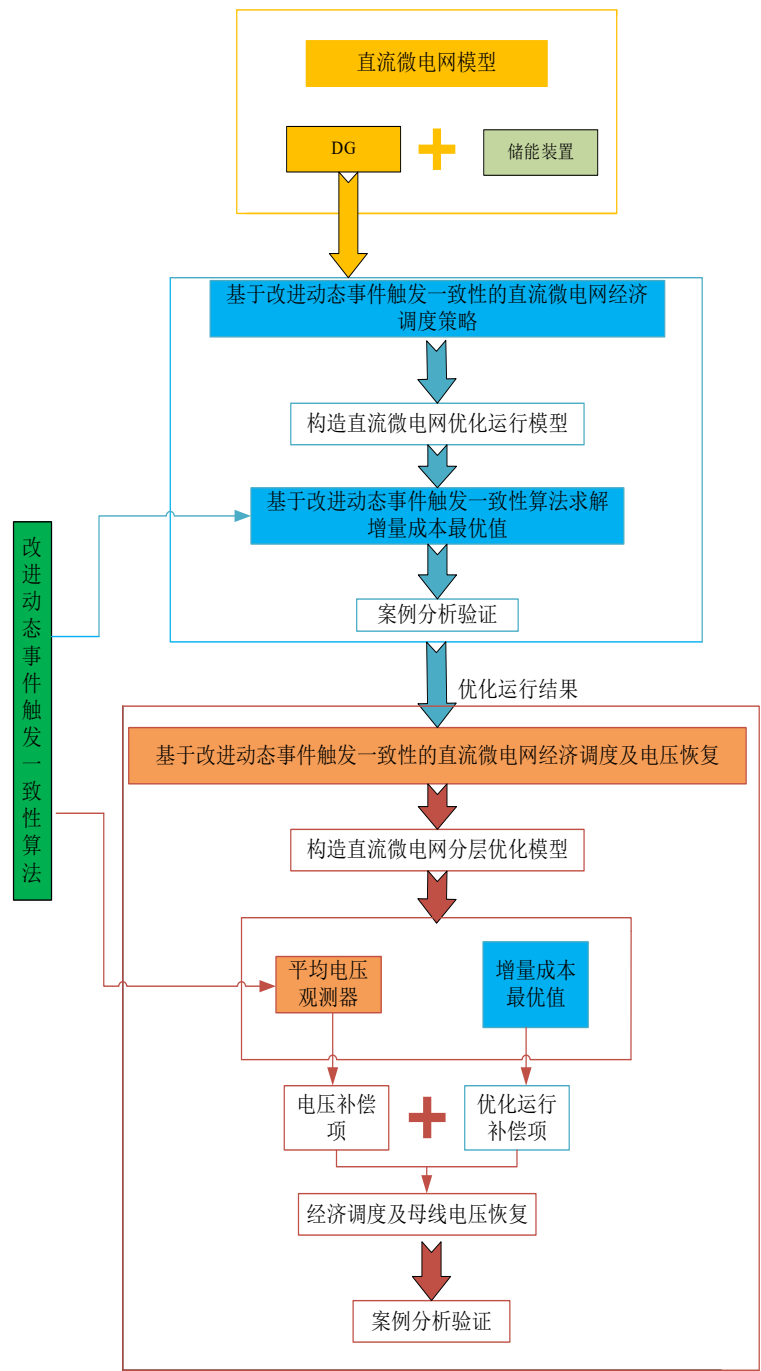


图 1-5 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网优化运行与控制流程图

第 2 章 预备知识

2.1 图论

如图 2-1 所示，令 G 表示 5 节点 MAS 的网络拓扑， $G=(V, E, A)$ ，其中 V 是图 G 中所有顶点的集合，是一个有限的非空集合，称为顶点集， $E \in V \times V$ 为边集， $A=\{a_{ij}\}$ 为邻接矩阵， a_{ij} 是指顶点 i 、 j 的权重， $a_{ii}=0$ ，且 $a_{ij} \geq 0$ ($i \neq j$)，如果 $(i,j) \in E$ ，则称 i 、 j 是连通的，即 i 能接收到 j 的信息，此时 $a_{ij} > 0$ ，否则 $a_{ij} = 0$ 。若任意两点间均是连通的，则称 G 是连通的，特别地，对于无向图来说， (i,j) 等价于 (j,i) ，即 $a_{ij} = a_{ji}$ 。因此，定义顶点 i 的邻居集合为 $N_i = \{j \in V; (i,j) \in E\}$ ，令 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 为顶点 i 的入度，则 G 的拉普拉斯矩阵定义为 $L = D - A$ ，其中度矩阵 $D = \text{diag}\{d_i\}$ 。

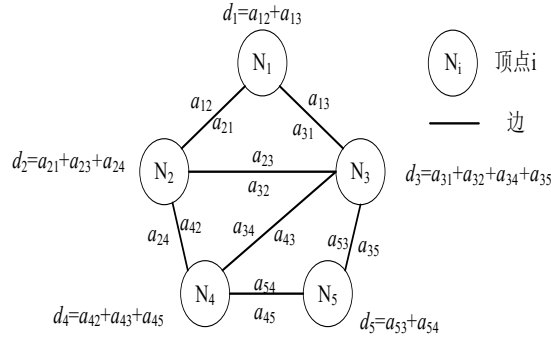


图 2-1 五节点系统网络拓扑图

令各顶点的权重为 1，即 $a_{ij}=1$ ，由上述图论知识和矩阵基础可以得到邻接矩阵 A 、度矩阵 D 和拉普拉斯矩阵 L ，即，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}。$$

通信网络的代数连通度决定了一致性算法的收敛速度，代数连通度越大，一致性算法的收敛速度越快。而且，通信网络的代数连通度越大，DG 间的通信频率更低，状态达成一致需要的通信量更少。

2.2 李雅普诺夫稳定性理论

李雅普诺夫 (Lyapunov) 理论是一种用于研究非线性系统稳定性的重要数学工具, 广泛应用于控制理论、动力系统和工程领域, 李雅普诺夫稳定性分析基于一个核心思想, 即通过构造一个李雅普诺夫函数, 类似于能量函数, 用来判断系统的稳定性。

定义系统状态方程如式(2-1)所示:

$$\dot{x} = f(x), \quad x \in R^n, \quad f(0) = 0 \quad (2-1)$$

存在一个 Lyapunov 函数 $V(x)$, 使得:

(1) 正定性: $V(x) > 0$, 对于所有 $x \neq 0$, 且 $V(0) = 0$ 。

(2) 负定导数: $V(x) = \frac{dV}{dt} = \nabla V \cdot f(x) \leq 0$ 。

则平衡点 $x=0$ 是 Lyapunov 稳定的, 即初始状态靠近平衡点, 则系统状态会达到稳定。如果进一步满足严格负定性, 即 $\dot{V}(x) < 0$ 且所有 $x \neq 0$, 则系统不仅稳定, 且其状态也会逐渐趋于平衡点 $x=0$, 则平衡点处是渐近稳定的。如果 $x \rightarrow \infty$ 时, $V(x) \rightarrow \infty$, 且 $\dot{V}(x) < 0$, 则系统是全局渐近稳定的。

Lyapunov 方法的关键是构造一个合适的 Lyapunov 函数, 常选取二次型函数用于稳定性分析。二次型函数为:

$$V(x) = x^T P x \quad (2-2)$$

式中, P 为正定矩阵。

2.3 多智能体一致性

2.3.1 传统分布式一致性协议

考虑一组由 n 个具有一般线性动态的智能体组成的 MAS, 第 i 个智能体的动力学方程为:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (2-3)$$

式中, $x_i(t) = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$ 为智能体的状态向量; $u_i(t)$ 为控制输入向量。

智能体之间的通信拓扑由一个图 G 来描述。通常考虑分布式协议：

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) \quad (2-4)$$

式中， a_{ij} 是智能体 i 和智能体 j 的邻接权值。

2.3.2 含时延的一致性协议

考虑 MAS 在实际运行中存在通信时延和自身控制时延的影响，引入包含时延的一致性协议，其方程为：

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ii})] \quad (2-5)$$

式中， τ_{ij} 为智能体 i 和智能体 j 之间的通信时延； τ_{ii} 为智能体 i 自身的控制时延。

2.4 事件触发机制

在现有的分布式控制中，通常采用周期性采样的控制方式，即在每个迭代时间点都进行采样。然而，在实际微电网运行中，采用周期性采样方式会造成大规模通信资源浪费，占用通信网络带宽，增加成本。针对这种问题，事件触发机制逐渐应用在微电网中。该机制可在满足事件触发的条件所对应的迭代时间点进行采样，从而可实现利用更少的通信资源来对微电网进行稳定控制。

事件触发机制的原理，就是保证微电网系统运行稳定的前提下，在算法进行迭代计算时，设置相关的事件触发条件，当系统状态满足设定的条件时，控制器就会接收信号，当系统状态不满足设定的条件时，则控制器接收不到信号，且保持在上一个满足设定条件的状态，与周期性采样的时间触发控制相比，事件触发控制可以减少控制器更新的次数，具有节约通信资源等优点。事件触发机制框图如图 2-2 所示。

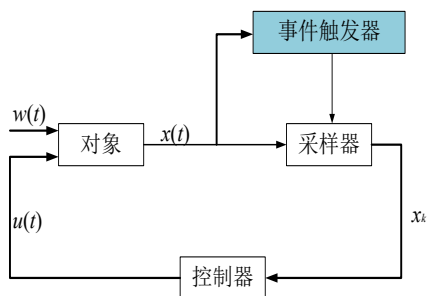


图 2-2 事件触发机制框图

图中， $x(t)$ 为系统的状态向量， $u(t)$ 为控制输出向量， $w(t)$ 为外部干扰向量， x_k 为满足事件触发条件的状态向量。由图可知，事件触发器设定一个事件触发条件，当系统的状态向量满足事件触发条件时，事件触发器更新其状态，并经采样器将更新后的状态向量发送给控制器进行下一次循环。如果系统的状态变量不满足事件触发器设定的条件时，则不会更新其状态，继续发送上一次的输出。

2.5 本章小结

本章首先阐述了图论、李雅普诺夫稳定性理论、多智能体一致性算法以及事件触发机制等预备知识，并介绍了时延影响下的分布式一致性算法和事件触发机制原理，为后续研究奠定基础。

第3章 改进动态事件触发一致性算法

直流微电网分布式控制旨在通过在各个分布式单元之间分配控制任务,实现分布式单元的协调控制,减少对中央控制器的依赖,提高系统的灵活性和鲁棒性。当前,多智能体一致性算法得到大量研究,但是这种周期性采样的控制方式会产生许多不必要的采样信号,从而浪费大量通信资源。因此,许多学者将事件触发机制与一致性算法相结合,旨在减少这些无用的采样信号,降低系统对通信资源的要求,节约成本。但是,传统的事件触发机制并不能最大限度地减少通信资源,为此,本章针对直流微电网系统中存在通信延时、高采样率等问题,提出一种改进动态事件触发一致性算法。首先,根据分布式单元的状态信息设计事件触发条件,并引入动态中间变量,可使分布式单元在满足事件触发条件时进行通信,能大幅降低分布式单元之间的通信次数,然后,通过 Lyapunov 方法分析该算法的稳定性,证明了本文改进算法不会有 Zeno 行为。最后,通过仿真实验验证了本文改进算法的有效性,相较于传统分布式一致性算法,本文改进算法的收敛速度快,节约通信资源,为后续经济调度策略和二次控制策略设计提供算法基础。

3.1 传统事件触发一致性算法

为了达到一致, MAS 需要邻居的连续状态信息,然而,在实际应用中连续通信通常是不切实际的。受 MAS 事件触发机制思想的启发,一些学者提出如下传统事件触发一致性算法。设分布式协议为:

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_{k_j}^j) - \mathbf{x}_i(t_{k_i}^i)) \quad (3-1)$$

式中,分布式单元 j 的触发时刻 $k_j(t) = \arg\max_k \{t_k^j \leq t\}$ 。

随着触发时刻 $\{t_k^j\}_{k=1}^{\infty}$ 递增,此算法只作用在触发时刻,在相邻的两个触发时刻之间状态保持不变。令 $\hat{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{x}_i(t_{k_i}^i)$,则状态测量误差 $\mathbf{e}_i(t) = [\mathbf{e}_1(t), \dots, \mathbf{e}_n(t)]^T = \hat{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{x}(t)$,式(2-4)可写为 $\dot{\mathbf{x}}(t) = -\mathbf{L}\hat{\mathbf{x}}(t) = -\mathbf{L}(\mathbf{x}(t) + \mathbf{e}(t))$ 。事件触发条件可以描述为:

$$f_i(t, e_i(t)) = \begin{cases} e_i(t) & \text{if } e_i(t) > c_1 e^{-\alpha t} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, $f_i(t, e_i(t))$ 是关于时间 t 和状态误差 $e_i(t)$ 的阈值函数; $c_1 > 0$; α 为一个待确定的正常数。

在事件触发一致性控制下, 每个智能体的控制器连续监测其自身的状态。当智能体 i 的状态测量误差超过一个给定的阈值时, 即 $f_i(t, e_i(t)) > 0$, 智能体 i 触发一次事件, 并更新其状态, 将当前状态信息传递给它邻居智能体。同时智能体 i 的状态测量误差设置为 0。如果状态测量误差小于或等于 0, 相邻智能体之间一直到下次事件触发之前都不会进行通信。

3.2 动态事件触发机制

动态事件触发机制就是在传统事件触发机制的基础上, 在触发条件上增加一个内部动态变量, 该变量可根据某一触发时刻的状态输出与上一触发时刻的状态输出的差值进行动态变化。与传统事件触发机制相比, 动态事件触发机制在保证系统稳定性的前提下, 能更少地减少触发次数。

为解决传统分布式一致性算法在微电网优化调度中需要分布式单元之间进行频繁信息交换以及系统拓扑结构变化引起的不稳定问题, 本文提出了一种改进动态事件触发一致性算法, 通过设计触发条件的阈值函数, 可跟随分布式单元的状态动态变化, 使分布式单元只在满足事件触发条件时进行信息交换。

3.2.1 改进动态事件触发一致性算法

根据动态事件触发机制原理, 定义中间变量 $q_i(t)$ 为:

$$q_i(t) = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t))^2 \geq 0 \quad (3-3)$$

定义内部动态变量 $\eta_i(t)$:

$$\dot{\eta}_i(t) = -\omega_i \eta_i(t) + \xi_i \left(\frac{\sigma_i}{2} q_i(t) - e_i^2(t) \right) + e^{-\nu t} \quad (3-4)$$

式中, 动态变量初值 $\eta_i(0) > 0$; 设计参数 $\omega_i > 0$; $\xi_i \in [0, 1]$; Lyapunov 衰减率函数的调整参数 $\sigma_i \in [0, 1]$; 指数项参数 $\nu \in [0, 1]$ 。

考虑上述 MAS，假设图 G 是无向连通的，附加设计参数 $\theta_i > (1 - \xi_i) / \omega_i$ ，当 θ_i 趋于 $+\infty$ 时，即为传统静态触发机制，第一次触发时刻 $t_1^i = 0$ ，智能体 i 的 $k+1$ 触发时刻序列为：

$$t_{k+1}^i = \max_{r \geq t_k^i} \{r : \theta_i(e_i^2(t) - \frac{\sigma_i}{2} q_i(t)) \leq \eta_i(t), \forall t \in [t_k^i, r]\} \quad (3-5)$$

当内部动态变量 $\eta_i(t)$ 大于等于设定的阈值函数时，事件即触发，相邻智能体之间进行信息交换。该改进算法会使各变量收敛一致，且不存在事件重复触发的行为，即 Zeno 行为。

3.2.2 算法稳定性证明

选择一个 Lyapunov 函数：

$$V(t) = \frac{1}{2} x^T(t) K_n x(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [x_i(t) - \bar{x}(0)]^2 \quad (3-6)$$

式中， $K_n = I_n - (1_n 1_n^T / n)$ ； I_n 为 n 维单位矩阵； $1_n = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。

为避免每个智能体重复监控其邻居的状态来进行更新，可将上式更新为：

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^n [\dot{x}_i(t) - \bar{x}(0)] \dot{x}_i(t) \\ &= \sum_{i=1}^n [-\hat{x}_i(t)] \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t) + e_j(t) - e_i(t)) \\ &= - \sum_{i=1}^n q_i(t) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (e_j(t) - e_i(t)) (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t)) \\ &\leq - \sum_{i=1}^n q_i(t) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (e_j(t) - e_i(t))^2 - \\ &\quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{1}{4} (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t))^2 \\ &= - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} q_i(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (e_j(t) - e_i(t))^2 \end{aligned} \quad (3-7)$$

加入动态变量后考虑 Lyapunov 函数：

$$\begin{aligned}
 \dot{W}(t) &= \dot{V}(t) + \sum_{i=1}^n \dot{\eta}_i(t) \\
 &\leq -\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} q_i(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (e_j(t) - e_i(t))^2 - \\
 &\quad \sum_{i=1}^n \omega_i \eta_i(t) + \sum_{i=1}^n \xi_i \left(\frac{\sigma_i}{2} q_i(t) - e_i^2(t) \right) + n e^{-\nu t} \\
 &\leq -\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (1 - \sigma_i) q_i(t) - \sum_{i=1}^n \omega_i \eta_i(t) + \sum_{i=1}^n \frac{1 - \xi_i}{\theta_i} \eta_i(t) \\
 &\quad + n e^{-\nu t} \\
 &\leq -(1 - \sigma_{\max}) \rho_2(L) V(t) - k_d \sum_{i=1}^n \eta_i(t) + n e^{-\nu t} \\
 &\leq -k_w W(t) + n e^{-\nu t}
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

式中, $k_d = \min\{w_i - (1 - \xi_i)/\theta_i\} > 0$; $\sigma_{\max}$ 为 $\max\{\sigma_i\}$; $k_w = \min\{(1 - \sigma_{\max})\rho_2(L), k_d\} > 0$; $\rho_2(L)$ 为拉普拉斯矩阵 L 的第二小特征值。

由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\nu t} = 0$, 则可由式(3-8)可得出:

$$V(t) < W(t) \leq W(0) e^{-k_w t} \tag{3-9}$$

因此该系统能收敛一致。

3.2.3 算法避免 Zeno 行为证明

接下来通过反证法证明本文改进算法能够避免 Zeno 行为。

假设不存在 Zeno 行为, 对于智能体 i , $\lim_{t \rightarrow \infty} t_k^i = T_0$ ($T_0 > 0$), 使得 $|x_i(t)| \leq 0$, 对于所有 $t \geq 0$ 和 $i = 1, \dots, n$ 。令 $\varepsilon_0 = \frac{\sqrt{\eta_i(0)}}{4\sqrt{\theta_i} M_0} e^{-\frac{1}{2}(\omega_i + \frac{\xi_i}{\theta_i})T_0} > 0$, 可知, 存在一个正实数 R , 使得:

$$t_k^i \in [T_0 - \varepsilon_0, T_0], \forall k \geq R \tag{3-10}$$

式(3-7)的充分必要条件为:

$$|\hat{x}_i(t) - x_i(t)| \leq \sqrt{\frac{\eta_i(0)}{\theta_i}} e^{-\frac{1}{2}(\omega_i + \frac{\xi_i}{\theta_i})t} \tag{3-11}$$

当系统达到稳定时, 有 $|\hat{x}_i(t_k^i) - x_i(t_k^i)| = 0$, 对于触发时刻 t_k^i , 可以得到:

$$2(t - t_k^i) \leq \frac{\sqrt{\eta_i(0)}}{\sqrt{\theta_i}} e^{-\frac{1}{2}(\omega_i + \frac{\xi_i}{\theta_i})t} \tag{3-12}$$

进一步可得:

$$t_{R+1}^i - t_R^i \geq \frac{\sqrt{\eta_i(0)}}{2\sqrt{\theta_i}} e^{-\frac{1}{2}(\omega_i + \frac{\xi_i}{\theta_i})t_{R+1}^i} \geq \frac{\sqrt{\eta_i(0)}}{2\sqrt{\theta_i}} e^{-\frac{1}{2}(\omega_i + \frac{\xi_i}{\theta_i})T_0} = 2\varepsilon_0 \quad (3-13)$$

即证下一触发时刻 t_{R+1}^i 与上一触发时刻 t_R^i 之间相差正值 $2\varepsilon_0$ ，即 Zeno 行为被排除。

3.3 仿真分析

3.3.1 系统性能仿真分析

本文在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建如图 2-1 所示的 5 节点网络拓扑仿真模型进行改进算法收敛性能研究，并将其与传统分布式一致性算法进行对比。假设网络无延时，每个节点的状态变量初始值为 $x=[1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$ ， $c_1=0.8$ ， $\theta_i=0.5$ ， $\sigma_i=0.9$ ， $\eta_i(0)=10$ ， $\omega_i=0.5$ ， $\xi_i=1$ ， $\nu=0.01$ ，迭代步长为 0.001，总时间为 4s。仿真结果如图 3-1 和图 3-2 所示。

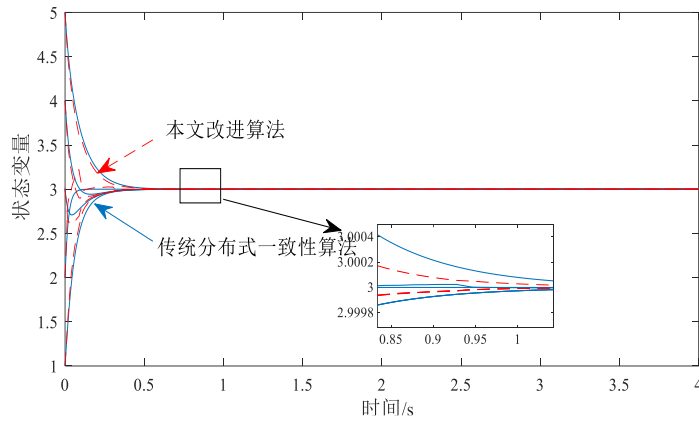


图 3-1 算法收敛性能对比曲线

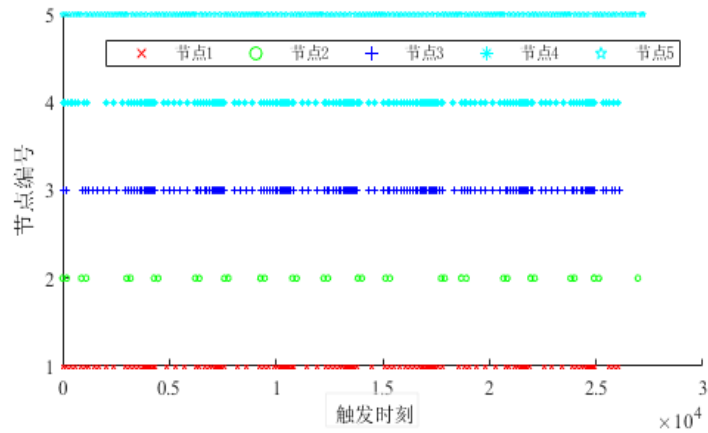


图 3-2 采用本文改进算法时各节点的触发时刻

由图 3-1 可知, 采用本文改进算法和传统分布式一致性算法均能使状态变量收敛到最优值。但与传统分布式一致性算法相比, 采用本文改进算法能够使状态变量更快收敛到最优值, 系统响应较快。由图 3-2 可以看出, 采用本文改进算法不需要每个状态变量在每个时刻都进行迭代更新, 只需在满足事件触发条件时进行迭代更新, 可减少状态变量之间的信息交换次数, 节约通信资源。

3.3.2 时延影响下鲁棒性分析

考虑如式(2-5)所示含时延的一致性协议, 进行 MAS 存在时延时鲁棒性仿真分析。为验证本文改进算法对时延工况下的有效性, 设置实验场景与 3.3.1 相同, 并设通信时延 $\tau_{ij}=2s$ 和控制时延 $\tau_{ii}=2s$ 。通过与采用传统分布式一致性算法进行性能对比, 验证改进算法的优越性。仿真结果如图 3-3 和图 3-4 所示。

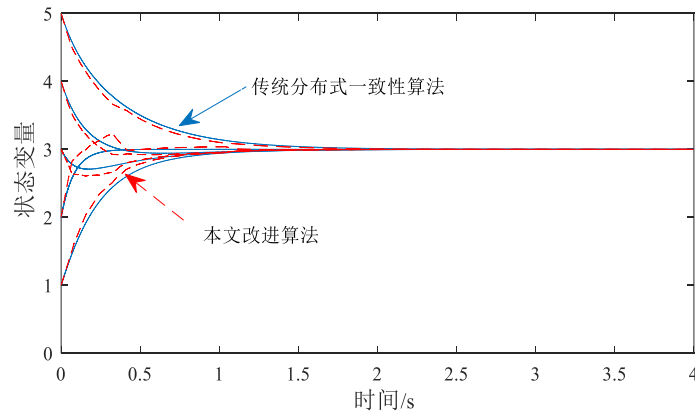


图 3-3 延时工况下算法收敛性能对比曲线

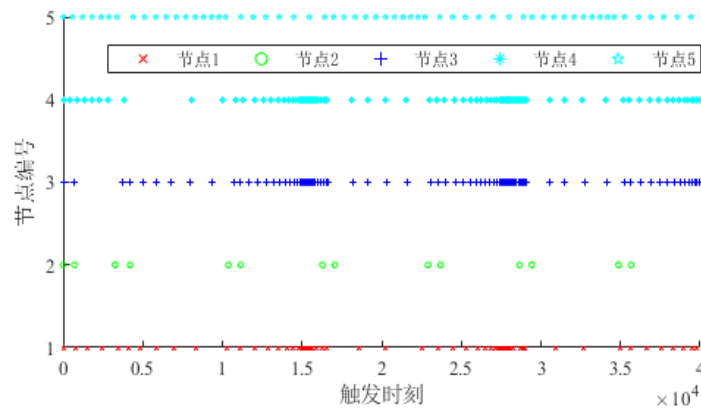


图 3-4 延时工况下采用本文改进算法时各节点的触发时刻

通过对比图 3-3 和 3-1, 可以看出系统在通信延时和控制延时都为 2s 的工况下, 系统的收敛速度变慢。由图 3-3 可知, 在周期性通信的传统分布式一致性算法中, 延时的影响更为突出, 但在同样的延时下, 改进算法具有更好的调节性能,

仍能使系统更快收敛到最优值。

通过对比图 3-2 和图 3-4 可以看出，在延时影响下，事件触发次数比无延时情况下的触发次数更少。综合对比可知，改进算法在保证系统稳定的同时，时延对其的影响更小，能明显减少状态变量之间的通信次数，满足通信对网络带宽的要求。

3.4 本章小结

为解决传统分布式一致性算法中通信存在时延、高采样率、通信次数过多等问题，将事件触发机制与一致性算法结合，并在事件触发机制基础上进行改进，提出改进动态事件触发一致性算法，并通过 Lyapunov 稳定性判决方法对该算法进行分析，得出该改进算法在系统中是稳定的，并对改进算法是否会重复触发事件进行了数学分析，可以得出所提出的改进动态事件触发一致性算法可以有效避免 Zeno 行为的出现。仿真结果表明，本文改进算法的收敛速度较快，在延时的影响下具有较高的鲁棒性且更能节约通信资源。

第 4 章 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度

在直流微电网分层控制框架中，经济调度通常作为三次控制来实现，其目标是通过优化各个 DG、储能单元、负荷等分布式单元之间的功率分配。在确保直流微电网在满足各种约束条件基础上，合理分配每个分布式单元的功率输出，降低运行成本，使系统总发电成本最低。为此，本文提出基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略（以下简称“改进调度策略”）。首先，建立以总发电成本最低的目标函数和相关约束条件的直流微电网经济调度模型。其次，运用第 3 章改进算法对该模型进行求解，确保每个分布式单元的增量成本一致，输出功率达到最优，从而使总发电成本最低，且能够减少通信次数，节约通信资源，满足经济性要求。最后，通过实验仿真，验证改进调度策略的可行性和有效性。

4.1 直流微电网分布式经济调度模型建立与求解

4.1.1 DG、储能单元以及负荷成本模型

本文设 DG、储能单元以及负荷均为分布式单元，各分布式单元的成本模型函数均为二次函数，成本函数如式(4-1)所示：

$$\begin{cases} C_g(P_{Gg}) = \alpha_g + \beta_g P_{Gg} + \gamma_g P_{Gg}^2 & g \in S_G \\ C_b(P_{Bb}) = \alpha_b + \beta_b P_{Bb} + \gamma_b P_{Bb}^2 & b \in S_B \\ C_l(P_{Ll}) = \alpha_l + \beta_l P_{Ll} + \gamma_l P_{Ll}^2 & l \in S_L \end{cases} \quad (4-1)$$

式中， α 、 β 、 γ 为成本函数的系数； g 、 b 、 l 分别为 DG、储能单元和负荷； P_{Gg} 为 DGg 的有功出力； P_{Bb} 为储能单元 b 的有功出力； P_{Ll} 为负荷 l 的需求功率； S_G 为 DG 集合； S_B 为储能单元集合； S_L 为负荷集合。

微电网经济调度一般通过分布式优化的方式使各分布式单元达到功率平衡，实现系统经济效益的最大化，即：

$$\max[\sum_{l \in S_L} C_l(P_{Ll}) - \sum_{g \in S_G} C_g(P_{Gg}) - \sum_{b \in S_B} C_b(P_{Bb})] \quad (4-2)$$

$$s.t. \sum_{l \in S_L} P_{Ll} - \sum_{g \in S_G} P_{Gg} - \sum_{b \in S_B} P_{Bb} = 0 \quad (4-3)$$

$$\begin{cases} P_{Gg, \min} \leq P_{Gg} \leq P_{Gg, \max} \\ P_{Bb, \min} \leq P_{Bb} \leq P_{Bb, \max} \\ P_{Ll, \min} \leq P_{Ll} \leq P_{Ll, \max} \end{cases} \quad (4-4)$$

式中, $P_{Gg, \min}$ 与 $P_{Gg, \max}$ 分别为 DGg 的输出功率下限和上限; $P_{Bb, \min}$ 与 $P_{Bb, \max}$ 分别为储能单元 b 的输出功率下限和上限; $P_{Ll, \min}$ 与 $P_{Ll, \max}$ 分别为负荷 l 的需求功率下限和上限。

4.1.2 目标函数

利用最优化方法中拉格朗日乘子法, 定义系统最优成本目标函数为:

$$\min \Gamma = -\sum_{l \in S_L} C_l(P_{Ll}) + \sum_{g \in S_G} C_g(P_{Gg}) + C_b(P_{Bb}) + \lambda(\sum_{l \in S_L} P_{Ll} - \sum_{g \in S_G} P_{Gg} - \sum_{b \in S_B} P_{Bb}) \quad (4-5)$$

式中, λ 为该条件下的最优值。

4.1.3 经济调度模型求解

将式(4-5)对 P_{Gg} 、 P_{Bb} 、 P_{Ll} 和 λ 分别求偏导, 并令其为 0 得到最优条件, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Gg}} = \frac{\partial C_g}{\partial P_{Gg}} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Bb}} = \frac{\partial C_b}{\partial P_{Bb}} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Ll}} = \frac{\partial C_l}{\partial P_{Ll}} - \lambda = 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \lambda} = \sum_{l \in S_L} P_{Ll} - \sum_{g \in S_G} P_{Gg} - \sum_{b \in S_B} P_{Bb} = 0 \quad (4-7)$$

则:

$$\frac{\partial C_g}{\partial P_{Gg}} = \frac{\partial C_b}{\partial P_{Bb}} = \frac{\partial C_l}{\partial P_{Ll}} = \lambda \quad (4-8)$$

即各分布式单元的增量成本达到一致, 输出功率达到最优。

各分布式单元的增量成本定义如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_g(P_{Gg})}{\partial P_{Gg}} = \lambda_g \\ \frac{\partial C_b(P_{Bb})}{\partial P_{Bb}} = \lambda_b \\ \frac{\partial C_l(P_{Ll})}{\partial P_{Ll}} = \lambda_l \end{cases} \quad (4-9)$$

简便起见，用 i, j 表示所有分布式单元，应用传统分布式一致性算法，各分布式单元的增量成本可表示为：

$$\lambda_i(t+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) \quad (4-10)$$

式中， $\lambda_i(t+1)$ 为分布式单元 i 进行第 $t+1$ 次迭代得到的计算值， a_{ij} 为邻接矩阵 A 中 (i, j) 的权重， λ_j 为分布式单元 j 的增量成本。

为使各分布式单元在系统中达到功率平衡，定义 ΔP 为系统的不平衡功率。

$$\Delta P = \sum_{l \in S_L} P_{Ll} - \sum_{g \in S_G} P_{Gg} - \sum_{b \in S_B} P_{Bb} \quad (4-11)$$

则式(4-10)可写为：

$$\lambda_i(t+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\lambda_j(t) - \lambda_i(t)) + \varepsilon \Delta P \quad (4-12)$$

式中， ε 为收敛系数，用来优化系统收敛速度。

应用第 3 章改进动态事件触发机制，则使用改进算法的增量成本为：

$$\lambda_i(t_{k+1}^i) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\lambda_j(t_k^j) - \lambda_i(t_k^i)) + \varepsilon \Delta P \quad (4-13)$$

4.2 “即插即用”时使用改进动态事件触发一致性算法性能分析

分布式单元投入或者退出微电网是微电网中常见的现象，此时，微电网的物理结构将发生变化，使通信网络的连接关系也发生变化，这将影响微电网的经济调度，因此，本文以此为例分析改进算法的收敛性。

当分布式单元 i 在 t 时刻退出微电网时，系统的通信拓扑将发生改变，即 i 的度矩阵发生变化，变化值如下：

$$\begin{cases} \dot{d}_{ii}(t) = d_{ii}(t) - 1, i \in N \\ \dot{d}_{jj}(t) = d_{jj}(t) - 1, j \in N \end{cases} \quad (4-14)$$

当分布式单元 i 在 t 时刻投入微电网时，系统的通信拓扑也将发生改变，即 i 的度矩阵将发生变化，变化值如下：

$$\begin{cases} \dot{d}_{ii}(t) = d_{ii}(t) + 1, i \in N \\ \dot{d}_{jj}(t) = d_{jj}(t) + 1, j \in N \end{cases} \quad (4-15)$$

式中， $\dot{d}_{ii}(t)$ 和 $\dot{d}_{jj}(t)$ 是分布式单元 i 和分布式单元 j 在分布式单元退出或投入时的入度。

每个分布式单元按照上述协议更新度矩阵，相应的邻接矩阵 A 和拉普拉斯矩阵 L 也将相应发生变化，系统中的每个分布式单元将会转入新的状态来进行更新迭代计算，寻求最优值。邻接矩阵更新如下：

当分布式单元 j 退出时：

$$\begin{cases} \dot{a}_{ij}(t) = a_{ij}(t) - 1, i \text{ 与 } j \text{ 相连} \\ \dot{a}_{ij}(t) = 0, i = j, i \text{ 与 } j \text{ 不相连} \end{cases} \quad (4-16)$$

当分布式单元 j 投入时：

$$\begin{cases} \dot{a}_{ij}(t) = a_{ij}(t) + 1, i \text{ 与 } j \text{ 相连} \\ \dot{a}_{ij}(t) = 0, i = j, i \text{ 与 } j \text{ 不相连} \end{cases} \quad (4-17)$$

4.2.1 功率恒定性证明

当系统功率平衡时即不平衡功率为 0，通过本文改进算法可以实现负荷需求功率在分布式单元之间重新分配，相应的分布式单元也会根据最优功率分配策略来输出功率满足功率平衡，即 $\Delta P=0$ 。

证明：假设分布式单元 j 退出系统运行，退出前分布式单元 i 与分布式单元 j 之间相连即存在通信连接，则其它分布式单元在分布式单元 j 退出后输出功率将增大，从而满足功率平衡，则分布式单元 i 的输出功率更新为 $\bar{P}_i(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_j(t)$ ，根据公式(4-12)可得：

$$\begin{aligned}
 2\gamma_i \bar{P}_i(t+1) + \beta_i &= \sum_{i=1}^n \dot{a}_{ij} (2\gamma_j P_j(t) + \beta_j - 2\gamma_i P_i(t) - \beta_j) + \varepsilon \Delta P \\
 &= \sum_{i=1}^n (a_{ij} - 1) (2\gamma_j P_j(t) + \beta_j - 2\gamma_i P_i(t) - \beta_j) + \varepsilon \Delta P \\
 &= \sum_{i=1}^n a_{ij} (2\gamma_j P_j(t) + \beta_j - 2\gamma_i P_i(t) - \beta_j) - \\
 &\quad \sum_{i=1}^n (2\gamma_j P_j(t) + \beta_j - 2\gamma_i P_i(t) - \beta_j) + \varepsilon \Delta P
 \end{aligned} \tag{4-18}$$

分布式单元 j 退出后不与其它分布式单元参与信息交换，则有：

$$2\gamma_j P_j(t) + \beta_j = \sum_{i=1}^n 2\gamma_j P_j(t) + \beta_j - 2\gamma_i P_i(t) - \beta_i \tag{4-19}$$

由式(4-18)可得：

$$2\gamma_i \bar{P}_i(t+1) + \beta_i = 2\gamma_i P_i(t) + \beta_i - 2\gamma_j P_j(t) - \beta_j + \varepsilon \Delta P \tag{4-20}$$

则可得 $\bar{P}_i(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_j(t)$ ，即证当分布式单元 j 退出系统造成拓扑发生变化

时，其它邻接的分布式单元会根据最优功率分配来达到功率平衡的目的。分布式单元 j 投入系统时证明同理。

4.2.2 收敛性证明

由式(4-14)-(4-17)可得 $L=D-A$ ，可得分布式单元 j 退出微电网时，拉普拉斯矩阵 L 更新如下：

$$L = \begin{cases} d_{ii}(t) - 1, & i = j \\ 1 - a_{ij}(t), & i \text{ 与 } j \text{ 相连} \\ 0, & i \text{ 与 } j \text{ 不相连} \end{cases} \tag{4-21}$$

当分布式单元 j 投入微电网时，拉普拉斯矩阵更新如下：

$$L = \begin{cases} d_{ii}(t) + 1, & i = j \\ -1 - a_{ij}(t), & i \text{ 与 } j \text{ 相连} \\ 0, & i \text{ 与 } j \text{ 不相连} \end{cases} \tag{4-22}$$

根据拉氏变换以及拉普拉斯矩阵的定义可将式(3-3)表示为：

$$s\dot{X}(s) = -LX(s) \tag{4-23}$$

式中， $\dot{X}(s) = [\dot{X}_1(s) \ \dot{X}_2(s) \ \dots \ \dot{X}_n(s)]^T$ ， $X(s) = [X_1(s) \ X_2(s) \ \dots \ X_n(s)]^T$ 。

由式(4-21)和式(4-22)可知，当分布式单元 j 退出或投入，拉普拉斯矩阵仍为半正定矩阵，式(4-13)所示改进算法仍能收敛，可以表示为：

$$\dot{X}(s) = L^{-1} s X(s) \quad (4-24)$$

定义 x_i^{ss} 为分布式单元 j 收敛的稳态值，定义向量 $x^{ss} = [x_1^{ss} \ x_2^{ss} \ \dots \ x_n^{ss}]^T$ 。根据拉氏变换的终值定理，可得：

$$x^{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s X(s) \quad (4-25)$$

定义 $\dot{x}_i^{ss}$ 为分布式单元 j 更新后的稳态值，定义向量 $\dot{x}^{ss} = [\dot{x}_1^{ss} \ \dot{x}_2^{ss} \ \dots \ \dot{x}_n^{ss}]^T$ ，对式(4-23)使用终值定理，考虑式(4-24)可得：

$$\dot{x}^{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s L^{-1} s x(s) = \frac{1}{n} \Phi x^{ss} \quad (4-26)$$

式中， $\Phi \in R^{N \times N}$ 为各元素都为 1 的矩阵。

由式(4-26)可证在系统拓扑发生改变后，系统的状态稳态值仍可收敛到各节点状态值的平均值。

4.3 经济调度策略

综上，直流微电网经济调度的目标是在实现 DG 和储能单元的总输出功率和负荷需求功率达到平衡的前提下，使各 DG 和储能单元的输出功率达到最优，即运行经济成本最低。如式(4-13)所示，将增量成本 λ 作为分布式单元的一致性变量。首先建立目标函数，以及考虑相关约束条件，并采用本文改进算法对目标函数进行求解。当总的负荷所需功率大于 DG 和储能单元的总输出功率时，即 $\Delta P > 0$ ，则 DG 和储能单元的增量成本变大，使 DG 和储能单元的输出功率变大。当总的负荷需求功率小于 DG 和储能的总输出功率时，即 $\Delta P < 0$ ，则 DG 和储能的增量成本变小，使 DG 和储能单元的输出功率变小。经过改进动态事件触发一致性经济调度策略，系统会逐渐实现功率平衡，最终 DG、储能单元和负荷的增量成本会达到一致，即 DG、储能单元会输出最优功率来满足负荷需求功率。基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略流程图如图 4-1 所示。

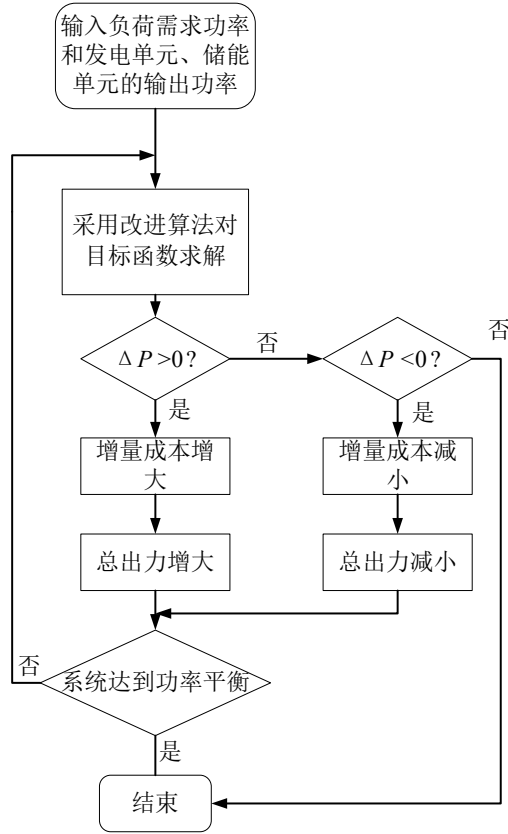


图 4-1 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略流程图

4.4 仿真分析

系统采用 IEEE-14 节点系统，拓扑结构图如图 4-2 所示。其中，节点 G1-G4 为 DG，节点 L5-L13 为负荷单元，节点 B14 为储能单元。所有 DG 和储能单元以及负荷的参数选取文献[27]的系统参数，如表 4-1 所示。内部动态变量初值 $\eta(0)=10$ ， $\sigma_i=0.5$ ， $\beta_i=1$ ， $\theta_i=1$ ，收敛系数 $\varepsilon=0.0005$ ，仿真步长 $dt=0.005$ ，总时间为 10s。

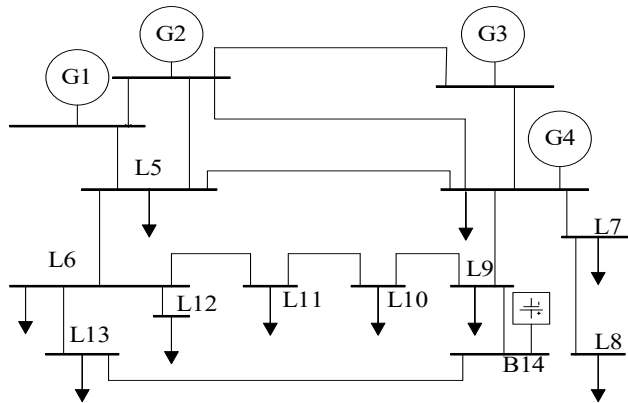


图 4-2 IEEE-14 节点系统结构图

表 4-1 分布式单元参数

节点	$\alpha_i/[(\$/h)]$	$\beta_i/[\$/(\text{kW}^2 \cdot h)]$	$\gamma_i/[\$/(\text{kW}^2 \cdot h)]$	P_{max}/kW	P_{min}/kW	P_0/kW
G1	300	2.25	0.04	60	30	35
G2	210	4.2	0.031	50	20	30
G3	290	3.25	0.0375	50	30	40
G4	320	4.05	0.035	50	20	20
L5	0	8.25	0.036	30	10	10
L6	0	7.2	0.033	20	5	5
L7	0	7.8	0.0375	30	10	10
L8	0	8.05	0.03	35	15	20
L9	0	8.45	0.039	35	15	20
L10	0	8.45	0.04	40	15	15
L11	0	9	0.0425	40	15	20
L12	0	7.05	0.0345	25	0	20
L13	0	8.15	0.0385	35	20	25
B14	0	0	0.175	25	25	5

4.4.1 改进经济调度策略性能研究

采用改进调度策略时仿真结果如图 4-3-图 4-6 所示。

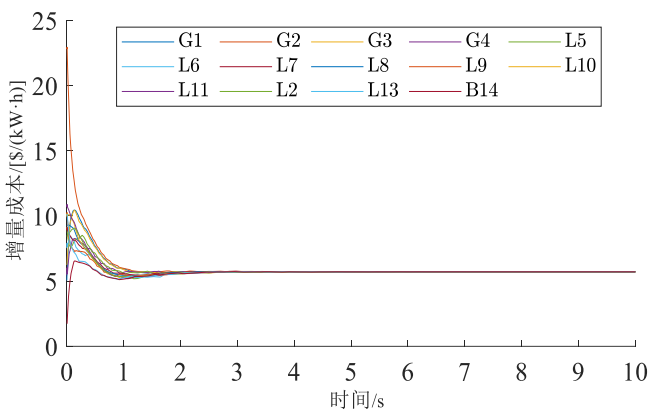


图 4-3 采用本文改进算法时分布式单元的增量成本曲线

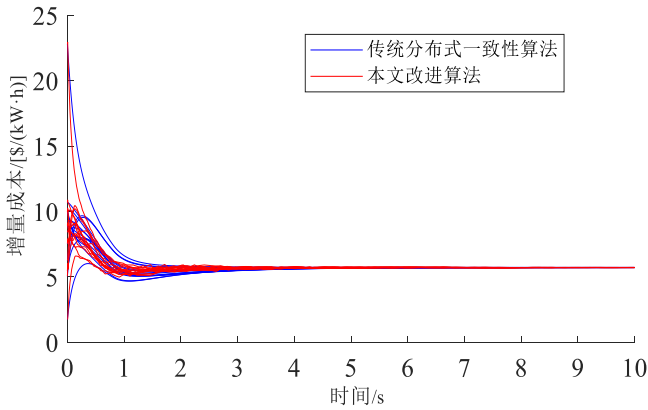


图 4-4 增量成本收敛性能对比曲线

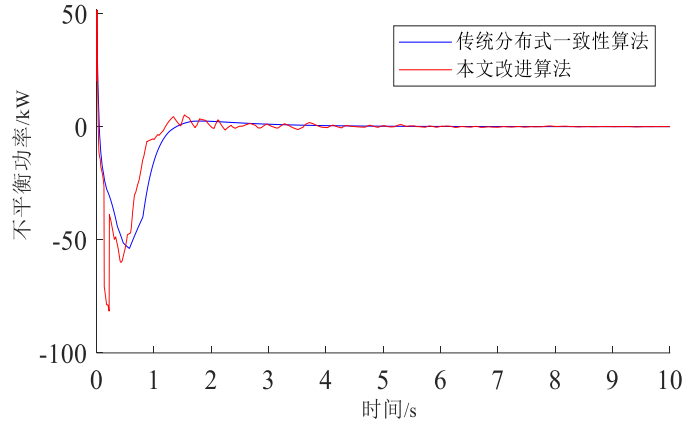


图 4-5 系统不平衡功率对比曲线

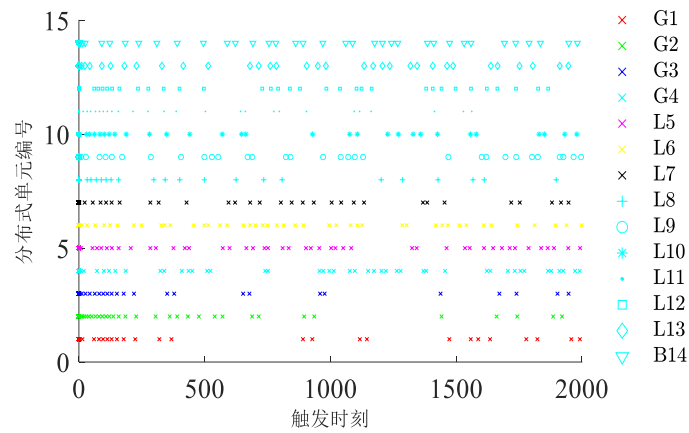


图 4-6 采用本文改进算法时各分布式单元的触发时刻

从图 4-3 可以看出，各分布式单元的增量成本收敛为 $\lambda^*=5.7[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ 。因此，本文改进调度策略可以实现最优功率分配，达到经济调度的目的。

图 4-4 对比了采用传统分布式一致性算法和本文改进算法时增量成本的收敛性能，从图可以看出相较于传统分布式一致性算法，改进算法能够更快地收敛到各分布式单元的增量成本最优值，表明加入改进动态事件触发机制后并不改变系统的稳定性，系统能稳定运行。收敛性能的提升与信息交互量的降低往往难以兼顾，更快的收敛速度一般需要各分布式单元之间交互更为复杂的信息，但采用本文改进算法时增量成本仍能收敛到最优值。

图 4-5 给出了采用两种算法下系统的不平衡功率变化情况，可以看出采用两种算法时均能使系统的不平衡功率收敛到 0kW ，表明采用本文改进算法能够满足系统功率供需平衡的要求，但通过两种算法对比，可以看出采用本文改进算法可以使系统的不平衡功率更快稳定到 0kW ，从而快速达到稳定状态。

图 4-6 给出了采用本文改进算法时各分布式单元的触发时刻，表明了采用本文改进算法时各分布式单元不需要所有时刻都进行信息交换，总触发次数只需

433 次，而传统分布式一致性算法需要每个分布式单元交换信息 2000 次，则系统所有分布式单元共需交换信息 28000 次。在实际应用中，微电网的调度通常需要共享一个通信网络，因此需要尽量降低通信频率，而采用本文改进算法可以降低通信频率，具有较大的实际意义。

表 4-2 给出了采用改进算法与分布式一致性算法时系统动态响应性能对比。

表 4-2 采用两种算法系统动态性能对比一览表

算法	增量成本是否收敛到最优	不平衡功率是否收敛为 0kW	收敛时间(s)	总触发次数(次)
传统分布式一致性算法	是	是	3.2	28000
本文改进算法	是	是	2.5	433

4.4.2 拓扑结构改变时系统性能研究

假设系统拓扑改变后结构图如图 4-7 所示，图 4-8-图 4-11 为系统拓扑改变后各分布式单元的增量成本、系统不平衡功率以及各分布式单元触发时刻情况。

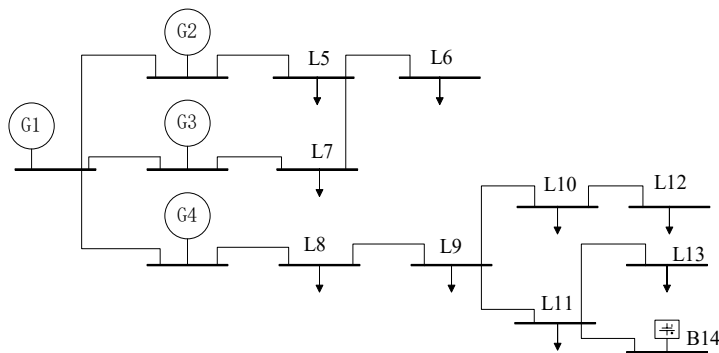


图 4-7 IEEE-14 节点系统拓扑改变后的结构图

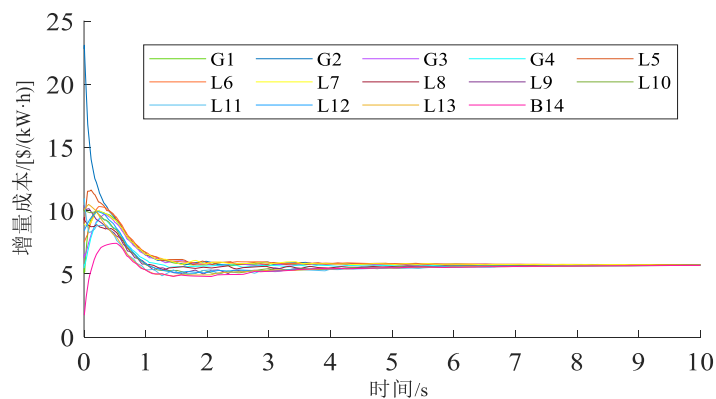


图 4-8 改变拓扑后各分布式单元的增量成本曲线

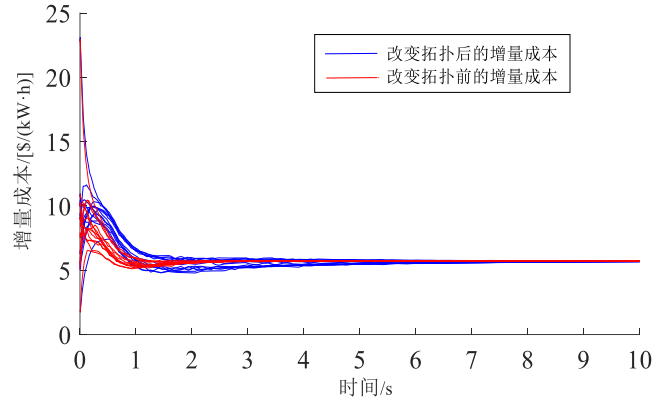


图 4-9 增量成本收敛性能对比曲线

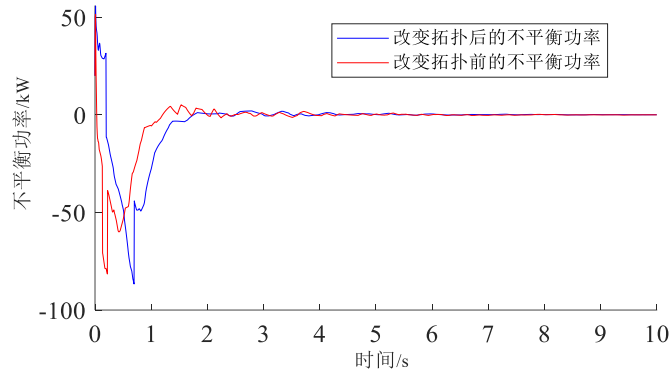


图 4-10 拓扑变化前后系统不平衡功率对比曲线

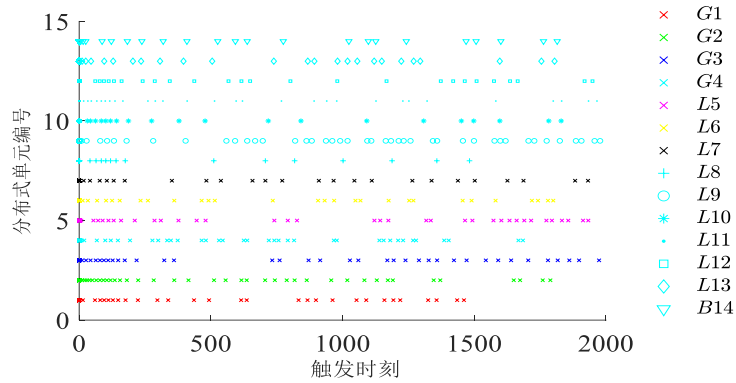


图 4-11 改变系统拓扑后分布式单元的触发时刻

图 4-8 为改变系统拓扑并使用本文改进算法各分布式单元的增量成本，从图可知，系统拓扑发生变化时，采用本文改进算法仍可以使各分布式单元的增量成本收敛到最优值 $\lambda^*=5.7[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ ，说明了本文改进算法可以适应系统拓扑发生变化的情况。

图 4-9 比较了拓扑改变前后使用改进算法时各分布式单元增量成本的收敛情况，通过比较图 4-2 和图 4-7 系统拓扑图可以看出，图 4-7 中各单元的连通度明显降低，由图论可知，通信拓扑代数连通度降低时，系统的收敛速度也相应降低，因此改变拓扑前各分布式单元的增量成本收敛速度明显快于改变拓扑后的收

敛速度。

图 4-10 为改变拓扑前后采用本文改进算法不平衡功率的变化情况，由图可知，拓扑变化虽然对系统的快速稳定性有所影响，但并不影响不平衡功率最终收敛到 0kW，保证了系统功率供需平衡。

从图 4-11 可以看出在改变系统拓扑情况下，使用改进算法后各分布式单元之间的信息交换次数也发生改变。由于系统拓扑结构发生改变，通信网络的代数连通度降低，系统中分布式单元之间的通信连接减少，当分布式单元的状态变量满足事件触发条件时，因其无法与其它不邻接的单元直接交换信息，只能通过更多的通信来获知事件发生，因此就需要增加通信的次数。

表 4-3 给出了系统拓扑变化前后系统性能对比分析，可以看出，系统拓扑结构的变化并不会影响系统的收敛性，但因为代数连通度降低，所以系统的收敛时间会变慢，分布式单元的总触发次数由 433 次增加到 618 次。

表 4-3 系统拓扑变化前后系统性能对比一览表

拓扑结构	增量成本是否收敛到最优	不平衡功率是否收敛为 0kW	收敛时间(s)	总触发次数(次)
拓扑变化前	是	是	2.5	433
拓扑变化后	是	是	5.2	618

4.4.3 分布式单元“即插即用”特性研究

假设在 $t=3s$ 时负荷 L8 退出运行，在 $t=6s$ 时将负荷 L8 重新投入系统。各分布式单元的增量成本如图 4-12 所示，系统不平衡功率如图 4-13 所示，各分布式单元的触发次数如图 4-14 所示。

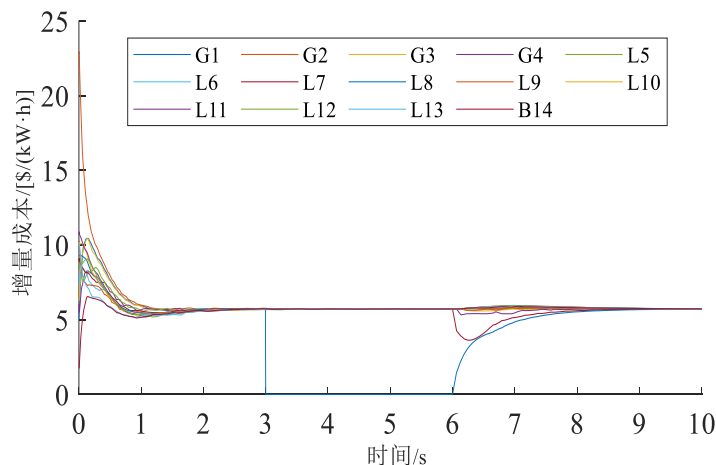


图 4-12 “即插即用”工况下各分布式单元的增量成本曲线

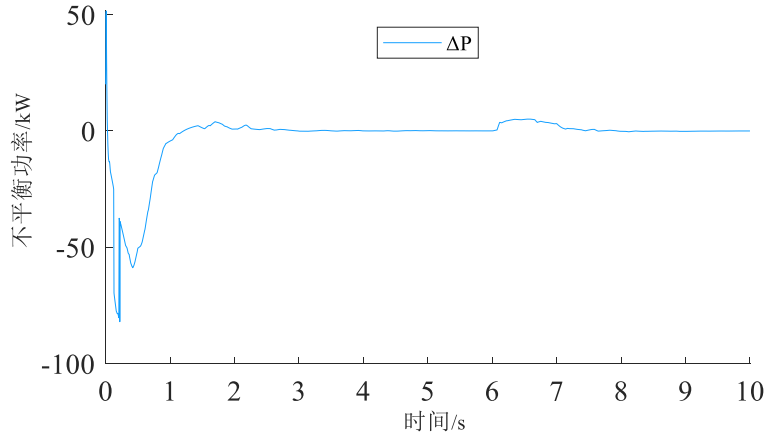


图 4-13 “即插即用”下系统不平衡功率曲线

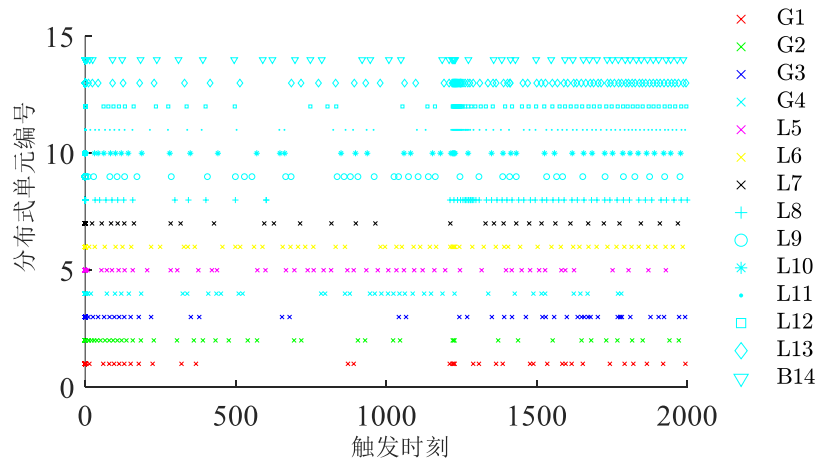


图 4-14 “即插即用”工况下各分布式单元的触发时刻

由图 4-12 可知，在负荷 L8 退出系统运行前，各分布式单元的增量成本达到一致，即系统达到最优，最优值 $\lambda^*=5.7[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ 。在 3s 前其它分布式单元已经收敛到最优值，当 L8 退出运行后其它分布式单元的增量成本并不改变，仍能收敛于最优值 $\lambda^*=5.7[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ 。当负荷 L8 重新接入后，各分布式单元的增量成本能收敛到 L8 退出系统前的最优值，即 $\lambda^*=5.7[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ 。可见采用改进算法能够满足分布式单元“即插即用”的要求，能达到经济调度的目的。

图 4-13 表明了“即插即用”工况下，系统的不平衡功率经 2.5s 仍能稳定在 0kW，在 3s 时由于 L8 退出运行，相应负荷需求功率减少，则其它 DG 降低输出功率来满足功率供需平衡，同时满足最优功率分配的要求，在 L8 重新投入运行后，经 2.5s 系统不平衡功率恢复到 0kW，可以说明基于本文改进算法的微电网经济调度策略可以在“即插即用”工况下满足系统最优功率分配的要求，达到经济调度的目的。

图 4-14 为“即插即用”工况下各分布式单元的触发时刻，由图可以看出负

荷 L8 在 3-6s（即图 4-14 中触发时刻 600-1200 次）内的通信次数为 0，说明 L8 退出运行后并不与其它分布式单元进行信息交换，在 6s（触发时刻第 1200 次）后 L8 重新投入运行并与其它分布式单元进行信息交换，各分布式单元的信息交换次数明显增加，需要大量信息交换来进行状态更新寻求最优值。

4.4.4 节约通信资源性能研究

为验证本文改进算法在节约通信资源方面的优越性，本文将其与传统静态事件触发一致性算法和传统动态事件触发一致性算法进行比较。系统参数如表 4-1 所示，实验场景设置与场景 4.4.3 相同。图 4-15-图 4-20 给出了本文改进算法和上述两种算法的性能对比情况。

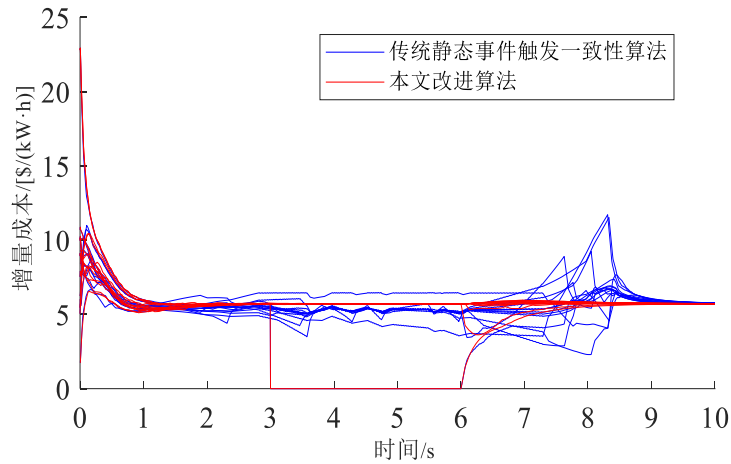


图 4-15 采用传统静态事件触发一致性算法和本文改进算法
各分布式单元的增量成本对比曲线

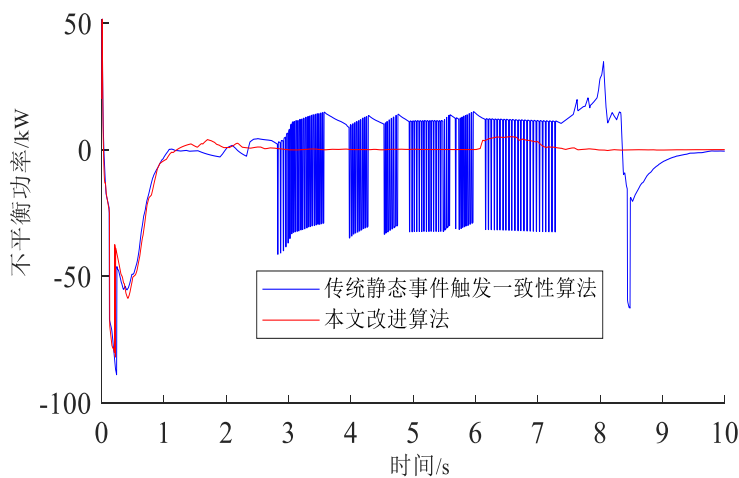


图 4-16 采用传统静态事件触发一致性算法和本文改进算法
系统的不平衡功率对比曲线

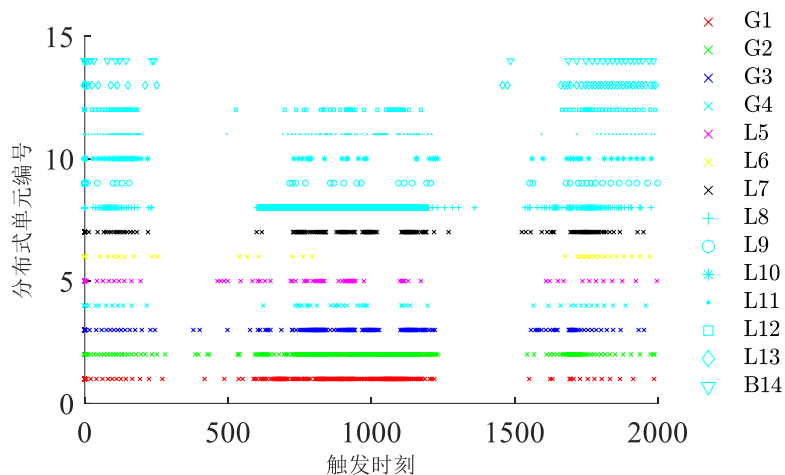


图 4-17 采用传统静态事件触发一致性算法时
各分布式单元的触发时刻

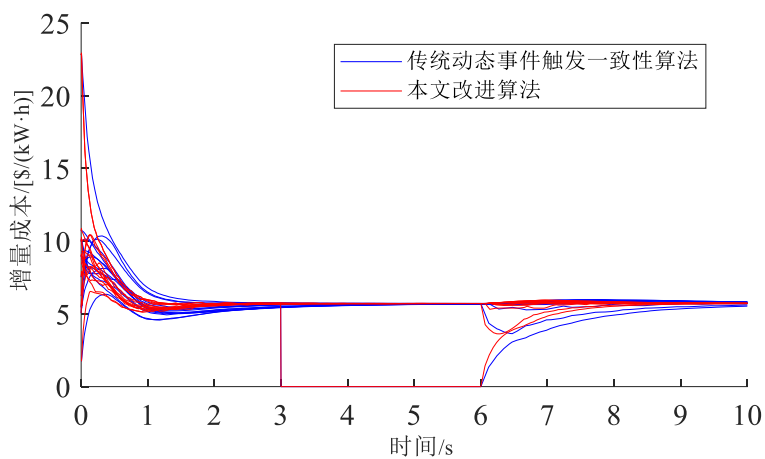


图 4-18 采用传统动态事件触发一致性算法和本文改进算法
各分布式单元的增量成本对比曲线

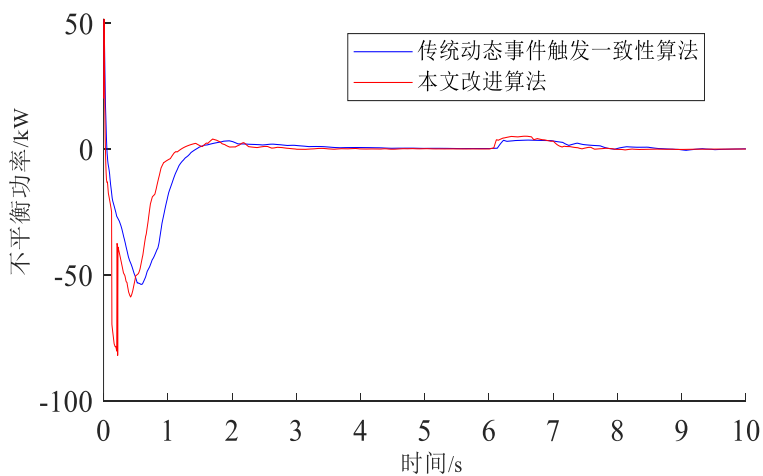


图 4-19 采用传统动态事件触发一致性算法和本文改进算法
系统的不平衡功率对比曲线

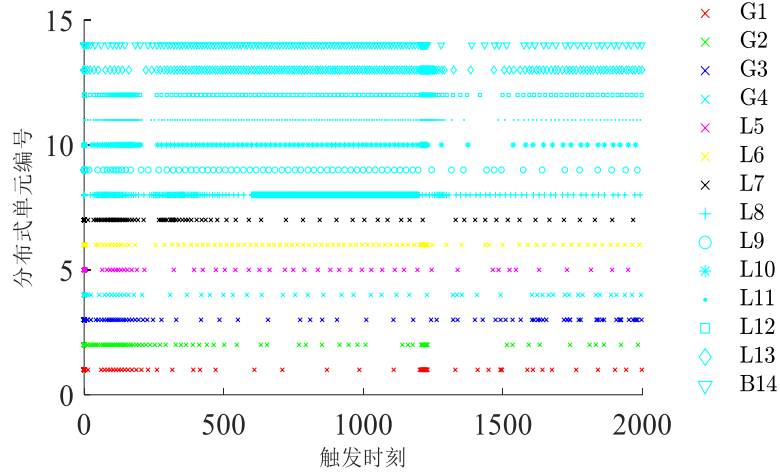


图 4-20 采用传统动态事件触发一致性算法时各分布式单元的触发时刻

图 4-15、图 4-16 为采用本文改进算法和传统静态事件触发一致性算法时各分布式单元的增量成本收敛性对比和不平衡功率对比情况。从图 4-15 可以看出采用传统静态事件触发一致性算法在分布式单元“即插即用”时并不能收敛到最优值，且系统不能稳定，算法鲁棒性较低。图 4-16 表明了采用传统静态事件触发一致性算法在 L8 退出运行时，不平衡功率大幅波动，说明传统静态事件触发机制在面对一些特殊情况如“即插即用”工况时并不能保证系统稳定，且不能满足功率供需平衡的目的。

图 4-17 表明了使用传统静态事件触发一致性算法下各分布式单元的触发时刻，可以看出在 3-6s 内（即图中 600-1200 次），由于系统不平衡功率的大幅度波动，各分布式单元需进行频繁的信息交换来实现功率平衡，在此时间段内各分布式单元的触发次数明显增多。综上所述，相比较传统静态事件触发一致性算法，本文改进算法具有更强的适应性且可以满足微电网经济调度的要求，不仅使系统达到稳定状态，而且动态性能较好。

图 4-18、图 4-19 给出了采用传统动态事件触发一致性算法时各分布式单元增量成本收敛性以及不平衡功率对比情况，通过对比可知，采用两种算法均能使各分布式单元的增量成本收敛到最优值，达到功率供需平衡的目的，但是本文改进算法能更快地使各分布式单元的增量成本收敛到最优，不平衡功率也能更快地收敛为 0kW。

图 4-20 给出了传统动态事件触发一致性算法时各分布式单元的触发时刻，由图可以看出 L10、L12、L13、B14 的信息交换几乎处于满载通信，相较于采用传统动态事件触发一致性算法时的各分布式单元触发次数可以看出本文改进算

法能够在系统快速收敛的前提下大幅降低通信次数，达到节约通信资源的目的。

表 4-4 给出了 3 种算法的性能对比。通过对比采用这 3 种算法时各分布式单元的触发次数可知，采用本文改进算法的触发次数仅为采用传统静态事件触发一致性算法触发次数的 74%、为传统动态事件触发一致性算法触发次数的 49%，但传统静态事件触发一致性算法不能在“即插即用”工况时保持系统稳定。

表 4-4 3 种算法性能对比一览表

算法	增量成本是否收敛到最优	不平衡功率是否收敛为 0kW	收敛时间(s)	总触发次数(次)
本文改进算法	是	是	2.5	2057
传统静态事件触发一致性算法	否	否	不收敛	2776
传统动态事件触发一致性算法	是	是	3.5	4205

因此，采用本文提出的改进调度策略在保证系统稳定的前提下，不仅能达到经济调度的目的，而且能最大程度地减少通信次数，节约通信资源。

4.5 本章小结

本章针对基于传统事件触发一致性的直流微电网分布式经济调度策略中分布式单元之间通信次数过多以及控制系统收敛速度慢等问题，提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略。首先，以直流微电网所有分布式单元的总发电成本最小为目标函数，并考虑分布式单元的出力上下限以及功率平衡约束，建立直流微电网经济调度模型。其次，运用改进动态事件触发一致性算法对模型进行求解，可使各分布式单元的增量成本快速趋于一致，求出最优增量成本，达到 DG 总发电成本最小的目的，且在达到此目的的前提下，使各分布式单元之间的通信次数大幅减少，节约通信资源，满足经济性要求。然后，以分布式单元投入或者退出微电网为目的，对改进调度策略在“即插即用”工况时的收敛性和功率恒定性进行了证明。最后，搭建实验仿真模型验证了改进调度策略的有效性和优越性。

第 5 章 基于改进动态事件触发一致性的直流微电网分布式 二次控制

针对直流微电网分布式二次控制中各 DG 之间需要频繁进行信息交换以维持系统稳定性、频繁的信息交换会导致系统不稳定以及造成额外的通信资源消耗等问题,本章提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网分布式二次控制策略(以下简称“改进二次控制策略”),该策略在保证系统稳定的前提下,可有效降低 DG 的通信次数,减轻通信网络的负担,并且提高了系统抗干扰性能,保证系统在稳定的前提下使电压恢复到额定值以及实现有功功率的精确分配。最后在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建仿真模型,对所提改进二次控制策略的有效性和可行性进行验证。

5.1 控制系统设计

如图 5-1 所示为多母线直流微电网分布式二次控制系统,图中,每个母线上的 DG 通过电力电子变换器与其它母线互联,每个母线接有负载,电力电子变换器采用下垂控制和双闭环控制来实现底层的稳定控制。各 DG 通过网络通信对直流微电网的母线电压恢复和电流精确分配进行二次控制。二次控制模块包括平均电压观测器和最优功率分配模块。平均电压观测器基于改进动态事件触发一致性算法对平均母线电压进行观测;最优功率分配模块通过功率计算模块得到的负荷需求功率和线路负荷消耗功率的总功率来进行最优功率分配,从而达到直流微电网的经济运行。而采用改进动态事件触发一致性算法,可大幅度减少各 DG 在通信过程中的通信频率,节约通信带宽,提高系统的鲁棒性。

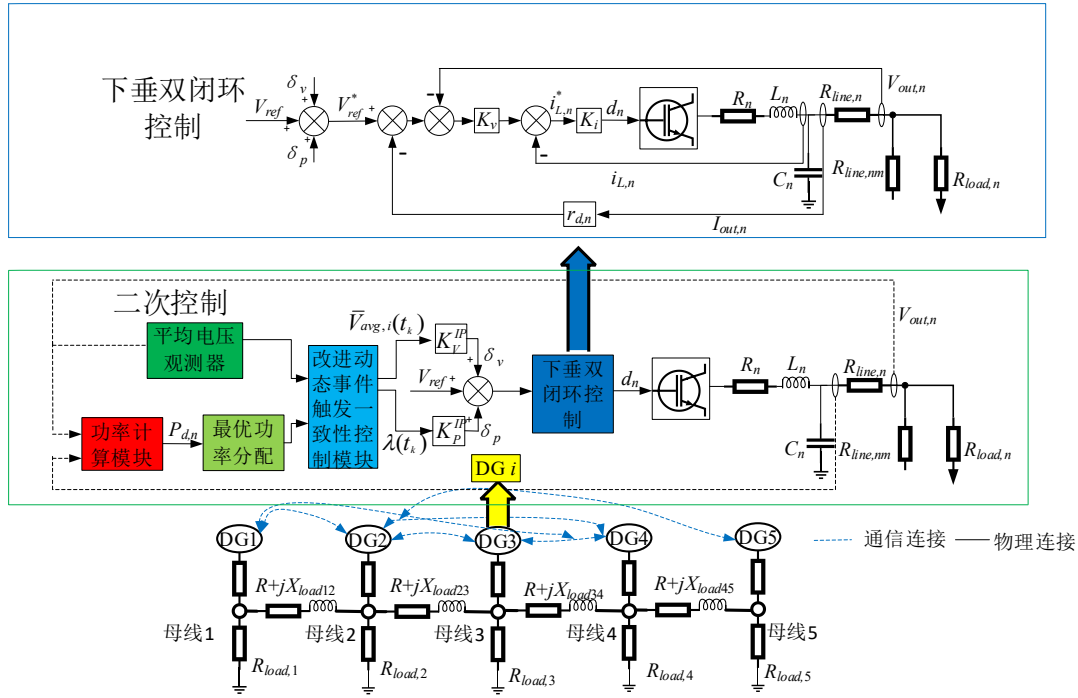


图 5-1 直流微电网分布式二次控制系统

常见的 DG 一次控制采用图 5-1 中下垂双闭环控制，控制系统通过采集电感电流和输出电压，将输出电压与参考电压 V_{ref} 比较，经过电压电流双闭环控制得到占空比 d_n ，从而实现对电力电子变换器的调节，进而控制输出电压 V_{out} 。电压外环和电流内环 PI 控制器的输出分别为：

$$i_{L,n}^* = k_p^{pv} (V_{ref} - r_{d,n} I_{out} - V_{out}) + k_i^{pv} \int (V_{ref} - r_{d,n} I_{out} - V_{out}) \quad (5-1)$$

$$d_n = k_p^{pi} (i_{L,n}^* - i_{L,n}) + k_i^{pi} \int ((i_{L,n}^* - i_{L,n})) \quad (5-2)$$

式中， $r_{d,n}$ 为下垂系数，也称虚拟电阻； k_p^{pv} 和 k_i^{pv} 为电压环的 PI 控制参数； k_p^{pi} 和 k_i^{pi} 为电流环 PI 控制参数，

5.2 改进二次控制策略

5.2.1 基于改进动态事件触发一致性的分布式平均电压观测器

在图 5-1 中，平均电压观测器通过收集各母线的电压值 $V_{out,i}$ ，将其作为上述一致性变量初始值经过改进动态事件触发一致性控制模块对系统的平均母线电压进行观测，平均电压观测值 $\bar{V}_{ang,i}$ 为：

$$\dot{\bar{V}}_{avg,i}(t_k) = V_{out,i}(t_k) - \int \sum_{j \in \{i, N_i\}} a_{ij} (V_{avg,i}(t_k) - V_{avg,j}(t_k)) \quad (5-3)$$

式中， N_i 是所有发电单元的集合； $V_{out,i}(t_k)$ 是 DG i 触发时刻的母线电压； $\dot{\bar{V}}_{avg,i}(t_k)$ 是触发时刻 DG i 的平均母线电压更新观测值。

为了使直流微电网的母线电压达到参考值，可将经平均电压观测器得到的观测值通过 PI 控制器调节以生成电压补偿量 $\delta_v(t_k)$ ，即：

$$\delta_v(t_k) = K_v^P (V_{ref} - V_{avg,i}(t_k)) + K_v^I \int (V_{ref} - V_{avg,i}(t_k)) \quad (5-4)$$

式中， K_v^P 和 K_v^I 分别为 PI 控制器的比例项系数和积分项系数。

5.2.2 改进二次控制策略

根据经济调度中得到的最优输出功率所对应的拉格朗日算子，定义功率补偿项 $\delta_p(t_k)$ 为：

$$\delta_p(t_k) = K_p^P \dot{\lambda}_i(t_k) + K_p^I \int \dot{\lambda}_i(t_k) \quad (5-5)$$

式中， K_p^P 和 K_p^I 分别为 PI 控制器的比例项系数和积分项系数。

将求得的电压补偿量 $\delta_v(t_k)$ 和 $\delta_p(t_k)$ 求和，并与参考电压值 V_{ref} 相加，得到修正后的电压参考值 V_{ref}^* ，代入到 5.1 节一次控制中，即：

$$V_{ref}^* = V_{ref} + \delta_v(t_k) + \delta_p(t_k) \quad (5-6)$$

从而通过加入 $\delta_v(t_k)$ 和 $\delta_p(t_k)$ 对母线电压进行补偿，用来解决下垂双闭环控制中母线偏差的问题，使其能够保证母线电压稳定且达到设定的额定值，并在二次控制中考虑了基于改进动态事件触发一致性的经济调度问题。

5.3 仿真分析

5.3.1 改进二次控制策略控制性能研究

为验证本文改进二次控制策略的有效性，本文在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建如图 5-1 所示的直流微电网仿真模型。图中，直流微电网包括五个 DG，

每个 DG 包括电力电子变换器、一次控制模块以及二次控制模块。微电网母线的额定电压为低压直流微电网常用电压 400V，仿真步长为 0.0001s。DG 之间的通信为双向通信且连接权重相等，二次控制模块采用改进二次控制策略，各单元通过采集母线电压和负荷功率，根据改进动态事件触发一致性控制模块与其它单元进行通信，实现通信资源节约最大化。在低压线路中，电阻对整个线路中的电压分布和电流大小影响都会比电抗更大，分析时只考虑电阻影响。直流微电网物理参数、改进动态事件触发一致性模块以及各 DG 的相关参数见表 5-1 和表 5-2。

表 5-1 直流微电网物理参数和改进动态事件触发一致性模块参数

模块	参数名称	参数值
变换器和线路参数	滤波电容 C_f/F	0.06
	滤波电感 L_f/H	1.2×10^{-5}
	输出线路电阻 $R_{line1/2/3/4/5}/\Omega$	8,6.4,5,4.517,3.2
	互联线路电阻 $R_{line12/23/34/45}/\Omega$	0.5,0.45,0.55,0.6
改进动态事件触发一致性模块参数	内部动态变量 $\eta_i(0)$	10
	σ_i	0.5
	β_i	1
	θ_i	1
	收敛系数 ε	0.0005

表 5-2 各 DG 的基本参数

编号	$a_i/$ [(\$/h)]	$b_i/$ [\$/(kW·h)]	$c_i/$ [\$/(kW ² ·h)]	$P_{max}/$ (kW)	$P_{min}/$ (kW)	$P_0/$ (kW)
1	300	1.3065	0.0046	25	5	10
2	210	0.5295	0.0111	46	11.5	23
3	290	1.137	0.0099	46	13.5	27
4	320	1	0.0036	48	14.5	29
5	250	0.9	0.0055	60	19.5	39

设在 $t=1\text{s}$ 前未加入本文改进二次控制策略，在 1s 后加入本文改进二次控制策略。仿真结果如图 5-2-图 5-7 所示。

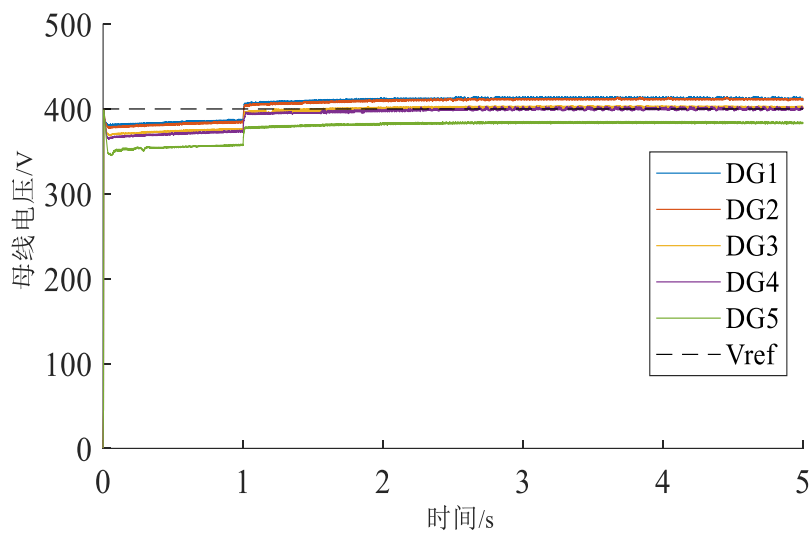


图 5-2 各 DG 的母线电压曲线

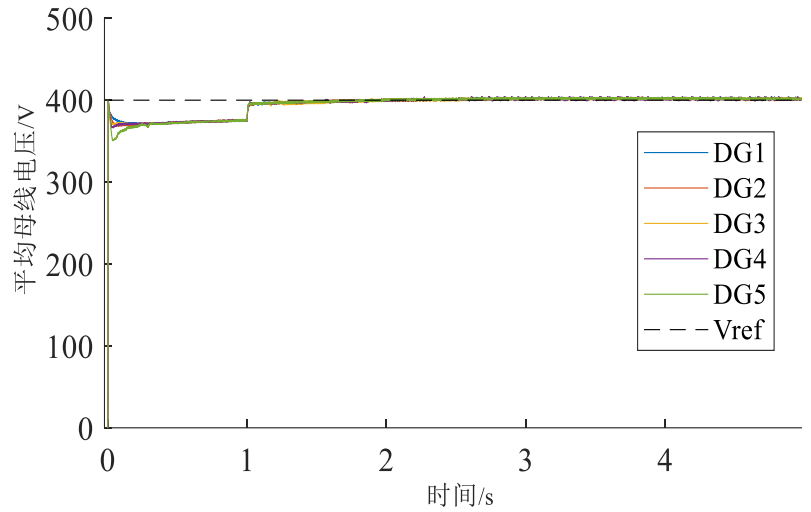


图 5-3 平均母线电压观测值

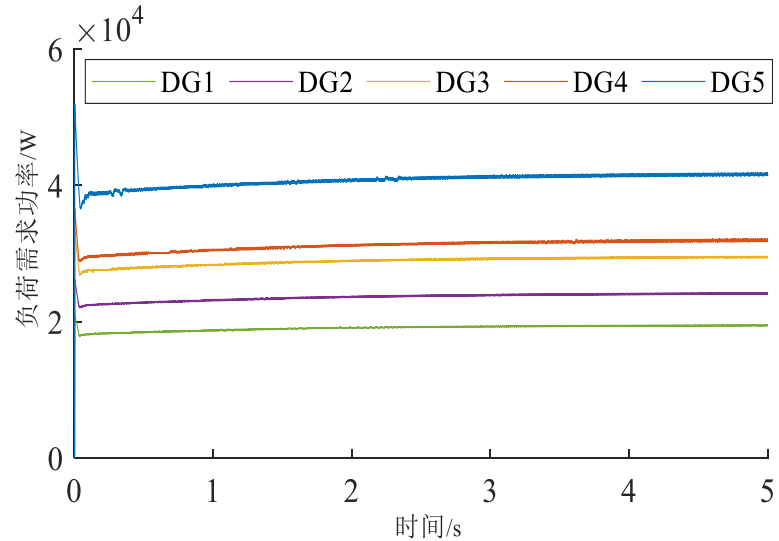


图 5-4 各 DG 的负荷需求功率曲线

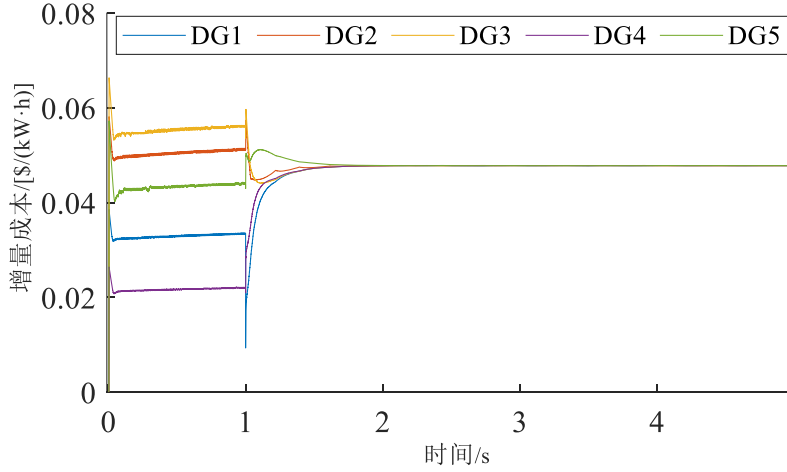


图 5-5 各 DG 的增量成本曲线

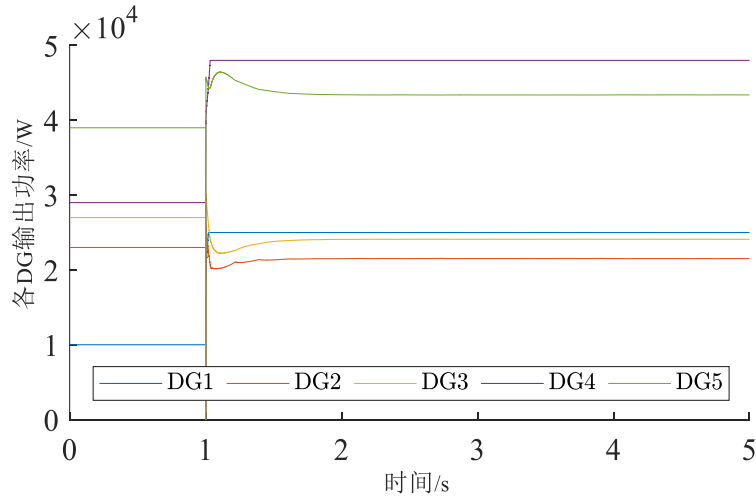


图 5-6 各 DG 的输出功率曲线

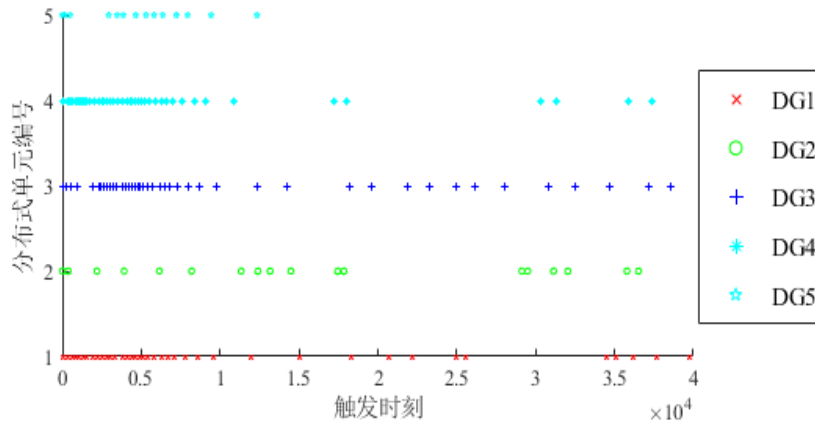


图 5-7 采用本文改进二次控制策略各 DG 的触发时刻

图 5-2 为各 DG 母线电压，由图可知，在 $t=1s$ 前，因为下垂双闭环控制的作用，各 DG 的母线电压均小于设定的额定电压 400V，未能恢复到额定电压值，电能质量较低。在 $t=1s$ 后采用本文改进二次控制策略，5 个母线电压均提高到 400V 左右，且均在设定的额定电压的 $\pm 7\%$ 允许偏差范围内，因此，由图 5-2 中各

DG 母线电压可以看出本文改进二次控制策略的有效性。

图 5-3 给出了基于改进动态事件触发一致性的平均母线电压观测器得出的平均母线电压。为验证平均母线电压观测器的快速收敛性，在 $t=0s$ 时，观测器启动，经 0.2s 左右各 DG 的母线电压收敛到平均值。在 1s 后，经改进二次控制策略调节后，各 DG 平均母线电压值收敛到 400V。

图 5-4 为功率计算模块得到的负荷需求功率情况，将得到的负荷总需求功率加入到经济调度策略中，经第 4 章改进调度策略可得到如图 5-5 所示的经济调度结果，在加入改进二次控制策略后各 DG 的增量成本收敛到 0.0475[\$/(kW·h)]。

图 5-6 为加入改进二次控制策略后各 DG 输出功率的变化情况，因为考虑了各 DG 的容量约束，可见 DG1 和 DG4 分别按照其最大功率 $P_{i,max}$ 输出，用来满足负荷总需求功率以达到功率供需平衡，并满足最优功率分配。

图 5-7 给出了在加入改进二次控制策略后的 4s 内改进动态事件触发机制的触发时刻，由图可知，加入改进动态事件触发机制后各 DG 之间不需要连续进行信息交换，在刚加入改进二次控制策略时，各 DG 间需要进行大量信息交换来使系统达到稳定，但系统达到稳定后，各 DG 间的信息交换次数明显减少，从而节约大量通信资源。

5.3.2 改进二次控制策略控制性能对比研究

为进一步验证本文改进二次控制策略的优越性，本文将其与文献[43]中常规动态事件触发二次控制策略（图中简称“常规策略”）进行比较，进一步验证本文改进二次控制策略的优越性。采用这两种控制策略时母线电压、平均电压观测值以及增量成本一致性对比仿真结果如图 5-8-图 5-10 所示，采用常规策略时 DG 间的触发时刻如图 5-11 所示。

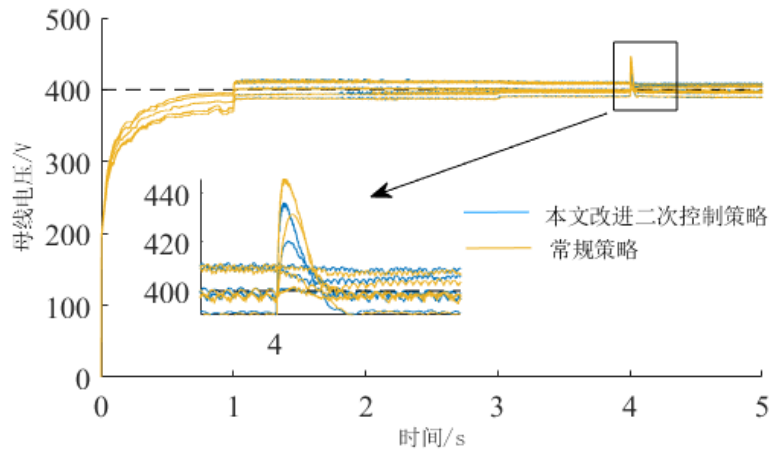


图 5-8 母线电压对比曲线

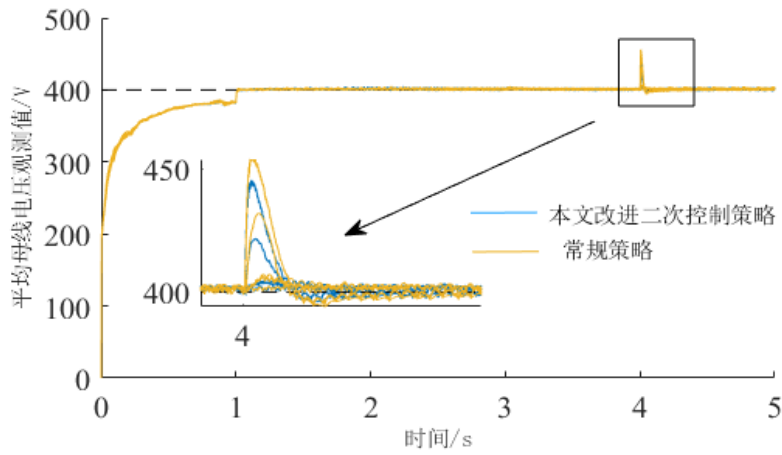


图 5-9 平均电压观测值对比情况

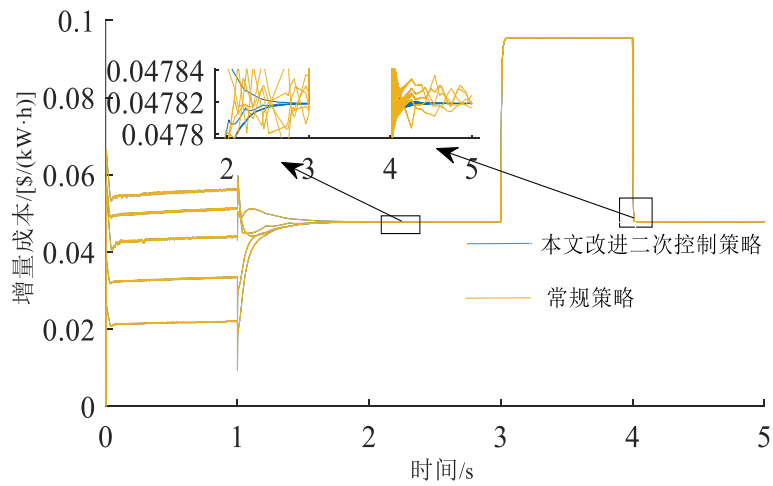


图 5-10 增量成本一致性对比曲线

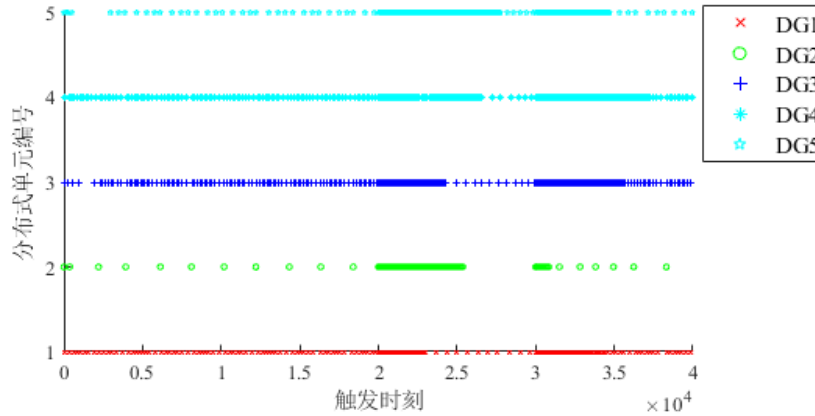


图 5-11 采用常规动态事件触发机制时各 DG 间的触发时刻

图 5-8 为在 4s 时 DG 退出时采用本文改进二次控制策略和常规策略母线电压对比曲线，由图 5-8 可知，应用本文改进二次控制策略和常规策略，在 $t=4s$ 时 DG 切除投入，母线电压都能快速稳定在 400V。

图 5-9 为在 4s 时 DG 退出时采用本文改进二次控制策略和常规策略平均电压观测值对比曲线，由图 5-9 可知，采用本文改进二次控制策略时，所得到的平均电压观测值在 DG 切除投入情况下能快速收敛到设定的额定值 400V，且电压波动较小，而采用常规动态事件触发二次控制策略时电压波动较大。

图 5-10 为在 4s 时 DG 退出时采用本文改进二次控制策略和常规策略增量成本对比曲线，由图 5-10 可知，应用本文改进二次控制策略时各 DG 的增量成本能快速收敛到最优值，波动较小，而采用常规策略时，电压波动较大，动态性能较差。

通过图 5-7 与图 5-11 对比，可得各 DG 的通信次数对比情况如表 5-3 所示。由表 5-3 可知，使用本文改进二次控制策略可以节约通信资源 98.4%左右。

表 5-3 触发次数对比

策略	DG1 (单位/次)	DG2 (单位/次)	DG3 (单位/次)	DG4 (单位/次)	DG5 (单位/次)	SUM (单位/次)
本文改进二次控制策略	127	113	137	137	120	634
常规策略	8952	8026	8993	9791	3534	39316

通过对比实验可以看出，本文改进二次控制策略具有较好的动态性能和稳态性能，能大幅减少通信资源，具有一定的现实意义和理论价值。

5.3.3 负荷波动时改进二次控制策略鲁棒性研究

为验证本文改进二次控制策略在负荷波动时的鲁棒性,设计场景:在 $t=1\text{s}$ 前,未加入本文改进二次控制策略; $t=1\text{s}$ 后加入本文改进二次控制策略;在 $t=3.5\text{s}$ 时,图 5-1 中母线 1 处切除其 50% 的负荷需求功率;在 $t=4.5\text{s}$ 时投入所切除的 50% 的负荷需求功率。仿真结果如图 5-12-图 5-17 所示。

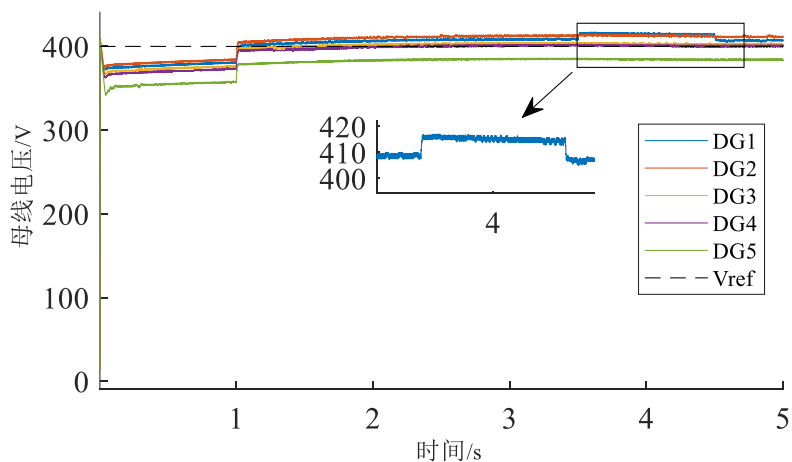


图 5-12 负荷波动时各 DG 母线电压曲线

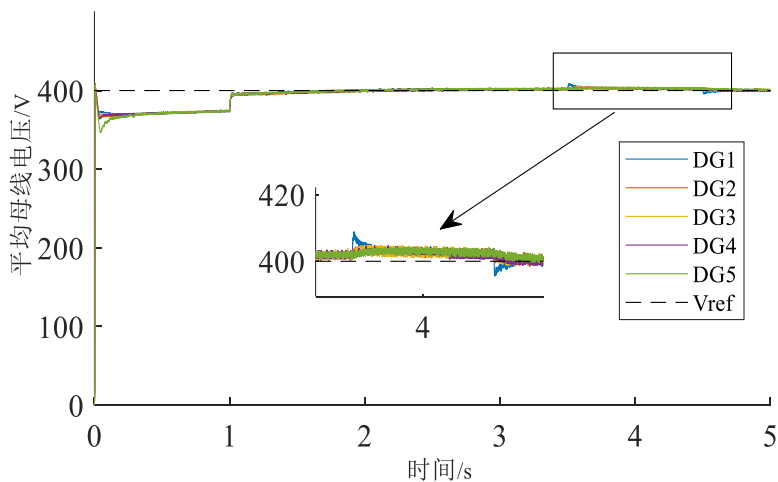


图 5-13 负荷波动时各 DG 平均电压观测值

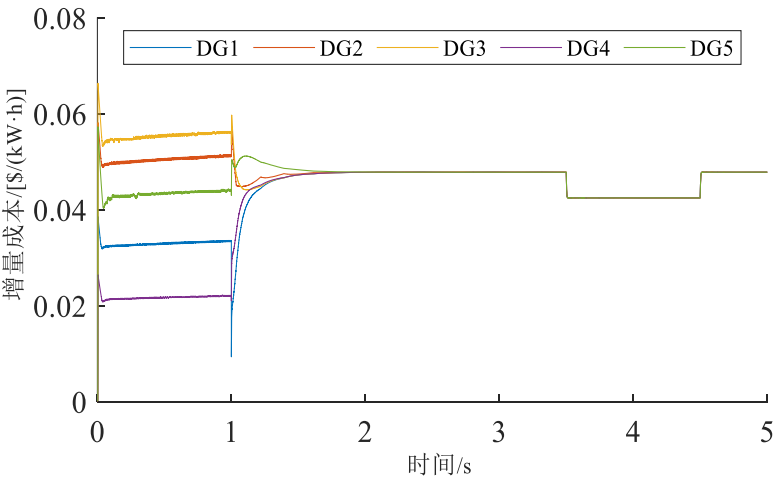


图 5-14 负荷波动时各 DG 的增量成本曲线

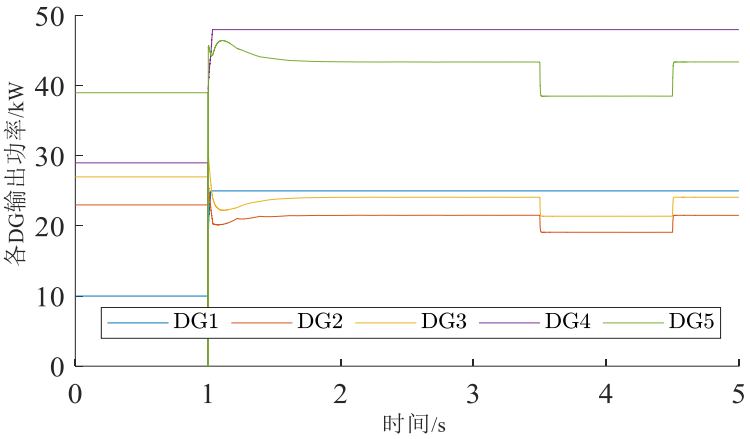


图 5-15 负荷波动时考虑功率约束各 DG 输出功率曲线

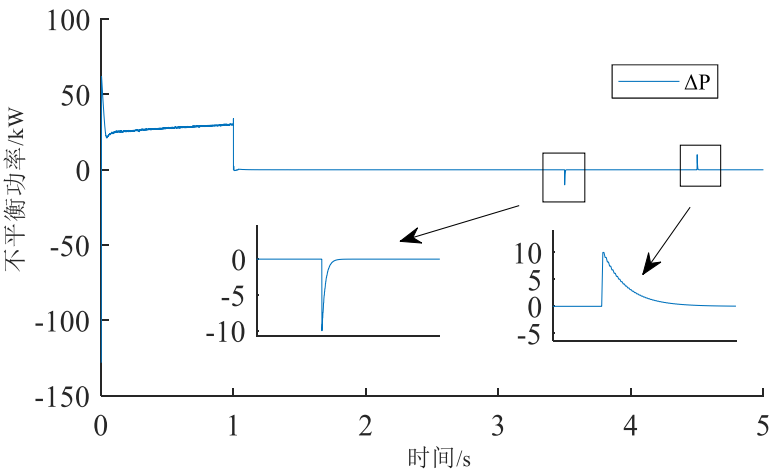


图 5-16 负荷波动时系统的不平衡功率曲线

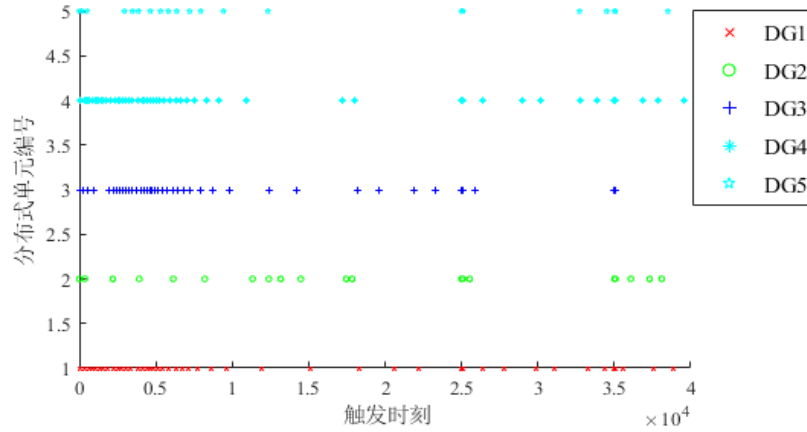


图 5-17 负荷波动时各 DG 的触发时刻

由图 5-12 各 DG 母线电压曲线可知，在 $t=1s-3.5s$ 时，各单元的母线电压能够恢复到 400V 左右； $t=3.5s$ 时，因 DG1 负荷需求功率切除 50%，DG1 的母线电压大于额定电压 400V； $t=4.5s$ 时，重新投入切除的 50% 负荷需求功率后，DG1 的母线电压又能重新恢复到 400V 左右。

由图 5-13 负荷波动时各 DG 的平均电压观测值可知，在 $t=3.5s$ 时，因 DG1 负荷需求功率减少 50%，所以 DG1 母线电压增大，但经短暂时间过渡后，平均电压观测器得到的各 DG 平均电压观测值均能收敛到额定值 400V。

图 5-14 表明了发生负荷波动时各 DG 的增量成本变化，由图可知，在 $t=3.5s$ 时，因 DG1 负荷需求功率少了 50%，所以各 DG 的输出功率也相应减少，根据最优功率分配准则，各 DG 的发电成本也相应减少，各 DG 的增量成本也相应降低且收敛到另一最优值 $0.432[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ ；在 $t=4.5s$ 时投入切除的负荷需求功率后，增量成本又能重新达到切除前的最优值 $0.475[\$/(\text{kW}\cdot\text{h})]$ 。

图 5-15 表明了发生负荷波动时，各 DG 的输出功率变化情况，由图可知，由于 DG2、DG3、DG5 的成本函数中二次项系数较大，为减小发电成本，相应的 DG 也随之减少发电，由图可以看出 DG2、DG3、DG5 的增量成本随之下降。

图 5-16 表明了发生在发生负荷波动时，系统不平衡功率的变化情况，由图可知，在 $t=3.5s$ 和 $t=4.5s$ 时，由于负荷发生波动，系统的不平衡功率瞬时变化，但经短暂时间过渡后稳定在 0kW。

图 5-17 表明了负荷波动时各 DG 间的触发时刻情况，由图可知，加入改进动态事件触发机制后，各 DG 之间不需要进行连续通信，只需在满足本文设计的事件条件时才进行通信，从而节约了通信资源。

5.3.4 DG 通信故障时算法鲁棒性研究

为验证本文改进二次控制策略在 DG 通信故障时的鲁棒性，设计场景： $t=1s$ 前，未加入本文改进二次控制策略， $t=1s$ 后加入本文改进二次控制策略，在 $t=2s$ 时，DG5 发生通信故障并在通信网络中丢失，为验证 DG 通信故障的影响，在 $t=3.5s$ 时，引入 5.3.3 节负荷波动事件。仿真结果如图 5-18-图 5-23 所示。

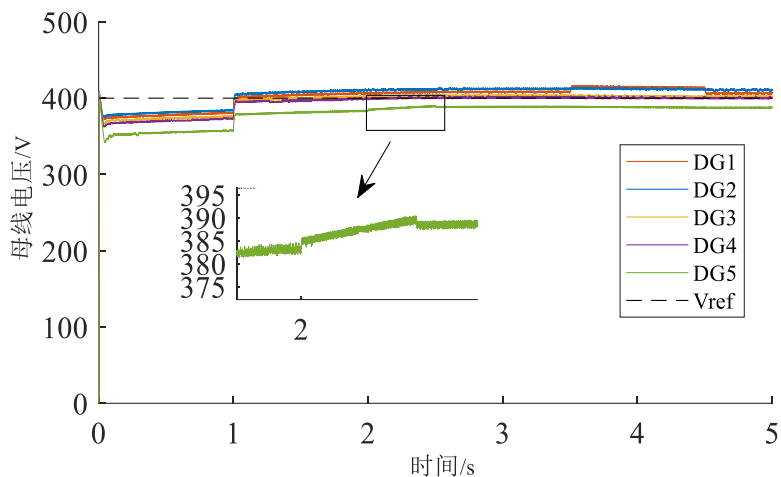


图 5-18 DG5 通信故障时各 DG 母线电压曲线

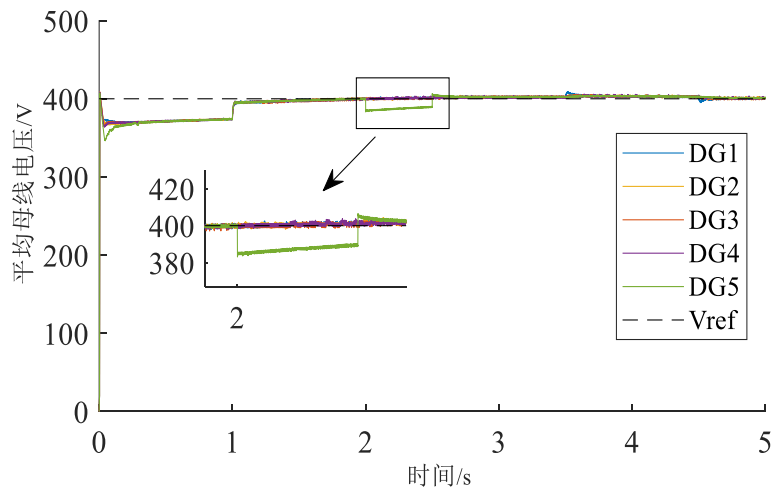


图 5-19 DG5 通信故障时各 DG 平均电压观测值

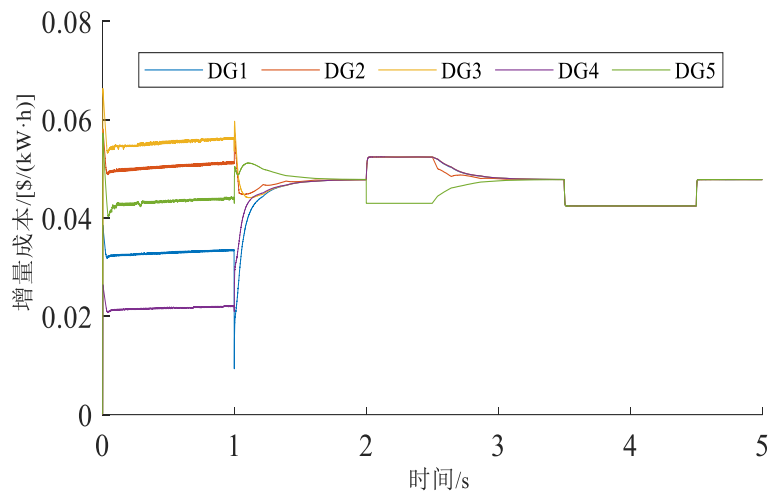


图 5-20 DG5 通信故障时各 DG 增量成本曲线

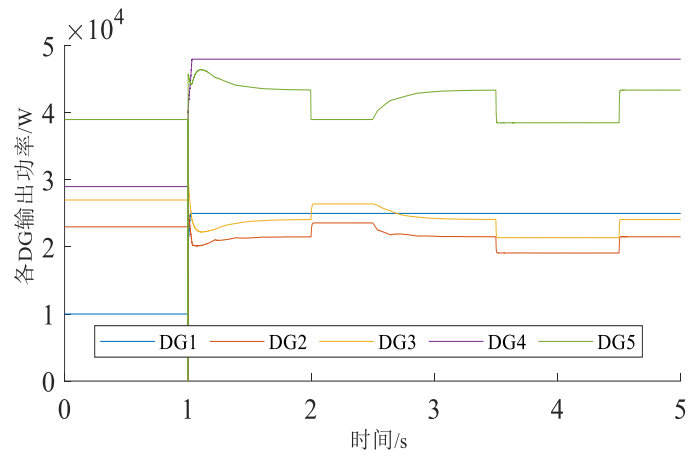


图 5-21 DG5 通信故障时考虑功率约束各 DG 输出功率曲线

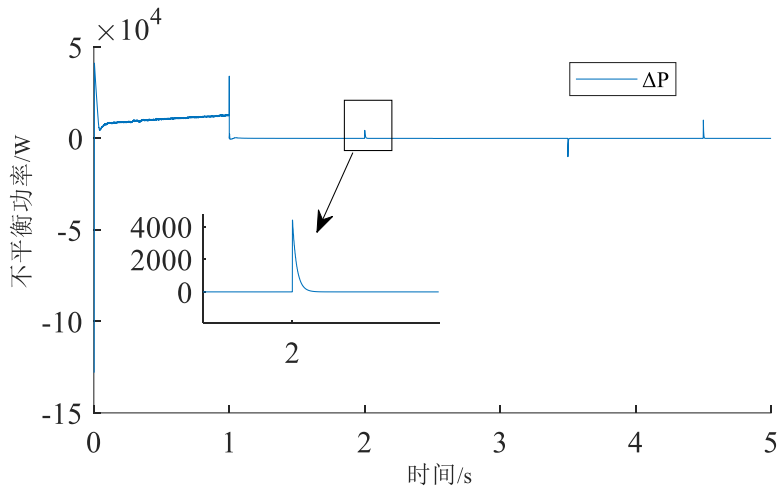


图 5-22 DG5 通信故障时系统的不平衡功率曲线

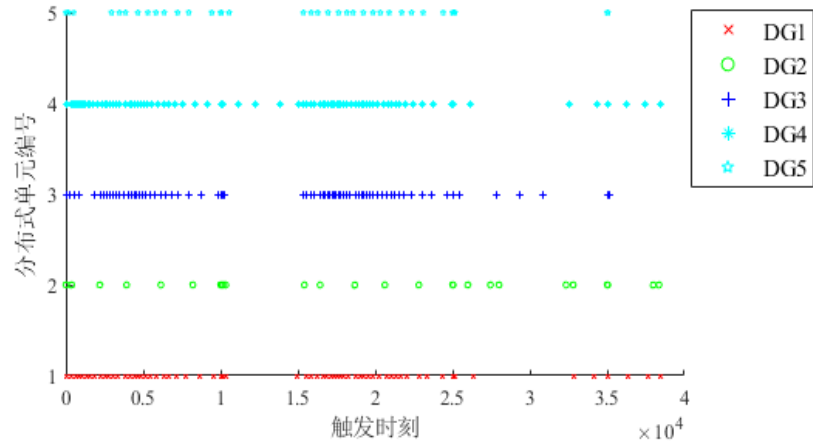


图 5-23 DG5 通信故障时各 DG 的触发时刻

由图 5-18 DG5 通信故障时各 DG 母线电压曲线可知， $t=2s-2.5s$ 内 DG5 发生通信故障，DG5 的母线电压仍能恢复到 400V 左右。

由图 5-19 可知，由于 DG5 在通信网络中丢失，DG5 不参与信息交换，在通信故障期间($t=2s-2.5s$)，经平均母线电压观测器得到的观测值为 1s 前未加入本文改进二次控制策略的观测值。

由图 5-20 通信故障时各 DG 增量成本曲线可知，故障期间 DG5 输出功率只能按下垂双闭环控制分配功率，其增量成本无法收敛到与其余 DG 相同的收敛值，而其他正常通信的 DG 仍可以输出最优功率。

由图 5-21 通信故障时考虑功率约束各 DG 的输出功率可知，由于 DG5 通信故障，DG5 的输出功率按下垂双闭环控制输出功率，其值为 1s 前未加入本文改进二次控制策略的输出功率，由于负荷总需求功率不变，DG5 的输出功率下降，为满足功率供需平衡，其他 DG 要输出更多的功率。

图 5-22 表明了 DG5 通信故障期间系统的不平衡功率，由图可知，因为 DG5 的输出功率只满足本单元所需的负荷功率，所以在 2s 时不平衡功率会发生波动，但由于采用本文改进二次控制策略，不平衡功率经过短暂时间过渡后又达到 0kW，从而满足系统功率的供需平衡。

图 5-23 为加入本文改进二次控制策略后 4s 内各 DG 的触发时刻，由图可知在 DG5 通信故障期间（加入本文改进二次控制策略后的 1.5s-2.5s），DG5 不参与信息交换，DG5 的触发次数为 0，在恢复通信后，DG5 又重新参与信息交换。

5.3.5 DG 切除投入时算法鲁棒性研究

为验证本文改进二次控制策略在 DG 切除投入时的鲁棒性，设计场景： $t=1s$ 前未加入本文改进二次控制策略； $t=1s$ 后加入本文改进二次控制策略；在 $3s$ 时切除 DG5； $4s$ 时将切除的 DG5 重新投入。仿真结果如图 5-24-图 5-29 所示。

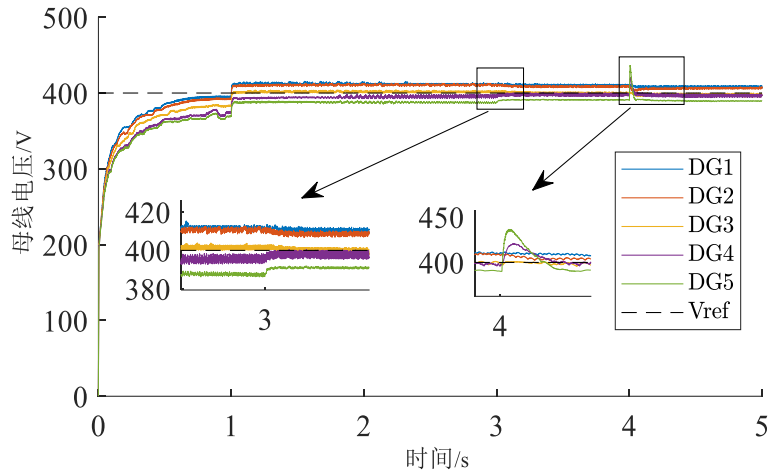


图 5-24 DG5 切除投入时各 DG 母线电压曲线

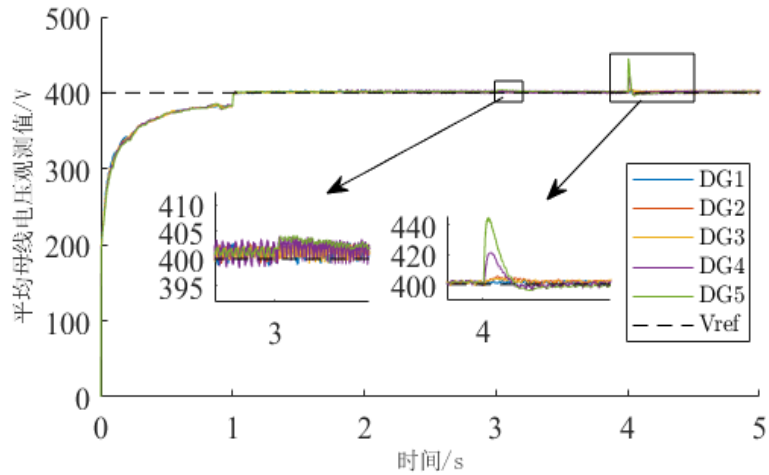


图 5-25 DG5 切除投入时各 DG 平均电压观测值

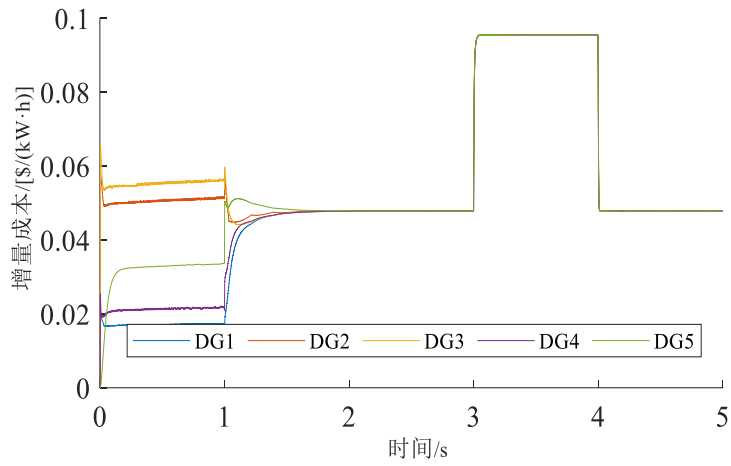


图 5-26 DG5 切除投入时各 DG 增量成本曲线

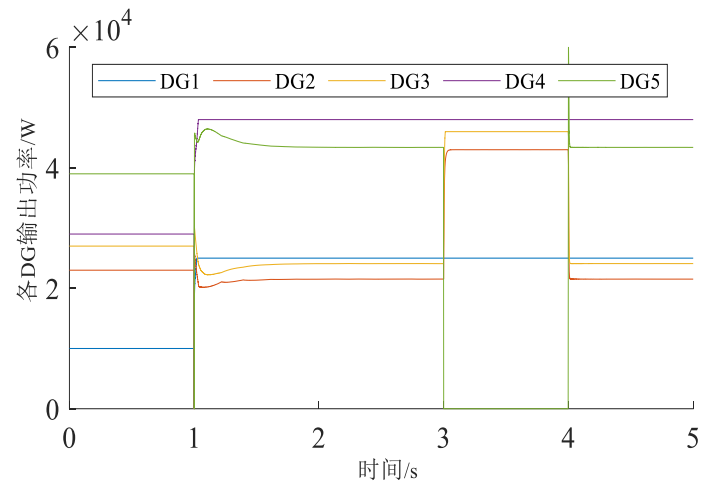


图 5-27 DG5 切除投入时考虑功率约束各 DG 输出功率曲线

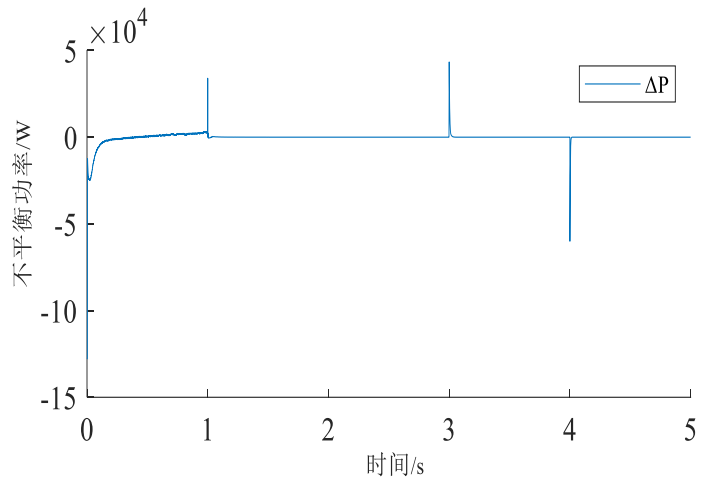


图 5-28 DG5 切除投入时系统不平衡功率曲线

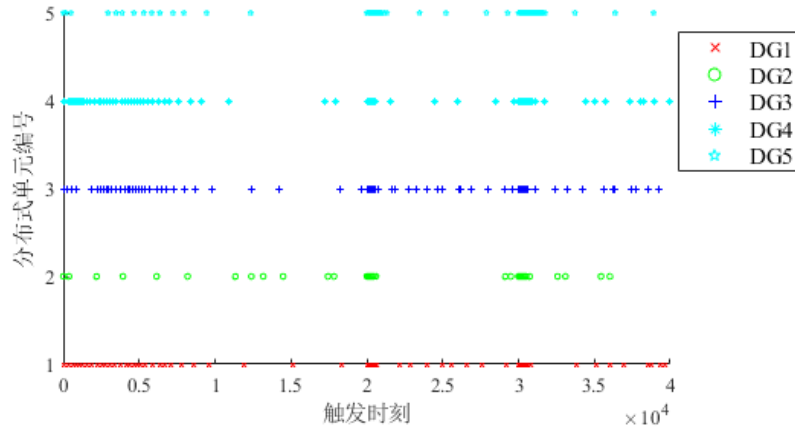


图 5-29 DG5 切除投入时各 DG 的触发时刻

由图 5-24 为 DG5 切除投入时各 DG 母线电压曲线,由图可知,在切除 DG5 后,各 DG 的母线电压发生波动,因为各 DG 通过线路并联,所以在 DG5 切除后 DG5 的母线电压仍能稳定在 400V;在 $t=4s$ 时 DG5 重新投入后,由于母线上有其它 DG 提供的电压,在 DG5 投入后, DG5 又重新为母线提供电压, DG5 的母线电压瞬时增大,经 0.25s 短暂时间过渡后母线电压又重新恢复到未切除时的电压值。

图 5-25 为切除投入 DG5 后各 DG 平均电压观测值,由图可知,在切除 DG5 前,各 DG 的母线电压为 400V,切除 DG5 后,由于各 DG 的母线电压发生变化,各 DG 的平均母线电压观测值也发生变化,但并不影响观测值收敛到 400V,将 DG5 投入后,各 DG 的平均电压观测值又收敛到 400V。

图 5-26 为在 DG5 切除投入后各 DG 的增量成本曲线,由图可知,切除 DG5 时即 DG5 的输出功率为 0,其他 DG 则应增大输出功率来满足负荷需求总功率,又因 DG5 的成本系数所占比重较低,所以在切除 DG5 后,系统的增量成本明显增加,将 DG5 投入后又能重新收敛到切除前的最优值。

图 5-27 为在 DG5 切除投入时考虑功率约束情况下各 DG 输出功率。由图可知在 3s-4s 时 DG5 的输出功率变为 0,其他 DG 的输出功率明显增加。

图 5-28 为 DG5 切除投入时系统的不平衡功率,由图可知,本文改进二次控制策略可使不平衡功率快速稳定到 0kW。

图 5-29 为 DG5 切除投入时各 DG 的触发时刻情况,由图可知,在切除投入 DG5 时各 DG 增加信息交换次数使系统达到稳定。

综上所述,在 DG 切除投入时,采用本文改进二次控制策略的鲁棒性较好。

5.4 本章小结

针对直流微电网下垂双闭环控制存在母线电压偏差、通信频率高、常规动态事件触发二次控制策略适用性低和 DG 切除投入时电压波动过大等影响系统动态性能和可靠性的问题,本文提出了一种基于动态事件触发一致性的直流微电网二次控制策略。在直流微电网分层控制中,首先,设计了基于改进动态事件触发一致性平均电压观测器,将得到的平均电压观测值以及功率分配最优值(增量成本最优值)作为补偿量加入到底层变换器的下垂双闭环控制中。其次,通过设计改进动态事件触发一致性模块,可以提高动态事件触发对系统状态变化的动态响应速度,且在不影响系统稳定性的前提下,最大限度地减少各 DG 间的通信频率,仿真实验表明在发生负荷波动、通信故障以及 DG 切除投入的情况下,该策略仍能满足上述目标需求,仿真对比实验显示,本文改进二次控制策略与常规动态事件触发二次控制策略相比,可以更大幅度地减少通信次数,降低二次控制对系统通信资源的占用,且在发生 DG 切除投入时,该策略的动态性能大幅提高,提高了二次控制的可靠性及稳定性。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

随着我国碳达峰和碳中和战略目标的加快实现，直流微电网作为一种高效、灵活、可持续发展的电力系统，正在成为支撑我国能源转型的重要技术之一。直流微电网在推动可再生能源的使用、能源利用效率的提高以及提高分布式发电的稳定性等方面扮演着重要角色。本文针对直流微电网分布式经济优化调度和二次控制展开研究。首先，针对直流微电网系统中分布式单元之间的通信次数过多等问题，提出改进动态事件触发一致性算法，分析了所提改进算法的稳定性问题，并考虑了所提改进算法在时延影响下的鲁棒性，有效地解决了分布式单元之间通信次数过多问题。然后，针对直流微电网系统的经济调度问题，提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略，在实现分布式单元的增量成本一致的前提下，使总发电成本最低，并且大幅度地节约了通信资源，满足经济性要求。最后，针对直流微电网系统二次控制中存在母线电压偏差等问题，提出了基于改进动态事件触发一致性的直流微电网分布式二次控制策略，保证了各 DG 的母线电压恢复到额定值以及功率最优分配。本文主要研究内容和成果如下：

（1）考虑直流微电网系统中 DG 之间通信次数过多以及通信时延等问题，在事件触发机制基础上进行改进，提出了一种改进动态事件触发一致性算法。每个 DG 只在满足事件触发条件时进行通信，可有效地减少 DG 的通信次数，节约通信资源。在保证系统稳定的前提下，即使系统中存在通信时延，该算法也能保证系统稳定，相较于传统分布式一致性算法，本文改进算法的收敛速度也大大提高。

（2）对直流微电网分布式经济调度进行研究，提出了一种基于改进动态事件触发一致性的直流微电网经济调度策略。改进调度策略可使每个分布式单元的增量成本达到一致，保证源荷储功率供需平衡，实现每个 DG 和储能的最优出力，使总发电成本最低，在保证系统稳定的前提下，可大幅减少分布式单元之间的通信次数，节约通信资源，满足经济性要求。

（3）对直流微电网分布式二次控制进行研究，提出了基于改进动态事件触

发一致性的直流微电网分布式二次控制策略。该策略不仅能保证每个 DG 的母线电压恢复到设定的额定值，并且能够实现功率的精确分配，同时降低通信负担。

6.2 展望

作为一种新兴的控制方法，基于动态事件触发机制的直流微电网控制策略拥有巨大的潜力。但随着能源绿色化转型的深入，高比例可再生能源和高比例电力电子设备接入能源互联网，直流微电网控制仍有许多问题亟待解决，今后的研究工作可从以下几方面深入研究：

（1）由于直流微电网系统的复杂性以及 DG 的多样性，未来的研究可以提升基于动态事件触发一致性算法的鲁棒性，尤其是在通信延时等情况下，可通过优化算法，进一步增强系统对外界干扰的适应能力，确保直流微电网在复杂场景下稳定运行。

（2）直流微电网分层控制中不同的控制目标对算法的需求各异，未来研究可探讨如何基于事件触发一致性算法实现多层次、多目标的优化控制。在优化发电单元最优出力等目标时，可同时兼顾微电网的稳定性和经济性。

（3）基于动态事件触发机制一致性算法的核心优势在于减少 DG 之间频繁的信息交换，未来的研究将探索如何优化通信协议、拓扑结构及网络资源分配，进一步减少时延影响，提高数据传输效率，确保事件触发机制能够在实时响应下顺利进行。通信与控制算法的协同优化将成为推动直流微电网分层控制方法发展的关键技术之一。

参考文献

- [1] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(01):2-17.
- [2] 杜伟, 文腾. 《“十四五”现代能源体系规划》等多项政策出台布局中国新型能源体系[J]. 国际石油经济, 2023,31(01):9-10.
- [3] 吴鸣, 张楠春, 梁英, 等. 新型电力系统背景下微电网技术研究与发展[J]. 新型电力系统, 2024,2(03): 251-271.
- [4] 范文轩, 袁至, 王维庆, 等. 绿氢储能系统综合评价体系和双层优化方法[J/OL]. 电力自动化设备, 1-17[2025-03-03]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202501022>.
- [5] 宋关羽, 王智颖, 李鹏, 等. 新能源微电网综合实验平台及教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(01): 112-116.
- [6] 农村电气化专业发展报告节选(三)——可再生能源分散接入和微电网技术[J]. 农村电气化, 2020, (03): 5-9.
- [7] 程昱舒, 谢振刚, 郭晓霞. 基于 NSGA-II算法的微电网无功分区节点选择[J]. 电子设计工程, 2025, 33(03): 111-114+119.
- [8] 孙之鑫. 基于改进蚁群算法的孤岛微电网优化调度[J]. 自动化应用, 2025, 66(01): 119-124.
- [9] 何启成. 新形势下电力工程设计中的电力系统规划设计研究[J]. 光源与照明, 2024, (12): 207-209.
- [10] 张宁, 李季. 基于自适应变异粒子群的风光储微网调度[J]. 天津: 天津理工大学学报, 2024, 40(02): 77-83.
- [11] 王学兵, 张国生, 宋宸, 等. 基于双向长短时记忆网络的并网微电网能量供需平衡优化[J]. 计算技术与自动化, 2024,43(01): 142-147.
- [12] 谢夏慧, 杨立宁, 陈奇朋. 分布式电源协调优化调度和电压协同控制关键技术综述[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(12): 146-147+150.
- [13] 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.
- [14] 何力宇. 孤岛微电网分层控制策略研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [15] 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.
- [16] 卢梦蝶, 宁涛, 王德佳, 等. 基于多智能体一致性的多微电网分布式经济调度[J]. 电气自动化, 2022, 44(02): 21-24.
- [17] 何玉钧, 魏克俭, 张倩. 考虑噪声和环境的微电网分布式经济调度策略[J]. 电子测量技

- 术, 2022, 45(09): 68-75.
- [18] 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, 2020.
- [19] Girard, Antoine. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(7): 1992-1997.
- [20] LI H, LI L, Cheng R , et al. Optimized event-triggered control for linear systems with state observer[C]// 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Kunming, China, 2021: 6584-6589.
- [21] X. Yi, K. Liu, D. V. Dimarogonas and K. H. Johansson. Distributed dynamic event-triggered control for multi-agent systems[C], 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), Melbourne, VIC, Australia, 2017, pp. 6683-6698.
- [22] 杨大鹏. 多智能体系统的事件驱动一致性控制与多 Lagrangian 系统的分布式协同[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [23] 刘永慧, 卢艳杰. 网络攻击下直流微电网系统的事件触发滑模控制[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(06): 212-221.
- [24] 刘永忠. 直流微电网在间歇控制下的稳定性研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2024.
- [25] 陈莉. 基于事件触发机制的直流微电网集群改进分布式控制[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2023.
- [26] 姜海阳. DoS 攻击下基于边沿事件触发的直流微电网分布式控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [27] 季博威. 基于事件触发的直流微电网控制[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- [28] 陈欣宇. 孤岛直流微电网分布式经济优化控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [29] 宋超, 禹梅, 谭文. 基于事件触发的微电网经济分配一致性算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(10): 1395-1408.
- [30] 田野. 基于事件触发一致性的孤岛微电网二次控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [31] 郭伟, 赵洪山. 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(05): 1140-1151.
- [32] 楼冠男, 蒋啸宇, 顾伟, 等. 基于事件触发的有源配电网改进变分算法及其稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 66-75.
- [33] 张继雄. 动态事件触发下线性多智能体系统分布式一致性控制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [34] 张继雄, 李宗刚, 宁小刚, 等. 动态事件触发下一般线性多智能体系统完全分布式一致性控制[J]. 兵工学报, 2023, 44(S2): 223-234.
- [35] 张浩. 线性多智能体系统的分布式动态事件触发一致性控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

- [36] 魏浩雄. 基于动态事件触发的多智能体分布式一致性控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [37] 于永进, 孙国强, 樊英杰. 基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024,52(20): 60-71.
- [38] 钱月. 基于动态事件触发的线性多智能体系统弹性控制及应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [39] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(09): 1520-1533.
- [40] Olfati-Saber R. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(03): 401-420.
- [41] 孙振峰. 信息网络攻击下微电网分布式经济调度[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [42] 王隔霞, 王军平. 微电网多目标经济调度的一致性算法[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(05): 500-506.
- [43] 白聪. 基于动态加权梯度的多微电网分布式优化经济调度方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [44] 胡之涵. 基于 V2G 背景下微电网分布式经济调度策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [45] 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, 2022.
- [46] 胡南. 基于一致性算法的微电网经济调度方法研究[D]. 秦皇岛: 东北大学, 2021.
- [47] 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.
- [48] 王力, 舒毅, 赵斌, 等. 基于 Kuramoto 模型的孤岛微电网分布式二次频率控制策略[J/OL]. 太阳能学报, 1-10[2025-03-03]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-1449>.
- [49] 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.
- [50] 翟镇, 何晋. 基于一致性算法的多储能单元分布式二次控制策略[J/OL]. 云南民族大学(自然科学版), 1-7[2025-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1192.n.20241111.1125.012.html>.
- [51] 程勇, 姚磊茹, 成琦, 等. 基于滑模自适应有限时间一致性算法的微电网二次控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5822-5830.
- [52] 彭子韵, 刘永慧. 基于固定时间滑模的直流微电网一致性控制[J]. 上海电机学院学报, 2024,27(06): 317-323.
- [53] 肖蕙蕙, 熊文星, 李海啸, 等. 孤岛微电网基于分布式一致性算法的二次控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024,38(01): 264-272.

- [54] 周焯, 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.
- [55] 杨家豪. 基于一致性算法的孤岛型微电网群实时协同功率分配[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(05): 8-15.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 张步云. 基于一致性算法的分布式储能经济优化控制策略[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [59] 米阳, 刘红业, 宋根新, 等. 面向能源互联网的多能源局域网两层功率优化分配[J]. 电力自动化设备, 2018,38(07): 1-10.
- [60] 蒲天骄, 刘威, 陈乃仕, 等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(06): 1579-1590.
- [61] 米阳, 郎中杰, 何星塘, 等. 孤岛微电网鲁棒自适应协调控制[J]. 控制工程, 2021, 28(05): 924-930.
- [62] 和正强. 微电网关键技术及其相关问题的窥探[J]. 中国新通信, 2022,24(23): 36-38.
- [63] 张凡, 牟龙华, 王子豪, 等. 主从控制孤岛微电网的优化故障控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(04): 1241-1248+1414.
- [64] 徐瑞东, 周建勇, 宋淑贞, 等. 对等结构的微网逆变器控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(08): 104-108.
- [65] 朱洋艳, 王致杰, 王鸿, 等. 基于分层控制的微电网混合储能协调优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(03): 235-242.
- [66] 杨清志, 蒋伟, 许春雷. 基于多智能体的交直流混合微电网监控设计与分层控制研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(07): 2327-2339.
- [67] 张帆, 夏能弘, 许肖颖. 基于有限时间一致性的混合微电网分层控制[J]. 电力电子技术, 2023,57(01): 105-108.
- [68] 孟潇潇, 尤泽豪, 张茂凡, 等. 基于背靠背变流器柔性互联微电网群的分层分布式协同控制及其稳定分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7917-7932.
- [69] 何力宇. 孤岛微电网分层控制策略研究[D]. 东北石油大学, 2024.
- [70] 姜华, 王红全, 路赵, 等. 基于多智能体一致性的微电网控制技术研究[J]. 电力大数据, 2024, 27(06): 65-71.

攻读硕士学位期间的研究成果

- [1] 欧阳昌乐, 张春, 吴文泰, 等. 基于改进动态事件触发机制的微电网经济调度一致性算法[J/OL]. 发电技术, 1-15[2025-02-19]. (CSCD)
- [2] 欧阳昌乐, 一种基于动态事件触发机制直流微电网经济调度方法(发明专利)

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，我在安徽工程大学的七年学习生涯即将画上句号，在这段求知与探索的旅程中，我得到了许多人的关心与帮助，在此，我谨向所有给予我支持和鼓励的老师、亲友和同学表达我最诚挚的感谢。

首先，我要衷心感谢我的导师张春教授，他不仅在学术研究上给予了我悉心的指导，还在生活和思想上给予了我极大的帮助。从课题的选题、研究方案的制定到论文的撰写与修改，导师都倾注了大量的心血，使我受益匪浅。

其次，感谢安徽工程大学的所有授课老师，是他们的教诲让我在专业知识和科研能力上得到了提升。同时，感谢实验室的师兄师姐和同学们，在学术交流、实验研究等方面给予我的帮助和鼓励，使我在科研道路上不再孤单。

此外，我要特别感谢我的家人，他们的理解、支持和关爱是我坚持不懈、勇往直前的动力。无论是在我遇到困难时的鼓励，还是在我取得进步时的分享，家人始终是我坚实的后盾。

最后，感谢自己在求学路上的坚持与努力，这段时光虽充满挑战，但也收获满满。愿你我未来可期。

尚德敏学 唯实惟新

