

分类号: TM73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220310106



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 分布式储能聚合与协同频率

控制研究

论 文 作 者 吴新龙

指 导 教 师 葛愿教授

学 科 (专 业) 电气工程

研 究 方 向 新能源发电技术

论文提交日期: 2025 年 5 月 19 日

分类号：TM73

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220310106

题 目 分布式储能聚合与协同频率控制研究

题 目 RESEARCH ON DISTRIBUTED ENERGY STORAGE
AGGREGATION AND COORDINATED FREQUENCY
CONTROL

论 文 作 者：吴新龙

指 导 教 师：葛愿 教授

专 业（领域）：电气工程

研究方向（领域）：新能源发电技术

论文答辩日期：2025年5月11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：吴新龙

日期：2025 年 5 月 19 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：

吴新龙

指导教师签名：

郭

日期： 2025 年 5 月 19 日

日期： 2025 年 5 月 19 日

分布式储能聚合与协同频率控制研究

摘 要

2020 年,伴随着国家“碳达峰”和“碳中和”双碳政策的提出,以光伏和风电为主的新能源高比例并网,电网在面临惯量支撑能力下降、频率调节裕度缩减等突出问题的同时,还面临着新能源出力波动性带来的调频需求激增问题。传统同步机组调频响应速度慢、调节精度有限的问题在新型电力系统中愈发凸显,而分布式储能凭借其快速功率响应特性和灵活调节能力,为系统频率稳定提供新的技术路径。本文主要从分布式储能聚合方法,聚合储能参与一次调频的控制策略和储能协同频率控制策略三方面开展研究。

在分布式储能聚合研究上,提出考虑动静态参数的分布式储能聚合方法。首先,考虑分布式储能接入系统层面的系统稳定性、系统可靠性和响应能力三个静态参数进行聚合。其次,在静态参数聚合的基础上,考虑分布式储能自身层面的储能可输出功率、储能汇聚时间和储能可调度容量三个动态参数进行二次聚合。最后,通过对动态参数聚合效果进行评估,验证聚合方法的有效性,实现分布式储能的高效聚合,为聚合储能参与系统调频控制奠定了基础。

在储能参与一次调频的控制研究上,提出基于模糊控制的储能调频死区设置和模糊神经网络控制的一次调频控制策略。首先,构建包含混合储能系统的频率响应模型,考虑锂电池和超级电容的动作特性,采用模糊控制的方法设置混合储能的死区。其次,从储能参与一次调

频的基本控制方式出发,分析虚拟下垂和虚拟惯性的作用特性,提出采用模糊神经网络控制两者占比系数的调频控制策略。最后,在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,验证本文在调频死区设置和调频控制策略上的有效性。

在储能协同频率控制研究上,提出基于改进遗传算法和集群划分的多智能体一致性协同频率控制。首先,构建包含火电机组、储能、新能源与可控负荷等多类型调频资源的频率响应模型,计算满足频率偏差下所需的下垂系数总值,采用一致性算法将下垂系数总值自适应分配至各调频资源,实现协同频率控制。其次,研究一致性算法中的收敛参数,采用改进遗传算法优化收敛系数,减少一致性算法的迭代次数。最后,在储能协同频率控制与储能 SOC 均衡上,通过对调频资源按照类型进行集群划分,储能集群内部协同后再参与不同集群之间协同,实现储能集群系统 SOC 均衡的同时兼顾了协同频率控制。

关键词: 动静态参数, K-means 算法, 分布式储能聚合, 一次调频, 模糊神经网络控制, 协同频率控制, 一致性算法

RESEARCH ON DISTRIBUTED ENERGY STORAGE AGGREGATION AND COORDINATED FREQUENCY CONTROL

ABSTRACT

In 2020, with the proposal of China's "carbon peaking and carbon neutrality" policy, the high penetration of renewable energy sources, primarily photovoltaic and wind power, has intensified challenges such as declining system inertia, reduced frequency regulation margins, and surging frequency modulation demands caused by renewable power fluctuations. Traditional synchronous generators, limited by their slow response and low regulation accuracy, struggle to meet the frequency stability requirements of modern power systems. Distributed energy storage systems (ESS), with their rapid power response and flexible regulation capabilities, offer a promising technical pathway for enhancing grid frequency stability. This paper focuses on three key aspects: distributed energy storage aggregation methods, control strategies for aggregated ESS participation in primary frequency regulation, and coordinated frequency control strategies for multi-resource systems.

In the study of distributed energy storage aggregation, a distributed energy storage aggregation method considering dynamic and static parameters is proposed. First, aggregation is performed based on three

static parameters at the system level: system stability, system reliability, and response capability, which are influenced by the integration of distributed energy storage. Subsequently, a secondary aggregation is conducted by incorporating three dynamic parameters at the energy storage unit level: available power output, aggregation time, and dispatchable capacity. Finally, the effectiveness of the aggregation method is validated through dynamic parameter evaluation, achieving efficient aggregation of distributed energy storage and laying the foundation for aggregated energy storage participation in system frequency regulation control.

In the study of energy storage participation in primary frequency regulation control, a primary frequency regulation strategy is proposed based on fuzzy control-based energy storage dead-zone configuration and fuzzy neural network (FNN) control. First, a frequency response model incorporating hybrid energy storage systems is established, accounting for the operational characteristics of lithium-ion batteries and supercapacitors. A fuzzy logic-based method is employed to configure the dead-zones for hybrid energy storage. Subsequently, building on the fundamental control modes of energy storage participation in primary frequency regulation, the study analyzes the complementary characteristics of virtual droop control and virtual inertia control. An FNN-based adaptive control strategy is designed to dynamically optimize the coordination ratio between these two control modes. Finally, a simulation model is developed in

Matlab/Simulink to validate the effectiveness of the proposed frequency dead-zone configuration and frequency regulation strategies.

In the study of coordinated frequency control for energy storage systems, a multi-agent consensus-based coordinated frequency control strategy is proposed, integrating an improved genetic algorithm and cluster partitioning. First, a frequency response model incorporating multiple types of frequency regulation resources, including thermal power units, energy storage systems, renewable energy sources, and controllable loads are established. The total droop coefficient required to meet frequency deviation constraints is calculated, and a consensus algorithm is applied to adaptively allocate this coefficient across resources, achieving coordinated frequency regulation. Second, convergence parameters within the consensus algorithm are optimized using an improved genetic algorithm, significantly reducing iteration cycles and enhancing computational efficiency. Finally, to address both frequency control and state-of-charge (SOC) balancing, frequency regulation resources are categorized into clusters based on their operational characteristics. Intra-cluster coordination within energy storage groups ensures SOC equilibrium, while inter-cluster coordination among heterogeneous resource clusters maintains system-wide frequency stability.

Xinlong Wu (Electrical Engineering)

Supervised by Prof. Yuan Ge

KEY WORDS: dynamic and static parameters, K-means algorithm, distributed energy storage aggregation, primary frequency regulation, fuzzy neural network control, cooperative frequency control, consistency algorithm

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 分布式储能聚合的研究现状.....	4
1.2.2 储能参与一次调频的研究现状.....	5
1.2.3 储能协同频率控制的研究现状.....	7
1.3 本文研究内容与结构安排.....	9
第 2 章 考虑动静态参数的分布式储能聚合研究	11
2.1 动静态参数的分布式储能聚合	11
2.2 分布式储能静态参数聚合	12
2.2.1 系统稳定性.....	12
2.2.2 系统可靠性.....	12
2.2.3 响应能力.....	12
2.2.4 基于 K-means 算法的静态参数聚合	13
2.3 分布式储能动态参数聚合	14
2.3.1 储能可输出功率.....	14
2.3.2 储能汇聚时间.....	14
2.3.3 储能可调度容量.....	14
2.3.4 动态参数的区间数.....	14
2.3.5 区间数特征变换.....	15
2.3.6 基于 K-means 算法的动态参数聚合	16
2.4 实验分析.....	16
2.4.1 基于 K-means 算法的静态参数聚合	16
2.4.2 基于 K-means 算法的动态参数聚合	18

2.4.3 基于 K-means 算法的动态参数聚合效果评估	20
2.5 本章小结.....	22
第 3 章 考虑调频死区和占比系数的储能一次调频	23
3.1 含混合储能的系统频率响应模型.....	23
3.1.1 传统电力系统频率响应模型.....	23
3.1.2 混合储能频率响应模型.....	25
3.1.3 含混合储能的系统频率响应模型.....	26
3.2 基于模糊控制的混合储能系统调频死区设置.....	28
3.3 储能一次调频的基本控制方式.....	31
3.3.1 虚拟下垂控制.....	31
3.3.2 虚拟惯性控制.....	32
3.4 基于模糊神经网络控制的储能一次调频控制策略.....	33
3.5 仿真分析.....	38
3.5.1 评价指标.....	38
3.5.2 仿真参数的设置及仿真平台的搭建.....	39
3.5.3 混合储能调频死区设置的仿真对比.....	39
3.5.4 基于模糊神经网络控制的储能一次调频控制策略的仿真对比.....	41
3.6 本章小结.....	44
第 4 章 基于一致性算法的储能协同频率控制研究	45
4.1 多智能体一致性算法理论.....	45
4.1.1 图论基础.....	45
4.1.2 一致性算法.....	47
4.2 基于一致性算法的调频控制策略.....	48
4.2.1 储能协同频率控制的频率响应模型.....	48
4.2.2 一致性算法调频指标求解.....	49
4.3 基于改进遗传算法的协同频率控制.....	51
4.3.1 协同频率控制.....	51
4.3.2 改进遗传算法.....	52
4.4 基于集群划分方法的协同频率控制策略.....	54

4.4.1 集群划分.....	54
4.4.2 储能 SOC 一致性均衡.....	55
4.5 仿真分析.....	57
4.5.1 协同频率控制.....	57
4.5.2 储能 SOC 均衡.....	60
4.6 本章小结.....	61
第 5 章 总结与展望	63
5.1 工作总结.....	63
5.2 未来展望.....	64
参考文献	65
攻读硕士学位期间取得的研究成果	72
致谢	73

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

在国家经济持续增长的驱动要素中，能源供给体系始终发挥着基础性支撑作用。当前化石燃料储量的持续缩减与环境承载能力的硬性约束，特别是传统化石能源大规模使用引发的生态系统破坏与全球温室效应加剧，正推动着能源消费模式的系统性重构。在此背景下，传统化石能源主导的能源供给体系面临根本性调整，构建低碳环保、安全可靠的能源供给体系，不仅成为应对气候变化的必然选择，更是实现可持续发展目标的战略核心。2020 年 9 月，伴随着“双碳”目标的提出，标志着我国能源供给体系深度转型进入实质性推进阶段。在此框架下，加速构建以新能源为主的能源供给体系，已成为实现“双碳”目标的重要手段。近几年来，我国能源供给体系中新能源机组装机容量不断增大。根据国家能源局全国电力工业统计数据^[1-4]，汇总统计形成表 1-1，可以看出在近几年国家政策的大力支持下，新能源机组装机容量由 2021 年的 6.4 亿千瓦增长至 2024 年的 14.1 亿千瓦，在总发电装机容量占比中从 26.72%增长至 42.03%，直观反映了我国新能源装机规模的爆发式增长及其在能源结构中的主导地位。截至 2024 年底，新能源占比超过 40%，标志着“双碳”目标下能源转型取得阶段性成果，为构建以新能源为主体的能源供给体系奠定坚实基础。

表 1-1 2021 年—2024 年太阳能发电和风电装机容量统计

年份	2021	2022	2023	2024
太阳能发电和风电装机/ 万千瓦	63504	75805	105083	140734
总发电装机/万千瓦	237692	256405	291965	334862
占比/%	26.72	29.56	35.99	42.03

在光伏发电的发展上，根据统计数据^[1-4]，汇总统计形成表 1-2，可以看出近四年来光伏发电的发展呈现爆发式增长，新增装机容量呈现逐年递增的趋势，装机容量由 2021 年的 30656 万千瓦直接飙升到 2024 年的 88666 万千瓦，容量足足

翻了两番。

表 1-2 2021 年—2024 年太阳能发电装机容量统计

年份	2021	2022	2023	2024
太阳能发电装机容量/ 万千瓦	30656	39261	60949	88666
新增装机容量/万千瓦	5313	8605	21688	27717
同比增长/%	20.9	28.1	55.2	45.5

在风力发电的发展上，相较于光伏，风电装机由于受到地形和气候条件的影响，增长趋势较为平稳。根据统计数据^[1-4]，汇总统计形成表 1-3，可以看出虽然新增装机容量在 2021 年有减少的现象，但近四年来风电装机容量一直保持着增长的趋势。截止到 2024 年，我国风电装机容量已达到 52068 万千瓦，相较于 2021 年的 32848 万千瓦，装机容量上取得了不错的成绩。

表 1-3 2021 年—2024 年风电装机容量统计

年份	2021	2022	2023	2024
风电装机容量/ 万千瓦	32848	36544	44134	52068
新增装机容量/ 万千瓦	4695	3696	7590	7934
同比增长/%	16.6	11.2	20.7	18.0

在新能源装机容量不断提高的情况下，装机容量的提高势必会提高其并网容量，提高其在电网中占有的比例，高比例的新能源接入会对电网产生一系列影响^[5-6]。

首先是新能源发电的功率输出特性受地理环境与气象条件变化的显著影响，其波动性与间歇性成为制约电网安全运行的关键因素。以风电机组为例，其出力特性与风速立方呈正相关关系，风速的随机扰动特性导致功率输出呈现分钟级剧烈波动，极端工况下甚至出现零功率输出状态。光伏发电系统同样面临辐照强度随机变化带来的功率波动挑战，遇到云层遮挡时光伏出力会在数秒内骤降一半以上。此类波动性电源的大规模接入，将导致电网净负荷曲线呈现显著的高频扰动特征，当波动幅值超过系统调节容量时，可能引发电网频率越限等故障。

其次是新能源大量并网的谐波问题，新能源机组通过电力电子器件并网，电力电子设备的大规模应用同时带来了复杂的谐波污染问题。并网变流器作为新能源发电的核心接口装置，其开关频率调制过程会产生特征次谐波分量，如双馈风电机组的背靠背变流器和光伏逆变器在最大功率跟踪模式下将激发出高次特征谐波。大量的谐波不仅会使电网损耗增大，更会影响电网的安全运行。

最后是新能源并网标准不统一，由于发电单元的类型异构性、容量离散性以及接入位置分散性，导致基于传统同步机组的并网技术标准适用性受限。尽管大容量新能源机组的并网规范相对统一，但对于一些广泛分布，容量较小的新能源机组并网标准并不容易统一，新能源并网标准的不统一会给电网带来一定的安全隐患。

通过分析高比例的新能源接入会对电网产生的影响，大量新能源并入会对电网安全稳定控制提出新挑战，其中特别是在频率稳定控制上。在传统电力系统中，一次调频与二次调频任务主要由火力发电机组及水力发电机组等传统发电单元承担。当电网频率发生波动时，这类机组通过机械调速装置及调频装置实施功率调整以维持系统稳定。然而，传统机组固有的响应延时显著、功率爬升速率较低等特性，导致其难以精确执行电网调度指令的快速响应要求。另一方面，频繁的机械动作会加剧机组机械损耗，显著缩短机组在系统中的运行寿命^[7]。此外，水力发电机组的调频特性存在显著时空差异性，其调频能力与水库蓄水状态相关。汛期时段水库容量充裕时可提供充足调节能力，但在枯水季节受来水量限制，其频率支撑能力将大幅削弱，所以水力发电机组并不能始终参与电网频率调节。值得注意的是，随着新能源渗透率的持续提升，风电机组和光伏机组的装机容量挤占了常规机组的装机容量，常规机组的调频能力呈现渐进式衰减趋势。与此同时风电机组和光伏机组不仅由于自身缺乏有效的惯量支撑几乎无调频能力，还因出力的波动性带来电网调频需求的增加，导致传统机组调频单元运行压力的激增。为应对高比例新能源接入引发的电网调频能力弱化问题，亟需构建兼具传统机组稳态调节特性与新能源波动快速平抑能力的新型调频体系。

储能系统凭借快速动态响应特性与双向功率精准调节能力，成为破解调频资源结构性缺口的核心技术载体。目前，储能在电网中的部署呈现两种发展格局：集中式储能以兆瓦级容量承担区域惯性支撑，而分布式储能则以模块化单元实现

配网节点灵活接入。相较于集中式储能，分布式储能在拓扑适应性、建设经济性 & 损耗控制方面具有显著优势，目前已成为储能在电网中部署的主流形态^[8]。然而，分布式储能直接参与一次调频存在三个问题：其一，分布式储能单体容量小，难支撑起电网的调频需求；其二，分布式储能灵活高，并离网状态的随机切换导致可调度容量时变，影响调频能力的持续性；其三，分布式储能数量多，直接参与调频控制不仅会面临着通信带宽需求激增与计算维度灾难，还会面临着调频容量闲置，严重时面临着控制指令的冲突引发频率二次跌落。

因此，本文首先开展针对分布式储能聚合方法的研究，实现分布式储能的聚合；其次在分布式储能聚合的基础上，研究聚合储能参与一次频率控制；最后提出包含储能、机组、新能源和柔性负荷的多类型调频资源之间的协同频率控制策略。本课题围绕“分布式储能聚合-储能调频-储能协同频率控制”的研究框架，能够充分挖掘分布式储能的调频控制潜力，为新型电力系统频率稳定提供跨时间尺度的弹性支撑，对推进能源清洁转型与“双碳”战略目标落地具有一定的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 分布式储能聚合的研究现状

在新能源发电占比不断提升的背景下，分布式储能聚合后再参与电网运行已成为共识^[9-10]。相较于分布式储能，聚合后的分布式储能更有更大的调频潜力，国内外从不同方面对分布式储能聚合开展了研究。

文献[11]提出一种按照分布式储能接入节点电气距离的远近进行聚合划分的策略，该策略下的聚合储能在电压调节层面，可显著抑制区域电网的电压偏差分布，有效改善节点电压质量；在经济效益层面，通过降低网损提升储能系统的综合收益。文献[12]提出一种定义配电网的节点坐标和电气距离的策略，在配电网中基于定义的电气距离对分布式储能进行聚类，并采用 DPSO 优化算法将分布式储能聚类到不同的汇聚组中。上述文献虽然实现了分布式储能的聚合，但在聚合过程中没有考虑分布式储能自身特性。

进一步研究中，分布式储能聚合考虑描述自身特性参数，文献[13]考虑分布式储能运行时寿命损耗等特征参数，基于 PSO-KM 算法将特征参数相近的分布

式储能聚合为一组，并验证了在调度过程中聚合的分布式储能的响应能力。文献[14]中提出描述分布式储能特性的六种潜力参数，采用层次分析法对潜力参数进行分析，根据潜力参数重要程度进行储能的聚合。文献[15]考虑分布式储能的最高可发容量比、日间出力比、出行高峰容量比、双向性和波动性等五个参数，并对参数降维处理，采用 K-means 算法实现在多种类别的分布式单元中分布式储能的聚合。文献[16]提出分布式储能先分区后分层的两次聚合方法，一次聚合按照地理位置进行分区，二次聚合按照分布式储能调峰特征参数进行分层。上述文献虽然在一定程度上实现分布式储能的聚合，但考虑的聚合参数均是描述分布式储能特性的静态参数。

为提高分布式储能聚合的精度，文献[17]提出一种考虑分布式储能动态变化行为的参数，通过采用自适应均衡技术设置运行范围，实现分布式储能动态参数的聚合。文献[18]提出包含分布式储能特性的动态规模参数，通过将规模参数映射到全景理论计算匹配度，将匹配度高的分布式储能进行聚合。文献[19]从安全性、灵活性和经济性的角度考虑，构建分布式储能的多级动态参数体系，采用层次分析法和加权法相结合的方式对分布式储能的动态参数进行了提炼，避免了部分参数因权重差异较大而导致聚合效果差的问题。

现有研究从多方面探索储能聚合，这些方法虽在不同需求场景下取得成效，但其核心机理均依赖于分布式储能特征参数体系的构建，即通过选取表征分布式储能运行特性的参数，实现分布式储能的聚合。

综合上述内容，在分布式储能聚合研究上，可以关注在以下两个方面。一方面，在选取能表征分布式储能的参数不够全面，多数研究采用三个参数进行聚类分析，难以全面刻画分布式储能的运行特性。另一方面，特征参数的选取多聚焦于静态参数或动态参数，缺乏考虑静态参数和动态参数结合的分布式储能聚合研究。鉴于此，将针对这两个方面开展研究。

1.2.2 储能参与一次调频的研究现状

对于聚合后储能参与一次调频，国内外已有不少文献从储能参与一次调频的频率响应模型和控制策略展开研究。

在储能参与调频的频率响应模型上，文献[20]验证储能参与一次调频中采用

详细模型和简化模型存在同样的实验效果,即在调频模型中储能可采用简化模型代替,等效成一阶惯性环节。文献[21-22]分别分析高风机和高光伏渗入下的频率需求,通过解析储能电源的频率响应机理,建立包含储能的频率响应模型。文献[23-25]频率响应模型上考虑储能死区的设置,定性分析储能死区对频率的影响,通过仿真验证储能死区设置在传统机组死区之内更能够稳定电网的频率。文献[26]建立一种分段函数因子与荷电状态自适应因子结合的死区综合设置和优化的频率响应模型,提高储能对电网频率偏差敏感性的同时保持了储能荷电状态。文献[27]进一步考虑频率响应模型上储能死区的改进,提出一种基于不同调频阶段的死区设置改进方法,通过构建非线性动力学模型完成系统稳定性判据推导,仿真验证所提改进死区设置策略对频率调节精度与动态稳定裕度的提升效果。以上文献在频率响应模型上考虑的均是单一类型的储能,相较于单一类型的储能,由高容量型储能与高响应型储能两者组成的混合储能,能有效化解新型电力系统中调频容量需求与动态响应速率间的矛盾。文献[28]突破单一储能设备建模框架,基于锂电池和飞轮等多类型储能的运行特征差异,提出兼容多种类型储能的通用调频模型,显著提升了模型对不同技术路线的适应性。文献[29]提出一种考虑混合储能调频死区的频率响应模型,依据储能与传统机组的动态响应特性进行差异化死区设置,设置机组死区大于锂电池死区大于超级电容死区,实现调频效果的提高。

在储能参与调频的控制策略上,控制策略的优劣决定了储能调频效果的好坏,文献[30]提出基于虚拟惯性原理的储能调控方式,其作用机理类似于提升系统等效惯性水平,能够在频率扰动初始阶段通过快速功率响应有效抑制频率暂态偏差变化率,然而该控制模式难以改善系统稳态频率偏差。针对此问题,文献[31]提出虚拟下垂控制策略,通过自适应调整储能单元的有功输出实现稳态频率恢复,但该方式在扰动初期缺乏惯性响应能力,对频率变化率抑制效果存在局限性。为综合提升调频过程的频率稳定性,后续研究探索了两种控制模式的组合应用策略。文献[32]通过合理两者相结合的方法,使储能装置在暂态阶段发挥惯量支撑作用,在稳态阶段切换至下垂控制模式,从而实现频率动态过程的优化。文献[33]在常规虚拟惯性控制上突破性引入负向惯量补偿环节,提出虚拟下垂结合正负虚拟惯量三种控制模式切换的频率恢复策略。值得注意的是,上述文献在组合控制方法

在模式切换时易引发储能功率突变,可能对储能设备造成机械应力冲击,切换时刻仍需进一步研究。文献[34]提出权重因子控制虚拟下垂和虚拟惯性的占比系数,不仅避免了模式切换带来的冲击,还提升了调频效果。相较于文献[34],文献[35]进一步提出采用模糊控制的方法控制两者的占比系数,考虑频率偏差和频率偏差变化率作为输入系数,实现占比系数的自适应调节。

综合上述内容,在储能参与一次调频问题的研究上,可以关注在以下两个方面。一方面,在储能参与调频的频率响应模型中,储能调频死区设置仅局限单一类型的储能和传统机组之间,对于混合储能之间调频死区的设置问题研究较少。另一方面,在储能参与调频的控制策略中,一类文献采用判断切换时机来进行两种控制方式切换的模式,一类文献采用构建的函数分配两种控制方式占比系数的模式,前者无法满足在调频任意时刻均有两种控制的同时存在切换时刻冲击大的问题,后者构建函数分配虽能满足在调频任意时刻均有两种控制方式的同时避免切换冲击,但构建函数并不能实现占比系数的自适应调节。鉴于此,将针对这两个方面开展研究。

1.2.3 储能协同频率控制的研究现状

在储能协同频率控制方式上,国内外研究主要沿着集中式与分布式控制两条技术路线展开。

从技术路线划分,集中式控制方法以文献[36-37]提出基于全局优化的机组-储能协同策略为代表,其通过中央控制器实现全网资源的统一调度。然而值得注意的是,依赖中央控制器的集中式架构存在双重挑战:一方面需维持全节点实时通信,导致通信带宽需求随节点规模呈指数级增长;另一方面控制中枢的故障将引发系统性失效风险,威胁电网安全运行。基于此,采用去中心化特征的分布式控制策略进行协同频率控制是更为有效的方式。

在分布式控制方面,文献[38]详细比较分析集中控制方式、集中-分区分布式控制方式、集中-单元分布式控制方式和完全分布式控制方式四种方式的优缺点,建立含火电机组、新能源机组、柔性负荷、电动汽车和储能单元的完全分布式协同控制系统模型。文献[39]提出一种储能系统参与某区域电网自动发电控制的分层分布式协调控制策略。上层综合考虑 BESS 的荷电状态和不同调频电源的技术

特性，完成储能系统与传统发电机之间调频命令的协调分配；下层以优化区域电网的经济运行为目的，实现对储能系统输出的精细化管理。为了实现风储联合系统中的协同调频，文献[40]提出两层分布式协同控制策略，该策略不仅通过对不同风速的双馈异步风力发电机进行可变比例调速实现差异化惯量支持，还实现与风电场协同储能进行调频控制。

上述文献在协同频率控制中，采用分布式控制的架构则基于一致性算法求解，其精髓在于依托通信网络实现状态信息的交互共享，驱动各单元基于局部信息交互实现预设状态参量的渐进步[41-42]。为加快协同频率控制的速度，文献对求解算法展开了进一步的研究，文献[43]根据节点重要的程度重新对邻接矩阵进行定义，缩短一致性算法收敛时间。文献[44]针对海量异构调频资源协调问题，创新性提出分群协同计算框架，该方法将分布式资源按类型划分为分布式光伏、储能和柔性负荷集群，并重构了分布式一致性算法的迭代机制，使得算法收敛周期缩短，显著提升计算时效性。文献[45]提出一种自适应全局平衡修正系数，通过判断频率偏差的大小，自适应更新修正系数，缩短算法收敛时间。

此外，文献进一步研究关于储能协同调频中如何兼顾储能 SOC 的均衡问题，文献[46]在负荷频率控制上提出考虑 SOC 平衡的分布式模型预测控制的方法，在实现系统频率稳定、缩小区域控制误差的同时，还维持储能单元 SOC 的一致。文献[47]针对分布式储能参与一次调频存在储能 SOC 均衡问题，提出一种以储能 SOC 为一致性目标的分布式储能协同控制策略，有效减少了不同分布式储能 SOC 之间的差异，实现分布式储能 SOC 均衡。上述文献虽然兼顾了储能参与一次调频与储能 SOC 均衡的问题，但是在储能协同调频资源的类型上仅局限于传统调频机组与储能系统。

综合上述内容，在储能协同频率控制上，可以关注在以下两个方面。一方面，在对一致性算法的改进上，并未对一致性算法收敛系数进行研究，文献中收敛系数多采用经验值。另一方面，在基于一致性理论的分布式控制模式下，存在兼顾储能协同多类型调频资源参与一次调频与储能 SOC 均衡的控制问题。鉴于此，将针对这两个方面开展研究。

1.3 本文研究内容与结构安排

总结上述文献研究中的不足之处,本文以分布式储能作为研究对象,首先开展对分布式储能聚合方法的研究,建立聚合后储能参与调频的频率响应模型和控制策略,最后对储能协同频率控制策略进行研究,本文内容如下:

第 1 章绪论,首先介绍新能源发展和并网的趋势,以及新能源大规模并网带来的调频挑战,介绍了储能参与调频的必要性。其次总结文献研究内容,列出国内外分布式储能聚合的研究现状、储能参与一次调频的研究现状和储能协同频率控制的研究现状。最后提出在分布式储能聚合、储能参与一次调频和储能协同频率控制研究中可关注的方面,提炼出本文的研究内容。

第 2 章针对选取能表征分布式储能的参数不够全面且多数为单一数值的问题,提出基于 K-means 算法的分布式储能聚合方法。首先,考虑分布式储能接入系统层面的系统稳定性、系统可靠性和响应能力三个静态参数进行聚合。其次,在静态参数聚合的基础上,考虑分布式储能自身层面的储能可输出功率、储能汇聚时间和储能可调度容量三个动态参数进行二次聚合。最后,通过对动态参数聚合效果进行评估,验证聚合方法的有效性,实现分布式储能的高效聚合。

第 3 章针对混合储能死区设置和调频控制策略问题,提出基于模糊控制的混合储能死区设置和模糊神经网络的一次调频控制策略。首先,构建包含锂电池和超级电容混合储能系统的频率响应模型,采用模糊控制的方法设置混合储能的死区,实现混合储能死区的动态调整。其次,从储能参与一次调频的基本控制方式出发,分析虚拟下垂与虚拟惯性的作用特性,提出采用模糊神经网络控制两者占比系数的调频控制策略。最后,通过 Matlab/Simulink 仿真平台,验证混合死区的动态调整和较优调频效果。

第 4 章针对一致性算法的收敛系数和储能协同调频兼顾储能 SOC 均衡的问题,提出基于改进遗传算法和集群划分的多智能体一致性协同频率控制策略。首先,构建包含火电机组、储能、新能源与可控负荷等多类型调频资源的频率响应模型,计算满足频率偏差下所需的下垂系数总值,采用一致性算法将下垂总值自适应分配至各调频资源,实现协同频率控制。其次,研究一致性算法中的收敛参数,采用改进遗传算法进行寻优,加快一致性算法的收敛速度。最后,在储能协同频率控制与储能 SOC 均衡上,通过对调频资源按照类型进行集群划分,储能

集群内部协同后再参与不同集群之间协同，实现储能集群系统 SOC 的均衡并兼顾了下垂系数的一致性分配。

第 5 章为总结与展望。本文总体研究框架如图 1-1 所示。

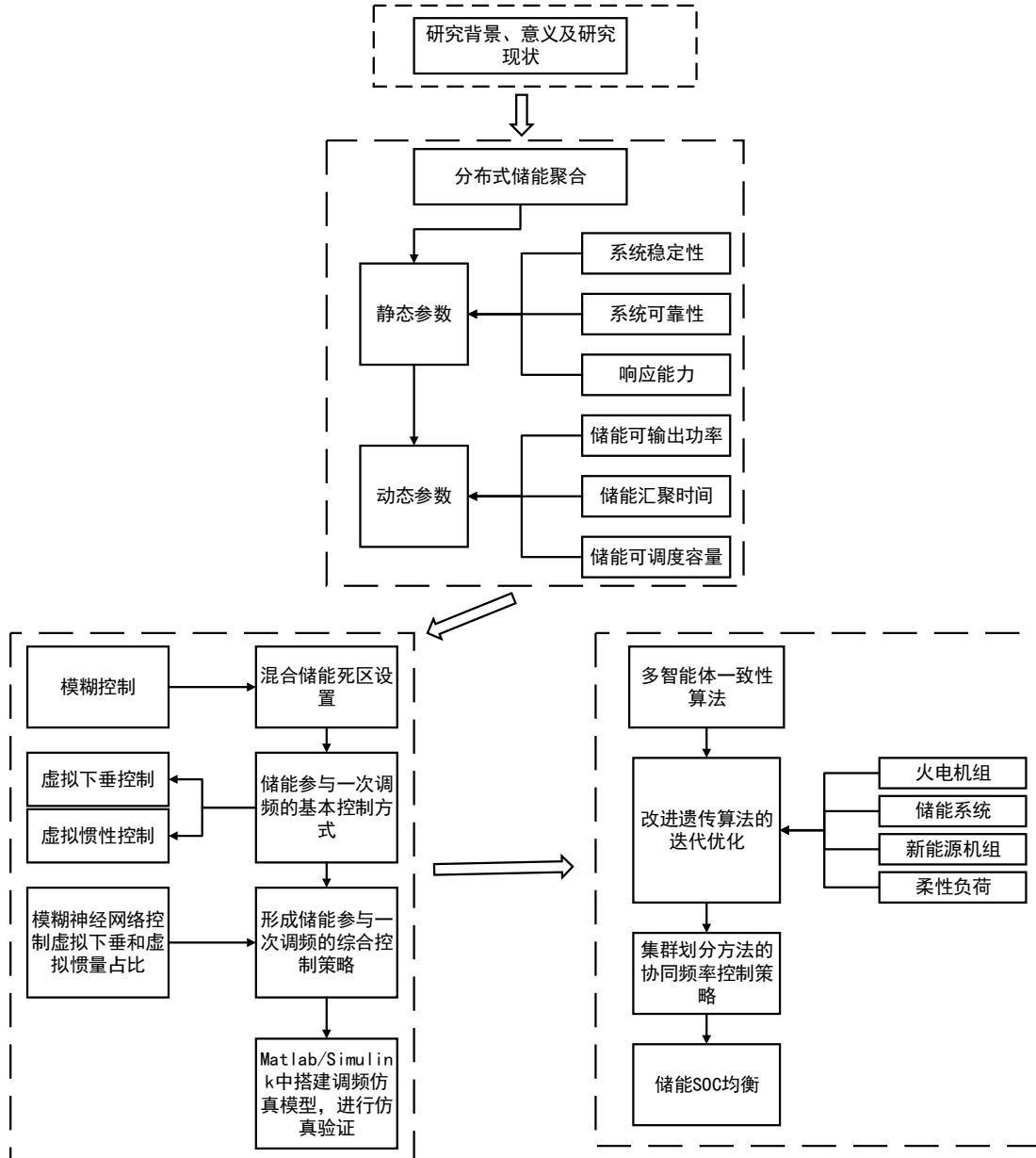


图 1-1 总体研究框架

第2章 考虑动静态参数的分布式储能聚合研究

随着高比例新能源渗透电网引发的惯量缺失问题日益突出,分布式储能因其灵活布局与快速响应特性成为支撑电网频率稳定的关键资源。然而,分布部署的储能单元普遍存在单体容量有限、动态特性各异、运行状态离散等固有缺陷,导致其独立运行时调频容量利用率不足,且可能引发区域功率振荡等次生问题。通过聚合技术将分布式储能聚合,有利于提升储能容量与调节精度,实现调频容量与电网需求的多时间尺度匹配,提升分布式储能调频经济性与可靠性。

因此,在本章中,考虑分布式储能接入电网系统层面的参数和分布式储能自身层面的参数,在系统层面上选取系统稳定性、系统可靠性和响应能力三个静态参数,在自身层面上选取储能可输出功率、储能汇聚时间和储能可调度容量三个动态参数,最后利用 K-means 算法得到具有相似参数的分布式储能聚合集群,实现分布式储能以小差异,高相似的聚合。

2.1 动静态参数的分布式储能聚合

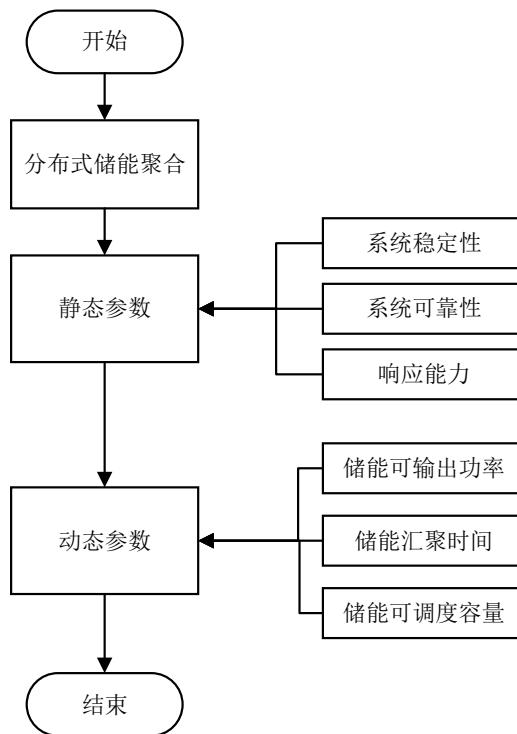


图 2-1 分布式储能聚合流程

本章先选取能表征分布式储能的参数，其次根据参数的特性将其分为静态参数和动态参数，最后分两步，第一步根据分布式储能的静态参数进行一次聚合，第二步在一次聚合的基础上再根据分布式储能的动态参数进行二次聚合，其聚合流程如图 2-1 所示。

2.2 分布式储能静态参数聚合

2.2.1 系统稳定性

分布式储能接入电网后，其频繁出力会带来一定的电压波动，系统稳定性按照分布式储能接入后带来的电压波动判断。电压波动根据额定电压与电压波动幅值幅值得出，得出后的电压波动可计算系统稳定性，其表达式为：

$$S = 1 - \left| \frac{V_k^* - V_k}{V_k} \right| \quad (2-1)$$

式中： S 表示系统稳定性， V_k 为节点 k 处的额定电压； V_k^* 为分布式储能出力在节点 k 处引起的节点电压波动幅值。

2.2.2 系统可靠性

系统可靠性反映的是分布式储能接入电网后，其基本单元的故障率，故障率越低，系统越可靠。

$$D = 1 - \eta_k \quad (2-2)$$

式中： D 表示系统可靠性， η_k 为节点 k 处的分布式储能在调度时间周期内的故障率。

2.2.3 响应能力

响应能力反映的是分布式储能接入电网后，单位时间内分布式储能的功率响应速度阈值，表征电网架构对分布式储能出力变化的最大耐受程度。

$$R = \frac{\Delta P_{k,\max}}{\Delta t} \quad (2-3)$$

式中： R 为响应能力， $\Delta P_{k,\max}$ 为节点 k 处分布式储能的最大有功功率瞬时变化量，

Δt 为单位时间。

2.2.4 基于 K-means 算法的静态参数聚合

K-means 算法具有解释性强、操作性高和处理效果好等特点^[48-50]，对于海量的分布式储能，采用 K-means 算法能够将具有相似参数的分布式储能进行有效聚合，其处理流程包含以下关键步骤。

步骤 1：数据归一化。对静态参数归一化处理。

步骤 2：最佳聚类数 K 值的确定。K 值的选择直接影响分布式储能聚合划分的合理性，选择合适的 K 的值对于聚类结果的准确性非常重要，选择不合适的 K 值会导致聚类效果不佳。手肘法是一种简单有效的方法，常用来确定最佳聚类数 K 值，该方法用误差平方和作为指标，其表示式如下：

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{X \in C_i} (X - c_i)^2 \quad (2-4)$$

式中：SSE 为误差平方和；X 为每个集群中的所有数据； c_i 表示每类的集群中心。当 K 值达到最佳聚类数时，误差平方和幅度下降最大。随着 K 值的增加，误差平方和幅度下降减缓。此时，形成一个明显的弯曲点，类似于手肘的形状。

步骤 3：分配数据。初始化过程采用随机选取策略，在数据集中随机选取 K 个数据作为初始的集群中心。对于数据集中的其他每一个数据，依据欧式距离准则将其划分至最近的集群中心中，形成初始聚类划分。欧式距离表达式如下：

$$D = \sqrt{\sum_{i=1, j=1}^N (X_i - X_j)^2} \quad (2-5)$$

步骤 4：更新集群中心。计算集群中所有数据的平均值，得到新的集群中心，新的集群中心将替代旧的集群中心。

重复步骤 3 和步骤 4，迭代执行数据分配与集群中心更新操作，直到满足终止条件或达到预设最大迭代次数，最终输出满足收敛条件的聚类方案。

2.3 分布式储能动态参数聚合

2.3.1 储能可输出功率

储能可输出功率由分布式储能自身输出功率的上下限决定，其表达式为：

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (2-6)$$

式中：\$P\$ 为储能可输出功率，\$P_{\min}\$、\$P_{\max}\$ 分别为储能可输出功率的上下限。

2.3.2 储能汇聚时间

储能汇聚时间表现为分布式储能响应系统调用时所需的时间，其响应时间往往表现为动态波动，且由储能系统本身性质决定。

2.3.3 储能可调度容量

储能可调度容量表现为分布式储能参与电网需求响应，在调度周期内提供容量的能力。

$$C = \frac{\left| \sum_{t=1}^T p(i) \Delta t \right|}{2} \quad (2-7)$$

式中：\$C\$ 为储能可调度容量，\$T\$ 为调度周期，\$p(i)\$ 为分布式储能在 \$i\$ 时刻的输出功率。

此外储能可调度容量应满足自身容量的上下限，其表达式为：

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (2-8)$$

2.3.4 动态参数的区间数

在分布式储能自身层面上，选取的动态参数均不是确切的数值，其提供的是参数的数值范围，因此采用区间数的方法科学而直观地表示动态参数^[51]。

在动态参数表征领域，任一分布式储能聚合指标中的动态参数可定义为区间数形式。具体而言，若某动态参数 \$\mathbf{X}_k\$ 的数学表征域为闭区间 \$[x_{kL}, x_{kR}]\$，则该动态参数可以用闭区间 \$I_{Xk} = [x_{kL}, x_{kR}]\$ 构成的区间数来描述。其中 \$x_{kL}\$ 与 \$x_{kR}\$ 分别表征参

数的下界和上界，当且仅当 $x_{kl} = x_{kr}$ 时，该区间退化为确定值，此时动态参数转化为静态参数^[52]。

从几何视角分析，区间数的维度特性呈现规律性演化，具体表现为：一维区间数在一维欧氏空间中表现为线性区间段；二维区间数在二维正交坐标系中扩展为矩形区域；三维区间数在三维空间坐标系下形成立方体域；当维度提升至多维时，区间数演化为多维超立方体域^[53-54]。

本文在分布式储能聚合指标中选取三个动态参数，区间数为三维，因此每个分布式储能单体表征为一个立方体空间，立方体空间重合程度的高低代表分布式储能相似程度的高低。聚合算法处理后，具有高重合度的立方体空间将划分进同一集群。

2.3.5 区间数特征变换

分布式储能的动态参数以区间数的形式展示，选取的三个动态参数构成一个立方体空间，此时一个立方体空间代表一个分布式储能单体。

K-means 算法采用欧式距离作为聚合指标，通常用于将数据点划分为不同集群。K-means 算法在处理数据点聚类时效果良好，但对于立方体空间聚合来说，其聚合效果并不理想。原因在于 K-means 方法的聚类结果受到初始中心点的选择影响较大，而在立方体空间中，难以准确选择初始中心点，导致聚类结果不够理想。因此在分布式储能的动态参数聚合时，并不直接采用 K-means 算法，而是通过对动态参数组成的立方体空间先进行区间数特征变换处理后^[55]再采用 K-means 算法进行聚合。

对于动态参数组成的数据集 X ，由 n 维动态参数 X_k 组成，每个动态参数 X_k 对应一个区间数 I_{xk} 。区间数特征变换处理通过考虑区间中值和区间大小的关系，将 n 维区间数所构成的超立方体域映射为一个由区间中值和区间大小所构成空间中的 $2n$ 维实值点。具体变换如下：对于数据集 $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_k, \dots, X_n) \in I^n$ ，其中 $I_{xk} = [x_{kl}, x_{kr}]$ 为 k 维动态参数的区间数，此时 X 为 n 维立方体域，进行区间数特征变化处理后，此时 $X = (x_1^\circ, x_2^\circ, x_3^\circ, \dots, x_k^\circ, \dots, x_n^\circ, \lambda x_1^*, \lambda x_2^*, \lambda x_3^*, \dots, \lambda x_k^*, \dots, \lambda x_n^*) \in I^{2n}$ 为 $2n$ 维实值点。其中 $x_k^\circ = (x_{kl} + x_{kr}) / 2$ ， $x_k^* = (x_{kr} - x_{kl})$ ， $\lambda = (x_R - x_L) / (x_R + x_L)$ 。

λ 为权重因子, 用来控制区间大小在聚类结果中起的作用, 取值范围为 $\lambda \in [0,1]$, 其取值越大代表区间大小在聚类结果中起的作用越大^[56]。当 $\lambda=1$ 时代表区间大小和区间中值在聚类中起相同作用, 当 $\lambda=0$ 时代表区间大小在聚类中不起影响作用, 聚类仅有区间中值决定。在本文选取的动态参数对应的区间数中, 区间中值和区间大小在聚类中处于同等地位, 因此 λ 取 1。

2.3.6 基于 K-means 算法的动态参数聚合

步骤 1: 区间数特征变换。对于立方体空间的聚合, K-means 算法十分依赖聚合中心的准确选取, 因此采用区间数特征变换处理, 将三维区间数构成的立方体空间映射为一个由区间中值和区间大小所构成空间中的六维实值点。

步骤 2: 数据标准化。由于动态参数进行区间数特征变换处理后每维数据存在大小相差较大的情况, K-means 算法在计算距离时较大的数据会掩盖较小的数据导致聚类效果不佳, 因此对数据采用标准化处理, 处理公式如下:

$$X^+ = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2-9)$$

$$X^- = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2-10)$$

式中: $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为数据的最大值与最小值; X^+ 、 X^- 分别表示标准化后的正指标与逆指标。

步骤 3、4、5 与基于 K-means 算法的静态参数聚合中的步骤 2、3、4 相同, 这里不做展开描述。

2.4 实验分析

2.4.1 基于 K-means 算法的静态参数聚合

本文选取 50 个分布式储能为例, 描述分布式储能的动静态参数限定在一定范围内采用随机数生成的办法产生, 采用手肘法确定最佳聚类数, 选取不同聚类数时误差平方和的变化曲线如下图所示。图 2-2 所示的 SSE-K 曲线显示, 当 $K=3$ 时曲线呈现显著拐点, 此时 SSE 的下降梯度达到峰值。当 $K>3$ 后, SSE 变化率

骤降，且随着 K 值继续增加呈现渐进饱和趋势。这种非线性衰减特征表明， $K=3$ 为兼顾模型复杂度与聚类精度的最优解，故 $K=3$ 为最佳聚类数。

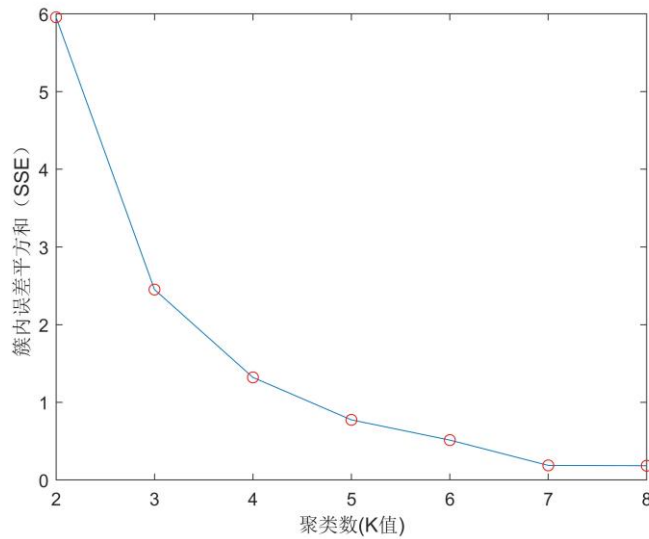


图 2-2 聚类数与误差平方和关系曲线

选取分布式储能接入电网系统层面的静态参数来表征分布式储能的相似度，基于 K -means 算法对分布式储能进行聚合分析。图 2-3 为按照系统稳定性，系统可靠性和响应能力三个静态参数来表征分布式储能相似程度的原始图。利用 K -means 算法对静态参数进行聚类后，分布式储能聚合结果如图 2-4 所示，50 个分布式储能聚合为 3 类，分别用红、黄、蓝 3 种颜色代表不同的集群，黑色的实心点代表集群中心。

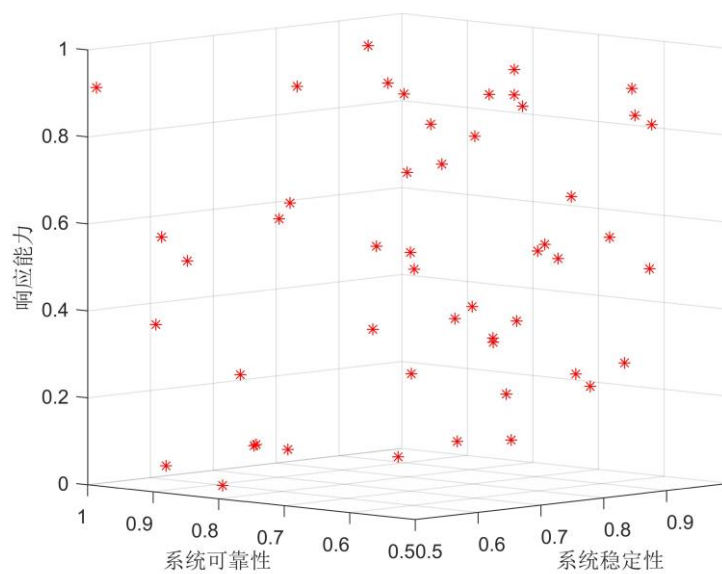


图 2-3 分布式储能静态参数相似度分布

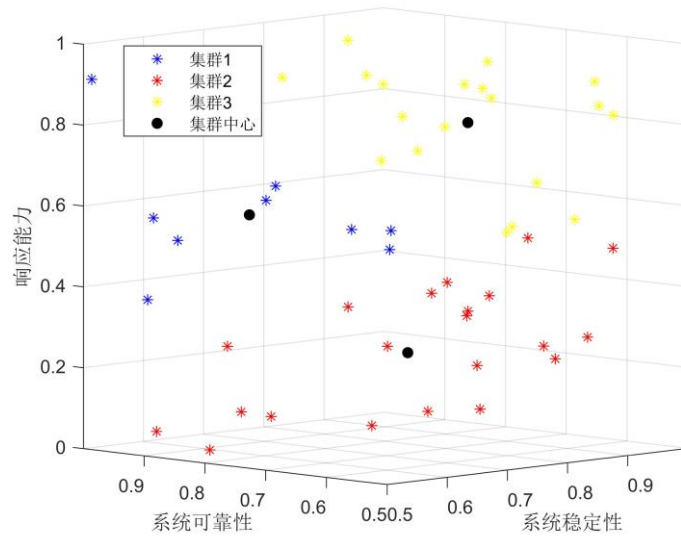


图 2-4 分布式储能静态参数聚合结果

2.4.2 基于 K-means 算法的动态参数聚合

进行动态参数聚合时，需要先将分布式储能的三个动态参数进行区间数特征变换为六维实值点，再采用 K-means 算法进行聚合。由于分布式储能的静态参数对动态参数起决定作用，因此分布式储能动态参数聚合是在静态参数聚合后的基础上进行的二次聚合。图 2-5、图 2-6 和图 2-7 分别为分布式储能静态参数聚合结果中集群 1、集群 2 和集群 3 的动态参数聚合结果，分布式储能静态参数聚合结果中集群 1 中各储能的动态参数以及区间数特征变换的结果如下表 2-1 所示。

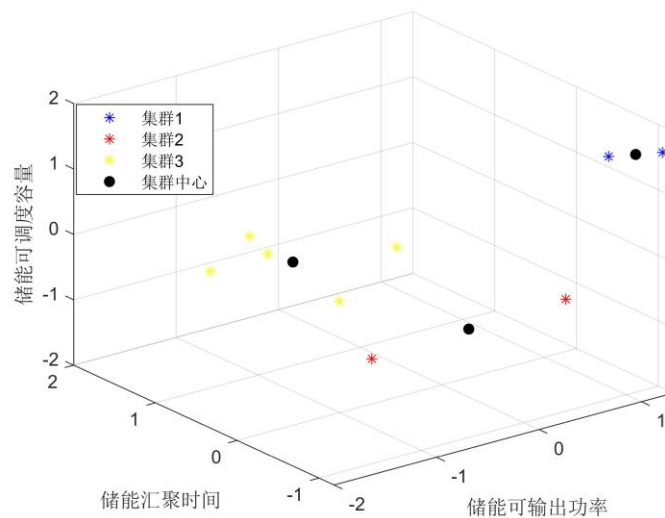


图 2-5 集群 1 中储能动态参数聚合结果

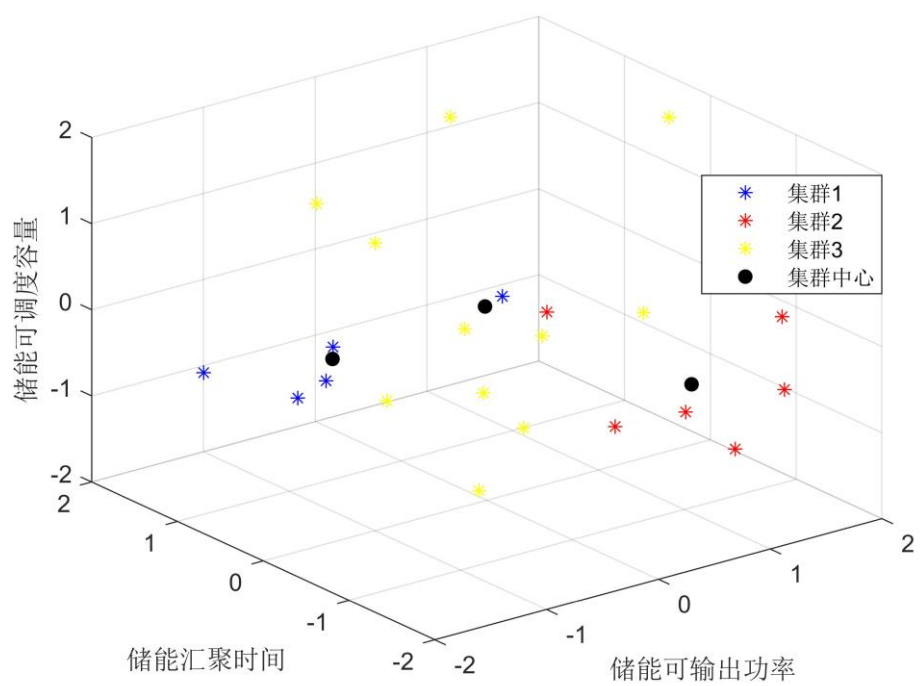


图 2-6 集群 2 中储能动态参数聚合结果

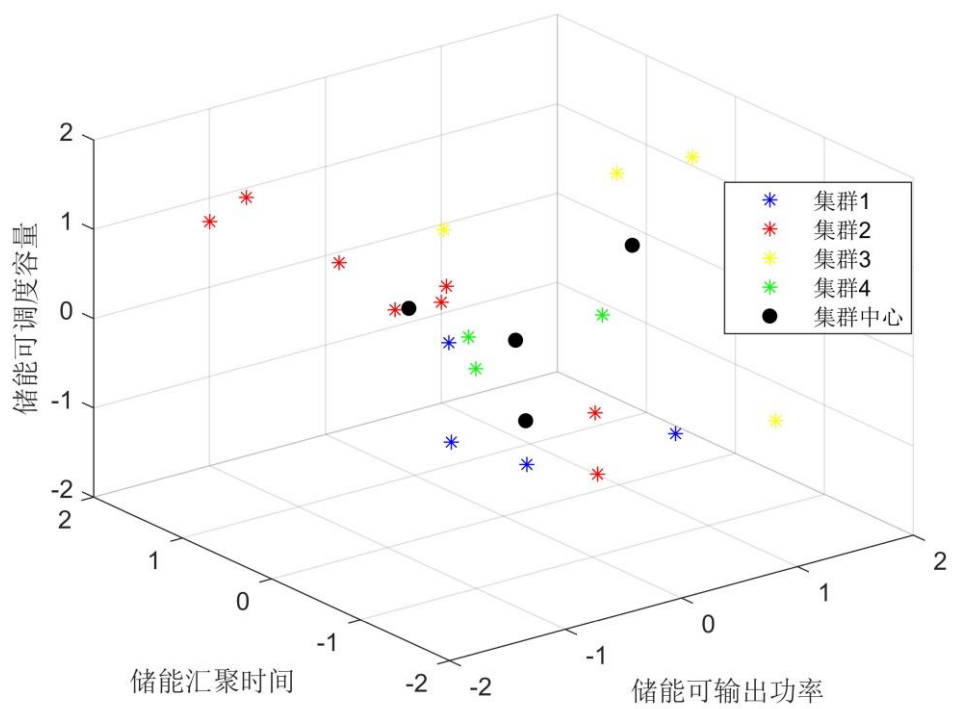


图 2-7 集群 3 中储能动态参数聚合结果

表 2-1 集群 1 中各储能的动态参数以及区间数特征变换的结果

储能可输出 功率/Kw	储能汇 聚时间/s	储能可调度 容量/Kwh	区间中值			区间大小		
7-19	6-8	27.5-56.5	13	7	42	12	2	29
7-15	8-12	26-50	11	10	38	8	4	24
5-21	7.5-10.5	33.5-58.5	13	9	46	16	3	25
4-12	6-10	50.5-69.5	8	8	60	8	4	19
19-31	7.5-10.5	32.5-43.5	25	9	38	12	3	11
24-44	5-9	15-35	34	7	25	20	4	20
8-24	5-9	12-34	16	7	23	16	4	22
22.5-33.5	3-5	78-92	28	4	85	11	2	14
24.5-41.5	2-6	72.5-91.5	33	4	82	17	4	19

上图中每个数据点都由六维数据构成，前三维分别对应动态参数的区间中值，后三维分别对应动态参数的区间大小。为能够可视化聚合效果，图中展示三维动态参数转换为六维实值点的前三维，即每个动态参数的区间中值。图 2-5、图 2-6 和图 2-7 均是根据手肘法确定的最佳聚类数，动态参数聚合在静态聚合成 3 类的基础上分别二次聚合为 3 类、4 类和 3 类。观察动态参数聚合结果可以发现，存在部分实值点与其集群中心相聚甚远，这种现象是由于 K-means 聚合距离是按照每个实值点六维坐标的欧式距离进行集群划分的，图中仅展示实值点三维坐标所导致的。

2.4.3 基于 K-means 算法的动态参数聚合效果评估

对于动态参数的聚合，由于采用了区间数特征变换的处理方法，因此需要对聚合效果进行评估。在上节的动态参数聚合结果上，将每个六维实值点对应还原成立方体空间，图 2-8、图 2-9 和图 2-10 分别对应图 2-5、图 2-6 和图 2-7 的聚合结果。

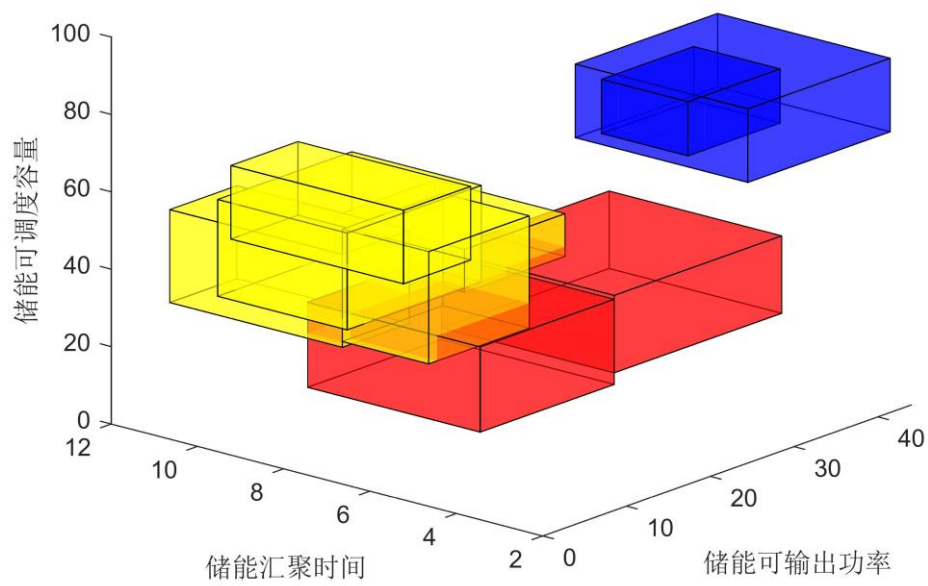


图 2-8 集群 1 中储能动态参数聚合还果图

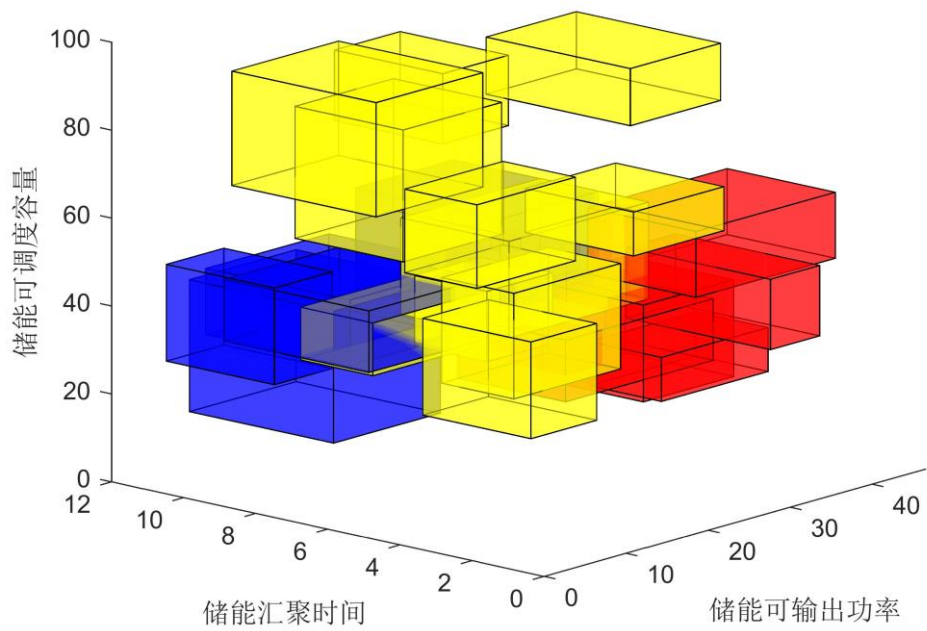


图 2-9 集群 2 中储能动态参数聚合还果图

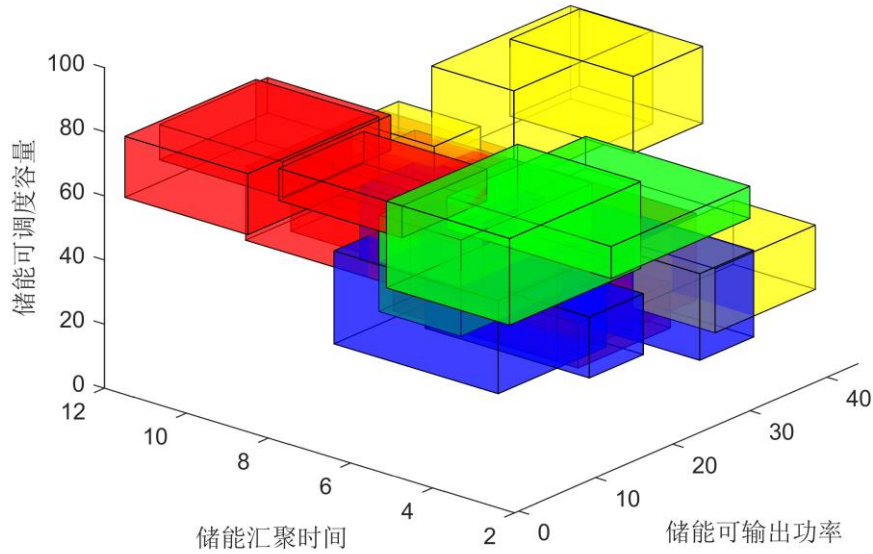


图 2-10 集群 3 中储能动态参数聚合还原图

图 2-5、图 2-6 和图 2-7 聚合结果对应的还原图分别为图 2-8、图 2-9 和图 2-10，从还原图中可以看出立方体空间是按照重合程度的高低划分到同一集群中，直观明显的反映对立体空间采用区间数特征变换处理后进行 K-means 算法聚合的可行性。

2.5 本章小结

本章通过对分布式储能聚合开展研究，提出一种考虑动静态参数的分布式储能聚合方法。首先，通过选取分布式储能接入电网系统层面的静态参数，基于 K-means 算法对静态参数进行聚合，实现分布式储能系统层面的聚合。其次，在系统层面的基础上，选取分布式储能自身层面的动态参数，先采用区间数特征变化的处理方法，再基于 K-means 算法对动态参数进行聚合，实现分布式储能自身层面的聚合。最后，通过对动态参数聚合效果进行评估，验证先采用区间数特征变换处理，再采用 K-means 算法对动态参数进行聚合的可行性。

第3章 考虑调频死区和占比系数的储能一次调频

随着高比例可再生能源渗透与电网惯量水平持续衰减,电力系统频率稳定性面临严峻挑战。一次调频作为维持电网频率稳定的首道防线,要求调频电源具备快速动态响应与精准功率追踪能力。传统同步机组受机械惯性制约,其功率爬升速率普遍较低,难以满足新型电力系统对快速频率支撑的需求。储能系统凭借其快速响应速度、双向功率调节特性及精确出力控制能力,已成为电网一次调频中不可或缺的一部分。

因此,在本章中,首先,构建包含超级电容和锂电池混合储能系统的频率响应模型,采用模糊控制的方法设置混合储能的死区,实现混合储能死区的动态调整。其次,从储能参与一次调频的基本控制方式出发,分析虚拟下垂和虚拟惯性的作用特性,提出采用模糊神经网络控制两者占比系数的调频控制策略。最后,通过 Matlab/Simulink 平台构建仿真模型,在死区设置和调频效果进行实验,验证混合死区的动态调整和较优调频效果。

3.1 含混合储能的系统频率响应模型

3.1.1 传统电力系统频率响应模型

传统电力系统作为典型的高阶非线性动态耦合系统,其广域互联特征显著且动态交互机理复杂。针对传统电力系统的频率响应分析,文献中主要采用以下三种方法:单机等值模型法、基于时域仿真软件仿真的全状态分析法以及系数法^[57]。其中,单机等值模型在计算效率存在优势,广泛应用在构建系统频率响应模型上。本文以单机等值模型法下的频率响应模型,建立包含传统机组、负荷及储能系统的电网仿真模型。在建模过程中,对原动机调速特性、电网拓扑关联等次要因素进行合理简化。

本文采用的经典频率响应模型可追溯到 1990 年 P.M.Anderson 提出的理论模型^[58],在模型上有两项关键假设条件:其一,将同步机组等效为再热式汽轮机主导的线性系统;其二,忽略机电暂态过程中的高阶非线性项。在此条件下,系统

频率响应主要受同步机组惯性时间常数和再热蒸汽系统时间常数支配,进而可通过二阶微分方程解析求解获得频率时域特性。然而,这种简化处理使得模型仅能表征电网全局频率均值特性,无法对机组间同步振荡现象进行表征。

(1) 火电机组模型

火电机组的模型可以分为再热式和非再热式的两种模式^[59],本文采用再热式的火电机组模型,模型包含调速器、再热器和汽轮机三个部分构成。

其中调速器的传递函数为:

$$G_{gov}(s) = \frac{1}{T_G s + 1} \quad (3-1)$$

再热器的传递函数为:

$$G_{reh}(s) = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{T_{RH} s + 1} \quad (3-2)$$

汽轮机的传递函数为:

$$G_{tur}(s) = \frac{1}{T_{CH} s + 1} \quad (3-3)$$

结合三个部分的传递函数,火电机组的传递函数为:

$$G_G(s) = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{(1 + T_G s)(1 + T_{CH} s)(1 + T_{RH} s)} \quad (3-4)$$

式中: T_G 、 T_{RH} 和 T_{CH} 分别对应着调速器、再热器和汽轮机的时间常数, F_{HP} 为再热器的增益。

(2) 发电机—负荷模型

对传统发电机组的运行方程进行拉普拉斯变换处理后得到^[60]:

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_E(s) = Ms\Delta f(s) \quad (3-5)$$

式中: $\Delta P_m(s)$ 和 $\Delta P_E(s)$ 分别代表着发电机的输入机械功率变化量和电磁功率变化量, M 代表着系统转动惯量, $\Delta f(s)$ 代表着系统频率偏差。

由于电磁功率的变化与负荷的变化有关,表达式为:

$$\Delta P_E(s) = \Delta P_L(s) + D\Delta f(s) \quad (3-6)$$

式中: $\Delta P_L(s)$ 和 D 分别表示为负荷变化功率和负荷阻尼系数。

上述两式相结合可得出发电机—负荷的传递函数为：

$$G_{gL}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)} = \frac{1}{Ms + D} \quad (3-7)$$

3.1.2 混合储能频率响应模型

(1) 锂电池储能模型

在储能系统参与电网频率调节的建模研究领域，国内外已形成较为完备的理论体系，特别是在动态特性表征与等效模型构建方面取得重要进展。现有锂电池储能系统等效模型主要涵盖四类拓扑结构^[61-63]，分别为戴维南等效模型（原型）、戴维南等效模型（I 型）、戴维南等效模型（II 型）和简化等效模型。

基于电路理论的戴维南等效模型（原型）因其物理意义明确而获得广泛采用，该模型通过电压源、阻抗网络及容抗元件的组合，能够准确表征铅酸电池、锂离子电池等不同类型储能装置在充放电工况下的动态响应特性，其状态空间方程的可解析性便于开展深入研究^[61]。此外，该模型还可以引入温度补偿因子与老化修正系数等影响因素，可显著提升模型在实际工程中的适用性。

针对储能系统并网接口的建模需求，戴维南等效模型（I 型）在戴维南等效模型（原型）上增加了功率变换器的动态环节^[62]。戴维南等效模型（I 型）与原型相比，其在动态工况下的模拟精度提升，但电路元件数量的增加导致参数辨识复杂度提升，且系统非线性特征显著增强，难以适应区域电网动态频率变化分析。

与戴维南等效模型（原型）相比，戴维南等效模型（II 型）侧重分析容量约束、SOC 动态及电压电流限值等模块，在保持结构简洁性的同时没有增加新的电路元件，但其非线性特征仍然显著，不适应区域电网动态频率变化分析^[63]。

在储能参与电网调频的控制模型上，有研究提出用一阶惯性模型描述储能系统出力特性的简化等效模型^[64]。该建模方法聚焦于储能单元的外部动态响应特性，通过传递函数形式描述其功率输出与频率扰动间的动态映射关系，而无需精确模拟电化学储能内部复杂反应机制。文献^[65]的对比测试表明，采用简化等效模型不仅能缩短大规模电网仿真计算耗时，还能缩小关键频率指标的复现误差。基于上述研究成果，本文在构建储能调频模型时采用储能的简化等效模型，同时考虑储能 SOC 变量，简化等效模型如图 3-1 所示。

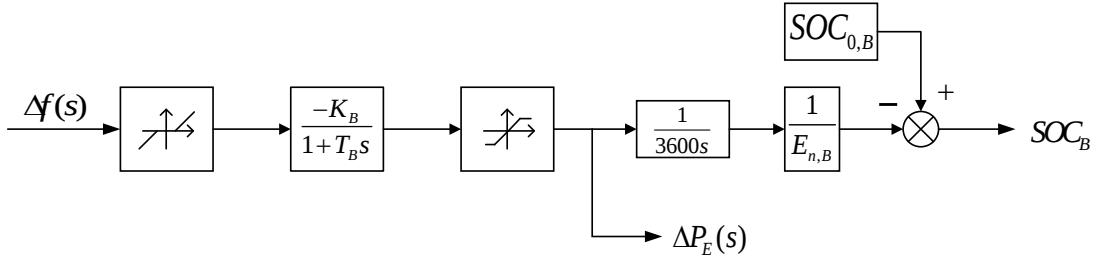


图 3-1 锂电池的简化等效模型

(2) 超级电容储能模型

超级电容储能模型采用与锂电池相同的简化等效模型。图 3-2 为混合储能的简化等效模型。

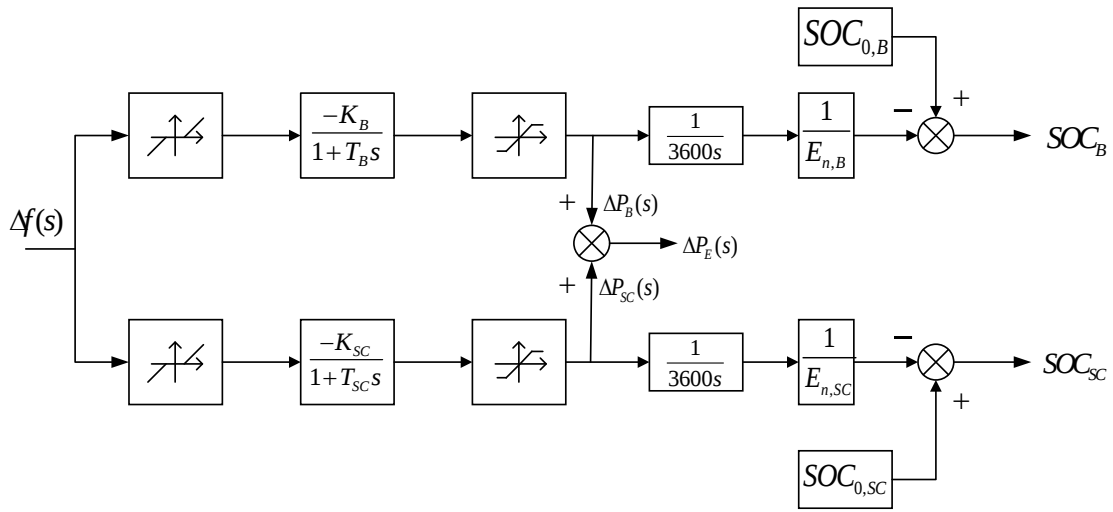


图 3-2 混合储能的简化等效模型

3.1.3 含混合储能的系统频率响应模型

电力系统的频率稳定性本质上取决于发电与用电环节的有功功率动态平衡。当电源出力或负荷需求发生突变时，系统将产生功率缺额并引发频率偏移。作为频率稳定体系的基础防御层级，一次调频依托同步机组原动机调速器的自主响应特性，通过机械功率与电磁功率的快速再平衡实现频率的恢复。尽管负荷功率具备随频率变化的自调节特性，但其响应过程受负荷构成比例、电压波动等多重因素耦合影响，呈现出显著的非线性与时变性。因此，在工程实践中通常将一次调频建模为同步机组调速器主导的动态过程，通过下垂系数与机组惯性时间常数共同构建频率动态响应模型。

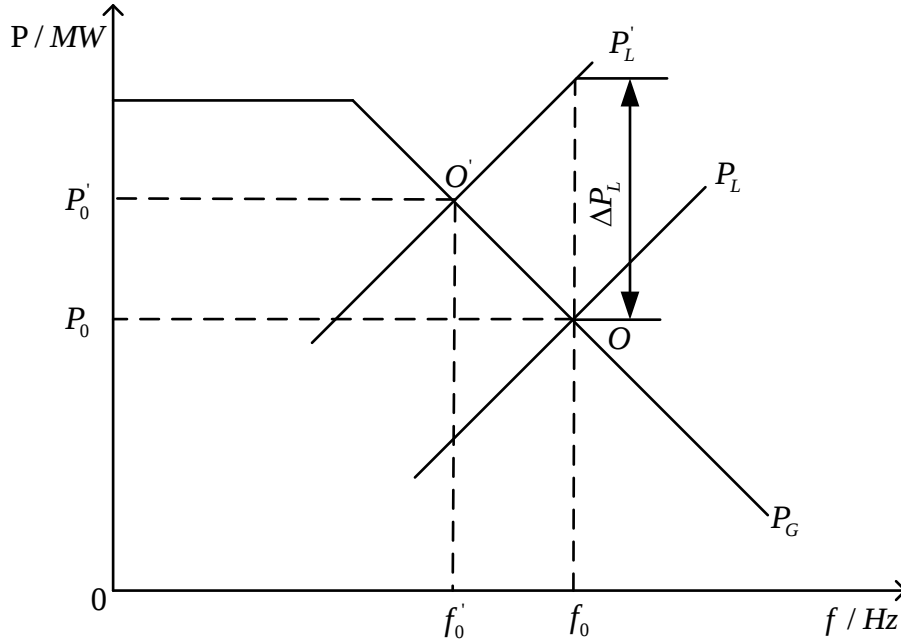


图 3-3 一次调频原理图

图 3-3 为发电机的有功频率静态特性曲线，揭示了机组与负荷的交互机制：初始稳定工作点 O 表征系统功率平衡状态，当负荷突增 ΔP_L 时，负荷特性曲线发生平移。在调速系统时滞阶段，机械功率与电磁功率失衡导致机组转速下降，引发电网频率跌落。随着频率下降，机组沿调速特性曲线提升出力，负荷功率需求则因频率调节效应相应降低，最终形成新的平衡点 O' 。此外由图 3-3 可以看出，该平衡点对应的频率低于初始值平衡点对应的频率，这证明传统一次调频属于有差调节。

储能参与一次调频的原理为：当电网遭受功率扰动引发频率跌落时，若频率偏差绝对值超过预设动作阈值，储能输出有功功率进行电网频率调整，使系统频率恢复的过程。具体而言：在频率波动正常区间内，储能处于待机状态以延长使用寿命；当频率越限但功率缺额小于储能容量时，按需输出补偿功率；当功率缺额超过储能最大出力时，则以额定功率运行。图 3-4 为混合储能参与一次调频的频率响应模型。

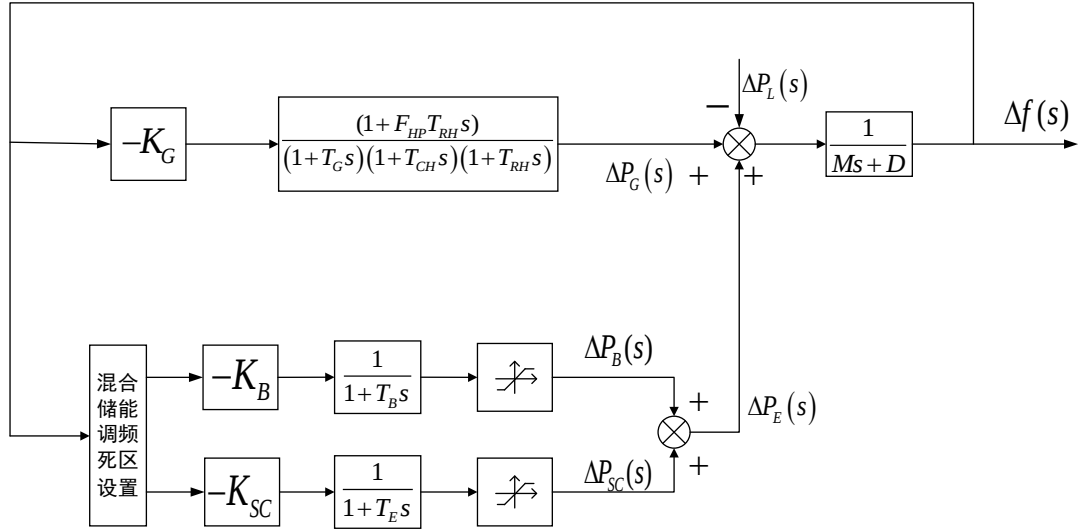


图 3-4 混合储能参与一次调频的频率响应模型

图中 $\Delta P_B(s)$ 、 $\Delta P_{SC}(s)$ 、 $\Delta P_E(s)$ 和 $\Delta P_G(s)$ 分别表示锂电池、超级电容、储能和传统机组调频出力， K_B 和 T_B 表示锂电池调节系数和时间常数， K_{SC} 和 T_{SC} 表示锂电池调节系数和时间常数， K_G 为传统机组调节系数。

3.2 基于模糊控制的混合储能系统调频死区设置

当电力系统经受一定扰动时，系统的频率就会随之发生偏差，传统机组的调速器系统因参与频率调整产生磨损。为规避微小频偏导致的调速器无效动作，设置传统机组的调频动作死区，当频率偏差超出此区间时才触发机组功率补偿，此举可有效降低火电机组动作次数。相较于传统机组，储能系统凭借更快的响应延迟与更高的功率调节能力，具备更优的频率跟踪精度。鉴于一次调频要求快速，储能调频死区的设定值应完全包含于传统机组动作死区范围之内，形成“储能优先响应-机组后备支撑”的分级调节模式。对于超级电容与锂电池构成的混合储能系统，锂电池死区设置应大于超级电容死区，该设计基于两类储能的寿命特性差异，超级电容循环寿命可达 10^6 次以上，而锂电池深度循环寿命仅约 3000 次。

对于锂电池调频死区和超级电容调频死区，仅能判断锂电池死区大于超级电容死区，难以采用准确值量化两者之间的关系。模糊控制基于模糊规则推理，广泛应用于非线性、时变和不确定系统的求解^[66]。故在两者死区设置上采用模糊控制，根据频率偏差和频率偏差变化率设计模糊控制器动态调整死区大小。

将 $\Delta f(s)$ 和 $d\Delta f(s)/dt$ 作为模糊控制的输入变量，锂电池和超级电容两个输入变量的论域分别为 $[-0.15, 0.15]$, $[-0.1, 0.1]$ ，锂电池输出变量的论域为 $[0.05, 0.15]$ ，超级电容输出变量的论域为 $[0.01, 0.1]$ ，输入变量使用高斯函数平滑过渡，避免死区的突变。根据实际输入变量具有的零状态和正负状态的特性，在正负状态选用大小两个词汇^[67]，将锂电池和超级电容两者的论域划分为 $\{NB、NS、Z、PS、PB\}$ 五个等级，分别代表着输入变量负大（NB）、负小（NS）、零（Z）、正小（PS）、正大（PB）。锂电池死区和超级电容死区大小分别为模糊控制的输出变量，两者取值始终保持为正，锂电池输出变量的论域取值较大，响应保守，超级电容输出变量的论域取值较小，响应灵敏。输出变量论域划分为五个等级 $\{VS、S、M、L、VL\}$ ，分别为代表着输出变量极小（VS）、小（S）、中（M）、大（L）、极大（VL）状态。

从锂电池和超级电容响应能力出发，结合上述分析有：在高频小幅波动时，超级电容优先响应，超级电容死区输出取极小状态；在低频大幅波动时，锂电池主导补偿，锂电池死区输出取极大状态；在动态趋势预测时，此时频率快速偏离目标，频率偏差变化率较大，提前缩小对应储能的死区。建立模糊控制规则表如表 3-1、表 3-2 和图 3-5 所示。

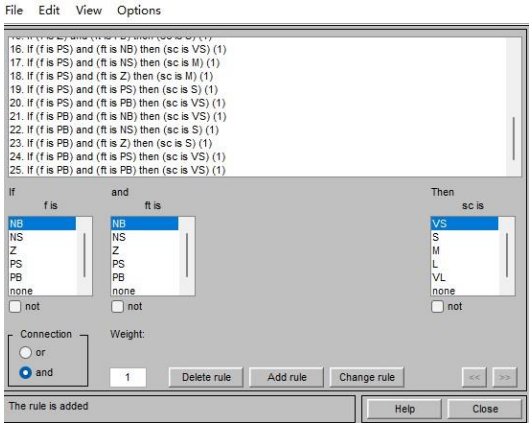
表 3-1 锂电池死区模糊控制表

$\Delta f(s) \setminus d\Delta f(s)/dt$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VS	VS	S	S	VS
NS	VS	S	M	M	VS
Z	S	M	L	M	S
PS	VS	M	M	S	VS
PB	VS	S	S	VS	VS

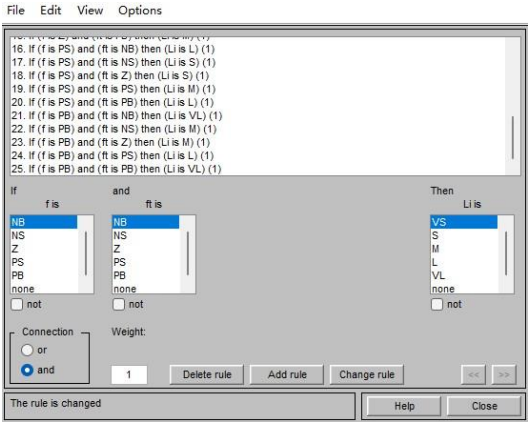
表 3-2 超级电容死区模糊控制表

$\Delta f(s) \setminus d\Delta f(s)/dt$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VL	L	M	M	VL
NS	L	M	S	S	L
Z	M	S	VS	S	M

PS	L	S	S	M	L
PB	VL	M	M	L	VL

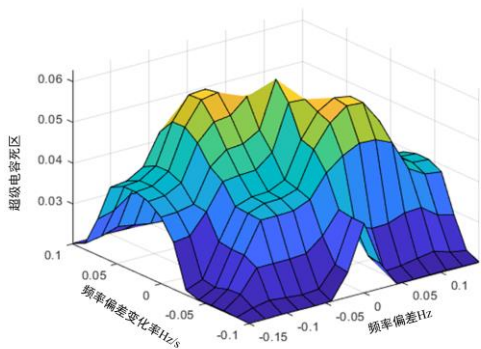


(a)超级电容死区的控制表

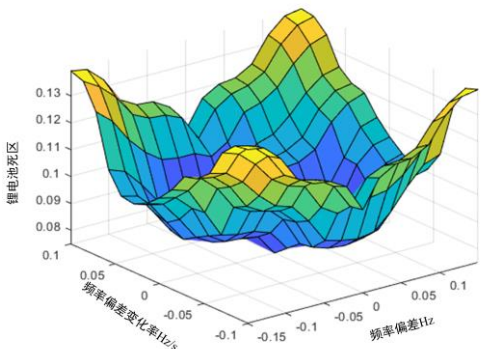


(b)锂电池死区的控制表

图 3-5 死区控制表



(a)超级电容模糊规则三维图



(b)锂电池模糊规则三维图

图 3-6 模糊规则三维图

图 3-6 为超级电容和锂电池的模糊规则三维图，图中体现了以下逻辑控制特点：在极端波动场景下，此时频率偏差和频率偏差变化率较大，超级电容死区设为极小（VS），快速响应，锂电池死区设置为极大（VL），避免频繁动作；在稳定场景下，此时频率偏差和频率偏差变化率较小，超级电容死区设为大（L），锂电池死区设为极小（VS），由锂电池处理长期偏差；在趋势预测场景下，如频率偏差正向加速偏离，超级电容提前缩小死区（VS），锂电池扩大死区（L）。

3.3 储能一次调频的基本控制方式

在储能系统参与电网一次频率调节的研究中,控制策略主要聚焦于两种核心方法:基于频率-功率下垂特性模拟的虚拟下垂控制与体现动态阻尼特性的虚拟惯性控制。有文献在频率恢复期提出虚拟负惯性控制^[68-69],其控制原理与虚拟惯性控制一致,仅在出力过程中与虚拟惯性控制相反。本研究重点探讨上述两种控制模式的协同优化机制,下面将详细阐述其数学模型与动态响应特性。

3.3.1 虚拟下垂控制

虚拟下垂控制是模拟同步发电机参与一次调频的频率下垂特性,根据系统频率与额定频率的偏差^[70],将储能系统模拟成同步发电机来对调整储能的有功输出,从而减小系统稳态时的频率偏差,采用虚拟下垂控制的负荷频率响应模型如下图所示 3-7 所示。

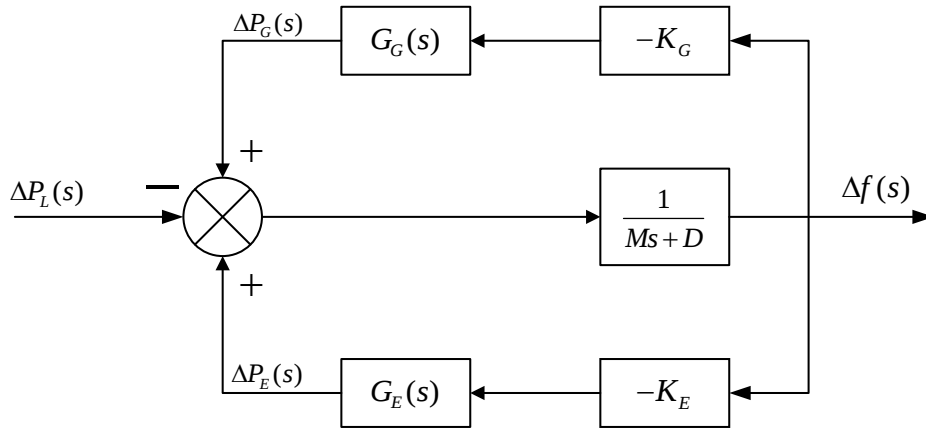


图 3-7 虚拟下垂控制的负荷频率响应模型

由图 3-7, 可得如下关系式:

$$\Delta P_G(s) = -K_G \cdot G_G(s) \cdot \Delta f(s) \quad (3-8)$$

$$\Delta P_E(s) = -K_E \cdot G_E(s) \cdot \Delta f(s) \quad (3-9)$$

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_G(s) + \Delta P_E(s) - \Delta P_L(s)}{D + sM} \quad (3-10)$$

对式(3-8)、(3-9)、(3-10)化简可得:

$$\Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{D + sM + K_G \cdot \Delta P_G(s) + K_E \cdot \Delta P_E(s)} \quad (3-11)$$

通过对上式求取极限可以得到系统初始时的频率变化表达式和稳态时的频率偏差表达式，如下式：

$$\Delta f_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot [\Delta f(s)] = \frac{-\Delta P_L}{M} \quad (3-12)$$

$$\Delta f_s = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L}{D + K_G + K_E} \quad (3-13)$$

由式(3-12)、(3-13)可得两个重要特性：其一，初始频率变化由扰动功率与系统等效刚度共同决定，与储能调节系数无关；其二，稳态频率偏差其幅值随储能调节系数增大呈反比例衰减，验证虚拟下垂控制在抑制稳态频率偏差方面的有效性。

3.3.2 虚拟惯性控制

虚拟惯性控制是模拟同步发电机内在惯性响应过程^[71]，根据系统频率变化速度，储能系统模拟传统机械惯性作用来对调整储能的有功输出，从而减小系统稳态时的频率偏差，采用虚拟惯性控制的负荷频率响应模型如下图 3-8 所示。

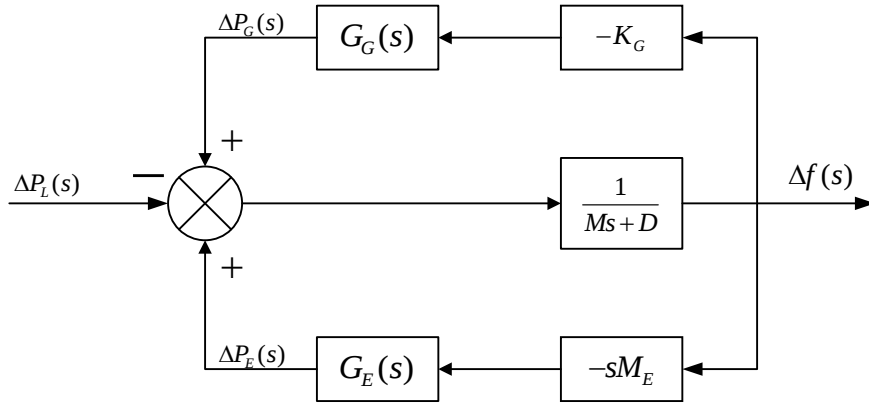


图 3-8 虚拟惯性控制的负荷频率响应模型

图中 M_E 表示储能的虚拟惯性系数。

$$\Delta P_G(s) = -K_G \cdot G_G(s) \cdot \Delta f(s) \quad (3-14)$$

$$\Delta P_E(s) = -sM_E \cdot G_E(s) \cdot \Delta f(s) \quad (3-15)$$

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_G(s) + \Delta P_E(s) - \Delta P_L(s)}{D + sM} \quad (3-16)$$

对式(3-14)、(3-15)、(3-16)化简可得：

$$\Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L(s)}{D + sM + K_G \cdot \Delta P_G(s) + sM_E \cdot \Delta P_E(s)} \quad (3-17)$$

由式(3-17)可得:

$$\Delta f_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot [\Delta f(s)] = \frac{-\Delta P_L}{M + M_E} \quad (3-18)$$

$$\Delta f_s = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L}{D + K_G} \quad (3-19)$$

由式(3-18)、(3-19)可得两个重要特性: 其一, 稳态频率偏差由扰动功率与系统等效刚度共同决定, 与虚拟惯量系数无显式关联; 其二, 初始频率变化与虚拟惯性系数成负相关关系, 验证虚拟惯性控制在抑制初始频率变化方面的独特优势。

通过深入剖析两种控制模式的动态响应特性, 可发现两者控制的互补规律: 虚拟下垂控制主要作用于稳态频率偏差, 通过功率-频率线性关系改善频率偏差; 而虚拟惯性控制则作用于初始频率变化, 通过微分反馈抑制频率偏差变化率。

3.4 基于模糊神经网络控制的储能一次调频控制策略

基于上节内容的分析, 在储能一次调频控制策略中, 本文提出两种控制结合加自适应分配占比系数的调频策略。当电网频率偏移量超过预设动作阈值时, 利用虚拟惯量占比系数 μ_1 和虚拟下垂占比系数 μ_2 控制储能在调频过程中的出力。由于占比系数 μ_1 和 μ_2 在调频过程中受系统频率变化而自适应改变, 从而能够形成不同的调频控制方式, 提高一次调频的效果。

$$\begin{cases} \Delta P_E(s) = \mu_1 \Delta P_b(s) + \mu_2 \Delta P_c(s) \\ \Delta P_b(s) = M_E \frac{d\Delta f(s)}{dt} \\ \Delta P_c(s) = K_E \Delta f(s) \end{cases} \quad (3-20)$$

式中: $\Delta P_b(s)$ 为虚拟惯性调频出力, $\Delta P_c(s)$ 为虚拟下垂调频出力, μ_1 和 μ_2 分别为 $\Delta P_b(s)$ 和 $\Delta P_c(s)$ 在 $\Delta P_E(s)$ 中的占比系数, 且有 $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

通过负荷增加时频率偏差曲线, 分析调频过程中占比系数的具体变化情况。

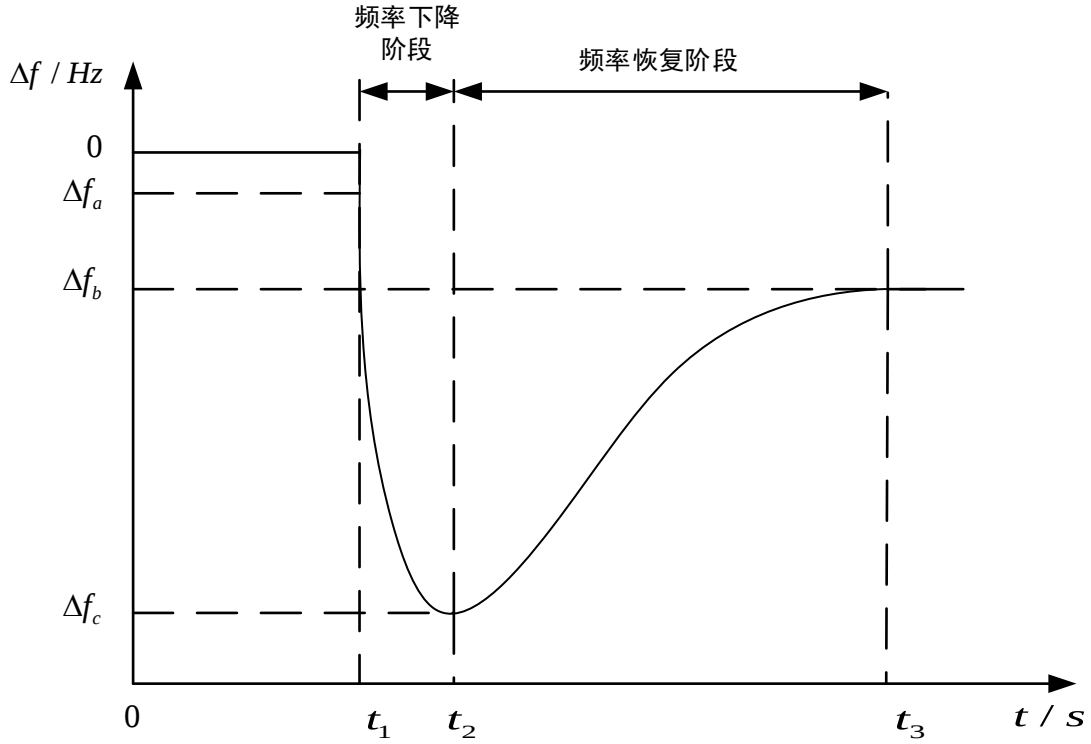


图 3-9 负荷增加时频率偏差曲线

图 3-9 中, t_1 、 t_2 、 t_3 分别为初始时刻, 最大频率偏差时刻和稳态时刻; Δf_a 、 Δf_b 、 Δf_c 分别为储能调频死区、最大频率偏差和稳态频率偏差。

在频率下降阶段 ($t_1 \sim t_2$ 时间段), 频率偏差 $\Delta f(s)$ 由较小值逐渐增大至较大值, 频率偏差变化率 $d\Delta f(s)/dt$ 由较大值逐渐减小至零, 此阶段需抑制快速增长的频率偏差和较大的频率偏差变化率。因此, 虚拟下垂控制的占比系数 μ_2 初始较小且跟随频率偏差的增大逐渐增大, 虚拟惯性控制的占比系数 μ_1 初始较大且跟随频率偏差变化率的减小逐渐减小, 变化过程中两者始终满足 $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

在频率恢复阶段 ($t_2 \sim t_3$ 时间段), 频率偏差变化率由负变为正, 虚拟惯性控制出力为负, 不利于调频需求, 故此阶段虚拟下垂控制的占比系数 μ_2 应保持较大值, 虚拟惯性控制的占比系数 μ_1 应保持较小值, 变化过程中两者始终满足 $\mu_1 > \mu_2$, $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

基于上述分析可知, 虚拟惯性控制的占比系数 μ_1 和虚拟下垂控制的占比系数 μ_2 随频率偏差曲线的变化而变化, 具有动态特性不易掌握的非线性时变系统的特征, 难以准确量化估计, 因此无法利用等式约束去输出 μ_1 和 μ_2 的具体数值。

在模糊控制策略设计中，定义频率偏差的输入论域为 $[-0.5, 0.5]$ ，频率偏差变化率的论域为 $[-0.5, 0.5]$ ，占比系数 μ_1 的输出论域限定于 $[0, 1]$ ，输入和输出变量均采用三角形隶属函数进行模糊化处理。输入变量的论域在储能死区的论域设置的基础上多出两个等级，分别为负中（NM）和正中（PM），输出变量的论域与储能死区的论域设置相同。

基于动态响应特性分析，建立如表 3-3 所示的模糊规则表。当系统处于频率偏差较小且频率偏差变化率较大时，占比系数 μ_1 取值大值以增强虚拟惯量阻尼效果；当系统处于频率偏差较大且频率偏差变化率较小时，占比系数 μ_1 减小以增强虚拟下垂控制；当系统处于频率偏差较大且频率偏差均为零时，频率稳定，占比系数 μ_1 取零。其他情况参考如表 3-3 设置，就不过多介绍。

表 3-3 模糊规则表

$\Delta f(s) \setminus d\Delta f(s)/dt$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VL	L	L	VL	Z	Z	Z
NM	L	L	M	L	Z	Z	S
NS	M	M	M	M	Z	S	S
Z	Z	S	Z	Z	Z	S	Z
PS	S	S	Z	M	M	M	M
PM	S	Z	Z	L	M	L	L
PB	Z	Z	Z	VL	L	L	VL

在储能参与的模糊控制上，为了保证占比系数在调频过程中自适应分配的精确度，输入变量划分多出两个等级，模糊规则共建立了四十九条。相较储能死区的二十五条模糊规则，规则数量显著增多，而模糊控制中模糊规则的建立过于依赖专家经验，存在主观性强、规则库不完备等问题，因此此处考虑在模糊控制上结合人工神经网络，构成基于模糊神经网络控制的一次调频控制策略。

相较于模糊控制，采用模糊神经网络控制实现控制规则的智能化升级，其核心优势在于通过神经网络自动提取输入输出间的非线性映射关系，前向传播阶段采用最小二乘估计器优化参数，反向传播阶段应用梯度下降法调整隶属函数参数，该机制使得模糊规则生成过程摆脱对人工经验的依赖。

模糊神经网络采用五层拓扑结构实现非线性映射，总体结构如下图 3-10 所

示^[72]:

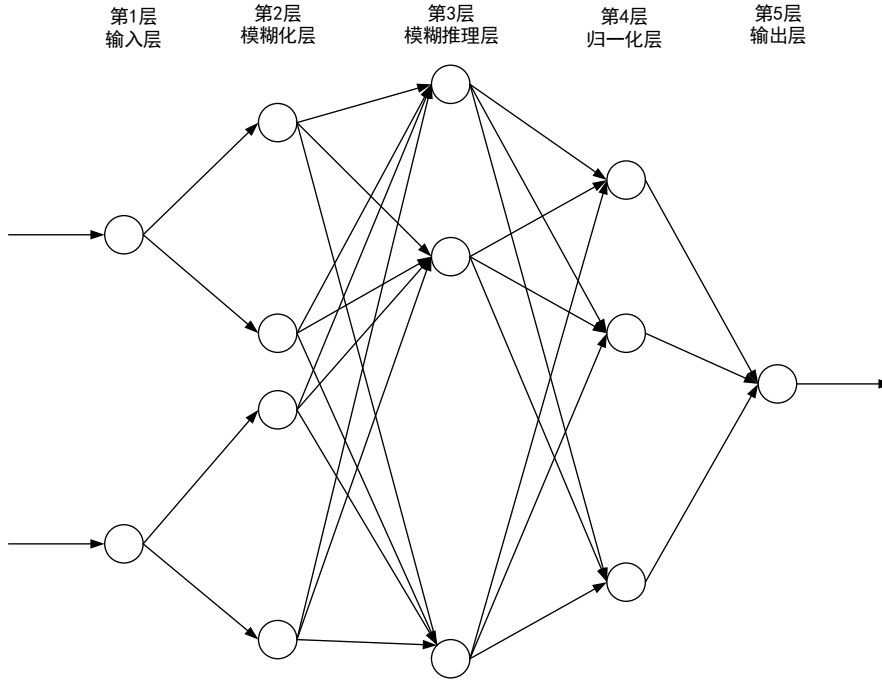


图 3-10 模糊神经网络框架

第一层为输入层，包含频率偏差和频率偏差变化率两个输入，其中 x_1 为频率偏差， x_2 为频率偏差变化率，第一层的节点数为 2，输入输出的表达式如下：

$$\begin{cases} I_i^1 = x_i, i=1, 2 \\ O_i^1 = I_i^1, i=1, 2 \end{cases} \quad (3-21)$$

式中： I_i^1 、 O_i^1 分别为第一层第 i 个输入、输出。

第二层为模糊化层，通过三角隶属函数将输入量转化为模糊集合，每个输入变量划分 7 个模糊子集，该层节点数为 14，输入输出的表达式如下：

$$\begin{cases} I_{ij}^2 = \mu_i^j, i=1, 2; j=1, 2, \dots, 7 \\ O_{ij}^2 = I_{ij}^2, i=1, 2 \end{cases} \quad (3-22)$$

式中： μ_i^j 为三角型函数， I_{ij}^2 、 O_{ij}^2 分别为第二层第 i 个输入第 j 个模糊集中的输入、输出。

第三层模糊推理层，基于 Mamdani 模糊模型构建四十九条模糊规则，该层节点数为 49，输入输出的表达式如下：

$$\begin{cases} I_i^3 = O_j^2 \cdot O_k^2, i=1, 2, \dots, 49; j, k=1, 2, \dots, 7 \\ O_i^3 = I_i^3, i=1, 2, \dots, 49 \end{cases} \quad (3-23)$$

式中： I_i^3 、 O_i^3 分别为第三层第 i 个输入、输出。

第四层为归一化层，对模糊规则触发强度进行概率标准化处理，该层节点数为 49，输入输出的表达式如下：

$$\begin{cases} I_i^4 = \frac{O_i^3}{\sum_{j=1}^{49} wO_j^3}, i=1, 2, \dots, 49 \\ O_i^4 = I_i^4, i=1, 2, \dots, 49 \end{cases} \quad (3-24)$$

式中：w 为权重占比， I_i^4 、 O_i^4 分别为第四层第 i 个输入、输出。

第五层为输出层，该层节点数为 1。

此外，在电力系统一次调频动态过程中，以虚拟下垂控制系数 K_E 为例，考虑其在不同 SOC 下对应的充放电系数分别为 $K_{E,c}$ ， $K_{E,d}$ ， $K_{E,c}$ 和 $K_{E,d}$ 的表达式如下：

储能充电时虚拟下垂系数为 $K_{E,c}$ 表达式为：

$$K_{E,c} = \begin{cases} K_{E,\max}, SOC \leq SOC_3 \\ \frac{K_{E,\max}}{1 - \frac{15(SOC_4 - SOC)}{SOC_4 - SOC_3}}, SOC_3 < SOC < SOC_4 \\ 100K_{E,\max} e^{\frac{15(SOC - SOC_3)}{SOC_4 - SOC_3}} + 1 \\ 0, SOC \geq SOC_4 \end{cases} \quad (3-25)$$

式中： $K_{E,\max}$ 为虚拟下垂系数的最大值， SOC_3 和 SOC_4 分别为对应的较大值和最大值。

储能放电时虚拟下垂系数为 $K_{E,d}$ 表达式为：

$$K_{E,d} = \begin{cases} K_{E,\max}, SOC \geq SOC_2 \\ \frac{K_{E,\max}}{1 - \frac{15(SOC - SOC_1)}{SOC_2 - SOC_1}}, SOC_1 < SOC < SOC_2 \\ 100K_{E,\max} e^{\frac{15(SOC - SOC_1)}{SOC_2 - SOC_1}} + 1 \\ 0, SOC \leq SOC_1 \end{cases} \quad (3-26)$$

式中： $K_{E,\max}$ 为虚拟下垂系数的最大值， SOC_1 和 SOC_2 分别为对应的最小值和较小值。

令虚拟惯性系数 $M_E = K_E$ ，使得虚拟惯性出力和虚拟下垂出力适当。

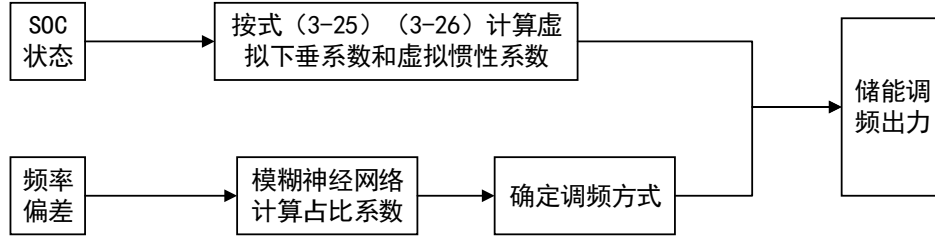


图 3-11 储能一次调频控制策略

综上，本研究构建储能一次调频控制策略如图 3-11 所示。当系统频率下降至储能死区之外时，触发储能的有功功率支撑功能。通过模糊神经网络计算虚拟惯性控制与虚拟下垂控制的占比系数确定调频方式，同时融合储能的 SOC 状态形成调节系数，最终算出储能调频出力。

3.5 仿真分析

在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建如图所示的仿真模型，通过对本文所提出模糊控制设置锂电池和超级电池的死区和模糊神经网络控制的储能参与调频进行仿真，评估所提控制策略的性能。

3.5.1 评价指标

对于阶跃负荷扰动，采用的评价指标分别为最大频率偏差 ($\Delta f_{\max}$)、稳态频率偏差 (Δf_w) 和频率恶化速度 (V_{down})。最大频率偏差是频率曲线跌落的最大值，最大频率偏差越小，调频效果越好。稳态频率偏差是频率曲线稳定时频率与额定频率的差值，稳态频率偏差越小，调频效果越好。频率恶化速度是频率曲线下降的跌落速度，速度越慢，效果越好。

对于连续负荷扰动，采用的评价指标分别为频率峰谷差 (Δf_{p-v}) 和频率偏差的均方根值 (f_{jun})，当两者越小时表明波动越小，调频效果越好。其中 f_{jun} 的表达式如下：

$$f_{jun} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} \quad (3-27)$$

式中： Δf_i 为 i 时刻的频率偏差值

3.5.2 仿真参数的设置及仿真平台的搭建

(1) 仿真参数的设置

在对仿真平台搭建之前，需要对仿真参数进行设置，表 3-4 和表 3-5 分别为系统参数和控制参数。本文将传统调频机组额定容量设置为 600MW，储能系统额定容量设置为 10MW/1MWh，电网额定频率为 50Hz，仿真参数以传统机组额定容量和电网额定频率为基准值进行标么化处理。

表 3-4 系统仿真参数的设置

参数	数值	参数	数值
M	5	D	1
K_G	20	T_G	0.08
T_{CH}	0.3	T_{RH}	10
F_{HP}	0.5	T_B	0.1
T_{SC}	0.1	$K_{E,max}$	20

表 3-5 控制策略仿真参数的设置

参数	数值	参数	数值
SOC_1	0.1	SOC_3	0.55
SOC_2	0.45	SOC_4	0.9

(2) 仿真模型的搭建

根据前文建立的储能参与一次调频的频率响应模型和控制策略图，在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建储能参与一次调频的仿真模型，在仿真模型中，搭建的重点是储能控制策略部分。

3.5.3 混合储能调频死区设置的仿真对比

为验证在模糊控制下储能死区能够实现动态调整，通过设置频率阶跃扰动和频率缓慢漂移两种场景。

(1) 频率阶跃变化

在频率阶跃变化下，前 0-10s 正常，10s 时 $\Delta f(s) = 0.12\text{Hz}$ ，此时 $d\Delta f(s)/dt$

趋向于无穷大，10s 后， $\Delta f(s)$ 维持在 0.12， $d\Delta f(s)/dt$ 趋向于零，采用模糊控制的仿真结果如图 3-12 所示。

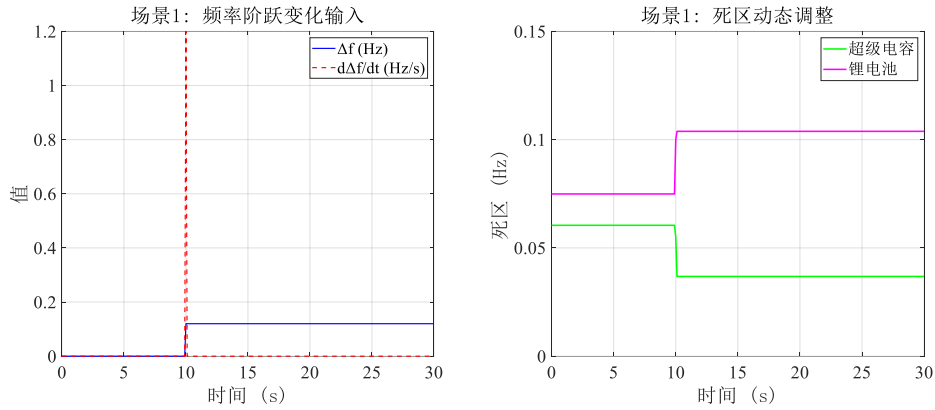


图 3-12 频率阶跃变化

由图 3-12 可知，在频率阶跃变化下，超级电容死区从 0.06Hz 立即降至 0.037Hz(VS 等级)，快速响应大幅度波动；锂电池死区从 0.075Hz 提升至 0.104Hz (VL 等级)，避免不必要的动作。

(2) 频率缓慢漂移

在频率缓慢漂移下， $\Delta f(s)$ 线性增至 0.04Hz，维持在较小值，采用模糊控制的仿真结果如图 3-13 所示。

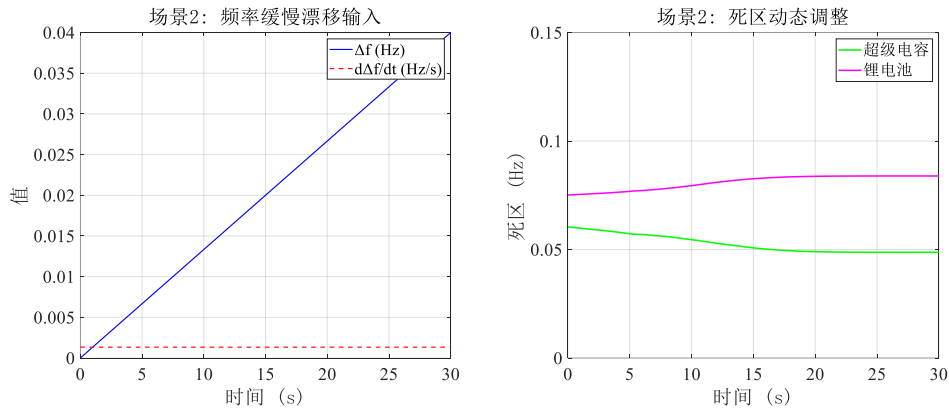


图 3-13 频率缓慢漂移

由图 3-13 可知，在频率缓慢漂移下，超级电容死区逐渐从 0.06Hz 降至 0.049Hz (S 等级)，参与长期补偿；锂电池死区从 0.075Hz 缓慢上升至 0.084Hz (L 等级)，适度响应趋势性偏差。

通过分析可知，锂电池和超级电容在面对不同场景下的波动下，在保证超级电容死区在锂电池死区范围内的同时，两者能够根据波动动态调整死区，避免了频繁动作，综合性能得到提升。

3.5.4 基于模糊神经网络控制的储能一次调频控制策略的仿真对比

为了验证模糊神经网络控制的优越性，设置阶跃负荷扰动和连续负荷扰动两种场景，对基于权重因子的储能一次调频控制策略^[34]，基于模糊控制的储能一次调频控制策略^[35]和基于模糊神经网络控制的储能一次调频控制策略（即本文所提控制策略）三种控制策略进行仿真，并对仿真调频效果进行分析。

（1）阶跃负荷扰动

在仿真模型中加入仿真时长为 30s，大小为 0.02（p.u.）的阶跃负荷扰动，三种控制策略对应的频率偏差曲线如图 3-14、图 3-15 所示，对应的评价指标结果如表 3-6 所示。

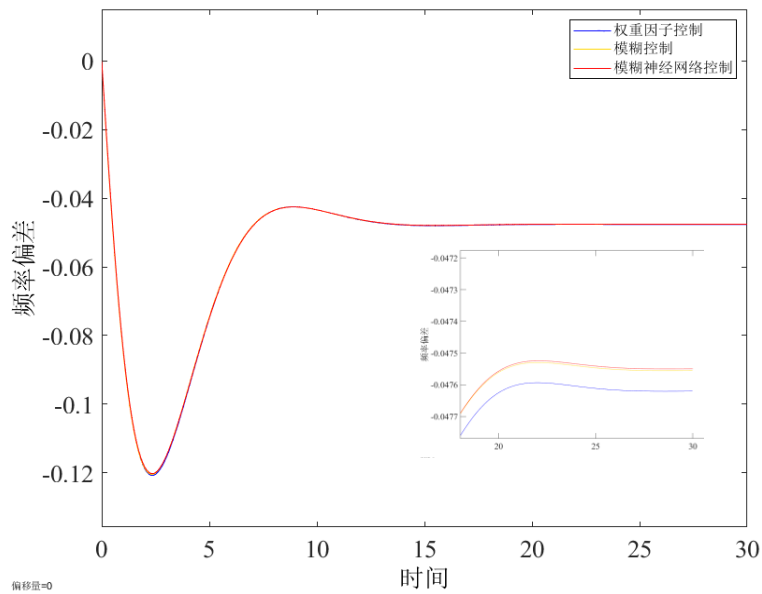


图 3-14 阶跃负荷扰动下的频率偏差曲线

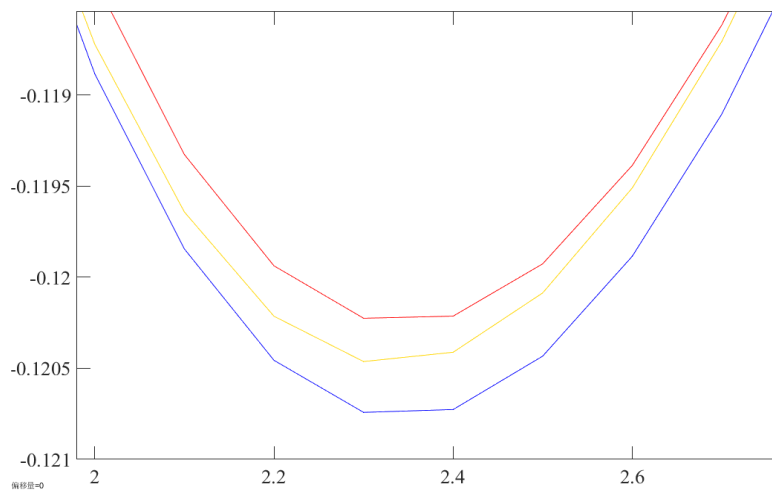


图 3-15 频率偏差曲线局部放大图

表 3-6 阶跃负荷扰动下评价指标结果

控制策略	$\Delta f_{\max}$	Δf_w	V_{down}
权重因子控制	-0.1207	-0.04763	0.0514
模糊控制	-0.1205	-0.04755	0.0513
模糊神经网络控制	-0.1203	-0.04754	0.0512

由图 3-14 知，在 0.02 (p.u) 阶跃扰动下，模糊神经网络控制策略下的频率偏差曲线与其他两种控制策略差距不大，但从频率偏差曲线的局部放大图 3-15 上和表 3-6 来看，本文控制策略的最大频率偏差比模糊控制策略小 0.17%，比权重因子控制策略小 0.33%，，稳态频率偏差和频率恶化速度上也有细微优势，因此在阶跃扰动下本文策略具有优势。

(2) 连续负荷扰动

在阶跃负荷扰动下，频率偏差曲线差距不大，为进一步验证控制策略的有效性。在仿真模型中加入图 3-16 所示仿真时间为 300s，大小为 0.06 (p.u) 的连续扰动，三种控制策略下的频率偏差曲线如图 3-17、图 3-所示，表 3-7 为评价指标结果。

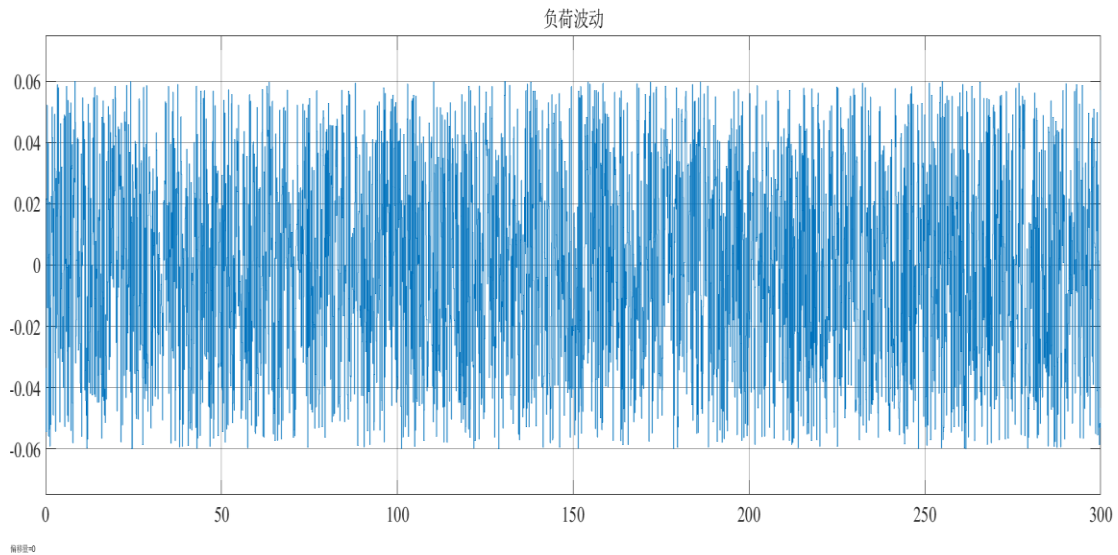


图 3-16 300s 连续负荷扰动

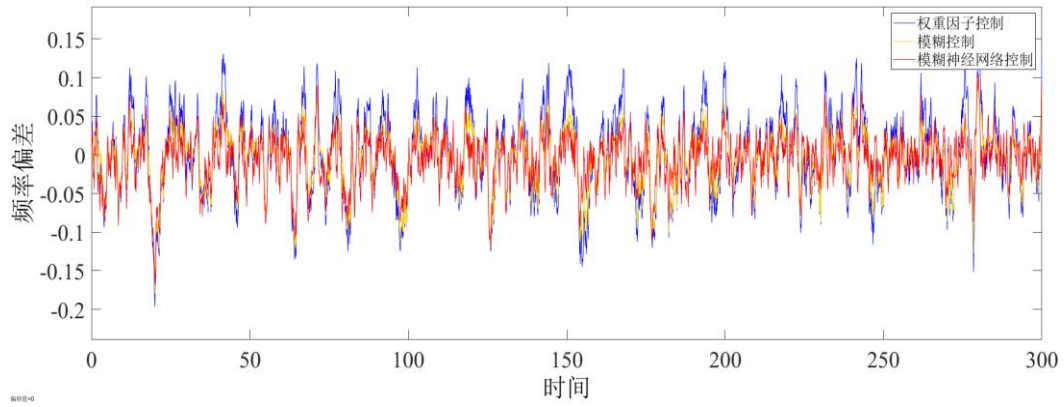


图 3-17 连续负荷扰动下的频率偏差曲线

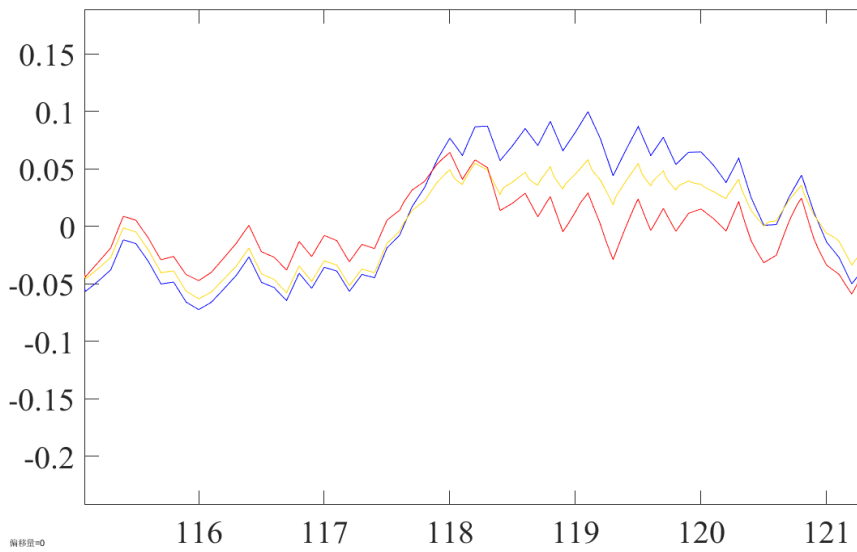


图 3-18 频率偏差曲线局部放大图

表 3-7 连续负荷扰动下评价指标结果

控制策略	Δf_{p-v}	f_{jun}
权重因子控制	0.33	0.1061
模糊控制	0.29	0.0971
模糊神经网络控制	0.26	0.0915

由图 3-17 可以看出，在连续扰动下，模糊神经网络控制策略与其他两种控制在调频趋势上大体相似，但不同的是不同的控制策略在频率偏差大小上有所差异，通过频率偏差曲线局部放大图 3-来看，本文控制策略不论是在负荷上升阶段还是负荷下降阶段，频率偏差均小于其他两种控制策略。由表 3-7 知，在连续扰动下，本文控制策略的频率峰谷差比模糊控制小 11.54%，验证了相较于模糊控制

中的人为设计模糊规则，模糊神经网络通过神经网络学习能力自动提取模糊规则，更能适应非线性系统，控制精度更高。此外本文控制策略的频率峰谷差比权重因子控制小 26.92%，验证了采用函数构建的控制方法无法实现占比系数的自适应调节，调频效果为三者中最差。本文控制策略的频率偏差均方根值比模糊控制小 6.12%，比权重因子控制小 15.96%，因此在阶跃扰动下本文策略具有显著优势。

综上所述，在储能死区设置上，采用模糊控制能够实现死区动态调整，在储能一次调频上，采用模糊神经网络控制策略能够实现更好的调频效果，仿真结果验证本文控制的有效性。

3.6 本章小结

本章通过对聚合后的储能参与调频开展研究，提出基于模糊控制的混合储能死区设置和模糊神经网络的一次调频控制策略。首先，针对超级电容和锂电池的响应特性差异，通过二十五条模糊规则实时调整超级电容和锂电池死区，实现了模糊控制下的死区动态调整。其次，分析虚拟下垂与虚拟惯性在稳态频率偏差与初始频率变化上的互补特性，提出采用模糊神经网络控制实现两者占比系数的自适应调节。最后，在 Matlab/Simulink 平台构建模型，设置典型扰动场景进行验证。实验结果表明，在死区设置上，锂电池和超级电容死区能够根据波动动态调整死区；在调频效果上，本文策略在连续扰动下的频率峰谷差比模糊控制小 11.54%，比权重因子控制小 26.92%。

第 4 章 基于一致性算法的储能协同频率控制研究

在第 3 章中, 储能一次调频侧重设计控制策略调整储能系统调频出力, 实现最佳的调频效果。在包含传统调频机组、新能源机组和柔性负荷等多种类型调频资源共存的调频体系中, 储能单元与其它调频主体间往往存在动态特性失配、调节指令冲突等问题。若缺乏有效的协同控制机制, 易引发调频容量叠加损耗、区域振荡加剧等连锁风险, 导致系统整体调频效能下降。因此, 构建基于一致性算法的储能协同频率控制框架, 对于实现多种类型调频资源动态互补、提升系统频率抗扰动能力具有重要意义。

因此, 在本章中, 首先, 构建包含火电机组、储能、新能源与可控负荷等多类型调频资源的频率响应模型, 计算满足频率偏差下所需的下垂系数总值, 采用一致性算法将下垂系数总值自适应分配至各调频资源, 实现协同频率控制。其次, 针对一致性算法中的收敛系数, 通过采用改进遗传算法对收敛系数进行优化, 加快一致性算法的收敛速度。最后, 针对储能协同调频兼顾储能 SOC 问题, 按照调频资源类型进行集群划分, 保证储能系统 SOC 均衡的同时兼顾协同频率控制。

4.1 多智能体一致性算法理论

4.1.1 图论基础

在一个复杂网络系统中, 网络的拓扑结构通常是复杂的, 图论通过引入点和边的概念对复杂网络的拓扑结构进行简化, 便于解决复杂网络问题。对于一个基于多智能体架构的主动配电网分布式系统^[73], 采用图论手段处理, 可以用无向图 $G=(V,E)$ 描述不同智能体节点之间的通信关系, 其中 V 是无向图中所有节点组成的集合, 节点与节点之间通过边组成联系, E 是无向图中所有边组成的集合。

对于一个由 n 节点组成的无向图, 定义矩阵 A 为邻接矩阵, 用来描述节点之间的连接关系, 矩阵元素 a_{ij} 表达式如下: 矩阵 L 为拉普拉斯矩阵。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 之间有连接} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 之间无连接} \end{cases} \quad (4-1)$$

定义矩阵 Δ 为度矩阵，用来描述与该点相连的点的数量。

$$\Delta = \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij}, & \text{对角线元素} \\ 0, & \text{非对角线元素} \end{cases} \quad (4-2)$$

定义矩阵 L 为拉普拉斯矩阵，由邻接矩阵和度矩阵得出，用来描述无向图的代数连通度^[74]。

$$L = \Delta - A = \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij}, & \text{对角线元素} \\ -a_{ij}, & \text{非对角线元素} \end{cases} \quad (4-3)$$

图 4-1 为一个 9 节点的无向图，该拓扑结构的邻接矩阵 A 为：

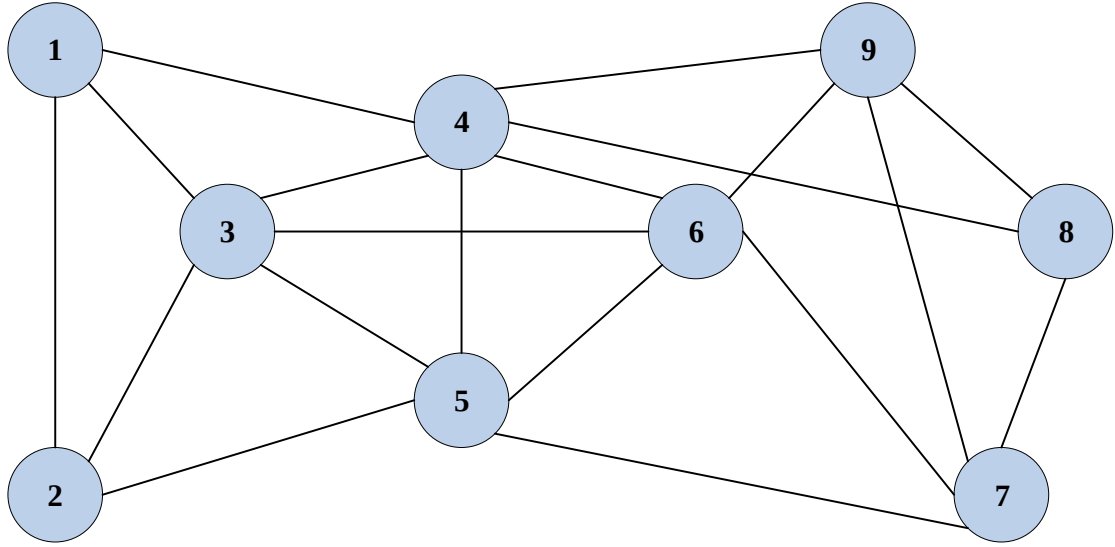


图 4-1 9 节点无向图

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

度矩阵 Δ 为：

$$\Delta = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

拉普拉斯矩阵 L 为:

$$L = \Delta - A = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 5 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 6 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 5 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 5 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

4.1.2 一致性算法

对于 n 节点的分布式系统, 定义节点的某个变量为一致性状态变量, 各节点通过检测自身信息同时与其他有通信连接的节点进行通信, 互相交换一致性状态变量信息, 在一致性算法驱动下进行迭代计算, 最终所有节点的一致性状态变量收敛至同一值。

一致性算法迭代过程表示为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)), i=1, 2, \dots, n \quad (4-7)$$

上式简化得:

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j(k), i=1, 2, \dots, n \quad (4-8)$$

式中: a_{ij} 为邻接矩阵 A 第 i 行第 j 列的元素。

用矩阵形式表示为：

$$\dot{X} = -LX \quad (4-9)$$

式中：\$L\$ 为拉普拉斯矩阵。

4.2 基于一致性算法的调频控制策略

4.2.1 储能协同频率控制的频率响应模型

电力系统动态频率特性分析是保障电网稳定运行的重要研究领域，其核心在于建立准确描述频率扰动传播过程的数学模型，电网关键运行参数的合理配置对频率动态响应过程具有决定性影响^[75-76]。本研究在经典电网频率动态模型基础上，集成火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷的频率响应环节，建立含有火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷的频率响应模型，如下图 4-2 所示。

为简化协同调频控制的复杂程度，火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷均通过下垂控制并入电网，通过对下垂系数的优化实现分布式资源的协同频率控制。在图 4-2 中，\$K_G\$、\$K_{ESS}\$、\$K_R\$ 和 \$K_L\$ 分别代表参与一次调频的火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷的下垂系数。

在电力系统调频控制中，合理设定调节设备的动作阈值区间是维持系统稳定运行的重要措施。为防止分布式调频资源在电网微小波动时产生非必要动作的同时简化控制模型的复杂度，将分布式资源的调频死区统一设定为相同值。

通过频率响应模型，可以计算出一次调频下频率偏差的频域表达式，再通过时频域变换，得出频率偏差的时域表达式：

$$\Delta f(t) = \frac{RP_d}{2\pi(DR + K_m + KR)} (1 + \alpha_1 e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi_1)) \quad (4-10)$$

对上式求导可得到极值点时的频率偏差，表达式如下：

$$\dot{f}_e = -\frac{RP}{2\pi(DR + K_m + KR)} (1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t_e} \sin(\omega_d t_e + \varphi)) \quad (4-11)$$

电网暂态过程中，频率下降的峰值水平是评估系统抗扰动能力的关键性指标^[77]。当极值点频率偏差 \$\dot{f}_e\$ 设定为 0.5Hz，且极值点 \$t_e\$ 确定的情况下，可以计算出火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷所需要提供总的下垂系数，通过接口智

能体接收并传递响应系数，再基于一致性算法将下垂系数分配至各节点，实现各节点协同频率控制。

$$K_{sum} = \frac{RP_d(1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t_e} \sin(\omega_d t_e + \varphi))}{2\pi R f_e} - \frac{K_m}{R} - D \quad (4-12)$$

$$= K_G + K_{ESS} + K_R + K_L$$

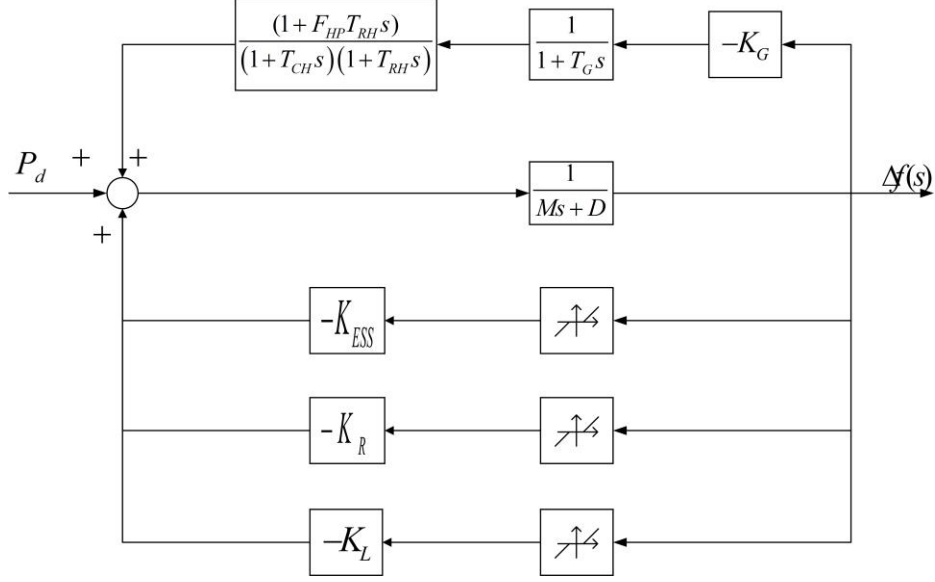


图 4-2 频率响应模型

4.2.2 一致性算法调频指标求解

在协同调频控制中，以调频成本最小为目标：

$$\min F = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (4-13)$$

式中： C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷的调频成本。

火电机组的调频成本可以用二次函数表示为：

$$C_1 = a_i (K_G \Delta f)^2 + b_i (K_G \Delta f) + c_i \quad (4-14)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 分别为火电机组成本函数中二次项、一次项和常数项的系数。

储能的调频成本可以用过原点的二次函数表示：

$$C_2 = d_i (K_{ESS} \Delta f)^2 \quad (4-15)$$

式中： d_i 为储能成本函数的系数。

新能源机组的调频成本表示为：

$$C_3 = e_i (K_R \Delta f)^2 \quad (4-16)$$

式中： e_i 为新能源成本函数的系数。

柔性负荷的调频成本可以用二次函数表示为

$$C_4 = \alpha_i (K_L \Delta f)^2 + \beta_i (K_L \Delta f) + \gamma_i \quad (4-17)$$

式中： α_i 、 β_i 、 γ_i 分别为柔性负荷成本函数中二次项、一次项和常数项的系数。

同时满足以下约束：

$$\text{s.t.} \begin{cases} K_{sum} = K_G + K_{ESS} + K_R + K_L \\ P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \\ P_{ESS}^{\min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS}^{\max} \\ P_R^{\min} \leq P_R \leq P_R^{\max} \\ P_L^{\min} \leq P_L \leq P_L^{\max} \end{cases} \quad (4-18)$$

对协同调频模型应用增广拉格朗日乘子求偏导得到：

$$\begin{cases} \lambda_G = \frac{\partial L}{\partial K_G} = 2a_i K_G \Delta f + b_i \Delta f \\ \lambda_{ESS} = \frac{\partial L}{\partial K_{ESS}} = 2d_i K_{ESS} \Delta f \\ \lambda_R = \frac{\partial L}{\partial K_R} = 2e_i K_R \Delta f \\ \lambda_L = \frac{\partial L}{\partial K_L} = 2\alpha_i K_L \Delta f + \beta_i \Delta f \end{cases} \quad (4-19)$$

由式（4-19）一致性指标可得参与一次调频的火电机组、储能、新能源机组和柔性负荷的下垂系数：

$$\begin{cases} K_G = \frac{\lambda_G - b_i \Delta f}{2a_i \Delta f} \\ K_{ESS} = \frac{\lambda_{ESS}}{2d_i \Delta f} \\ K_R = \frac{\lambda_R}{2e_i \Delta f} \\ K_L = \frac{\lambda_L - \beta_i \Delta f}{2\alpha_i \Delta f} \end{cases} \quad (4-20)$$

4.3 基于改进遗传算法的协同频率控制

4.3.1 协同频率控制

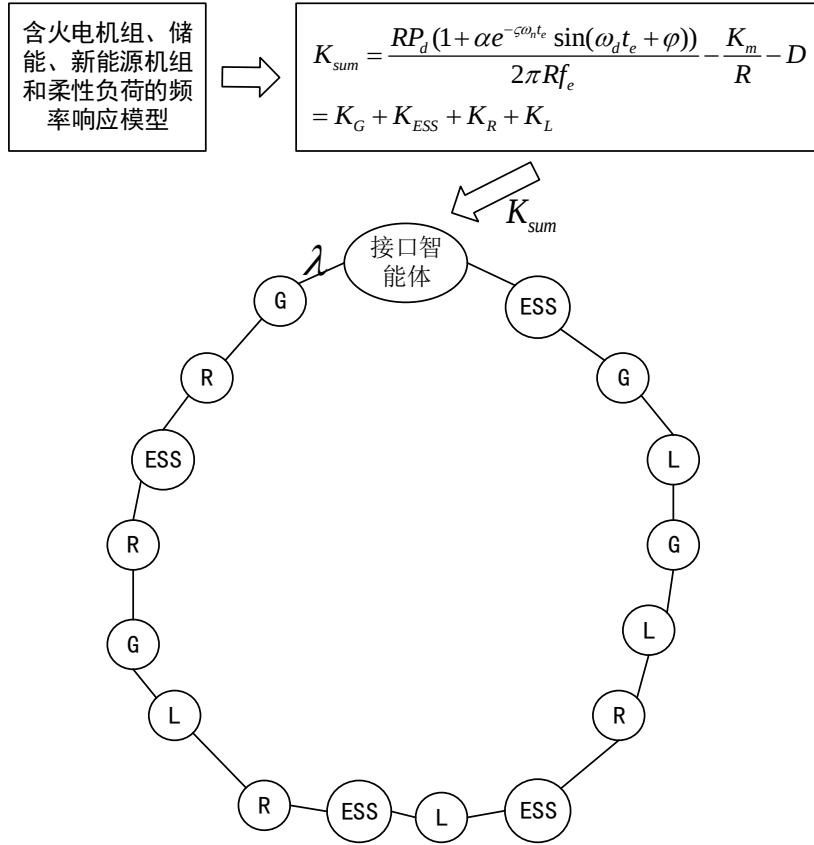


图 4-3 协同调频控制

接口智能体接受由频率响应模型计算出的调频响应系数，其次通过分布式通信网络采集本区域调节单元的一致性状态参数，最后与相邻区域接口智能体进行多轮次状态协商，最终形成满足全网动态响应的最优协调方案。协调调频控制如图 4-3 所示，迭代公式为：

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^M a_{ij} \lambda_j(k) + \varepsilon \Delta K, i = 1, 2, \dots, M \quad (4-21)$$

$$\Delta K(k+1) = K_{sum} - \sum_{m=1}^M K_m(k+1) \quad (4-22)$$

式中： ε 为收敛系数， $\Delta K(k+1)$ 表示第 $k+1$ 次迭代中，总需求响应系数 K_{sum} 与调频资源下垂系数总和之间的差值。

一致性计算的流程图如图 4-4 所示。

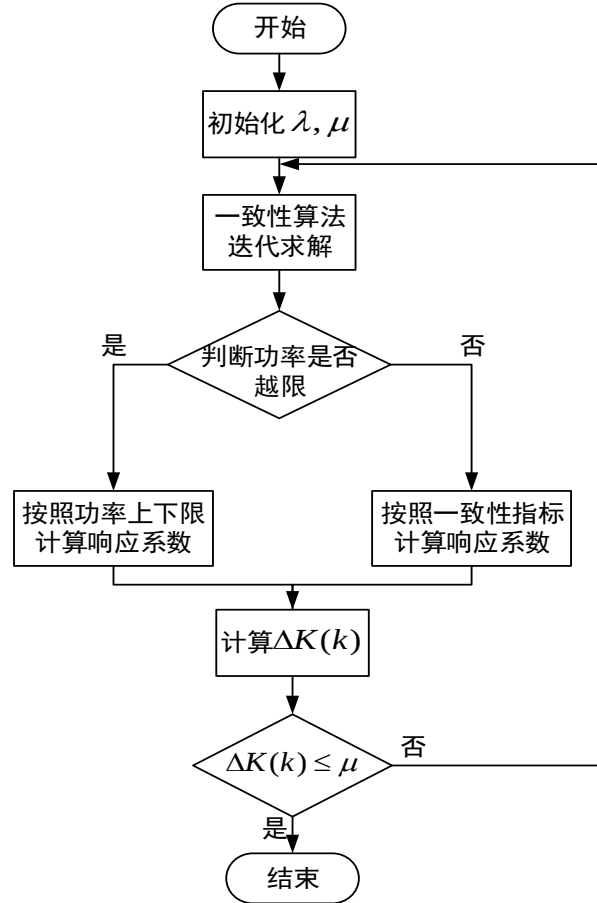


图 4-4 一致性计算流程

该控制策略在保证各调频资源的出力不超出自身出力限制的同时，能够实现总下垂系数满足电网需求。

4.3.2 改进遗传算法

在一致性算法中，收敛系数 ε 的取值影响收敛过程，当 ε 超过临界阈值时，系统一致性变量将呈现增幅振荡现象，导致算法无法收敛；而当 ε 低于最优区间时，计算复杂度显著上升，收敛时间将随 ε 减小呈现显著增长。因此，本节通过采用改进遗传算法寻得最佳收敛系数来提高系统性能。

一致性算法中需要考虑多智能体的动态特性，属于非线性优化问题，相较于传统优化算法，遗传算法不需要考虑内部情况，在搜索全局最优解时，具有一定的高效率和较大的灵活性^[78]。遗传算法作为一类模拟生物进化机制的启发式搜索方法，其核心流程包含种群初始化、适应度评估、遗传操作等阶段。在遗传算法中，种群中的每个个体表示问题解空间的一个候选方案，适应度函数定量评估解的优劣程度。遗传操作包括交叉操作和突变操作，其中，交叉操作主要是通过

原有基因的互相交换来形成新的基因组合方式,变异操作则是原有基因上进行改变形成新的基因。遗传算法中的交叉与变异操作实现基因的有效传递和生成新的基因,保证个体的多样性,有助于算法找到全局最优解。

在遗传算法的优化过程中,初始种群的选择策略对算法的全局收敛特性及解的质量具有决定性影响。传统遗传方法通常采用均匀随机分布生成初始种群,这种无导向的初始化机制存在两个显著缺陷:其一,种群多样性指数可能低于临界阈值,导致早熟收敛概率增加;其二,适应度方差超过合理范围时,算法收敛迭代次数将激增。因此针对初始种群选择问题,本文针对初始种群的选取进行改进,先采用生成规模为原始种群两倍的候选种群,通过适应度评估筛选出较优个体组成初始种群,最后将该优质种群用于迭代计算。

在遗传算法进化机制中,交叉与变异操作分别承担着染色体基因信息重组和随机扰动的重要职能。交叉操作通过父代染色体的基因片段交换实现优质特征的组合继承,而变异操作则通过局部基因位翻转维持种群多样性。传统算法通常将交叉概率(P_c)和变异概率(P_m)设定为固定数值,这种固定参数策略存在两方面局限性:其一,在进化初期高交叉率可能破坏潜在优质基因结构;其二,进化后期固定低变异率难以突破局部最优陷阱。因此,在交叉和变异的概率值上,本文设置自适应调整的概率值,令 $P_m = P_c$,其表达式为:

$$P_c = \begin{cases} P_c^{\max}, f_1 \leq f_{ave} \\ P_c^{\max} - \frac{(P_c^{\max} - P_c^{\min})(f_1 - f_{ave})}{f_{\max} - f_{ave}}, f_{ave} \leq f_1 \leq 2f_{ave} \\ 0, f_1 > 2f_{ave} \end{cases} \quad (4-23)$$

式中: $P_c^{\max}$ 、 $P_c^{\min}$ 分别为交叉概率的上下限; $f_{\max}$ 、 f_{ave} 分别为最大适应度和平均适应度; f_1 为所选的两个个体中适应值较大的个体。

式(4-23)表达的含义是在适应度较小时,促进其尽可能多的交叉变异;当适应度高于平均值时,减小交叉概率,尽可能保留优良基因;当适应度已经很高时就不再变异,使得优良个体的基因可以完全保留下来。这样随着种群的不断进化可以动态地调整交叉概率,兼顾优化求解的速度与全局寻优能力。

本文通过对传统遗传算法在初始种群选择和交叉、变异操作上进行改进,搜寻一致性算法的最佳收敛系数,改进的遗传算法流程图如图 4-5 所示。

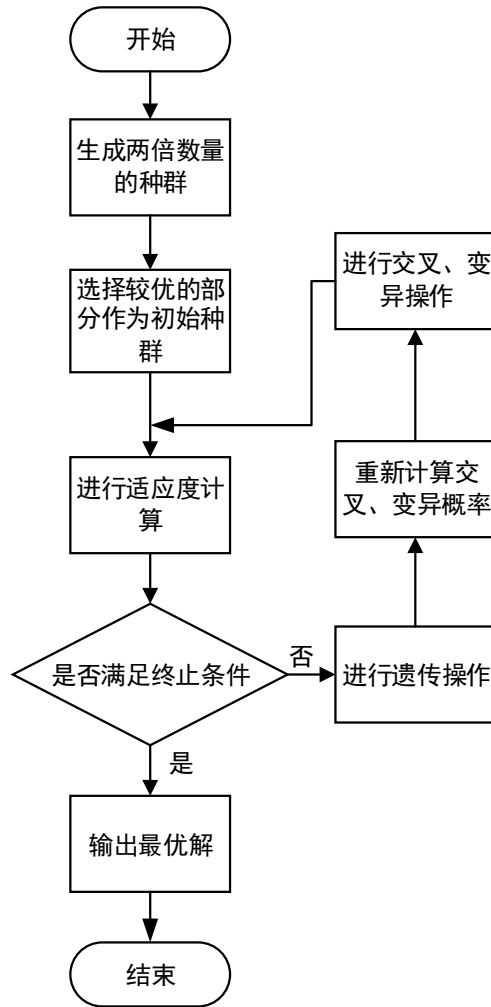


图 4-5 改进遗传算法流程

4.4 基于集群划分方法的协同频率控制策略

4.4.1 集群划分

在上一节中一致性算法迭代对多智能体不区分类型，构成一个通信拓扑，整体进行一致性算法迭代，虽然能实现协同频率控制，但无法保证储能 SOC 的均衡。因此本文采用按照集群划分的方法，将调频资源按照类型划分，按照新能源机组、储能单元、火电机组和柔性负荷，不同类型之间相互进行一致性迭代，迭代过程如图 4-6 所示。

$$\begin{cases} \lambda_{G,i}(k+1) = \sum_{j=1}^M a_{ij} \lambda_{G,j}(k) + \varepsilon \Delta K, i=1,2,\dots,M \\ \lambda_{ESS,i}(k+1) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \lambda_{ESS,j}(k) + \varepsilon \Delta K, i=1,2,\dots,N \\ \lambda_{R,i}(k+1) = \sum_{j=1}^O a_{ij} \lambda_{R,j}(k) + \varepsilon \Delta K, i=1,2,\dots,O \\ \lambda_{L,i}(k+1) = \sum_{j=1}^Q a_{ij} \lambda_{L,j}(k) + \varepsilon \Delta K, i=1,2,\dots,Q \end{cases} \quad (4-24)$$

$$\begin{aligned} \Delta K(k+1) &= K_{sum} - \sum_{m=1}^M K_{G,m}(k+1) - \sum_{m=1}^M K_{ESS,m}(k+1) \\ &\quad - \sum_{m=1}^M K_{R,m}(k+1) - \sum_{m=1}^M K_{L,m}(k+1) \end{aligned} \quad (4-25)$$

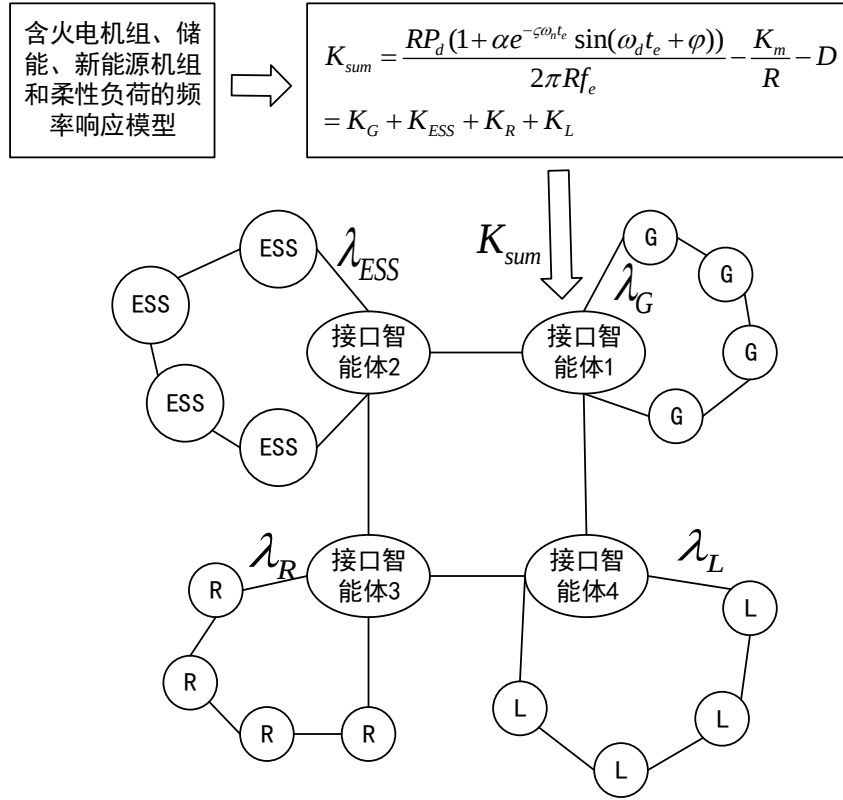


图 4-6 集群一致性迭代

4.4.2 储能 SOC 一致性均衡

在协同频率控制中，采用常规迭代所有节点作为一个整体收敛至同一值，储能无法作为子系统保留独立收敛值，因此无法考虑储能个体之间的 SOC 均衡。与 SOC 不进行均衡相比，对储能 SOC 进行均衡的好处包括：有助于促进储能系

统的整体利用效率；有助于评估储能系统的整体可调节容量和里程；有助于缓解储能系统的不均匀老化。因此采用集群划分的方法，相同的集群构建通信拓扑，交互一致性指标；不同集群的接口智能体之间交互响应系数，保证总下垂系数满足要求。该迭代方法不仅能够储能集群可作为子系统先达到储能 SOC 一致性均衡，同时再参与整体的协同调频控制。

通过一致性算法促使各单元荷电参数趋近于全局均衡值，实现对储能 SOC 进行一致性均衡，其动态收敛过程可通过如下数学机制表征。

基于一致性算法，定义 n 个储能个体初始时刻 SOC 值，有：

$$SOC(k)=[SOC_1(k), SOC_2(k), \dots, SOC_n(k)]^T \quad (4-26)$$

$$SOC_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} SOC_j(k), i=1, 2, \dots, n \quad (4-27)$$

当检测到电网频率偏移时，储能节点基于分布式通信架构与拓扑邻点进行状态交互，通过一致性算法迭代计算，储能 SOC 收敛至初始时刻的平均值。

$$SOC_i(k+1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SOC_i(k) \quad (4-28)$$

储能 SOC 均衡过程中，不同 SOC 状态下对应的下垂系数为：

当 $SOC \leq 0.2$ 时：

$$K_{ESS} = \begin{cases} K_{E,max}, \Delta f > 0 \\ 0, \Delta f < 0 \end{cases} \quad (4-29)$$

当 $SOC \geq 0.8$ 时：

$$K_{ESS} = \begin{cases} 0, \Delta f > 0 \\ K_{E,max}, \Delta f < 0 \end{cases} \quad (4-30)$$

当 $0.2 < SOC \leq 0.5$ 时：

$$K_{ESS} = \begin{cases} 0.5K_{E,max} (1 + \sqrt{\frac{0.5-SOC}{0.3}}), \Delta f > 0 \\ 0.5K_{E,max} (1 - \sqrt{\frac{0.5-SOC}{0.3}}), \Delta f < 0 \end{cases} \quad (4-31)$$

当 $0.5 < SOC < 0.8$ 时：

$$K_{ESS} = \begin{cases} 0.5K_{E,\max} (1 - \sqrt{\frac{SOC - 0.5}{0.3}}), \Delta f > 0 \\ 0.5K_{E,\max} (1 + \sqrt{\frac{SOC - 0.5}{0.3}}), \Delta f < 0 \end{cases} \quad (4-32)$$

4.5 仿真分析

4.5.1 协同频率控制

对本文储能协同频率控制策略进行仿真分析，采用由 10 台火电机组、8 台储能系统、3 台新能源机组和 8 个柔性负荷构成的 39 节点系统进行仿真分析，火电机组、储能、新能源和可控负荷的具体运行参数取值参考文献^[44]，如表 4-1、表 4-2 和表 4-3 所示。

表 4-1 火电机组的运行参数

火电机组	a_i	b_i
G1	0.0046	13.0650
G2	0.0111	5.2950
G3	0.0099	11.3700
G4	0.0095	3.3600
G5	0.0104	12.7950
G6	0.0029	11.7750
G7	0.0021	3.3750
G8	0.0062	9.4350
G9	0.0077	6.4500
G10	0.0048	12.3900

表 4-2 储能和新能源机组的运行参数

储能	d_i	新能源机组	e_i
1	0.01089	1	0.393
2	0.02232	2	0.444
3	0.01159	3	0.794
4	0.02222		
5	0.01481		

6	0.01465
7	0.01449
8	0.03704

表 4-3 柔性负荷的运行参数

柔性负荷	α_i	β_i
1	-0.1402	25.7550
2	-0.0625	18.4200
3	-0.1510	27.6300
4	-0.0842	10.5900
5	-0.0810	16.2750
6	-0.2121	28.3650
7	-0.1190	28.1400
8	-0.1596	23.5500

设置仿真时长为 30s，大小为 0.02 (p.u.) 的阶跃负荷扰动，验证在分布式资源一致性参与协同调频控制和定下垂系数协同调频控制和分布式资源不参与协同调频控制下的频率变化曲线，如图 4-7 所示，在一致性参与调频中一致性指标迭代过程如图 4-8 所示，图 4-9 为采用改进遗传算法优化收敛系数的曲线。其中采样步长取 0.05s，收敛系数初始取值为 $\varepsilon = 0.005$ ，采用改进遗传算法寻优得到 $\varepsilon = 0.001$ 。

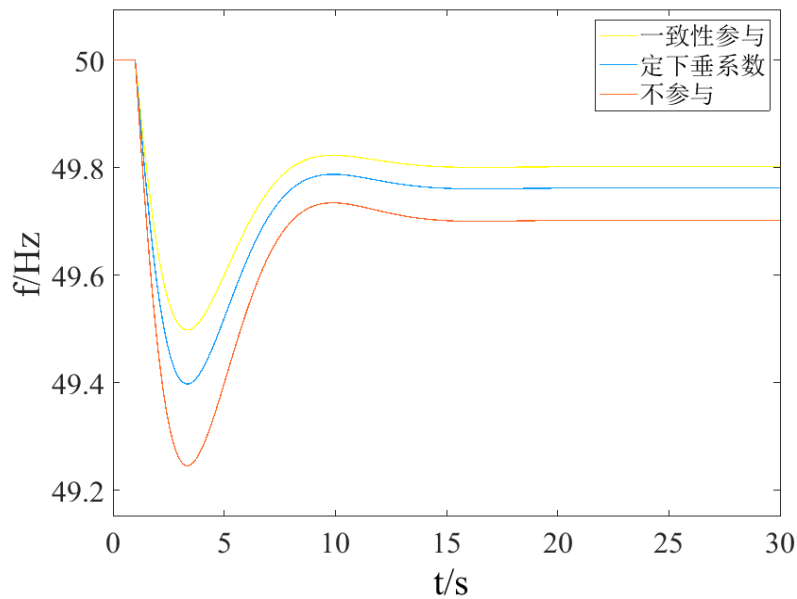


图 4-7 频率变化曲线

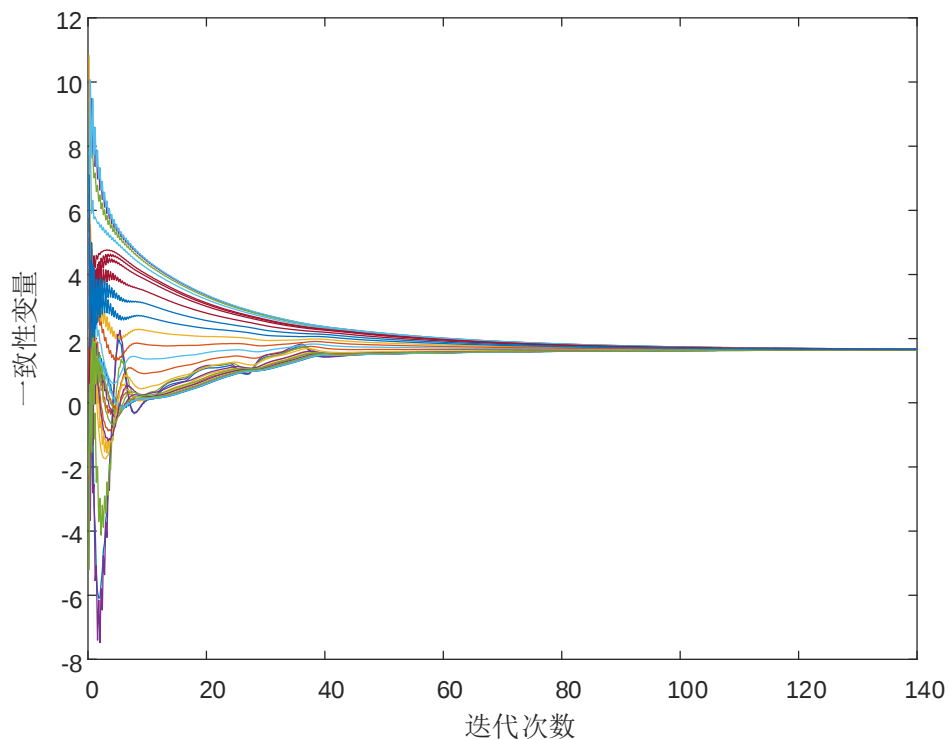


图 4-8 一致性算法指标收敛过程

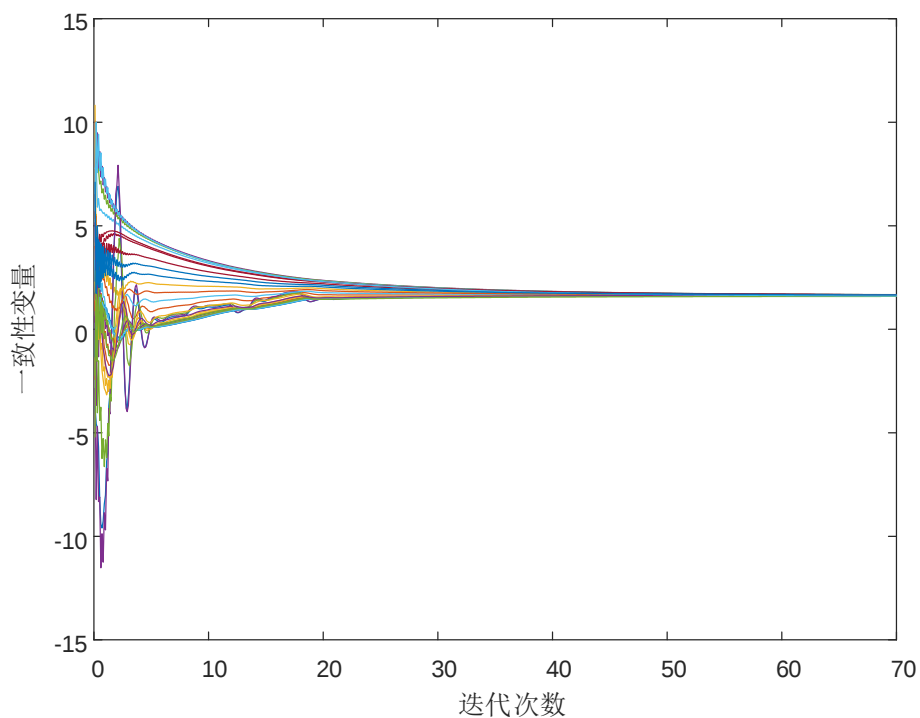


图 4-9 改进遗传算法的一致性指标收敛过程

由图 4-7 可知，当调频资源不参与电网动态支撑时，受限于传统同步机组有限的功率调节裕度，系统极值点频率下降 0.75Hz ，面临频率失稳风险，极端工况下可能激活紧急控制装置。当调频资源采用定下垂系数参与一次调频时，调频资

源的动态响应特性未能充分释放，导致极值点频率偏移量仍超出安全运行阈值，调控效能存在显著提升空间。当调频资源采用一致性参与一次调频时，系统极值点频率偏差为设定的 0.5Hz，一致性算法实现了下垂系数的自适应分配，在维持系统频率稳定性的同时，显著提升调频资源整体的调节能力。由图 4-8 和图 4-9 可以看出，对一致性算法中的收敛系数采用改进遗传算法进行优化，优化系统在一致性变量上的迭代次数比未优化系统要少，未优化的系统在迭代次数在八十五次，优化后的系统的迭代次数在五十九次，表明改进遗传算法优化参数的有效性。

4.5.2 储能 SOC 均衡

设置与上节相同的阶跃负荷扰动，储能初始 SOC 分别设置为 0.52、0.51、0.5、0.49、0.48、0.47、0.46、0.45。

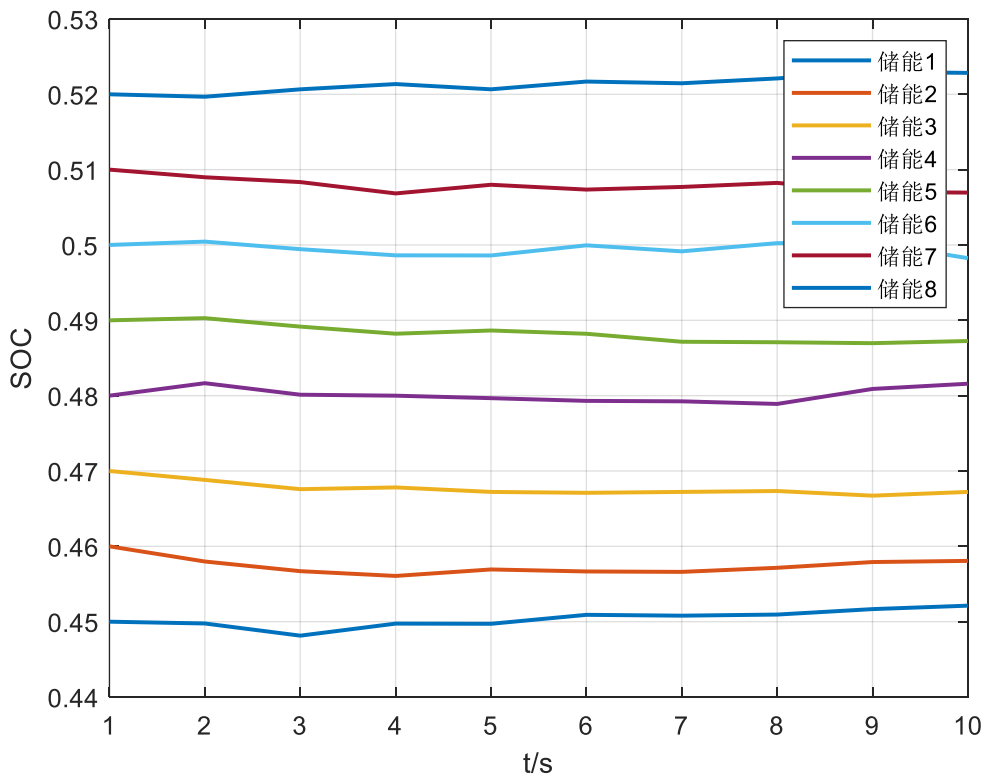


图 4-10 不采用集群划分的储能 SOC 变化

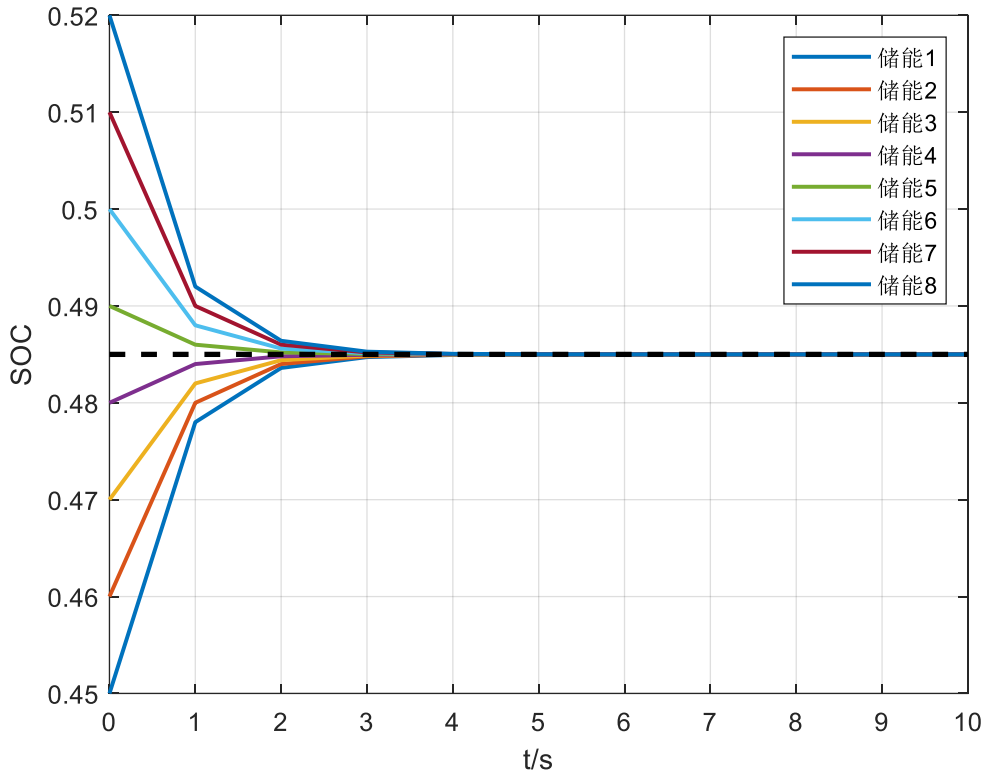


图 4-11 采用集群划分的储能 SOC 变化

不采用集群划分和采用集群划分的储能 SOC 的变化如图 4-10 和图 4-11 所示，在阶跃负荷扰动下，不采用集群划分的方法，整体作为一个系数一致性分配下垂系数，无法保障储能 SOC 的均衡。由图可以看出 8 台储能系统在协同调频控制过程中 SOC 维持在初始 SOC 附近，互相之间的 SOC 保持着较大差距。采用集群划分的方法，储能集群之间通过一致性算法迭代计算实现储能 SOC 均衡，并通过接口智能体与其他调频资源反馈下垂系数，实现协同频率控制。由图可以看出 8 台储能系统在协同调频控制过程中储能 SOC 之间差距逐渐减小，储能 SOC 实现了均衡。

4.6 本章小结

本章通过对储能协同频率控制开展研究，提出基于改进遗传算法和集群划分的多智能体一致性协同频率控制。首先，建立包含传统调频机组、新能源机组和柔性负荷等多种类型调频资源的频率响应模型，计算满足频率偏差下所需的下垂系数总值，采用一致性算法将下垂系数总值自适应分配至各调频资源，实现协同频率控制。其次，通过采用改进遗传算法对一致性算法中的收敛系数进行优化，

优化前后的迭代次数分别在八十九次和四十九次,减少了一致性算法的迭代次数。最后,针对储能协同调频兼顾储能 SOC 问题,按照调频资源类型进行集群划分,储能集群内部协同后再参与不同集群之间协同,实验验证集群划分下储能 SOC 能够实现均衡。

第 5 章 总结与展望

5.1 工作总结

综上所述，本文针对高比例可再生能源并网引发的电力系统频率稳定问题，从分布式储能聚合方法、聚合后储能调频控制及储能协同频率控制三个层面展开系统性研究出发，为电力系统频率稳定运行提供全场景解决方案，对推进新型电力系统建设与双碳战略落地具有一定意义。本文成果如下：

在分布式储能聚合研究中，聚合依赖于分布式储能的相似度，存在选取表征分布式储能相似度参数不够全面以及为静态数值的问题。考虑分布式储能接入电网系统层面的参数和分布式储能自身层面的参数，在系统层面上选取系统稳定性、系统可靠性和响应能力三个静态参数，在自身层面上选取储能可输出功率、储能汇聚时间和储能可调度容量三个动态参数，最后利用 K-means 算法分别对分布式储能静态参数和动态参数进行聚合，得到具有相似参数的分布式储能聚合集群，实现分布式储能以小差异，高相似的聚合。

在聚合后储能参与调频研究中，存在超级电容和锂电池的动作死区设置和调频控制策略的问题。在超级电容和锂电池的动作死区的设置上，运用模糊控制的方法来确定死区的大小，动态调整两者死区的大小。在储能调频控制策略上，提出采用模糊神经网络控制自适应调整虚拟惯性和虚拟下垂的占比系数的调频策略。最后，在 Matlab/Simulink 建立仿真模型，验证本文在死区设置和调频控制策略上的有效性。

在协同调频控制研究中，存在一致性算法收敛速度慢和储能协同调频兼顾储能 SOC 均衡的问题。首先，建立包含传统调频机组、新能源机组和柔性负荷等多种类型调频资源的频率响应模型，计算满足频率偏差下所需的下垂系数总值，采用一致性算法将下垂系数总值自适应分配至各调频资源，实现协同频率控制。其次，通过采用改进遗传算法对一致性算法中的收敛系数进行优化，加快一致性算法的收敛速度。最后，针对储能协同调频兼顾储能 SOC 问题，按照调频资源类型进行集群划分，保证储能集群系统 SOC 均衡的同时兼顾了协同频率控制。

5.2 未来展望

尽管本文取得一定进展，但仍有许多方面可以进一步研究，未来仍需在以下方面深化研究：

在分布式储能聚合的问题上，动态参数的聚合是在静态参数聚合的基础上进行的二次聚合，一次聚合的精确度会影响到二次聚合的结果，从而影响聚合效果。此外在聚合过程中未考虑设备老化、环境温度等时变因素对聚类效果的影响。因此，前者考虑调研其他能够实现静态参数和动态参数同时进行的聚合算法，后者考虑结合在线学习算法，实现聚合参数实时的自适应调整。

在储能参与一次调频控制研究中，研究聚焦调频场景下的控制优化，未涵盖储能参与调频-调峰协同及复杂工况下的综合控制需求，后续可以考虑储能参与调频-调峰协同上的研究。

在储能协同调频资源的频率控制研究中，基于多智能体框架下的协同控制假设通信拓扑理想化，未考虑时滞、数据丢包等实际通信约束对一致性算法的影响。此外当前研究以局部电网为对象，未涉及跨区域储能资源的广域协同问题，后续可结合分层分布式控制框架，探索储能集群参与跨区调频服务的动态博弈模型。

通过上述方向的持续攻关，有望进一步提升分布式储能在新型电力系统中的调频贡献度，推动能源转型背景下电力系统的安全、经济与低碳运行。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年全国电力工业统计数据[EB/OL].
<https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [2] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[EB/OL].
https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [3] 国家能源局. 国家能源局发布 2022 年全国电力工业统计数据[EB/OL].
http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.
- [4] 国家能源局. 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据[EB/OL].
https://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [5] Al-Shetwi AQ, Hannan MA, Jern KP, et al. Power Quality Assessment of Grid-Connected PV System in Compliance with the Recent Integration Requirements[J]. Electronics. 2020, 9(2): 366.
- [6] 何晋伟, 孟维奇, 蒋玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(07): 2983-2994.
- [7] 罗逸夫, 胡秦然, 钱涛, 等. 计及多工况对机组寿命损耗的机组组合优化模型[J/OL]. 上海交通大学学报, 1-24[2025-03-20].
- [8] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [9] Zakeri B, Gisse GC, Dodds PE, et al. Centralized VS Distributed Energy Storage – Benefits for Residential Users[J]. Energy, 2021, 236: 121443.
- [10] Silva C, Faria P, Fernandes A, et al. Clustering Distributed Energy Storage Units for the Aggregation of Optimized Local Solar Energy[J]. Energy Reports, 2022, 8: 405-410.
- [11] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(04): 133-141.
- [12] Li P, Ma X, Chen M, et al. Aggregate Regulation Strategy of Distributed Energy Storage under Power Spot Market in China[J]. IET Renewable Power Generation.

- 2022, 16(2): 313-328.
- [13]尹渠凯, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于改进 K-means 聚类的电力市场下分布式储能系统经济性调控模型[J]. 电力建设, 2019, 40(05): 20-27.
- [14]靳文涛, 牛萌, 吕洪章, 等. 客户侧分布式储能汇聚潜力评估方法[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 34-41.
- [15]韩霖坤. 低压配电台区分布式可调资源逻辑聚合策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [16]武艺, 姚良忠, 廖思阳, 等. 一种基于改进 K-means++算法的分布式光储聚合调峰方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3923-3931.
- [17]叶鹏, 刘思奇, 关多娇, 等. 基于自适应均衡技术的分布式储能聚合模型及评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1689-1699.
- [18]王剑波, 李建林, 周喜超, 等. 基于全景理论的分散式储能系统集群优化调度策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(08): 2742-2752.
- [19]Li L, Li Y, Wan M, et al. Evaluating and Aggregating the Grid-Support Capability of Energy Storage Clusters by Considering the Peak Regulation Requirements[J]. Frontiers in Energy Research. 2023, 11: 1281267.
- [20]Mu Y, Wu J, Ekanayake J, et al. Primary Frequency Response from Electric Vehicles in the Great Britain Power System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1142-1150.
- [21]周婷婷, 李欣然, 姜学皎. 储能电源参与电网调频的需求评估方法[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 65-71.
- [22]You S, Liu Y, Tan J, et al. Comparative Assessment of Tactics to Improve Primary Frequency Response without Curtailing Solar Output in High Photovoltaic Interconnection Grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018, 10(2): 718-728.
- [23]Wang X, Zhang S, Liu Y, et al. Virtual Inertia Compensation Control of Wind Farm Based on SOC Feedback Regulation of Energy Storage System[J], Electrical & Energy Management Technology, 2017, 3(1): 478-488.
- [24]马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电

- 工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [25]朱武, 董艺, 高迎迎, 等. 考虑调频死区与荷电状态的储能参与电网一次调频控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4391-4399.
- [26]Li S, Xu Q, Xia Y, et al. Comprehensive Setting and Optimization of Dead-Band for BESS Participate in Power Grid Primary Frequency Regulation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 141: 1-14.
- [27]贺悝, 郭罗权, 谭庄熙, 等. 高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 65-75.
- [28]郭强, 陈崇德, 胡阳, 等. 飞轮和锂电池储能联合光伏发电一次调频控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(11): 1-9.
- [29]方红艳, 马平. 考虑混合储能调频死区的自适应下垂控制策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(04): 213-222.
- [30]孟建辉, 彭嘉琳, 王毅, 等. 考虑储能荷电状态及频率恢复特性的改进型灵活虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(06): 100-107+114+108-111.
- [31]刘旭峰, 张继红, 吴振奎. 一种混合储能微电网中对频率的下垂控制方法[J]. 电气自动化, 2018, 40(06): 13-15+44.
- [32]许宏远. 储能参与含风电的电力系统的调频策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [33]吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
- [34]李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
- [35]王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及 SOC 的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 192-198+219.
- [36]Tsikalakis AG, Hatziaargyriou ND. Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation[C]. In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Michigan, USA, Jul. 24-29, 2011, pp. 1-8.
- [37]Abdelaziz MM, Shaaban MF, Farag HE, et al. A Multistage Centralized Control Scheme for Islanded Microgrids with PEVs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 927-937.

- [38]徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等.主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(一): 基于一致性理论的分布式协调控制系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2841-2848+3135.
- [39]Yu B, Lv Q, Zhang Z, et al. Hierarchical Distributed Coordinated Control for Battery Energy Storage Systems Participating in Frequency Regulation[J]. Energies, 2022, 15(19): 7283.
- [40]Peng X, Tan J, Wang Z, et al. Study on Strategy of Wind Farm Combined with Distributed Energy Storage to Realize Synergetic-Consensus Frequency Regulation[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 91: 112091.
- [41]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(05): 1705-1713.
- [42]姚雅涵, 熊永新, 姚伟, 等. 面向电网频率快速支撑的风电场自适应分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(02): 561-573.
- [43]徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(二): 考虑非理想遥测环境的一致性算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3244-3254.
- [44]王晶晶, 廖思阳, 姚良忠, 等. 基于一致性算法的直流受端电网分布式调频资源协同频率控制[J]. 电网技术, 2022, 46(03): 888-900.
- [45]边晓燕, 孙明琦, 赵健, 等. 基于一致性算法的源-荷协同分布式优化调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(04): 1334-1347+1540.
- [46]Chong H, Man Y, Hui G, et al. DMPC-Based Load Frequency Control of Multi-Area Power Systems with Heterogeneous Energy Storage System Considering SOC Consensus[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 228: 110064.
- [47]贺悝, 谭庄熙, 李欣然, 等. 考虑荷电状态一致性的分布式储能电站一次调频控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(02): 870-880.
- [48]程雄, 戴鹏, 钟浩, 等. 考虑综合相似性度量的光伏典型出力场景聚类方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8462-8475.
- [49]Capó M, Pérez A, Lozano JA. An Efficient Split-Merge Re-Start for the K-means Algorithm[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2020, 34(4): 1618-1627.

- [50]Mussabayev R, Mladenovic N, Jarboui B, et al. How to Use K-means for Big Data Clustering[J]? Pattern Recognition, 2023, 137: 109269.
- [51]彭宇, 罗清华, 彭喜元. UIDK-means:多维不确定性测量数据聚类算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(06): 1201-1207.
- [52]李春晖. 基于区间数的不确定数据自适应聚类算法[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [53]陆亿红, 任胜亮. 基于区间数的不确定数据流 2k 近邻聚类算法[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(3): 321-326.
- [54]张志超. 不确定空间数据聚类方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [55]肖满生, 张龙信, 张晓丽, 等. 一种改进的区间型不确定数据模糊聚类方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(08): 1968-1974.
- [56]Maciel L, Ballini R, Gomide F, et al. Participatory Learning Fuzzy Clustering for Interval-Valued Data[C]. The 16th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 20-24, 2016, pp. 687-698.
- [57]张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(01): 1-25.
- [58]Anderson P M, Mirheydar M. A Low-Order System Frequency Response Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [59]袁蓓. 电池储能在电网中的调频控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [60]张舒鹏. 电池储能参与调频的控制策略研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2021.
- [61]谭绍杰. 储能电源参与含风电的电力系统 AGC 的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [62]Mercier P, Cherkaoui R, Oudalov A. Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1469-1477.
- [63]Pillai JR, Bak-Jensen B. Integration of Vehicle-to-Grid in the Western Danish Power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 2(1): 12-19.
- [64]Datta M, Senjyu T. Fuzzy Control of Distributed PV Inverters/Energy Storage

- Systems/Electric Vehicles for Frequency Regulation in a Large Power System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 479-488.
- [65]黄际元. 储能电池参与电网调频的优化配置及控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [66]Al Sumarmad KA, Sulaiman N, Wahab NI, et al. Energy Management and Voltage Control in Microgrids Using Artificial Neural Networks, PID, and Fuzzy Logic Controllers[J]. Energies, 2022, 15(1): 303.
- [67]Meng G, Chang Q, Sun Y, et al. Energy Storage Auxiliary Frequency Modulation Control Strategy Considering ACE and SOC of Energy Storage[J]. IEEE Access, 2021, 9: 26271-26277.
- [68]高卓. 高风电渗透率下储能参与系统一次调频控制策略[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [69]李军徽, 高卓, 李翠萍, 等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 52-59.
- [70]邓霞, 孙威, 肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(04): 1157-1165.
- [71]张祥宇, 杨黎, 朱晓荣, 等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 109-115.
- [72]闫继亮. 基于模糊神经网络的同步发电机励磁控制系统研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [73]蒲天骄, 刘克文, 李烨, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(08): 1864-1874.
- [74]Sun L, Tian X, Ding D, et al. Consensus Control of Cooperation-Competition Multi-Agent Systems with Round-robin Protocols: A Set-Membership Approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(9): 5005-5022.
- [75]戚陈陈, 陈鹏伟, 陈新, 等. 分散式风电高渗透率接入直流受端电网频率特性建模与分析[J]. 电网技术, 2022, 46(06): 2161-2170.
- [76]刘福锁, 卿梦琪, 唐飞, 等. 计及风电一次调频和频率约束的风电占比极限值计算[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 863-870.

- [77]刘柳, 李卫东, 唱友义, 等. 大功率缺失下频率最低点估计的低阶仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 78-83.
- [78]Hüner E, Toyran H. Design Optimization with Genetic Algorithm of Open Slotted Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbines[J]. International Journal of Green Energy, 2023, 20(4): 423-431

攻读硕士学位期间取得的研究成果

- [1] Wu X, Zhou Y, Wang H, et al. Research on Distributed Energy Storage Aggregation Considering Dynamic and Static Parameters[C]. In 2023 China Automation Congress (CAC2023), Chongqing, China, Nov. 17-19, 2023, pp. 8323-8328.
- [2] 葛愿, 徐东, 吴哲勋, 等. 一种考虑动静态参数的分布式储能聚合方法[P]. 中国专利: CN117691635A, 2024-03-12.
- [3] 朱广帅, 徐通, 葛愿, 等. 一种深度学习下混合储能系统参与一次调频的控制方法[P]. 中国专利: CN119651649A, 2025-03-18.

致谢

行文至此，代表着我三年研究生生涯的结束，从研一来时的论文选题到现在的论文定稿，回顾这三年的研究生时光，有过试一遍错一遍的研究思路，有过跑一遍又一遍仍显示报错的代码，还有过搭完这一小部分需要去改上一小部分的模型，这些或许有点“痛苦”的经历，但在落笔写下的这一刻都成为了我人生中不可或缺的宝贵体验。在这段充满挑战与成长的学术旅程中，我并非独行，师长和母校的培养，同门们和父母的陪伴，如同暗夜中的星光，照亮了我前行的方向。谨以此页，向你们致以最诚挚的谢意。

首先，我要向我的研究生老师葛愿教授致以最深切的感激。记得刚进入实验室时，我对研究生如何进行科研知之甚少，仍然保留着本科时期的学习思维，即期待着老师教后我才学的思维，谢谢那段时间葛老师的循循善诱，告诫我科研是需要自主发现问题，找到问题和解决问题。记得第一次组会汇报时，我做着有着杂乱无章的框架和密密麻麻的文字的 PPT 去准备汇报，经过长达十几分钟的朗读后，我终于结束了汇报。面对并不符合他预取的组会汇报，他并未苛责于我，而是语重心长的说：“开组会目的是讨论你读文献后对文献的看法，不是直接粘贴复制文献的话，然后来读给我听”，他特别强调了独立思考的重要性，这句教诲至今让我铭记在心。还记得每一学年的年终总结时，他总是告诫我们在科研上要有自己的规划，不要抱着“脚踩香蕉皮，滑到哪里算哪里”的学习心态。最后在论文选题与写作阶段，葛老师也与我进行了多次讨论，探讨研究思路的可行性，确保论文的可完成性。三年时光，谢谢你的指导和帮助，我收益颇多。

其次，我由衷感谢母校，感谢母校对我的培养，感谢母校给予的无微不至的关怀，感谢母校这所不大却充满了温情，填满了我本硕七年的地方。学校新建的校门，新图书馆，每一栋建筑的变迁，每一个食堂新推出的菜品，都有过我生活的记忆。母校教会我的不仅是专业知识，更是如校训那般的“尚德敏学，唯实惟新”的精神品格，这将是毕生珍藏的财富。

论文的完成离不开课题组兄弟姐妹们的鼎力相助。感谢王师兄，在我第一篇文章写作时，给予了许多关于格式编写上的帮助与指导；感谢同门和师弟师妹们，

给予了关于课题上的新想法，也提出了很多建设性的意见。

我最要感谢的是我父母，谢谢你们的辛勤付出和无私奉献。作为只有小学文凭的父母，他们不懂什么是 K-means 算法，什么是模糊神经网络，什么是一致性算法。但每次在视频通话的另一头，我与他们讲起最近在学校里研究的东西时，他们永远是认认真真的听我说的每一句话，努力试图理解我讲的内容，然后尝试与我讨论这些。回顾二十多年来走过的路，走过的每一步都充满了他们对我的爱，他们是我失败时的鼓舞者，无助时的帮助者，伤心时的安慰者，更是我成功时的骄傲者，他们是我前进路上最大的动力。曾几何时，蹒跚学步的孩子已经长大，曾几何时，他们头上长了白发，脸庞爬上了皱纹。谢谢你们，我亲爱的父母。

最后，特别感谢对论文进行评审的老师，感谢你们在百忙中能够抽出时间评审我的论文，向你们致以崇高的敬意。

尚德敏学 唯实惟新

