
分类号: TM73

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210310109

题 目 混合储能平抑光伏微电网功率波动研究

题 目 Research on Hybrid Energy Storage to Stabilize
the Power Fluctuation of Photovoltaic Microgrid

学生姓名: 李敖

指导教师: 陈其工教授

专 业: 电气工程

研究方向: 智能微电网

论文答辩日期: 2024 年 5 月 19 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：李敖

日期：2024 年 5 月 27 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

李敖

指导教师签名：



日期： 2024 年 5 月 27 日

日期： 2024 年 5 月 27 日

混合储能平抑光伏微电网功率波动的研究

摘 要

随着可再生能源的广泛应用,光伏微电网系统因其灵活性和独立性受到了广泛关注。然而,由于光伏发电系统受光照强度、温度等众多因素的影响,导致光伏发电系统输出不稳定,这不仅影响了光伏发电的可靠性,也给电网的稳定性带来了挑战。为了解决这一问题,在光伏微电网系统中加入了混合储能,混合储能是解决这一问题的有效手段。但由于储能装置自身容量有限,可能会出现过充过放的现象,影响混合储能的使用寿命。因此,本文提出了一种考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略,将两种储能的 SOC 划分为 9 个工作区域,根据实时 SOC 和实际功率需求进行二次功率分配,这种方法不仅能平抑系统的功率波动,也能有效防止储能单元过充过放。

首先,对光伏微电网系统结构进行深入分析,了解各组成部分的工作原理和相互关系,特别是光伏发电单元的特性及其控制策略。详细介绍了光储直流微电网系统中的光伏发电系统、混合储能系统、并网系统和负载四个主要组成部分,对光伏电池的工作原理进行分析,建立了光伏电池的模型并进行仿真分析。选择超级电容和蓄电池作为混合储能系统,充分利用它们各自的优势:蓄电池的能量密度高、超级电容的功率密度高,以实现更好的功率波动平抑效果。

其次,介绍了混合储能系统的结构,详细分析了双向 DC/DC 变

换器的工作原理并对其进行数学建模，又介绍了双向 DC/DC 变换器的充放电控制策略，确保混合储能系统能够有效地响应微电网系统功率需求。

接着，分析光伏微电网功率波动原因，针对传统功率分配控制策略的不足，提出了一种考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略。先通过二阶低通滤波器法对不平衡功率进行高、中、低频初次分解，后面考虑两种储能的 SOC，通过对两种储能装置的 SOC 进行精细划分，并根据实时 SOC 和实际功率需求进行二次功率分配，此策略不仅能够平抑功率波动，还能有效防止储能单元过充过放，延长其使用寿命。

最后，在 Matlab/Simulink 中搭建了光储直流微电网模型，对所提出的控制策略进行仿真验证。仿真结果表明，二次功率分配策略能够平抑系统的功率波动，并有效防止储能单元出现过充过放现象，从而提高了整个系统的稳定性和可靠性。

关键词：光伏微电网，功率波动，混合储能，二次功率分配，过充过放

RESEARCH ON HYBRID ENERGY STORAGE TO STABILIZE THE POWER FLUCTUATION OF PHOTOVOLTAIC MICROGRID

ABSTRACT

With the widespread application of renewable energy, photovoltaic microgrid systems have received extensive attention due to their flexibility and independence. However, due to the influence of many factors such as light intensity and temperature, it leads to the unstable output of the photovoltaic power generation system, which not only affects the reliability of photovoltaic power generation, but also brings challenges to the stability of the power grid. In order to solve this problem, hybrid energy storage is added to the photovoltaic microgrid system, and hybrid energy storage is an effective means to solve this problem. However, due to the limited capacity of the energy storage device, the phenomenon of overcharging and overdischarging may occur, which affects the service life of hybrid energy storage. Therefore, this paper proposes a secondary power allocation strategy for hybrid energy storage system considering dual SOC, which divides the SOC of the two types of energy storage into 9 working areas, and carries out secondary power allocation according to the real-time

SOC and actual power demand, which can not only stabilize the power fluctuation of the system, but also effectively prevent the energy storage unit from overcharging and overdischarging.

Firstly, the structure of the photovoltaic microgrid system is analyzed in depth to understand the working principle and interrelationship of each component, especially the characteristics of the photovoltaic power generation unit and its control strategy. The four main components of photovoltaic power generation unit, grid-connected unit, hybrid energy storage unit and load in photovoltaic microgrid system are introduced in detail, the working principle of photovoltaic cells is analyzed, and the photovoltaic cell model is established and simulated for analysis. Choose batteries and supercapacitors as hybrid energy storage systems to take advantage of their respective advantages: high energy density of batteries and high power density of supercapacitors to achieve better power fluctuation smoothing effect.

Secondly, the structure of the hybrid energy storage system is introduced, the working principle of the bidirectional DC/DC converter is analyzed in detail and the mathematical modeling is carried out, and the charging and discharging control strategy of the bidirectional DC/DC converter is introduced to ensure that the hybrid energy storage system can effectively respond to the power demand of the microgrid system.

Then, the reasons for the power fluctuation of photovoltaic microgrid are analyzed, and in view of the shortcomings of the traditional power distribution control strategy, a secondary power allocation strategy for hybrid energy storage system considering dual SOC is proposed. Firstly, the second-order low-pass filter method is used to decompose the unbalanced power at high, medium and low frequencies for the first time, and then the SOC of the two energy storage devices is considered, and the SOC of the two energy storage devices is finely divided, and the secondary power allocation is carried out according to the real-time SOC and the actual power demand, which can not only stabilize the power fluctuation, but also effectively prevent the energy storage unit from overcharging and overdischarging, and prolong its service life.

Finally, a model of photovoltaic storage DC microgrid was built in Matlab/Simulink, and the proposed control strategy was simulated and verified. The simulation results show that the secondary power allocation strategy can stabilize the power fluctuation of the system and effectively prevent the overcharge and overdischarge of the energy storage unit, thereby improving the stability and reliability of the whole system.

Li Ao(Electrical Engineering)

Supervised by Professor Chen Qi Gong

KEY WORDS: photovoltaic microgrid, power fluctuation, hybrid energy storage, secondary power distribution, overcharge and overdischarge

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 本课题的研究背景及意义.....	1
1.2 混合储能平抑光伏微电网功率波动研究现状.....	3
1.3 本文研究内容.....	5
第 2 章 光伏微电网系统结构.....	8
2.1 光储直流微电网系统组成.....	8
2.2 光伏发电单元建模与仿真分析.....	9
2.2.1 光伏电池工作原理分析.....	9
2.2.2 光伏电池的数学模型.....	10
2.2.3 光伏发电单元的仿真分析.....	11
2.2.4 最大功率点跟踪控制.....	14
2.3 混合储能系统.....	18
2.3.1 混合储能单元的选择.....	19
2.3.2 蓄电池工作原理及模型分析.....	21
2.3.3 超级电容工作原理及模型分析.....	24
2.4 本章小结.....	26
第 3 章 混合储能系统结构及控制策略研究.....	28
3.1 混合储能系统结构.....	28
3.2 双向 DC/DC 变换器工作原理及数学建模分析	30
3.3 双向 DC/DC 变换器的充放电控制策略	33
3.4 本章小结.....	35
第 4 章 混合储能系统二次功率分配策略.....	36
4.1 光伏微电网系统功率波动分析.....	36
4.2 混合储能平抑光伏微电网功率波动.....	37
4.3 传统混合储能系统的功率分配方法.....	38

4.4 考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略.....	39
4.5 本章小结.....	43
第 5 章 系统建模与仿真分析.....	44
5.1 光储直流微电网系统建模.....	44
5.2 仿真结果分析.....	44
5.2.1 混合储能平抑功率波动仿真结果分析.....	45
5.2.2 工作区域仿真结果分析.....	48
5.3 本章小结.....	54
第 6 章 总结与展望.....	55
6.1 全文总结.....	55
6.2 工作展望.....	56
参考文献.....	57
攻读硕士期间取得的学术成果.....	63
致谢.....	64

第1章 绪论

1.1 本课题的研究背景及意义

随着人类社会的迅猛进步，对能源的需求在不断攀升。传统的化石能源，如煤、石油和天然气，是在长时间的地质过程中形成的，储量有限且分布不均。随着人类开采量的增加，这些资源正面临着枯竭的风险。面对能源需求的日益增长和传统能源不断减少等种种问题，人类必须寻找更加可持续、环保的能源解决方案^[1-3]。发展可再生能源，共同促进能源转型和绿色发展^[4]。

因此，寻找清洁、可再生的能源替代方案已成为全球共同的课题。在这样的背景下，太阳能作为一种清洁无污染的能源，受到广泛关注。光伏发电技术作为利用太阳能的一种重要方式，得到广泛应用^[5-7]。然而，由于太阳能的间歇性和不稳定性，单一的光伏发电系统往往难以满足持续的电力需求。光伏微电网是指由光伏发电系统、储能系统、负荷以及控制保护系统等组成的小型发配电系统，可以实现自给自足或并网运行^[8]。光伏微电网的提出，解决了光伏发电的随机性和间歇性问题，提高电力系统的可靠性和稳定性。同时，光伏微电网还可以与主电网相互补充，实现能源的多元化利用^[9-11]。光伏微电网的研究具有重大意义。

（1）推动新能源产业的发展

光伏微电网作为新能源产业的重要组成部分，其研究和应用有助于推动新能源产业的发展。随着光伏微电网技术的不断进步和成本的不断降低，其在各个领域的应用也将越来越广泛^[12,13]。

（2）促进能源转型和绿色发展

通过利用太阳能这一绿色能源，光伏微电网可以减少传统能源的消耗。光伏微电网还具备提高能源利用效率的能力。传统的能源供应系统往往存在能源损失和浪费的问题，而光伏微电网则能够通过智能化的管理和优化，实现能源的精准匹配和高效利用，有助于节约能源资源^[14,15]。

（3）提高电力系统的稳定性

光伏微电网可以与主电网相辅相成，提高电力系统的可靠性和稳定性。在光

光伏发电系统出现故障或主电网出现故障时,光伏微电网可以独立运行或作为备用电源,确保电力系统的稳定运行^[16-18]。

随着全球对可再生能源的日益关注,光伏微电网是一种将太阳能发电与微电网技术相结合的系统。光伏微电网通过利用太阳能发电,为局部地区提供清洁、可再生的能源供应^[19]。

混合储能技术是一种集成了多种储能装置的技术,它结合了电池储能、超级电容储能等不同类型的储能方式。这种技术能够实现对光伏微电网输出电能的精准调节和平抑,从而提高光伏微电网的供电稳定性和可靠性^[20]。

混合储能技术的核心优势在于其灵活性和高效性。通过结合不同类型的储能装置,混合储能技术可以根据光伏微电网的实际需求进行灵活的能量调度和分配。储能装置在光伏微电网中扮演着至关重要的角色^[21]。当光伏微电网产生的电能超过即时需求时,储能装置能够迅速吸收这些多余的电能,并将其安全、高效地存储起来。这种能力不仅避免了电能的浪费,还确保了光伏微电网的稳定运行。而当光伏微电网由于天气条件不佳、设备故障或其他原因导致输出的电能不足时,储能装置则能够迅速释放之前存储的电能,以补充微电网的供电需求。这种及时的补充确保了电力供应的连续性和可靠性,避免了因电能短缺而导致的停电或电力供应不稳定的情况^[22]。储能装置的存在使得光伏微电网能够更好地应对能源需求的变化和波动。无论是日间高峰用电时段还是夜间低谷时段,储能装置都能够根据实际需求进行电能的储存和释放,从而实现电能的平衡和优化利用。此外,储能装置的使用还有助于提高光伏微电网的经济性。通过减少对传统电网的依赖,降低购电成本,并结合储能装置的高效利用,光伏微电网可以为用户带来更为经济、实惠的电力供应方案^[23]。

混合储能技术在光伏微电网中的应用具有广阔的发展前景。

首先,混合储能技术通过结合多种储能方式,能够有效地提高光伏微电网的供电稳定性和可靠性^[24]。混合储能技术可以通过快速响应和精确控制,平滑光伏微电网的输出功率,减少波动和间断,确保电力供应的稳定性和可靠性^[25]。混合储能技术还能够优化能源的利用和分配。这种能量的平衡和调节不仅可以减少对传统电网的依赖,降低购电成本,还可以提高能源利用效率,减少能源浪费。此外,混合储能技术还具有较长的使用寿命和较高的安全性。同时,通过智能管理

和优化算法,混合储能系统还可以实现自我监测、自我修复等功能,提高运行效率和安全性^[26]。

其次,混合储能技术还可以与光伏微电网的能量管理系统相结合,实现能量的高效调度和分配。通过对光伏微电网中的电能、储能装置的状态以及用户需求进行实时监测和分析,能量管理系统可以制定出最优的能量调度策略,确保光伏微电网的高效运行和用户的用电需求得到满足。这种智能化的能量管理方式不仅可以提高能源利用效率,还有助于降低运营成本和维护成本^[27]。

此外,混合储能技术还可以与其他可再生能源技术相结合,如风力发电、生物质能等。通过整合不同类型的可再生能源,混合储能技术可以进一步提高光伏微电网的供电稳定性和可靠性,并降低对传统电力系统的依赖^[28,29]。

综上所述,混合储能技术与光伏微电网的结合是实现可持续能源供应的关键。通过提高供电稳定性和可靠性、实现能量的高效利用和优化调度,推动可再生能源的大规模应用和发展。

1.2 混合储能平抑光伏微电网功率波动研究现状

随着全球对可再生能源的重视与需求不断增长,光伏微电网是一种绿色的分布式能源系统。然而,光伏出力受光照条件、季节变化等多重因素影响。混合储能技术能够有效地吸收和释放能量,从而平抑光伏微电网的功率波动,提高系统的供电质量和可靠性^[30]。本文将基于光伏微电网和混合储能平抑光伏微电网功率波动,对国内外研究现状进行详细的介绍和分析。

在混合储能系统结构设计方面,研究者们针对不同应用场景和需求,设计了多种混合储能系统方案^[31]。这些方案通常结合了锂离子电池、超级电容、飞轮储能等多种储能技术,以实现快速响应和长时间储能的平衡。例如,采用锂离子电池作为主要储能装置,用于存储较长时间段的能量,而超级电容则作为辅助储能装置,用于快速响应光伏出力的短期波动^[32]。

在控制算法优化方面,学者们不断探索新的控制策略,以提高混合储能系统的平抑效果。他们通过引入先进的预测控制、自适应控制、模糊控制等算法,实现对光伏出力波动的精确预测和快速响应^[33,34]。同时,他们还关注于能量管理系

统的优化,通过制定合理的能量调度策略,确保混合储能系统在不平抑功率波动的同时,实现能量的高效利用^[35]。

在混合储能系统技术研究方面,研究者们对储能装置的性能和特性进行了深入研究。他们通过对比分析不同储能技术的优缺点,设计出更加高效的混合储能系统方案。同时,他们还积极探索新型储能材料和技术,如固态电池、液流电池等,为混合储能技术的发展提供了新的动力。

在混合储能系统优化方面,学者们不仅关注控制算法的改进,还注重系统结构和配置的优化。他们通过构建数学模型和仿真平台,对混合储能系统的性能进行评估。同时,还根据智能优化算法,如粒子群算法、遗传算法等,实现对混合储能系统参数和配置的最优求解^[36-38]。

此外,研究者们还关注于混合储能系统的环境影响和可持续性评估。通过评估储能材料的环境影响、储能系统的全生命周期成本等因素,为混合储能技术的可持续发展提供了重要指导。同时,积极探索混合储能系统在智能微电网等领域的应用,为推动可再生能源的广泛应用提供了有力支持。

文献[39]提出了电热混合储能系统的电加热结构,并建立了该模式下混合储能系统的加热模型,建立了基于环保、经济等多目标优化模型,采用多目标非支配粒子群算法求解,得出电、热的最优容量配置。

文献[40]针对目前的研究没有充分考虑源、网、负载等灵活资源在可靠性评价中的作用,导致评价结果不准确这一问题,提出一种融合了源、网、负荷等灵活资源的混合储能可靠性评价模型。算例分析结果表明,在资源灵活的情况下,电力系统的可靠性可以大大提高。

文献[41]提出一种基于满足负载缺电率、提高储能系统整体经济性的原则的能源管理策略,利用超导磁储能、电池储能和储氢的各自优势,配置容量,以负荷不足率等运行指标为约束条件的储能容量最优配置模型。利用改进的粒子群优化算法进行算例计算,验证了改进模型以及算法的有效性。

文献[42]针对光伏直流微电网系统光照温度、强度和负载变化引起的功率波动,提出一种基于小波包-模糊的多尺度分解方法。根据不同储能类型的响应速度和性能特点,选择与其频率范围相适应的储能装置进行波动抑制,完成混合储能充放电功率的分配。仿真结果表明,小波包-模糊方法能够充分利用不同储能

各自的优势，有效抑制系统中的功率波动。

文献[43]介绍了一种增强的并网交流微电网中最大功率点跟踪（Maximum power point tracking, MPPT）的方法。使用 Matlab/Simulink 进行仿真以创建不同系统组件的模型，从而能够比较所研究的两个控制器之间的性能：粒子群优化算法和传统 P&O（Perturb and Observe）。研究结果表明，该方法与其他策略相比，用于调整 MPPT 控制的粒子群优化算法的实现对于优化功率提取表现出更明显的积极影响。

文献[44]提出了一种简化的光伏系统和电池储能系统在单电压控制器调节直流母线电压的控制策略。所提出的控制策略通过消除电压控制器之间的模式转换，简化混合控制方案，同时提高了电池利用率和系统的瞬态响应速度。

文献[45]提出了一种通过在动态微电网中打开和关闭的能源管理策略，最大限度地减少电网消耗的能源。

文献[46]介绍了光伏系统在并网模式下运行时混合储能系统和直流母线电压的控制技术。电池和超级电容器由于其互补的能量特性，当光伏功率发生突然变化时，用于抑制光伏功率波动对直流母线的影响。此外，在电网连接期间，使用虚拟同步发电机来同步系统，从而增加系统的惯性。仿真结果表明，所提策略能够有效、快速地抑制直流母线电压波动。

综上所述，国内外在混合储能平抑光伏微电网功率波动方面取得了重要进展。然而，这些研究未考虑储能装置的荷电状态，容易造成储能单元过充过放的现象。随着光伏微电网规模的扩大和应用的深入，混合储能技术仍面临一些挑战，如储能系统的安全性与可靠性等^[47,48]。

1.3 本文研究内容

混合储能平抑光伏微电网功率波动是一种针对光伏发电过程中功率不稳定问题的解决方案。这种策略旨在利用储能系统，包括不同种类的储能元件，如蓄电池、超级电容等，来平衡和稳定光伏微电网的功率输出。混合储能系统可以存储系统多余的电能，在光伏系统输出功率不足时释放电能，可以有效解决系统功率波动的问题。混合储能系统结合了不同类型储能元件的优点，例如，电池可以

提供长时间的储能能力，而超级电容则可以快速响应功率变化，因此可以更好地应对光伏系统功率波动的不同特点。

在平抑功率波动的过程中，需要对两种储能装置的荷电状态(State of Charge, SOC)进行实时监控，并通过考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配控制策略将储能单元的 SOC 维持在正常工作区，有效防止储能装置出现过充过放的现象，增加了两种储能单元的使用寿命。通过仿真结果的对比，验证了混合储能系统平抑光伏微电网功率波动以及二次功率分配策略的有效性。

课题的主要研究内容如下：

第 1 章首先详细介绍了本课题的研究背景及意义，接着从光伏微电网、混合储能系统以及用混合储能系统平抑光伏微电网的功率波动三个方面出发，阐述了这三个方面的国内外研究现状。

第 2 章对光伏微电网的系统结构进行分析。首先介绍了光储直流微电网的系统中的四个组成部分，然后阐述了光伏发电单元的特性，分析光伏电池的工作原理并建立数学模型，接着介绍光伏发电单元的控制策略，对实现 MPPT 的几种典型方法：恒压法、电导增量法和扰动观察法进行分析。最后分析了常用的储能装置的优缺点，综合对比后选取超级电容和电池组成混合储能系统。

第 3 章主要是分析混合储能系统结构以及充放电控制策略研究。首先比较混合储能系统的两种结构的优缺点，然后分析了双向 DC/DC 变换器的工作原理，并对变换器进行数学模型，最后详细分析了双向 DC/DC 变换器的充放电控制策略。

第 4 章主要是介绍混合储能系统二次功率分配策略。本章首先详细介绍了光伏为微电网系统功率波动的原因，接着分析了混合储能平抑光伏微电网功率波动的原理，然后阐述了传统二阶低通滤波法对混合储能系统进行功率分配的原理，其不足是未把两种储能装置的荷电状态加以考虑在内，容易造成混合储能系统出现过充过放的现象，最后，针对传统功率分配控制策略的不足，本章提出了一种考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略，后面将两种储能装置的 SOC 划分为 9 个工作区域，并对每个工作区域的二次功率分配规则进行详细的理论推导。

第 5 章主要是对光储直流微电网系统进行建模和仿真分析。为验证本文所提

二次功率分配策略的可行性，在 Matlab/Simulink 中建立光储直流微电网模型，对 9 个工作区域进行仿真，并对仿真结果进行大量分析。仿真结果与理论结果一致，二次功率分配策略真实可行，既平抑了系统的功率波动，又有效防止混合储能系统出现过充过放的现象，大大增加了储能装置的寿命。

第 6 章全文总结和工作展望。

第2章 光伏微电网系统结构

光伏发电的输出确实受到多种因素的影响，其中光照条件是最主要的因素之一^[49,50]。光照强度、环境温度以及光照的稳定性都会直接影响光伏电池板的发电效率。因此，在实际应用中，需要充分考虑这些因素，以确保光伏发电系统的稳定运行。单一的储能元件可能无法满足光伏微电网系统的所有需求。因此，建立混合储能系统成为了一个更为理想的选择。混合储能装置可以利用各种储能装置的优势，从而更好地满足系统的需求。在建立混合储能系统的过程中，选择合适的数学模型是关键。建立超级电容和蓄电池的数学模型，对其工作原理进行分析。这样可以更好地了解这些储能元件的特性，从而更准确地控制整个系统^[51,52]。

2.1 光储直流微电网系统组成

由于光照条件的变化和负载需求的不稳定，光伏发电系统输出的电能往往存在波动。因此，需要一个有效的储能系统来平衡这种波动，确保供电的稳定性。混合储能系统正是为了解决这一问题而设计的。它结合了不同类型储能元件的优点。可以通过控制双向 DC/DC 变换器，实现储能装置的充放电，使得系统在不同的工作状态下都能平稳运行。在并网模式中，除了储能系统外，电网也可以提供补偿，共同维持系统的稳定运行。

图 2-1 为光储直流微电网系统，整个系统主要由四部分组成。

(1) 光伏发电系统。可以将太阳能转换成电能，利用 BOOST 升压变换器以及对光伏电池板的最大功率点追踪将功率输出到直流母线，直流母线上的电能可送入直流负载、储能装置以及电网。

(2) 混合储能系统。混合储能系统由超级电容和蓄电池组成，通过双向 DC/DC 变换器与直流母线连接，实现与直流母线的功率交换。

(3) 并网系统。直流母线通过双向 DC/AC 变换器连接电网，可以和电网进行能量双向交换。

(4) 负载单元。

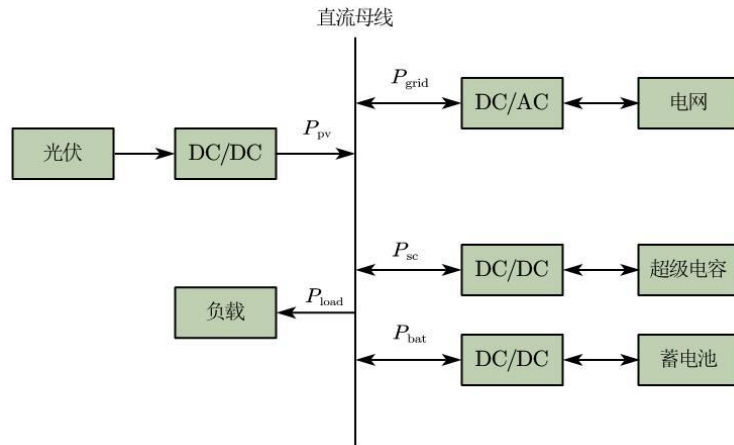


图 2-1 光储直流微电网系统

2.2 光伏发电单元建模与仿真分析

光伏发电系统是一个复杂但高效的能源转换系统，在离网模式下也可以正常运行，它配备了混合储能系统，当系统夜间不发电或发电不足时，依然可以稳定地给负载供电。混合储能系统在这里起到了至关重要的作用，它能够存储光伏组件在光照充足时产生的多余电能，并在需要时释放出来，从而保证了系统功率的稳定性和供电的连续性。光伏发电系统并网时，可以将多余的电能输送到电网中，实现上网功能。同时，当光伏发电系统供电不足或出现故障时，并网系统也可以从电网中获取电能，供给负载使用^[50]。光伏组件将光能转换成电能，这是整个系统的能量来源。最后，直压和电流在控制器的作用下进行管理和调节，确保电压和电流的稳定。

总的来说，光伏发电系统是一个高效、环保的能源解决方案，可以根据不同的应用场景和需求进行灵活配置，提供可靠的电力支持。

2.2.1 光伏电池工作原理分析

光伏电池，是光伏发电系统的核心组成部分，以下是对光伏电池工作原理的详细分析：

工作原理：光伏电池的工作原理基于光生伏特效应。当太阳光照射在半导体材料上，电子从共价键中被激发出来，形成电子-空穴对。在 P-N 结的电场作用

下，电子和空穴分离，分别在 N 区和 P 区聚集，从而在输出端口上呈现电压，并可通过外部负载产生电流。

影响因素：

光照强度：光照强度会影响光伏电池输出性能。光照强度增大时，输出电流和电压也会增大^[53]。

温度：温度变化时，光伏电池的输出也会变化。

光谱分布：不同波长的光对光伏电池的影响不同，因此光谱分布也是影响光伏电池性能的一个重要因素。

伏安特性：光伏电池具有非线性直流电源的特性，其输出电流和电压关系并非恒定。

综上所述，光伏电池具有独特的工作原理，其输出性能受多种因素影响。了解这些特性有助于更好地利用光伏电池，提高光伏发电系统的效率和稳定性^[54,55]。

2.2.2 光伏电池的数学模型

为了建立光伏电池的数学模型，首先要理解其等效电路的各个组成部分。

理想电流源：在光照强度稳定的情况下，等效为一个理想电流源，电流为 I_{ph} 。

二极管 D：光伏电池的非线性特性可以用二极管模拟。

串联电阻 R_s ：材料本身有电阻值，这个电阻代表了电池内部的串联损耗。通常情况下， R_s 的值较小，对整体性能的影响不大，但在建模时仍需要考虑。

并联电阻 R_{sh} ：由于制造工艺的不完美，光伏电池中可能存在微小的裂痕，导致漏电和短路。这个并联电阻代表了这些漏电路径的电阻。 R_{sh} 的值通常很大，但在建模时也是必要的，以确保模型的准确性。

图 2-2 为光伏电池等效电路，包括理想电流源、二极管、串联电阻和并联电阻。通过分析和计算这个等效电路，得到光伏电池的输出电压和电流的关系。

需要注意的是，具体的数学模型和参数值需要根据实际的光伏电池类型和规格来确定。在实际应用中，还需要考虑温度、光照强度等环境因素对光伏电池性能的影响。

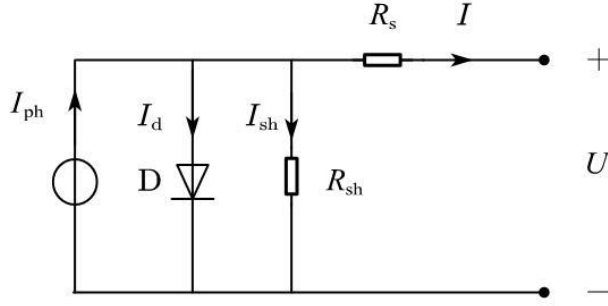


图 2-2 光伏电池等效电路

由光伏电池等效电路可得：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2-1)$$

$$I_{sh} = \frac{U + IR}{R_{sh}} \quad (2-2)$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad (2-3)$$

由式(2-1)、(2-2)、(2-3)可得：

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U + IR}{R_{sh}} \quad (2-4)$$

式中， I 为光伏电池输出电流， U 为光伏电池输出电压， I_{ph} 为光生电流源电流， I_d 为二极管电流， I_{sh} 为并联电阻电流， R_{sh} 为旁路电阻， R_s 为等效电阻， I_s 为 PN 结反向饱和电流， K 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， A 为理想 PN 结因子， q 为电子标准电荷量^[56,57]。

2.2.3 光伏发电单元的仿真分析

光伏电池的 $P-U$ 曲线展示了在某一确定的光照强度和环境温度下，光伏电池输出功率与电压之间的关系。图 2-3 为光伏电池典型的 $P-U$ 曲线，随着电压的变化，输出功率会先增大后减小^[58]。

通过分析 $P-U$ 曲线，可以了解光伏电池在不同电压下的功率输出特性，从而确定最佳的工作电压，实现最大功率输出。MPPT 算法会根据 $P-U$ 曲线的特性，通过不断改变光伏电池的工作点，令其处于最大功率点左右，从而最大程度地利

用光伏电池的能量输出。

在实际应用中，需要实时监测外部条件，并根据实际情况调整 MPPT 算法的工作参数，以确保光伏电池系统始终运行在最佳状态。

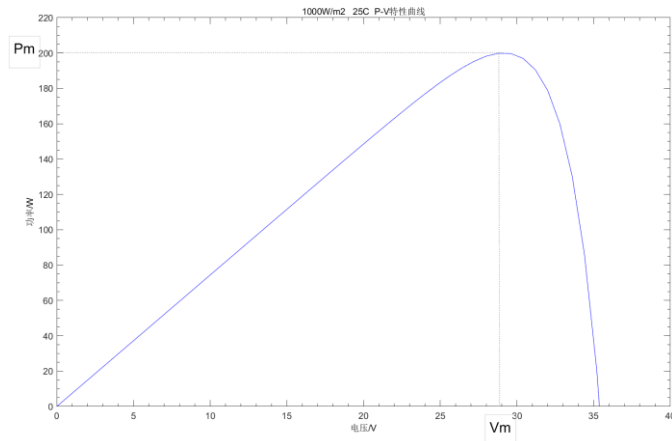


图 2-3 光伏电池典型 P - U 曲线

环境温度与辐照度都会影响光伏电池的输出特性。辐照度主要影响光伏电池的光生电流，而环境温度则对光伏电池的内阻和开路电压产生影响。这些因素共同作用，决定了光伏电池的输出电流和电压，进而影响到其功率输出。

图 2-4 展示了辐照度对 I - U 曲线影响。辐照度对 I - U 曲线的影响主要体现在光电效应中。辐照度增大时，电流也会增大，即在相同的电压下，电流值会更高。这是因为辐照度的增加使得更多的光子撞击到光电管的金属表面，从而有更多的电子从金属中逸出，形成更大的电流。这种关系在 I - U 曲线上表现为曲线向上移动，即在相同的电压下，电流值更高。

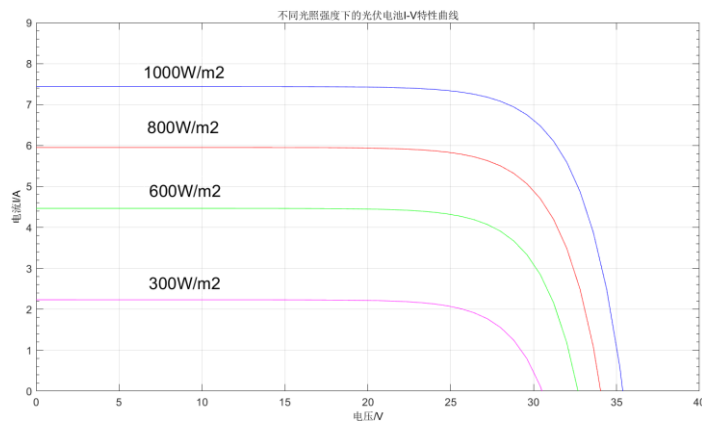


图 2-4 辐照度对 I - U 曲线影响

图 2-5 展示了温度对 $I-U$ 曲线影响。温度对 $I-U$ 曲线的影响主要体现在半导体材料和导体的电阻变化上。对于半导体，其导电特性会随着温度的升高而改变。当温度升高时，半导体的导电性会提高，因为在温度升高的情况下，载流子数量增加，导电性增强。温度升高时，光伏电池内阻减小，开路电压降低，导致 $I-U$ 曲线向左下方移动。

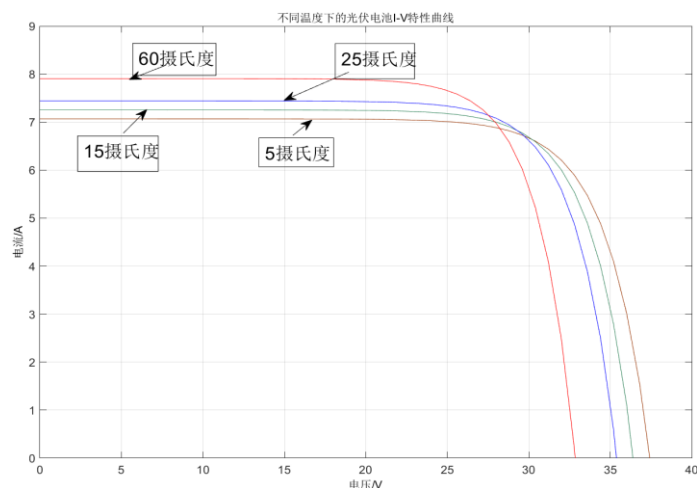


图 2-5 温度对 $I-U$ 曲线影响

图 2-6 展示了辐照度对 $I-U$ 曲线影响。辐照度对 $I-U$ 曲线的影响主要体现在光电效应中。当辐照度改变时，光电管中的电流也会相应发生变化，从而在 $I-U$ 曲线上产生不同的表现。具体来说，如果增加辐照度，那么在相同的电压下，光电管中会产生更大的电流。这是因为更多的光子撞击到光电管的金属表面，导致更多的电子从金属中逸出，进而形成更大的电流。因此，在 $I-U$ 曲线上，增大辐照度会使得曲线向上移动，即相同电压下的电流值增大。反之，如果降低辐照度，那么在相同的电压下，光电管中的电流会减小。这是因为撞击到金属表面的光子数量减少，导致电子逸出的数量减少，电流也随之减小。在 $I-U$ 曲线上，这表现为曲线向下移动。

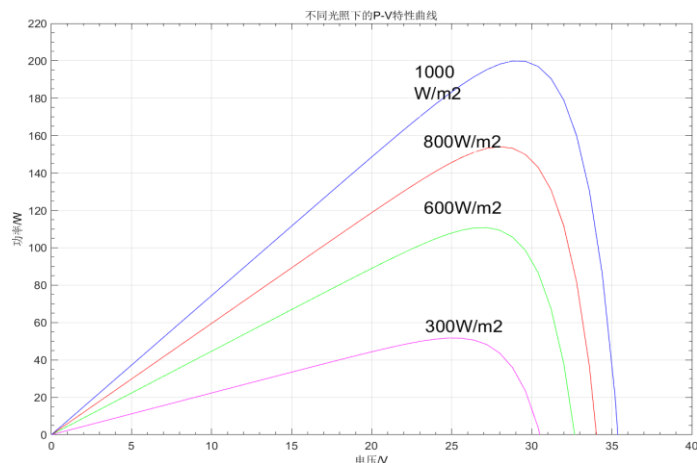
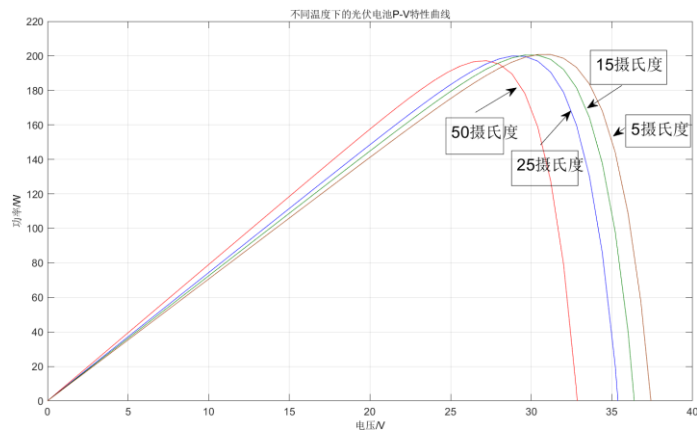
图 2-6 辐照度对 P - U 曲线影响

图 2-7 展示了温度对 P - U 曲线影响。当温度升高时，开路电压减小，短路电流增大。最大功率点向左下方移动。

图 2-7 温度对 P - U 曲线影响

2.2.4 最大功率点跟踪控制

最大功率点跟踪是用来实时调整光伏电池的工作点，接近最大功率点，光伏电池输出最大功率，最大程度利用太阳能^[59]。

可以通过电导增量法、扰动观察法以及恒压法等实现 MPPT。这些算法各有特点，但共同的目标都是找到最大功率点并调整系统的工作状态以达到最高效率。例如，扰动观察法通过不断改变光伏电池板的输出电压，并观察功率的变化来找到最大功率点，而电导增量法则通过分析电导和功率之间的关系来确定最大功率点^[60]。

MPPT 技术的优点在于能够实时响应环境变化，自动调整光伏电池板的工作

状态，确保系统始终运行在最佳工作点，从而提高发电效率。此外，MPPT 技术还具有适应性强、高精度和快速响应等特点。

在后续的比较中，可以综合考虑各种算法的准确性、稳定性、计算复杂度以及成本等因素，以找到最适合特定应用场景的 MPPT 算法。通过不断优化和改进算法，可以进一步提高光伏电池的转换效率，推动光伏发电技术的发展和應用。

(1) 电导增量法是一种有效的最大功率点追踪算法，它通过分析光伏电池的 $I-U$ 输出特性曲线来实现最大功率点的追踪。这种方法的核心思想在于利用最大功率点处的特定数学性质： $I-U$ 曲线的顶点处的斜率为零（或者电导等于瞬时电导的负值），进而改变光伏电池的工作点。

图 2-8 为电导增量法原理图，在电导增量法中，首先通过测量光伏电池的电流和电压值得到当前的 $I-U$ 工作点。然后，计算该点的电导（即电流对电压的导数）和瞬时电导（即当前电流值除以当前电压值）。通过比较这两个值的大小和符号，判断当前工作点在最大功率点的右侧还是左侧，不断改变输出电压，最终可以使其稳定在最大功率点附近^[61,62]。

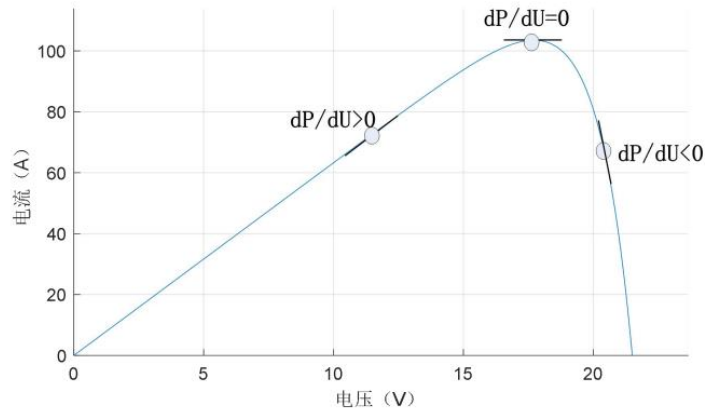


图 2-8 电导增量法原理图

电导增量法的优点在于其具有较高的追踪精度和稳定性，能够快速地响应环境变化并调整工作点。然而，电导增量法也存在一些挑战和限制。由于噪声的影响，电导和瞬时电导的计算可能存在一定的误差，这可能导致最大功率点的追踪出现偏差。此外，对于某些非线性较强的光伏电池系统，电导增量法的追踪效果可能不如其他方法。

因此，在选择使用电导增量法进行最大功率点追踪时，需要根据具体的应用

场景和需求进行评估和优化。通过结合其他 MPPT 算法或采用先进的控制策略，可以进一步提高光伏电池系统的性能和稳定性。

由图 2-8 可知，最大功率点出 $dP/dU=0$ ，左侧的 $dP/dU>0$ ，右侧的 $dP/dU<0$ 。

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(IU)}{dU} = I + \frac{UdI}{dU} \quad (2-5)$$

在最大功率点处时：

$$\frac{dP}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (2-6)$$

在最大功率点左侧时：

$$\frac{dP}{dU} > -\frac{I}{U} \quad (2-7)$$

在最大功率点右侧时：

$$\frac{dP}{dU} < -\frac{I}{U} \quad (2-8)$$

当工作点在最大功率点左侧时，增大输出电压；在最大功率点右侧时，减小输出电压，通过比较 dP/dU 和 $-I/U$ 的大小，增加或减小输出电压可以实现 MPPT。

图 2-9 是电导增量法流程图。在流程图中，关键参数包括当前和前一时刻检测的电压（ U ）和电流（ I ），以及控制系统的占空比（ D ）。占空比是脉冲宽宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）信号中高电平所占的比例，它直接决定了光伏板与负载之间的等效阻抗。

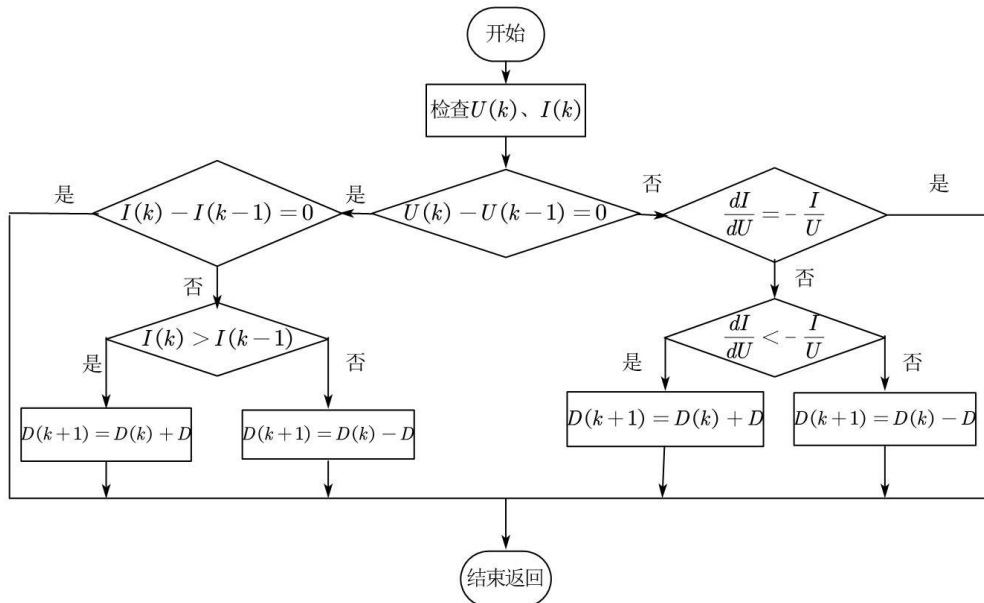


图 2-9 电导增量法流程图

先把不同时刻的电流、电压差值进行比较,再把电导变化率与瞬时电导的比值进行比较,这个比值用于判断当前工作点相对于最大功率点的位置,从而决定是增加还是减少占空比。通过这种方式,控制系统能够逐步调整光伏板的工作点,使其逼近最大功率点。

然而,电导增量法也有一些不足,它要使用高精度的传感器,微小的测量误差都可能导致控制算法做出错误的判断。此外,电导增量法还可能受到其他因素的影响,如光照强度、温度变化、光伏板老化等。这些因素都可能导致光伏板的电导特性发生变化,也会影响电导增量法的精确性。

总的来说,虽然电导增量法是一种有效的 MPPT 控制算法,但其在实现过程中也面临一些挑战和限制。在实际应用中,需要根据具体的系统需求和条件来选择合适的控制策略和技术手段。

(2) 扰动观察法

扰动观察法是 MPPT 算法中的一种主流方法,它基于试错策略来寻找最大功率点。这种方法通过不断地对光伏系统的工作电压进行小的扰动(增加或减少),并观察由此引起的输出功率变化,从而调整系统的工作点以逼近最大功率点。

扰动观察法的工作流程相对简单明了:

初始状态:首先,系统测定光伏电池的当前电流和电压,并计算出当前的输出功率。

扰动施加:在下一时刻,系统对光伏电池的工作电压施加一个小的扰动,这通常是一个预定的电压变化步长 ΔU 。

功率比较:在扰动后,再次检测电压和电流,计算出输出功率,将新的输出功率与扰动前的输出功率做差,得出功率变化量 ΔP 。

方向判断与调整:

如果 $\Delta P > 0$,说明扰动方向正确,即当前扰动使得输出功率增加了。因此,系统将继续保持同方向的扰动,通常意味着进一步增加工作电压。

如果 $\Delta P < 0$,说明扰动方向错误,即当前扰动导致了输出功率的下降。此时,系统需要改变扰动方向,通常是减小工作电压。

扰动观察法的优点在于其实现简单、鲁棒性强。然而,它也存在一些缺点,比如:扰动步长的选择对算法的性能有很大影响。步长过大可能导致系统错过最

大功率点，步长过小会导致算法的响应速度慢。

因此，在实际应用中，需要根据具体的应用场景和需求来选择合适的扰动观察法参数，并可能需要结合其他控制策略来优化 MPPT 的性能。图 2-10 和图 2-11 分别为扰动观察法工作原理图和扰动观察法流程图。

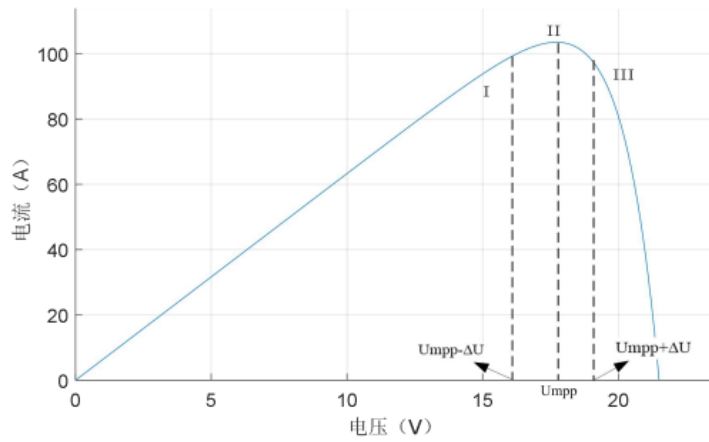


图 2-10 扰动观察法原理图

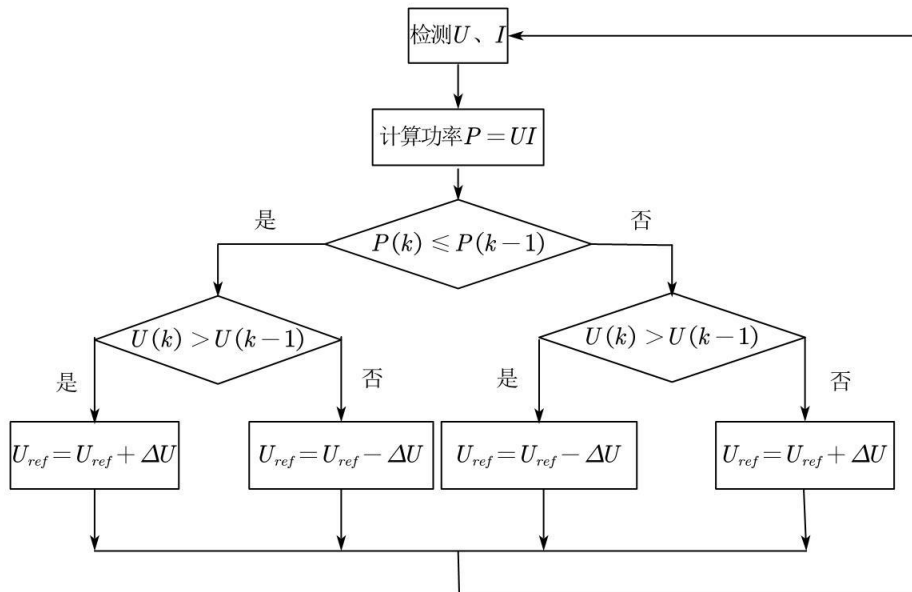


图 2-11 扰动观察法流程图

2.3 混合储能系统

混合储能系统（Hybrid Energy Storage System, HESS）是一种将多种不同类

型的储能技术混合应用的能量储存系统。其核心思想在于结合不同储能技术的优点，实现优势互补，同时克服单一储能技术的局限性和缺陷。

混合储能系统通常根据实际需求进行组合和优化，例如将功率型储能元件与容量型储能元件结合，以满足电力系统对长时间大容量和瞬时大功率的需求。这种设计方式使得混合储能系统在需要大功率输出和长时间能量存储的应用中具有很高的适应性，例如，在电网峰值需求期间，混合储能系统可以提供额外的功率输出以满足需求。

混合储能系统的优势主要体现在以下几个方面：

提高储能效率：混合储能系统可以有效利用不同储能技术的优点，实现储能效率的最大化。

延长电池寿命：混合储能系统中电池的使用寿命通常比单一储能系统中的电池使用寿命更长。

提升系统安全性与可靠性：通过降低电池的使用次数及充放电倍率，混合储能系统可以大幅提升系统的安全性，并增加系统可靠性。

因此，混合储能系统有助于满足复杂多变的能源需求，提高能源利用效率，并优化系统性能。这种系统为可再生能源的大规模并网提供了有效的解决方案，有助于缓解可再生能源的波动性和不确定性问题，对电力系统的供需平衡管理、运行成本降低以及可靠性和稳定性的提高都具有重要作用。

2.3.1 混合储能单元的选择

不同的场景要求不同的储能系统，选择合适的储能装置至关重要。目前，市场上存在多种基于不同储能原理的新型储能技术，每种技术都有其独特的性能和成本特点。在进行储能装置选择时，通常需要综合考虑以下几个方面：

能量密度：单位质量或体积存储的能量，影响储能系统的储能容量。

功率密度：储能系统能够快速释放或吸收能量的能力，影响储能系统的响应速度和动态性能。

循环寿命：储能装置能够经过多少次充放电循环而保持性能稳定，决定了储能系统的使用寿命。

充电/放电效率：储能系统在充放电过程中的能量损失情况，高效率意味着更少的能量浪费。

放电深度：指储能系统在放电过程中能够释放的能量比例，高放电深度意味着更高的能量利用率。

安全性：涉及储能系统在运行和故障状态下的安全性能，包括防火、防爆、防泄漏等方面。

可靠性：指储能系统的稳定性和故障率，对于保证供电的连续性和稳定性至关重要。

以下是对几种常用储能装置综合对比分析，如表 2-1 所示。

表 2-1 储能装置优缺点

储能装置	优点	缺点
超级电容	功率密度高、寿命长	能量密度低
压缩空气	容量大	受地理条件限制
抽水蓄能	容量大	受地理条件限制
蓄电池	容量大、能量密度高	功率密度低
化学储能	寿命长	转换效率低
电磁储能	效率高、寿命长	条件要求高
超导储能	功率密度高	成本高

根据表 2-1 可知，不同的储能装置在储能性能和经济性方面存在显著的差异，这使得它们各自适用于不同类型的储能应用。在复杂的应用场景下，单一类型的储能装置往往难以满足实际应用的需求^[63]。在这种情况下，对不同类型的储能装置进行整合以形成混合储能系统就显得尤为重要。通过整合，可以充分发挥各种储能装置的优势，弥补彼此的不足。比如蓄电池，其储能密度大、成本低廉，但蓄电池的使用寿命快速衰减是一个关键问题，这限制了其在需要长期稳定运行的应用场景中的使用。与此相对，新型的超级电容储能技术具有可以忽略充电次数、高效充放电的特点，但容量相对较小。

因此，将蓄电池储能技术与超级电容储能技术建立混合储能单元，实现优势互补，借助超级电容的高效充放电能力，从而极大提升储能系统的整体性能。此外，混合储能系统的构建还可以灵活调整。例如，在需要快速响应的应用中，可

以增加超级电容的比例；而在对储能容量要求较高的应用中，则可以增加蓄电池的比例。

总的来说，混合储能系统的应用为复杂多变的储能需求提供了有效的解决方案，通过整合不同类型的储能装置，可以实现储能性能和经济性的双重优化。

2.3.2 蓄电池工作原理及模型分析

（1）蓄电池工作原理

典型的蓄电池，尤其是铅酸蓄电池，其结构包含电解质、正负极和隔膜等关键部分，蓄电池结构如图 2-12 所示。

电解质：铅酸蓄电池的电解质通常采用稀硫酸（ H_2SO_4 ）。稀硫酸可以导电以及参与化学反应。充放电过程中，硫酸的浓度会发生变化，这是电池能量转换的直接体现。

正负极：

正极（Positive Electrode）：正极活性物质是二氧化铅（ PbO_2 ）。在放电过程中， PbO_2 会接受电子并发生化学反应，转化为硫酸铅（ PbSO_4 ）。这个过程会释放电能，驱动外部负载工作。

负极（Negative Electrode）：负极活性物质是铅（ Pb ）。在放电时，铅会失去电子并转化为硫酸铅（ PbSO_4 ）。这个过程中，电子通过导线流向正极，形成电流。

隔膜：微孔橡胶隔板作为电池内部的隔膜，避免正负极之间接触，防止电池内部短路。

充放电过程：

放电过程：正极和负极之间存在电位差，因此，电流从正极流出，经过负载，再流回负极。在这个过程中，正极的 PbO_2 和负极的 Pb 分别与硫酸发生化学反应，产物为硫酸铅（ PbSO_4 ），释放电能，电解液的硫酸浓度逐渐降低。

充电过程：通过外部电源向电池注入反向电流。这个电流使得硫酸铅（ PbSO_4 ）在正负极上分别还原为 PbO_2 和 Pb ，同时硫酸的浓度逐渐恢复。这个过程就是电池的充电，它使得电池能够再次储存电能以供后续使用。

铅酸蓄电池以其成熟的技术、相对较低的成本和较高的能量密度，在储能领

域有着广泛的应用。然而，其也存在使用寿命相对较短的问题，因此在某些高端或特殊应用场景中，可能需要结合其他类型的储能装置，形成混合储能系统，以满足更为复杂和严苛的储能需求。

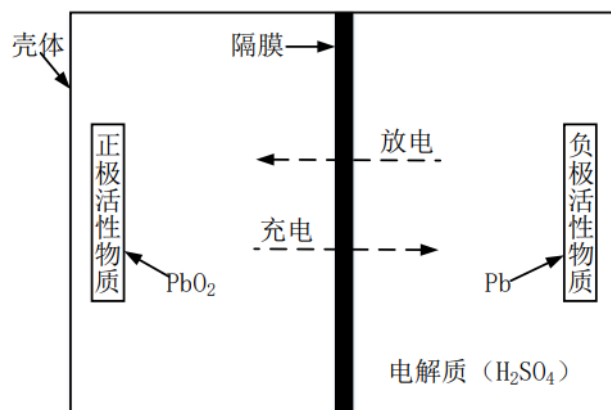


图 2-12 蓄电池结构

（2）蓄电池等效电路模型分析

蓄电池可以用通用等效电路模拟。将电池等效为一个理想电压源串联一个内阻的电路。理想电压源 E 代表电池的开路电压。而定值内阻 R 则代表电池内部由于电解质、正负极材料以及隔板等因素导致的电阻^[64]。

图 2-13 为通用等效电路模型，在这个模型中，当电池放电时，电流流过内阻 R ，产生压降，导致电池的输出电压降低，即电池实际能够提供给外部负载的电压。由于内阻是定值，因此这个模型在电池 SOC 变化不大时，这个模型能够较为准确地模拟蓄电池。

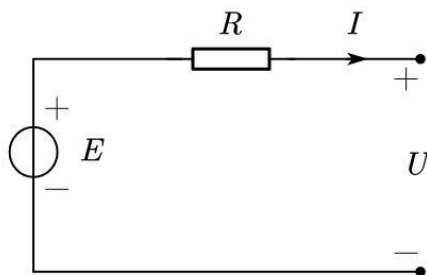


图 2-13 通用等效电路模型

然而，需要指出的是，这个模型虽然简单且易于分析，但它并不能完全反映电池在实际工作中的所有特性。特别是在电池 SOC 发生显著变化时，电池的开

路电压和内阻都可能发生变化。

因此，在实际应用中，为了更准确地模拟电池的性能，可能需要采用更为复杂的电池模型，如等效电路模型中加入更多元件（如电容、电感等）以模拟电池的动态特性，或者采用基于电化学原理的电池模型以更深入地理解电池的工作机制^[65]。

图 2-14 为 Thevenin 等效电路模型，这种电池等效电路模型更为复杂，更精确地体现电池的动态性能。在 Thevenin 模型中，除了理想电压源 E 和内阻 R_1 之外，还引入了一个电容 C 来模拟电池内部的容性效应。此外，还考虑了电解质与极板之间的接触电阻 R_1 。

Thevenin 模型中的元件与放电率和电池的 SOC 有关系。例如，电池的开路电压 E 会随着 SOC 的变化而变化，通常在 SOC 较高时电压也较高，SOC 较低时电压则较低。同样，内阻 R_1 和接触电阻 R_2 也可能随着 SOC 和放电率的不同而有所变化。此外，电容 C 的值反映了电池内部的容性效应，它也会受到 SOC 和充放电倍率的影响。

因此，在实际应用中，为了更准确地模拟电池的行为，通常需要根据电池的实际情况对 Thevenin 模型中的元件值进行调整或进行实时估算。这通常涉及到大量的实验数据和复杂的参数辨识算法。通过这些方法，可以获得更准确的电池模型，进而用于电池管理系统的设计和优化，提高电池的性能和安全性。

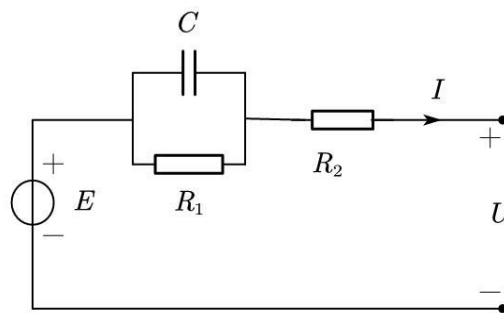


图 2-14 Thevenin 等效电路模型

三阶动态等效电路模型是一种更为精细的电池模型，它考虑了电池在充放电过程中的主反应和副反应，从而能够更准确地描述电池的动态行为和性能。图 2-15 为三阶动态等效电路模型。

主反应支路模拟了电池在正常工作状态下的电化学反应行为。其中， E_m 代表电池

的电动势,它反映了电池在开路状态下的电位差。 R_0 是欧姆内阻,代表了电解质、电极和连接件等产生的电阻,它会导致电池在放电时产生电压降。 R_1 是容性内阻,与电容 C 一起构成了电池的 RC 网络,用于模拟电池内部的容性效应和极化现象。此外, R_2 作为过充电电阻,主要用于模拟电池在过充电状态下的特殊行为,保护电池免受过充电的损害。

副反应支路模拟了电池在充电过程中产生的水解反应等副反应。这些副反应会导致电池的充电效率降低,并可能产生气体等副产物,对电池的安全性和寿命产生影响。 R_g 代表了副反应支路的电阻,它的大小反映了副反应发生的难易程度。

通过综合考虑主反应和副反应的影响,三阶动态等效电路模型能够更全面地展示电池在充放电过程中的动态特性,可以提高电池的性能、安全性和寿命^[66]。

需要注意的是,三阶动态等效电路模型虽然能够提供更为准确的模拟结果,但其复杂性和计算量也相对较高。

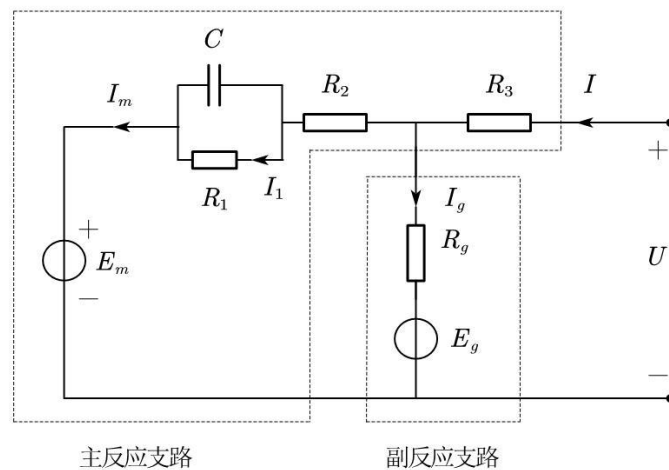


图 2-15 三阶动态等效电路模型

2.3.3 超级电容工作原理及模型分析

(1) 超级电容器的工作原理

超级电容是一种高功率密度和长使用寿命的储能装置,在多种应用场景中展现出巨大的潜力。

图 2-16 为超级电容结构图,主要包括电解质、两个电极和隔膜等。电极通常采用具有高比表面积的材料或其他导电材料制成,以提供足够的离子吸附面

积。电解质则负责在充放电过程中传导离子，其选择对超级电容的性能有重要影响。隔膜允许离子通过，也可以避免电极之间直接接触。

由于超级电容的储能过程是基于物理吸附而非化学反应，因此其充放电速度非常快，且循环寿命长，这使得超级电容被应用在需要快速释放和吸收能量的场合。

然而，尽管超级电容具有诸多优势，但其价格相对较高，且能量密度低于电池。因此，在实际应用中，通常需要结合其他储能技术，如电池，形成混合储能系统，以满足不同场景下的复杂需求。

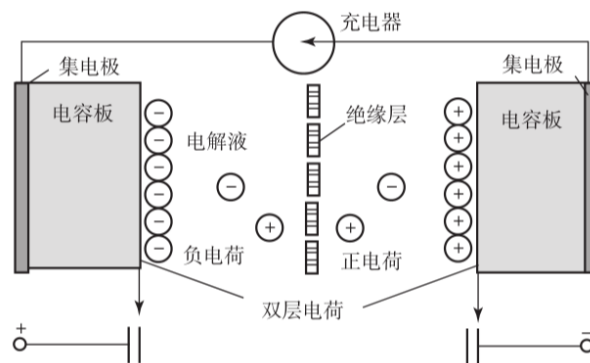


图 2-16 超级电容结构图

(2) 超级电容器等效电路模型

超级电容器的物理模型非常关键，需要借助电阻和非线性电容等元件，以复杂网络的形式来构建其物理模型。

图 2-17 为超级电容物理模型，在物理模型中，电阻和非线性电容的引入能够模拟超级电容在实际工作中的复杂行为。电阻代表了电容器内部的电阻损失，而非线性电容则能够更准确地描述超级电容在充放电过程中的电容变化。这种模型构建方式能够更全面地考虑超级电容的多种因素，从而更准确地预测其性能。电阻率、隔膜性能等因素也会对系统参数产生影响。这些因素在超级电容的设计和制造过程中都是非常重要的考虑因素。

在实际应用中，根据超级电容的具体应用场景和性能要求，选择合适的物理模型进行建模和分析。通过对模型参数的调整和优化，可以更好地理解和预测超级电容的性能。

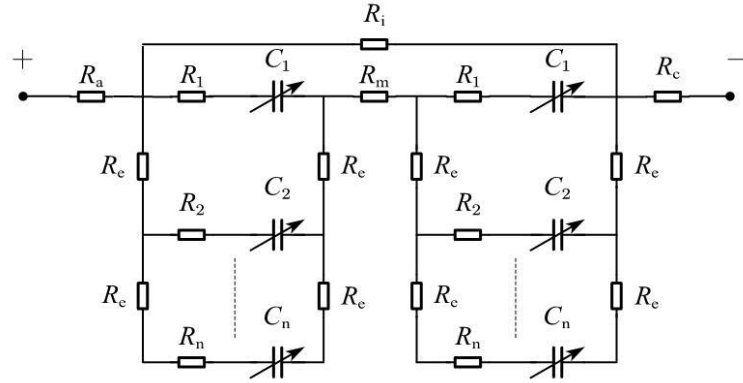


图 2-17 超级电容物理模型

串联 RC 等效电路模型是一种简化的模型，用于描述超级电容在充放电过程中的电气特性。在这个模型中，电容 C 与电阻 R_g 串联，这种结构能够反映超级电容在短时间内的动态响应，但可能无法准确描述复杂系统中的长期行为。

当多个超级电容进行串联时，由于每个超级电容都有自身的内阻，这些内阻也会串联起来。因此，等效的串联电阻 R_{g_array} 可以通过将各个超级电容的内阻相加得到。

串联 RC 等效电路模型虽然简单，但它在分析超级电容的充放电过程时非常有用。通过测量或估计单个超级电容的电容和内阻，可以使用上述公式来计算串联后的等效电容和电阻，从而进一步分析整个系统的电气特性。这种模型特别适用于需要快速分析和计算的情况，例如在电路设计和优化过程中。

2.4 本章小结

本章节对光伏直流微电网系统进行了全面而深入的介绍，从系统结构到关键组件的建模与控制策略，再到混合储能系统的选择与分析，展现了光伏直流微电网的复杂性和技术细节。

首先，明确了光伏直流微电网系统的四大核心部分：光伏发电系统、混合储能系统、负载以及并网环节。这四个部分共同构成了微电网的基本框架，实现了从太阳能的捕获、转换、存储到最终应用的完整流程。接着，对光伏发电单元进行了详细的建模与分析。根据光伏电池的特性，建立了光伏电池的数学和物理模型。针对光伏发电的控制策略，重点介绍了 MPPT 技术。通过 MPPT 技术可以

实现光伏系统输出最大功率。对扰动观察法、恒压法和电导增量法进行详细介绍。然后，对微电网中的混合储能系统进行了深入的分析。混合储能系统通过结合不同类型的储能装置，实现了对电能的高效存储和释放。在比较了目前常用的储能装置的优缺点后，选择超级电容和蓄电池构成混合储能系统。超级电容具有响应速度快的优点，适合应对微电网中的瞬时功率波动；而蓄电池则具有能量密度高、成本相对较低的特点，适合作为长期稳定的能量来源。最后，详细分析了蓄电池和超级电容的工作原理，接着建立了数学模型以及改进模型。这些模型不仅有助于深入理解储能装置的工作特性，还为后续的微电网控制策略制定提供了重要的参考依据。

第3章 混合储能系统结构及控制策略研究

在本文的研究中,选择超级电容和蓄电池组成混合储能系统。针对这种系统,选择合适的连接结构对于实现有效的功率管理和优化储能性能至关重要。

将超级电容和蓄电池分别连接双向 DC/DC 变换器,再与直流母线连接,可以独立控制蓄电池和超级电容的充放电,从而实现对它们之间功率的精确分配^[67]。双向 DC/DC 变换器在此结构中起到了关键作用。它不仅能够实现直流电压的升降变换,还能够根据控制策略的要求,灵活地调整蓄电池和超级电容的充放电电流和电压。这种灵活性使得混合储能系统能够更好地适应微电网中的功率波动和能量变化需求。当微电网需要吸收或释放大功率时,超级电容由于其快速充放电的特性,将首先响应并承担这部分功率变化;而蓄电池则主要负责平衡微电网中的长期能量需求^[68,69]。

通过采用这种连接结构和控制策略,可以有效地利用蓄电池和超级电容各自的优点,实现对微电网中功率波动的有效平抑和能量的高效利用。

3.1 混合储能系统结构

图 3-1 为直接并联等效电路图,蓄电池与超级电容直接连接直流母线,结构虽然简单,但确实存在一系列的问题。由于蓄电池的电压变化幅度较小,超级电容在并联时其两端电势差与蓄电池相同,这限制了超级电容快速充放电的特性。超级电容作为快速响应元件,其设计初衷是吸收和释放系统中的高频功率波动,但直接并联的方式使得超级电容无法充分发挥这一优势。

此外,直接并联连接还存在电压差导致超级电容击穿的风险。强大的电压差可能导致超级电容损坏。因此,在实际应用中,必须确保蓄电池和超级电容两端电压相等,但这又会进一步限制超级电容的性能。

为了解决这些问题,可以在超级电容和蓄电池之间连接双向 DC/DC 变换器。这样不仅可以解决电压差问题,还可以根据系统需求灵活调整蓄电池和超级电容的充放电状态,提高混合储能系统的性能和稳定性。

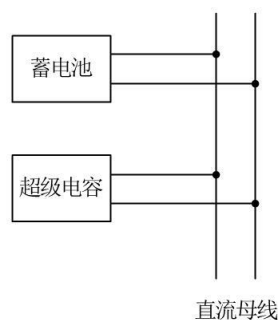


图 3-1 直接并联等效结构图

图 3-2 为经双向 DC/DC 变换器并联等效电路图，这种连接方式具有更高的灵活性和可控性。双向 DC/DC 变换器通过其独特的工作原理，能够精确地调节蓄电池和超级电容的充放电过程。在充电过程中，变换器可以根据需要调节电压和电流，确保蓄电池和超级电容能够安全、高效地接收电能。同时，在放电过程中，变换器也能够根据负载需求，精确地调节输出电压和电流，以提供稳定的电力供应。双向 DC/DC 变换器还通过其连接作用，实现了混合储能系统的高精度能量管理。通过对蓄电池和超级电容的独立控制，变换器能够根据需要动态地分配和调节两者的能量输出，以满足系统在不同工况下的能量需求。这种能量管理策略不仅提高了系统的响应速度，还优化了系统的整体性能。

虽然利用双向 DC/DC 变换器的连接方式在成本上可能相对较高，且响应速度可能略逊于直接并联的方式，但其在能量管理的灵活性、精准性以及系统稳定性方面的优势是显而易见的。因此，在本文中，选择了经双向 DC/DC 变换器并联连接的拓扑结构作为混合储能系统的控制方案，以实现更高效、更稳定的能量管理和利用。

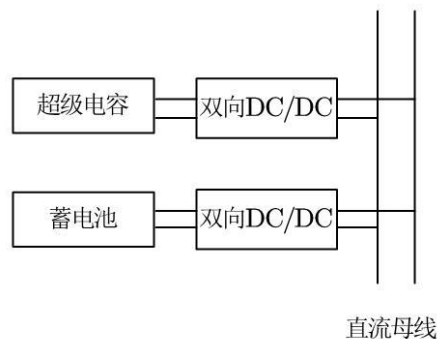


图 3-2 经双向 DC/DC 变换器并联等效结构图

3.2 双向 DC/DC 变换器工作原理及数学建模分析

本文采用非隔离型升降压（Buck-Boost）变换器，该变换器结合了 Boost 和 Buck 变换器的特点，能够实现输出电压的升降，满足不同应用场景的需求。图 3-3 为双向 DC/DC 变换器电路图，其中，全控型绝缘栅双极晶体管作为开关管 V_1 和 V_2 ，具有快速响应和高效率的特点；续流二极管 VD_1 和 VD_2 则用于在开关管关断时提供电流通路，保证电路的正常工作^[70]。

在实际应用中，通过控制 Buck-Boost 变换器开关管开通和关断的时间以及顺序，精确调节输出电压。同时，图 3-3 中的稳压电容 C_1 和母线电容 C_2 能够平滑输出电压，减小纹波；储能电感 L 则用于存储和释放能量，提高系统的动态响应能力。

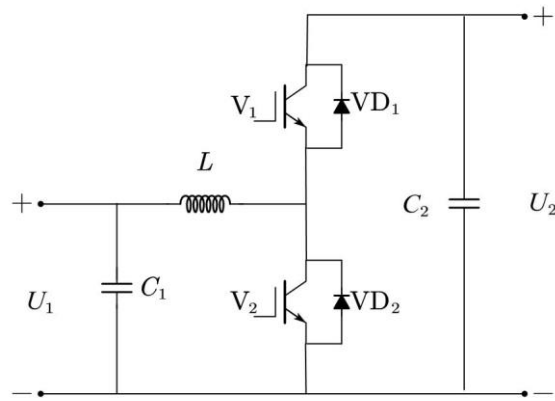


图 3-3 双向 DC/DC 变换器电路图

（1）Boost 模式工作原理分析

放电时，变换器工作在 Boost 模式，储能元件释放能量。Boost 模式的主要目的是提升输出电压，以满足负载或系统的需求。图 3-4 为 Boost 工作模式下的等效电路图。

在 Boost 工作模式下，开关管 V_1 和 V_2 的通断状态是交替进行的。当 V_2 导通时，电流从母线电容 C_2 通过储能电感 L 流向 V_2 ，此时 V_1 的续流二极管 VD_1 导通，允许电流通过。 V_1 的开关管断开，续流二极管 VD_2 也断开。这个过程中，电感 L 储存能量。当 V_2 断开时，电感 L 上的电流不会突变，经过二极管 VD_1 续流，开关管 V_1 导通，从而形成一个新的电流路径。这个过程中，电感 L 释放能

量，帮助提升输出电压。

因此，在 Boost 工作模式下，电路主要由母线电容 C_2 、储能电感 L 、开关管 V_2 以及 V_1 的续流二极管 VD_1 构成。这个等效电路图清晰地展示了这些组件之间的连接关系以及电流流向。

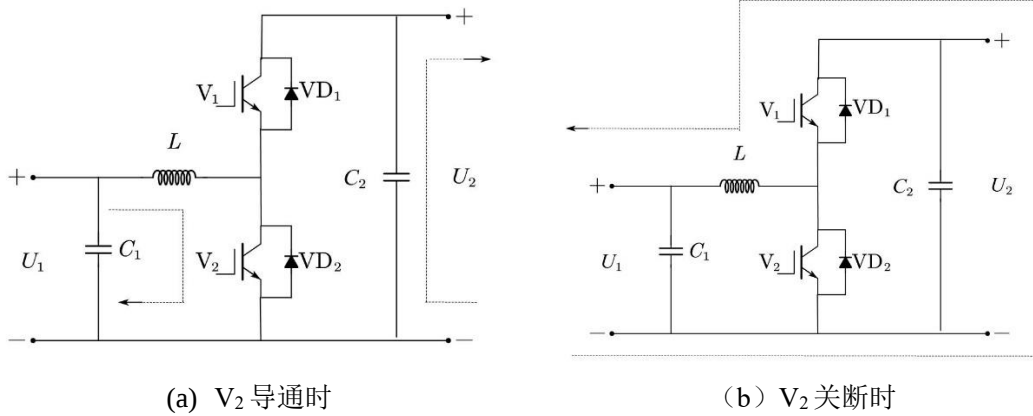


图 3-4 Boost 工作模式下的等效电路图

在储能系统放电状态的 Boost 工作模式中，对时间段 $[t, t + T]$ 进行分阶段研究，可以更深入地理解变换器的工作过程以及电路中各元件的相互作用。

(a) 当 V_2 处于导通状态时：

在时间段 $[t, t + KT]$ 内（其中 $0 < K < 1$ ），开关管 V_2 导通。此时，母线电容 C_2 通过储能电感 L 向 V_2 提供电流。由于电流方向的原因，续流二极管 VD_1 处于截止状态，即 VD_1 所在回路不导通。在这个阶段，电感 L 开始储存能量，并且电路中的电流逐渐增大。在这个阶段，对其进行数学模型，建立电路中各元件的电压、电流关系。通过求解这些方程，可以得到电感 L 上的电流、输出电压 U_1 。

(b) 当 V_2 处于关断状态时：

在时间段 $[t + KT, t + T]$ 内（其中 $0 < K < 1$ ），开关管 V_2 关断。流过电感 L 上的电流不会突变，续流二极管 VD_1 导通后，形成一个新的电流路径，使得电感 L 中的电流能够继续流动。电感 L 中存在变化的电流，产生感应电动势，其极性反向，可以提升输出电压。在这个阶段，对其进行数学模型，建立电路中各元件的电压、电流关系。通过求解这些方程，可以得到电感 L 上的电流、输出电压 U_1 。

需要注意的是，在实际应用中，还需要考虑电路中其他元件（如电容、电阻等）的影响，以及变换器工作过程中可能出现的非线性效应和干扰因素。因此，在进行详细分析和设计时，需要综合考虑各种因素，并进行充分的实验验证。

(2) Buck 模式工作原理分析

充电时，变换器工作在 Buck 模式，储能系统吸收能量。Buck 模式的主要目的是降低输入电压，以便有效地为储能系统充电。Buck 工作模式下的等效电路图如图 3-5 所示。

在 Buck 工作模式下，开关管 V_1 和 V_2 的通断状态同样是交替进行的。当 V_1 导通时，电流通过开关管 V_1 流入储能电感 L 和母线电容 C_2 ，此时 V_2 的续流二极管 VD_2 导通，允许电流通过。开关管 V_2 断开，续流二极管 VD_1 也断开。这个过程中，电感 L 开始储存能量，同时母线电容 C_2 也在充电。 V_1 断开时，电感 L 上的电流不会突变，通过二极管 VD_2 续流，形成一个短暂的电流回路，帮助平稳过渡。

因此，在 Buck 工作模式下，电路主要由母线电容 C_2 、储能电感 L 、开关管 V_1 以及 V_2 的续流二极管 VD_2 构成。这个等效电路图清晰地展示了这些组件之间的连接关系以及电流流向。

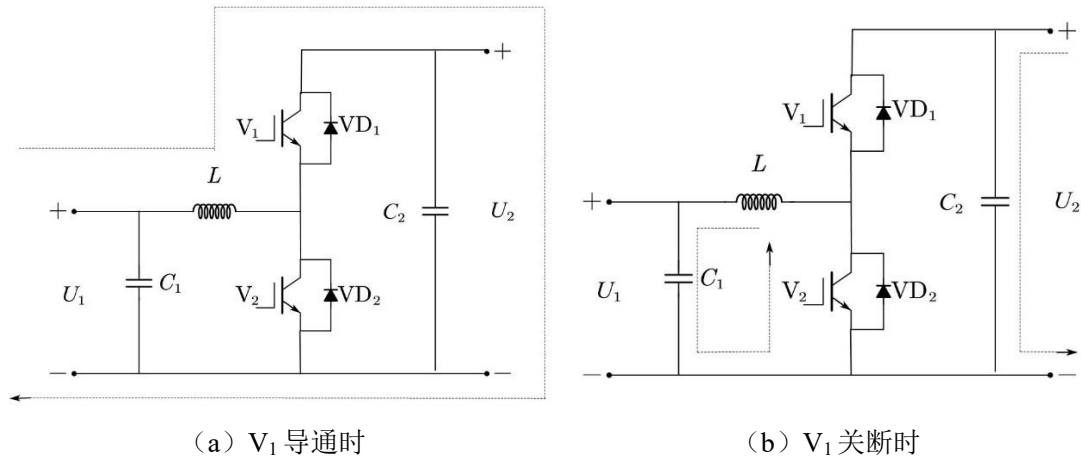


图 3-5 Buck 工作模式下的等效电路图

在储能系统充电状态的 Buck 工作模式中，对时间段 $[t, t + T]$ 进行分阶段研究，有助于深入理解变换器的工作机制以及电路中各元件的相互作用。

(a) 当 V_1 处于导通状态时：

在时间段 $[t, t + KT]$ 内（其中 $0 < K < 1$ ），开关管 V_1 实际上应该是导通的，而不是关闭的。此时，电流通过 V_1 流入储能电感 L 和母线电容 C_2 。由于电流方向的原因，续流二极管 VD_2 处于截止状态，即 VD_2 所在回路不导通。在这个阶段，电感 L 储存能量，电路中电流增大。在这个阶段，可以根据电路的基本定律建立

数学模型，描述电路中各元件的电压、电流关系。通过求解这些方程，可以得到电感 L 上电流的变化规律，以及母线电容 C_2 的充电情况。

(b) 当 V_1 处于关断状态时：

在时间段 $[t + KT, t + T]$ 内（其中 $0 < K < 1$ ），开关管 V_1 关断。电感 L 上的电流不会突变。续流二极管 VD_2 导通，使得电感 L 中的电流能够继续流动并逐渐减小。在这个阶段，同样可以建立数学模型来描述电路中各元件的电压、电流关系。通过求解这些方程，可以得到在 V_1 关断期间，电感 L 上电流的变化规律，以及母线电容 C_2 的充电情况。

通过对这两个阶段的详细研究，可以更全面地理解 Buck 工作模式下变换器的工作原理和性能特点。这有助于优化变换器的设计和控制策略，提高储能系统的充电效率和稳定性。

3.3 双向 DC/DC 变换器的充放电控制策略

图 3-6 为恒流控制结构框图，单环恒流控制策略结构相对简单，它主要关注电流的控制，通过调节变换器的参数来保持恒定的充电或放电电流。这种控制策略的优点在于响应速度快。然而，它缺乏对电压的有效控制，因此在某些情况下可能出现较大的电压波动，造成系统不稳定。

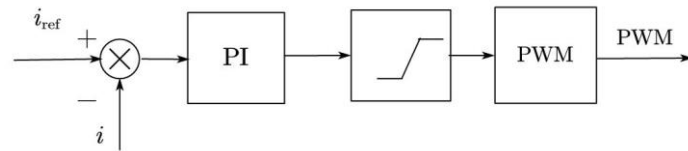


图 3-6 恒流控制框图

图 3-7 为电压电流双环控制框图，通过外环控制电压稳定，内环控制电流精度。这种策略在保持电流稳定的同时，也能对电压进行有效调节，从而确保系统的稳定运行。它的优点在于能够同时满足电流和电压的控制要求，提高系统的整体性能。

在实际应用中，需要根据微电网系统的具体需求和条件来选择合适的控制策略。例如，如果系统对电流精度要求较高，可以选择单环恒流控制策略；如果系统需要同时满足电流和电压的控制要求，且对稳定性有较高需求，那么电压外环

电流内环双环控制策略可能更为合适。

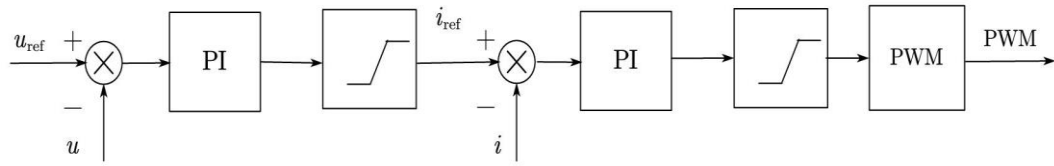


图 3-7 电压电流双环控制框图

通过控制蓄电池与超级电容的充放电电流和电压，可以实现对它们功率的精确控制，能够有效地管理储能单元的充放电过程，确保系统的安全和稳定运行。

双向 DC/DC 变换器控制框图如图 3-8 所示， T_1 、 T_2 为开关管，通过充放电参考电压与实际工作电压作比较，得到的误差作为 PI 控制器的输入，经过 PI 控制器后，可以使得实际电压趋近于参考电压，从而达到控制目的。同时，转换器输出参考电流，通过与变换器实际电流作比较，得到的误差输入到电流 PI 控制器，可以使得实际电流趋近于参考电流，完成对电流的控制。

限幅装置在控制系统中起到了保护作用。通过对储能模块的工作电压和电流进行限制，可以防止电路出现过压、过流等异常情况，从而确保电路的安全运行。

脉宽调制电路可以控制双向 DC/DC 变换器中开关管的导通与关断。将电压、电流 PI 控制器的输出值转换为驱动脉冲，通过控制驱动脉冲的频率和宽度，精确控制开关管，实现对储能单元充放电电压和电流的控制。

比较器能够比较两个输入端的电压和电流的大小，并输出一个数字信号来表示这两个输入之间的差异。

在实际应用中，比较器模块被用来判定储能单元的实际工作电流方向。当实际工作电流方向与期望的电流方向不符时，比较器会发出信号，触发变换器的工作模式切换。比如，如果实际工作电流是流向储能单元的，这表示储能单元正在充电；反之，如果电流是从储能单元流出的，则表示储能单元正在放电。

基于比较器的输出，控制系统可以决定变换器应该处于充电模式还是放电模式。如果需要充电，变换器会调整其工作状态以接受并存储；如果需要放电，变换器则会将储能单元中的能量转换为电能输出到电力系统中。

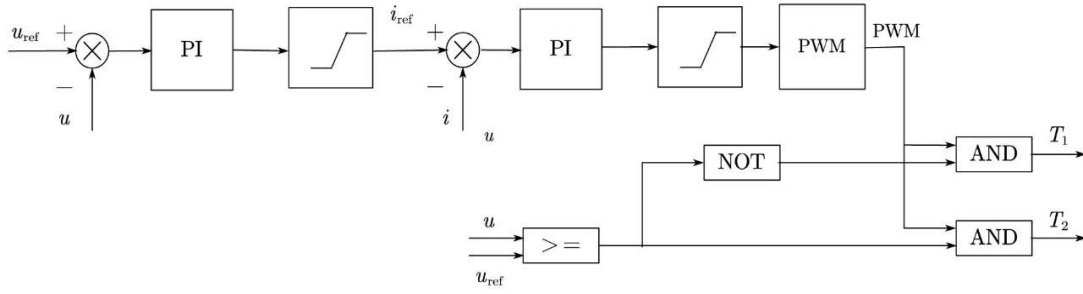


图 3-8 双向 DC/DC 变换器控制框图

3.4 本章小结

本章节主要分析了混合储能系统的结构、介绍了双向 DC/DC 变换器的工作原理并对其进行建模，又阐述了其充放电控制策略。

混合储能系统由蓄电池、超级电容组成，能够在不同的工作场景下发挥各自的优势，共同应对光伏系统的功率波动，确保微电网的稳定运行。

通过双向 DC/DC 变换器可以连接混合储能系统和直流母线。其性能直接关系到储能元件的充放电效率和微电网的能量管理效果。变换器能够实现直流电压的双向转换，既可以将储能元件的电压转换为适合微电网使用的电压，也可以将微电网的电压转换为适合储能元件充电的电压。这种双向转换的特性使得混合储能系统能够灵活地应对微电网的功率需求变化，实现能量的高效利用。

分析双向 DC/DC 变换器的工作原理并对其进行数学建模。该模型能够全面描述变换器的动态特性，包括电压、电流和功率等参数的变化规律。这为深入理解变换器的工作过程、优化控制系统设计以及提高系统性能提供了有力的理论支持。

详细介绍了如何通过精确控制双向 DC/DC 变换器的开关管动作来实现对储能元件的充放电控制。根据微电网的实时功率需求和储能元件的状态，控制器会计算出适当的充放电电流或电压指令，并通过脉宽调制等技术手段将这些指令转换为驱动脉冲，从而实现对变换器的精确控制。这种控制策略能够确保混合储能系统在各种工作场景下都能够高效、稳定地运行，为微电网提供可靠的能源支持。

第4章 混合储能系统二次功率分配策略

光伏微电网系统中存在的功率波动问题，可以通过混合储能系统解决。然而，由于混合储能装置的容量有限，过充过放等安全问题必须得到充分考虑。因此，提出了考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配控制策略。

该控制策略是根据储能设备的 SOC 状态进行功率的二次分配，以优化储能系统的使用效率并避免过充过放等问题。首先，利用二阶低通滤波器对不平衡功率进行初次分配，将其分解为低、中、高频三部分。低频功率并入电网，中高频功率分别由蓄电池和超级电容承担。接着，按照蓄电池和超级电容的 SOC 状态，将 SOC 划分为 9 个区域。每个区域都对应着相应的功率分配策略。例如，当 SOC 处于较低水平时，系统可能会减少从该储能设备中抽取的功率，以避免过放；而当 SOC 处于较高水平时，系统可能会增加向该储能设备充电的功率，以避免过充。

通过这种二次功率分配控制策略，不仅可以有效地平抑光伏微电网系统中的功率波动，还可以根据储能设备的实际状态进行灵活调整，避免过充过放等安全问题的发生。这有助于提高储能系统的使用寿命和整体性能，进而保障微电网系统的稳定运行和供电质量。

4.1 光伏微电网系统功率波动分析

光伏电源的固有特性确实给微电网的运行带来了挑战。由于其出力具有随机性和波动性，当光伏电源在微电网中的渗透率较高时，会影响微电网系统稳定和安全运行。

大规模非线性负载接入微电网时，会进一步加剧功率波动和谐波问题。负载在运行时会产生大量的谐波电流，流入微电网系统时，会引起电压波动和频率振荡。

太阳辐射不稳定：太阳辐射的稳定性对光伏电站的直流电压波动有重要影响。太阳辐射的波动可能导致光伏电池组件输出的直流电压发生变化，进而引起整个光伏电站直流电压波动。

温度变化：光伏组件的输出功率与温度呈反比例关系，组件温度越高，输出功率越低。温度变化会影响光伏电站直流电压的波动。

组件老化：光伏电站使用寿命长，组件老化可能导致输出电压不稳定性增大，进而引起直流电压波动。

4.2 混合储能平抑光伏微电网功率波动

在用混合储能平抑光伏微电网功率波动的实际应用中，采用一阶低通滤波器确实是一种简单而有效的方法。图 4-1 和图 4-2 分别为一阶低通滤波器的拓扑结构和一阶低通滤波器控制框图。

在混合储能系统中，将光伏微电网的功率波动信号作为输入信号输入到一阶低通滤波器中，滤波器将信号中的高频成分和低频成分分离。高频分量通常代表功率的快速波动，这部分功率波动需要快速响应来平抑。由于超级电容响应速度快、功率密度高，可以承担高频分量^[71]。低频分量则代表功率的缓慢变化，这部分功率波动对系统的稳定性影响较小，但持续时间较长。由于蓄电池能量密度高、存储容量大，因此适合承担低频分量的平抑任务。

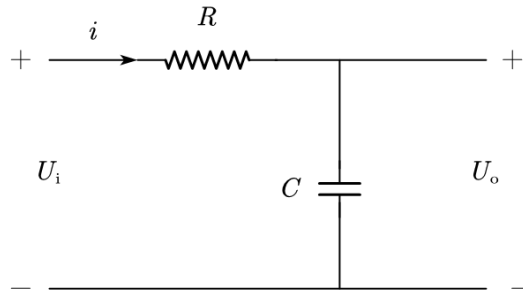


图 4-1 一阶低通滤波器拓扑结构

根据电路可以得出其微分方程，如式(4-1)所示：

$$U_i = U_o + RC \frac{dU_o}{dt} \quad (4-1)$$

式中， U_i 、 U_o 、 C 、 R 分别是输入电压、输出电压，等效电容、等效电阻。

式(4-1)中， RC 是滤波时间常数，令 $RC=\tau$ ，则：

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4-2)$$

蓄电池功率 P_{bat} 为：

$$P_{\text{bat}} = \frac{1}{\tau s + 1} P_{\text{hess}} \quad (4-3)$$

式中, P_{hess} 为混合储能系统功率。

超级电容功率 P_{sc} 为:

$$P_{\text{sc}} = P_{\text{hess}} - P_{\text{bat}} \quad (4-4)$$

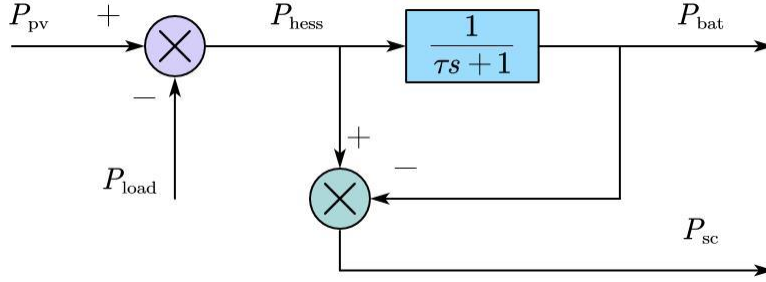


图 4-2 低通滤波器控制框图

4.3 传统混合储能系统的功率分配方法

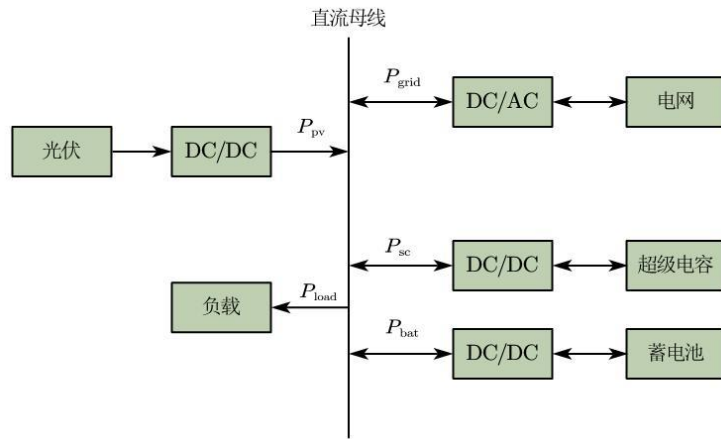


图 4-3 光储直流微电网结构图

由图 4-3 可知, 光储直流微电网系统的功率平衡表达式:

$$P_s = P_{\text{pv}} - P_{\text{load}} \quad (4-5)$$

$$P_{\text{hess}} = P_{\text{sc}} + P_{\text{bat}} \quad (4-6)$$

$$P_{\text{pv}} + P_{\text{hess}} = P_{\text{grid}} - P_{\text{load}} \quad (4-7)$$

式中, P_{pv} 、 P_s 、 P_{load} 、 P_{grid} 、 P_{hess} 、 P_{sc} 、 P_{bat} 分别是光伏输出功率、不平衡功率、

负载功率、并网功率、混合储能功率、超级电容功率、蓄电池功率。 P_s 为正时混合储能充电， P_s 为负时混合储能放电。

传统二阶低通滤波法功率分配的控制框图如图4-4所示，光伏发电系统输出功率 P_{pv} ，经负载消耗后的功率为不平衡功率 P_s ，不平衡功率 P_s 经过二阶低通滤波器后被分为高、中、低频3种功率分量，高、中频功率分量分别是超级电容和蓄电池的充放电功率，低频功率分量并入电网。

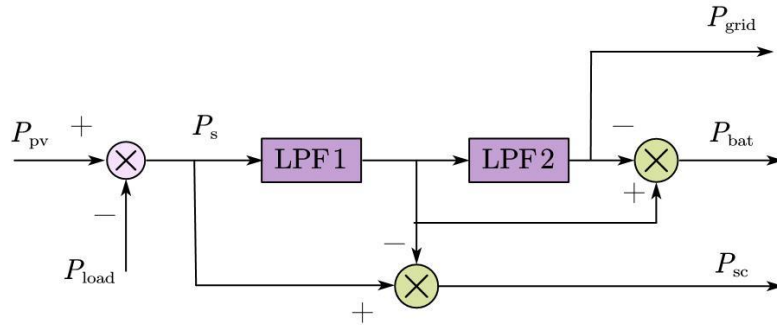


图 4-4 传统功率分配控制框图

两种储能单元输出的参考功率为：

$$\begin{cases} P_{sc} = \frac{T_1 s}{T_1 s + 1} P_s \\ P_{bat} = \frac{1}{T_1 s + 1} \frac{T_2 s}{T_2 s + 1} P_s \end{cases} \quad (4-8)$$

式中， T_1 、 T_2 分别为两个低通滤波器的时间常数，通过传统功率分配方法分配功率时，由于两个低通滤波器的滤波时间常数 T_1 、 T_2 不变，因此，分配给超级电容和蓄电池的功率只能按照式(4-8)所示。但蓄电池和超级电容自身容量有限，导致混合储能系统出现过充过放的现象，不仅减少两种储能装置的寿命，还会给光伏微电网系统带来不利影响。

4.4 考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略

对于传统二阶低通滤波法存在的问题，本文提出了考虑双重SOC的混合储能系统二次功率分配策略，图4-5为二次功率分配控制框图，利用二阶低通滤波器对不平衡功率进行初次功率分配，再将超级电容和蓄电池的SOC划分为9个工作区域，在不同工作区域根据实时SOC和实际功率需求进行二次功率分配，有效

防止超级电容和蓄电池过充过放，增加光伏微电网系统的安全性。其中， P_{bat_ref} 、 P_{sc_ref} 分别为二次功率分配后的蓄电池和超级电容参考功率； SOC_{bat} 、 SOC_{sc} 与分别为蓄电池和超级电容的SOC。

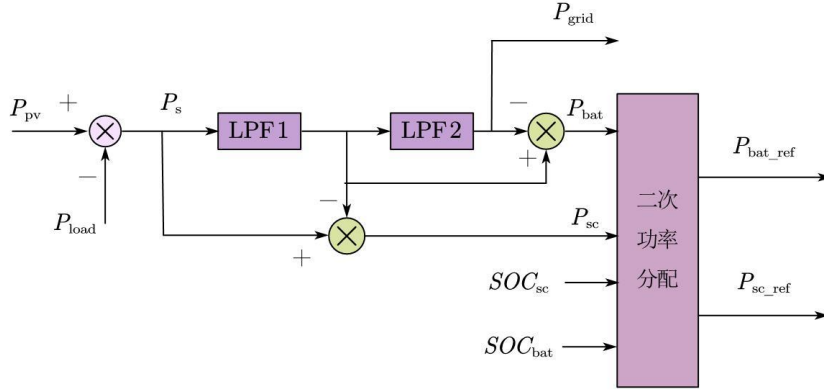


图 4-5 二次功率分配控制框图

约束方程：

$$\begin{cases} SOC_{bat_min} \leq SOC_{bat} \leq SOC_{bat_max} \\ SOC_{sc_min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{sc_max} \end{cases} \quad (4-9)$$

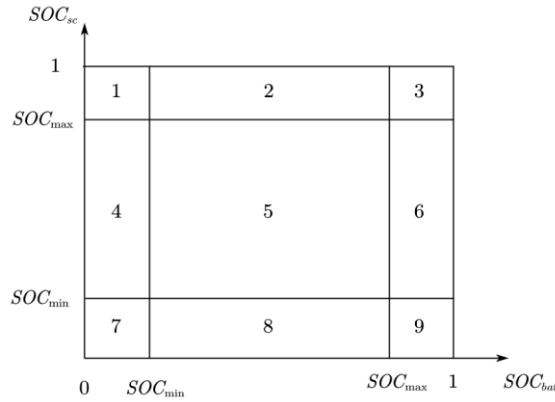


图 4-6 混合储能 SOC 工作区域

混合储能 SOC 工作区域如图 4-6 所示，将两种储能的 SOC 分成了 9 个工作区域，当处于工作区域 5 时，混合储能根据式(4-8)进行功率分配；当处于其它 8 个工作区域时，需要对混合储能进行二次功率分配，以下是二次功率分配的规则。

工作区域1：

$$\begin{cases} SOC_{sc} > SOC_{max} \\ SOC_{bat} < SOC_{min} \end{cases} \quad (4-10)$$

若 $P_{pv} > P_{load}$ ，此时蓄电池充电，超级电容放电，初次分配给混合储能吸收的功

率和超级电容释放的功率均由蓄电池吸收。蓄电池和超级电容根据式(4-11)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

$$\begin{cases} P_{sc_ref} = P_1 \\ P_{bat_ref} = P_{hess} + P_1 \end{cases} \quad (4-11)$$

式中， P_1 为 SOC_{sc} 恢复到 SOC_{max} 所需功率。

若 $P_{pv} < P_{load}$ ，此时蓄电池充电，超级电容放电，初次分配给混合储能释放的功率和蓄电池充电的功率均由超级电容释放。蓄电池和超级电容根据式(4-12)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

$$\begin{cases} P_{sc_ref} = P_{hess} + P_2 \\ P_{bat_ref} = P_2 \end{cases} \quad (4-12)$$

式中， P_2 为 SOC_{bat} 恢复到 SOC_{min} 所需功率。

工作区域2：

$$\begin{cases} SOC_{sc} > SOC_{max} \\ SOC_{min} \leq SOC_{bat} \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (4-13)$$

二次功率分配规则同工作区域1一致。

工作区域3：

$$\begin{cases} SOC_{sc} > SOC_{max} \\ SOC_{bat} > SOC_{max} \end{cases} \quad (4-14)$$

若 $P_{pv} > P_{load}$ ，为防止蓄电池和超级电容过充，两者应停止工作。蓄电池和超级电容根据式(4-15)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

$$\begin{cases} P_{sc_ref} = 0 \\ P_{bat_ref} = 0 \end{cases} \quad (4-15)$$

若 $P_{pv} < P_{load}$ ，此时蓄电池和超级电容均放电，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

工作区域4：

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{\max} \\ SOC_{bat} < SOC_{\min} \end{cases} \quad (4-16)$$

二次功率分配规则同工作区域1一致。

工作区域5:

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{\max} \\ SOC_{\min} \leq SOC_{bat} \leq SOC_{\max} \end{cases} \quad (4-17)$$

若 $P_{pv} > P_{load}$ ，此时蓄电池和超级电容均充电，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

若 $P_{pv} < P_{load}$ ，此时蓄电池和超级电容均放电，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

工作区域6:

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{\max} \\ SOC_{bat} > SOC_{\max} \end{cases} \quad (4-18)$$

若 $P_{pv} > P_{load}$ ，此时蓄电池放电，超级电容充电，初次分配给混合储能吸收的功率和蓄电池释放的功率均由超级电容吸收。蓄电池和超级电容根据式(4-12)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

若 $P_{pv} < P_{load}$ ，此时蓄电池放电，超级电容充电，初次分配给混合储能释放的功率和超级电容吸收的功率均由蓄电池释放。蓄电池和超级电容根据式(4-11)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

工作区域7:

$$\begin{cases} SOC_{sc} < SOC_{\min} \\ SOC_{bat} < SOC_{\min} \end{cases} \quad (4-19)$$

若 $P_{pv} > P_{load}$ ，此时蓄电池和超级电容均充电，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

若 $P_{pv} < P_{load}$ ，为防止蓄电池和超级电容过放，两者应停止工作。混合储能根据式(4-15)进行二次功率分配。当恢复至正常工作区域时，蓄电池和超级电容根据式(4-8)进行功率分配。

工作区域8:

$$\begin{cases} SOC_{sc} < SOC_{min} \\ SOC_{min} \leq SOC_{bat} \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (4-20)$$

二次功率分配规则同工作区域6一致。

工作区域9:

$$\begin{cases} SOC_{sc} < SOC_{min} \\ SOC_{bat} > SOC_{max} \end{cases} \quad (4-21)$$

二次功率分配规则同工作区域6一致。

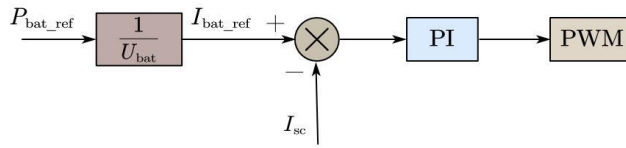


图 4-7 蓄电池充放电控制图

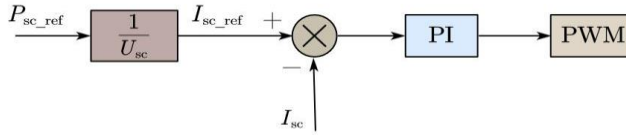


图 4-8 超级电容充放电控制图

蓄电池和超级电容充放电控制图分别如图 4-7、图 4-8 所示，二次功率分配后得到两者的参考功率，然后分别除以储能装置的端电压就能达到两者的参考电流，将实际电流与参考电流作差，得到的误差通过 PI 调节器形成控制信号，再通过 PWM 发生器产生 PWM 波，占空比决定了双向 DC/DC 变换器的开通和关断时间，通过调整 PWM 波的占空比，可以实现对储能装置的充放电控制。

4.5 本章小结

本章节深入探讨了光伏微电网系统功率波动的各种原因，分析了用混合储能平抑光伏微电网功率波动的方法。针对传统二阶低通滤波方法存在的不足，提出了一种考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略。这种策略在传统功率分配方法的基础上，加入了混合储能的实时荷电状态作为考虑因素。通过对混合储能进行二次功率分配，不仅实现了用混合储能平抑系统的功率波动，还有效避免了储能单元过充过放的问题。

第5章 系统建模与仿真分析

5.1 光储直流微电网系统建模

为验证本文所提的考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略的有效性，在 Matlab/Simulink 中搭建光储直流微电网模型。图 5-1 为光储直流微电网模型，该模型能够模拟光伏微电网系统的实时运行状况，包括光伏发电、混合储能系统、并网系统以及负载等多种模块。

模型结构图清晰地展示了光伏微电网的各个组成部分及其相互之间的连接关系。光伏发电单元通过模拟实际的光照条件和光伏电池特性，产生直流电能。混合储能系统可以储存和释放能量。混合储能系统的控制策略则根据本文所提的二次功率分配策略进行设计，考虑了储能单元的实时荷电状态，以实现精确的功率分配和同时避免了出现过充过放的现象。

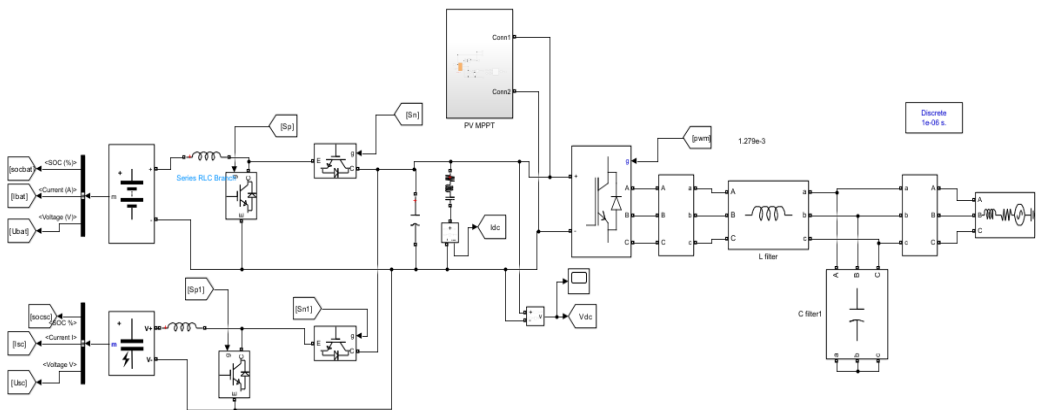


图 5-1 光储直流微电网模型

5.2 仿真结果分析

为了验证本文所提的考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略的可行性，在 Matlab/Simulink 中对图 5-1 所示的光储直流微电网进行建模、仿真。仿真参数如表 5-1 所示。

表 5-1 光储直流微电网系统仿真参数

参数	数值
直流母线电压 U_{dc}	700 V
光伏电池温度 T	25°C
超级电容电压 U_{sc}	400 V
超级电容容量 F	20 F
蓄电池电压（多节串联） U_{bat}	240 V
蓄电池容量 Ah	20 Ah
负载功率 P_{load}	25kW
超级电容 SOC 最大限制 SOC_{sc_max}	80%
超级电容 SOC 最小限制 SOC_{sc_min}	20%
蓄电池 SOC 最大限制 SOC_{bat_max}	80%
蓄电池 SOC 最小限制 SOC_{bat_min}	20%

5.2.1 混合储能平抑功率波动仿真结果分析

光伏电池初始光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$, 1s 时为 $600\text{W}/\text{m}^2$, 2s 时为 $1200\text{W}/\text{m}^2$ 。负载功率不变。

图 5-2 为光伏输出功率和负载功率，红线表示光伏输出功率，蓝线表示负载功率。在 0~1s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，在 1~2s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，在 2~3s 内， $P_{pv} > P_{load}$ 。

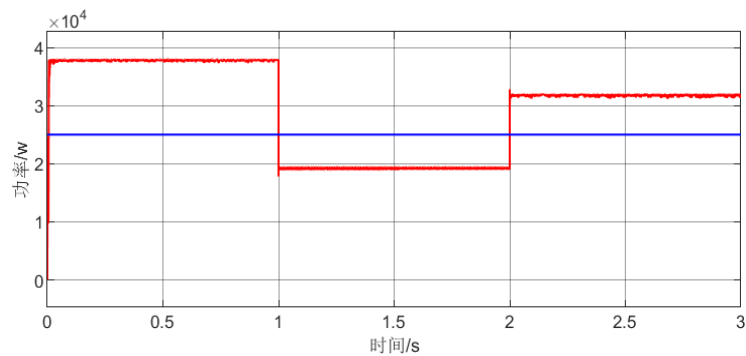


图 5-2 光伏输出功率和负载功率

图 5-3 为光伏微电网直流母线电压，图 5-4 为并网三相电压局部放大图。结合图 5-2、图 5-3 和图 5-4 可知：当光伏微电网发生功率波动时，两种储能对系

统的功率波动进行平抑，维持直流母线电压稳定，保证光伏微电网系统安全稳定运行。

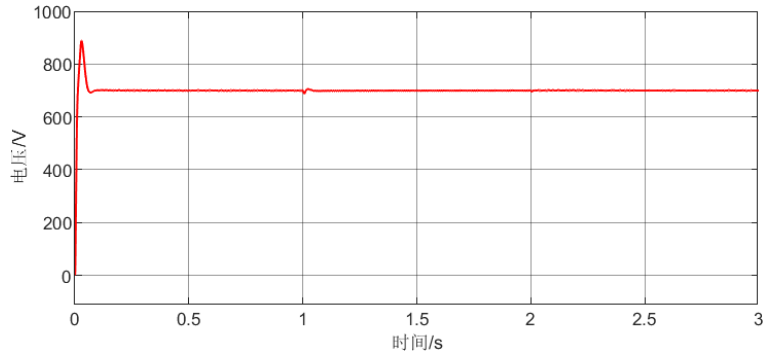


图 5-3 直流母线电压

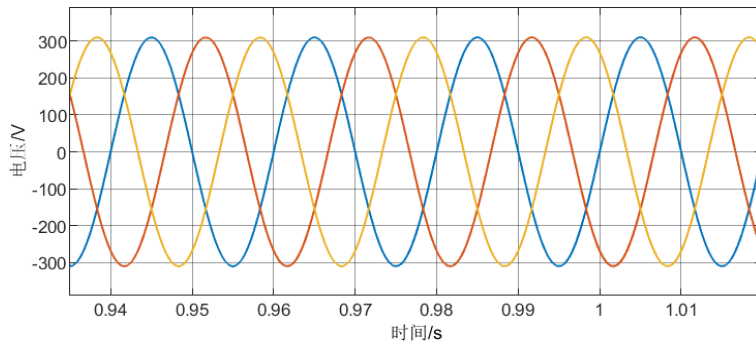


图 5-4 并网三相电压局部放大图

图 5-5 为混合储能系统整体功率，因光伏微电网系统并网运行，混合储能系统承担频率较高的功率，低频功率可与电网进行双向能量交换。

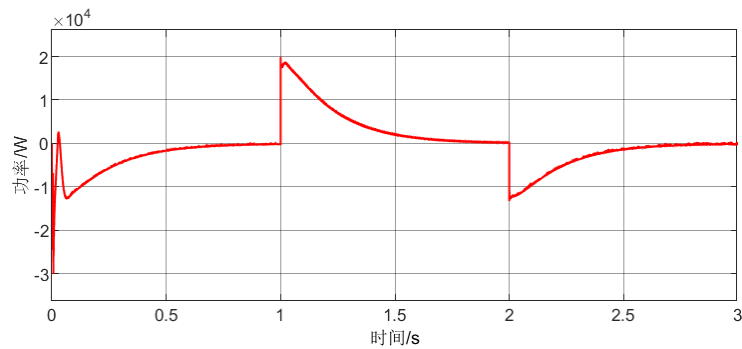


图 5-5 混合储能系统整体功率

图 5-6 和图 5-7 分别为蓄电池和超级电容充放电功率及其局部放大图，黑、红分别表示超级电容和蓄电池功率，图 5-8 为并网功率图。在 0~1s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，蓄电池和超级电容充电，分别承担中、高频功率，经混合储能平抑后的低频功率满足并网要求，传输到电网；在 1~2s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，蓄电池和超级电容放电电，

分别承担中、高频功率，缺额功率由电网补充；同理，在 2~3s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，和 0~1s 内系统工作状态相同。另外，在蓄电池和超级电容充放电功率局部放大图中也可以清晰看到：在第 1s 和第 2s 时刻，光照强度突然变化时，即系统功率突然增大或减少时，超级电容是瞬间响应的，且功率变化较快，蓄电池响应速度和功率变化较慢，符合两种储能装置的特点。

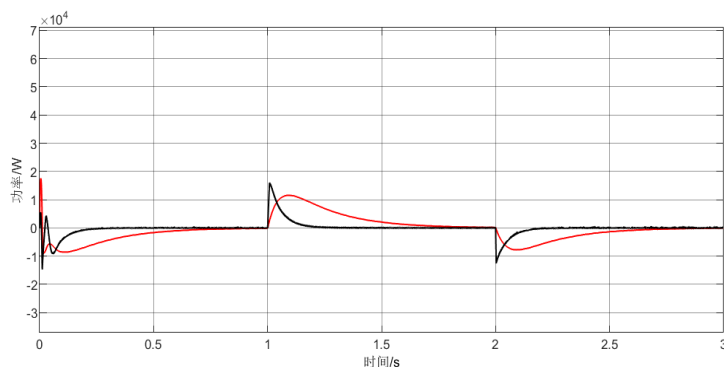


图 5-6 蓄电池和超级电容功率

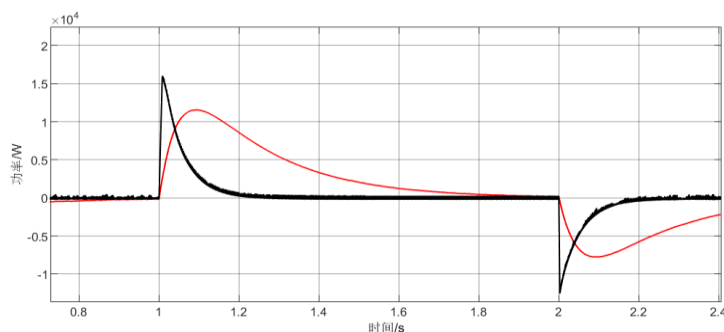


图 5-7 蓄电池和超级电容功率局部放大图

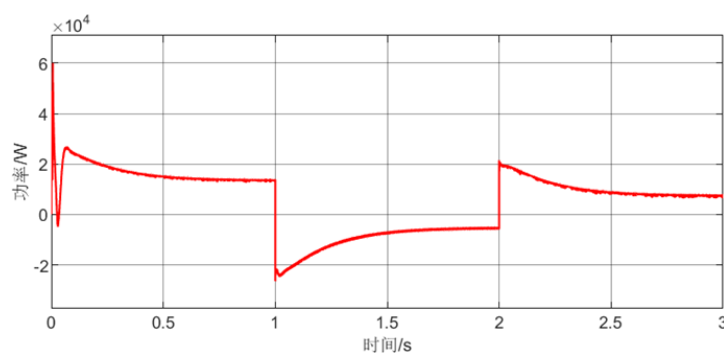


图 5-8 并网功率

图 5-9 和图 5-10 分别为蓄电池和超级电容 SOC，当系统出现功率波动时，混合储能会及时工作，按照策略对功率波动进行平抑。由混储能 SOC 变化曲线也可知，超级电容功率变化较快，用于承担高频功率分量，蓄电池功

率变化较慢，用于承担低频功率分量。混合储能系统会共同工作，优势互补，平抑光伏微电网的功率波动，维持系统安全稳定地运行。

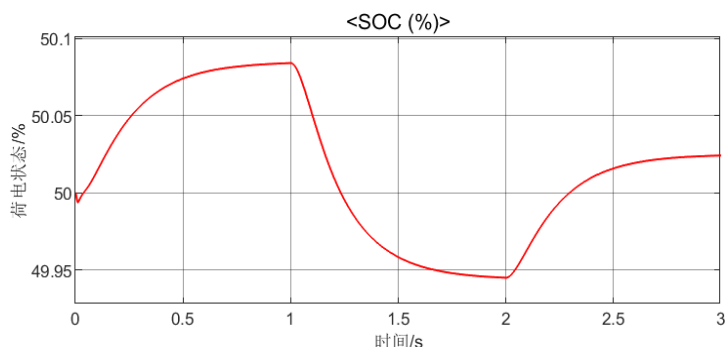


图 5-9 蓄电池 SOC

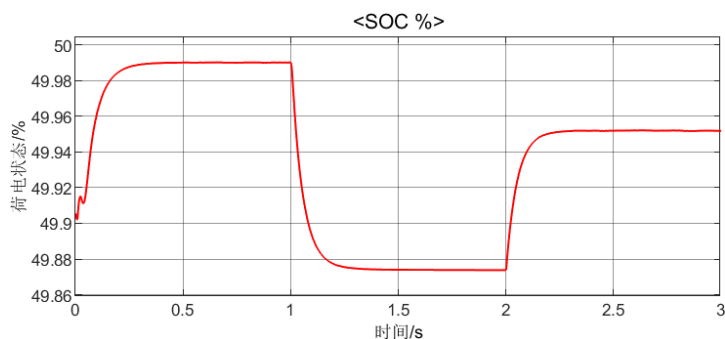


图 5-10 超级电容 SOC

5.2.2 工作区域仿真结果分析

由上章 2.2 理论分析可知，当混合储能工作区域 1、2、4 时需进行二次功率分配，且二次分配公式相同，因此，下面仅对工作区域 1 进行仿真验证。同理，工作区域 6、8、9 亦如此，仅对工作区域 6 进行仿真验证。

初始光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏电池输出功率为 32 kW ，大于直流负载功率； 0.5s 时光照强度下降为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏电池输出功率为 19kW ，小于直流负载功率。光储直流微电网系统直流母线电压和各工作区域的功率二次分配结果仿真如下图所示。

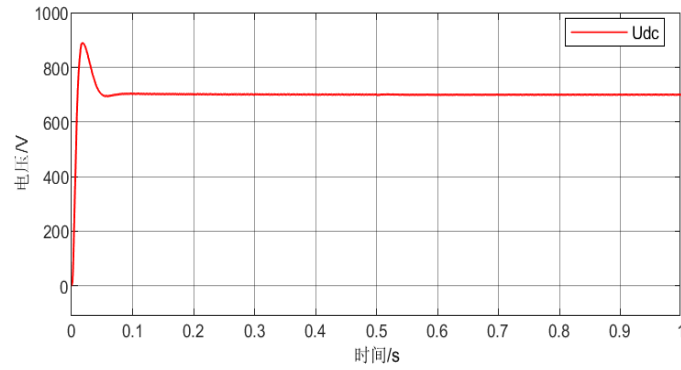


图 5-11 直流母线电压

图 5-11 为光储直流微电网系统直流母线电压，由图可知，该控制策略可以维持直流母线电压稳定。

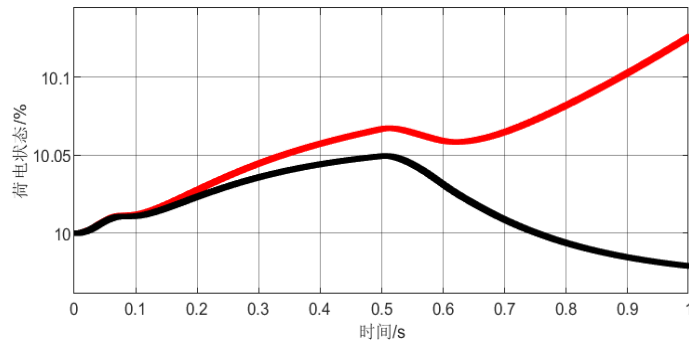


图 5-12 工作区域 1 蓄电池 SOC

图 5-12 为工作区域 1 的蓄电池 SOC 曲线，黑、红线分别表示传统功率分配策略和二次功率分配策略下的蓄电池 SOC 曲线。在工作区域 1 时，蓄电池处于过放区，为防止损害储能单元，应对蓄电池进行充电。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池均充电，满足充电要求；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，传统功率分配策略下的蓄电池放电，蓄电池出现过放现象，在二次功率分配策略下蓄电池充电，有效防止蓄电池出现过放的现象。

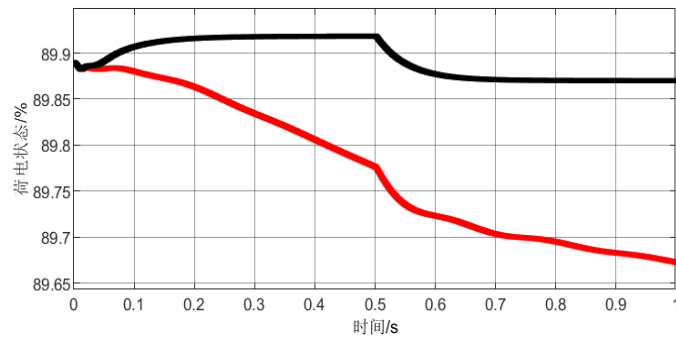


图 5-13 工作区域 1 超级电容 SOC

图 5-13 为工作区域 1 内的超级电容 SOC 曲线，黑、红色线分别表示传统功率分配策略和二次功率分配策略下的超级电容 SOC 曲线。在工作区域 1 时，超级电容处于过充区，为防止损害储能单元，超级电容应放电。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，传统功率分配策略下的超级电容充电，超级电容出现过充现象，在二次功率分配策略下超级电容放电，有效防止超级电容出现过充的现象；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池均放电，满足放电要求。

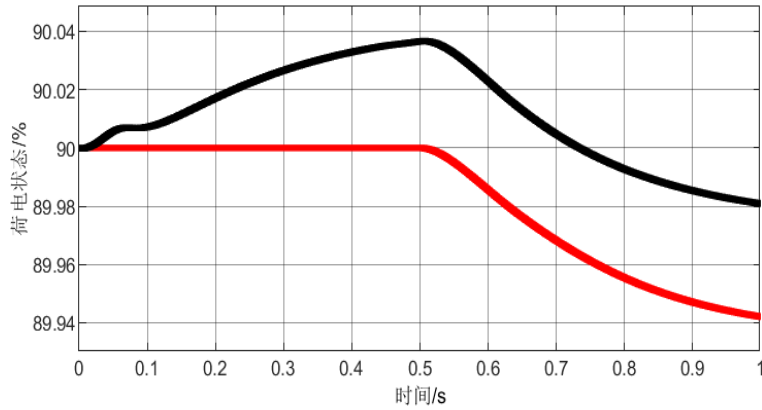


图 5-14 工作区域 3 蓄电池 SOC

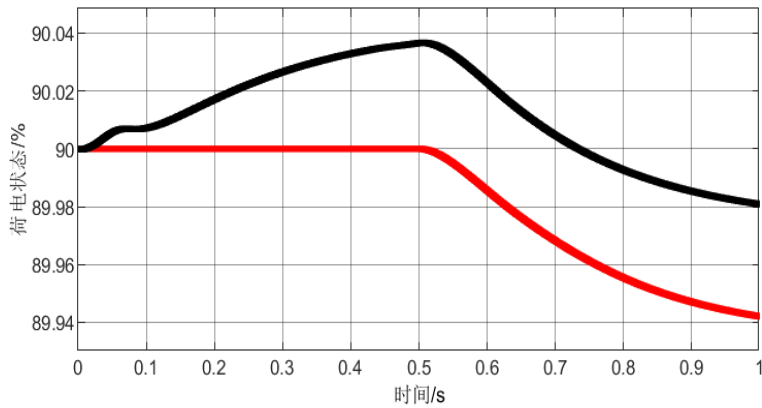


图 5-15 工作区域 3 超级电容 SOC

图 5-14 和图 5-15 分别为工作区域 3 内的蓄电池 SOC 曲线和超级电容 SOC 曲线，黑、红线表示意义分别同图 5-12 和图 5-13 一致。在工作区域 3 时，蓄电池和超级电容均处于过充区，为防止损害混合储能单元，蓄电池和超级电容应放电或者停止工作。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，在传统功率分配策略下的蓄电池和超级电容均充电，蓄电池和超级电容出现过充现象，在二次功率分配策略下蓄电池和超级电容停止工作，有效防止蓄电池和超级电容出现过充的现象；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池和超级电容均放电，满足放电要求。

在 0~0.5s 内，在二次功率分配策略下两种储能单元均停止工作，虽有效防止混合储能出现过充的现象，但此时系统功率不平衡。此时的不平衡功率不能满足电网对并网功率的要求，不能直接并网。为解决这一问题，可以选择增加负载来消耗此不平衡功率或者光伏发电退出 MPPT 模式，暂时减小发电功率，维持系统功率平衡。

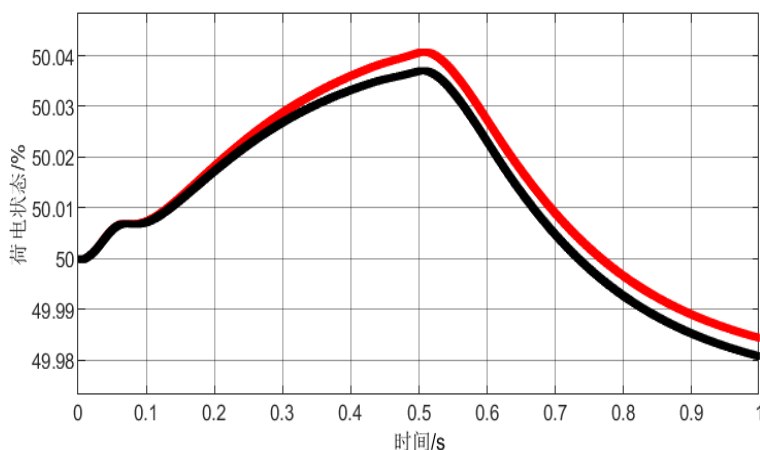


图 5-16 工作区域 5 蓄电池 SOC

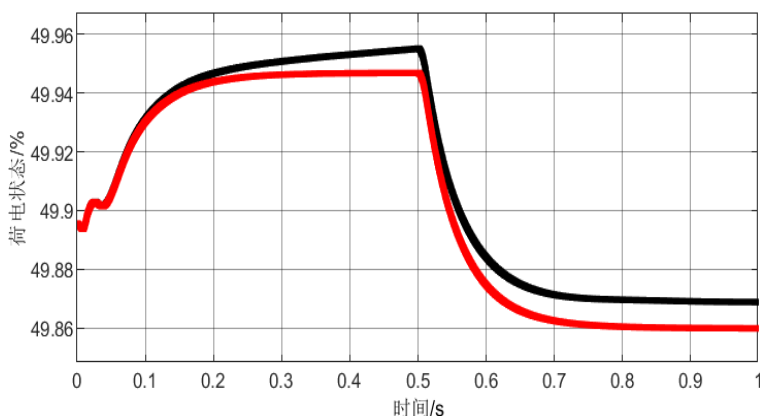


图 5-17 工作区域 5 超级电容 SOC

图 5-16 和图 5-17 分别为工作区域 5 内的蓄电池 SOC 曲线和超级电容 SOC 曲线，黑、红线表示意义分别同图 5-12 和图 5-13 一致。在工作区域 5 时，蓄电池和超级电容均处于正常工作区。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，两种储能单元均充电；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，两种储能单元均放电。两种控制策略下的储能单元 SOC 曲线图完全一致。但为了把两种控制策略的效果都展示出来，在 0~0.5s 内设置两个光伏电池的光照强度不一样。

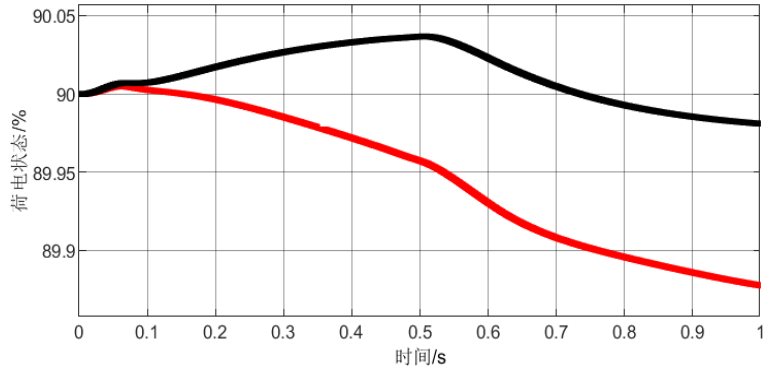


图 5-18 工作区域 6 蓄电池 SOC

图 5-18 为工作区域 6 内的蓄电池 SOC 曲线，黑、红线表示意义同图 5-12 一致。在工作区域 6 时，蓄电池处于过充区，为防止损害储能单元，蓄电池应放电。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，传统功率分配策略下的蓄电池充电，蓄电池出现过充现象，在二次功率分配策略下超级电容放电，有效防止蓄电池出现过充的现象；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池均放电，满足放电要求。

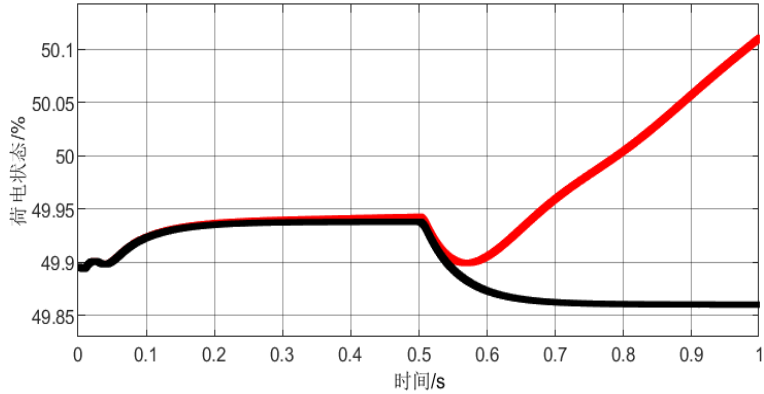


图 5-19 工作区域 6 超级电容 SOC

图 5-19 为工作区域 6 内的超级电容 SOC 曲线，黑、红线表示意义同图 5-13 一致。在工作区域 6 时，超级电容处于正常工作区。在 0~0.5s 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池均充电，满足充电要求；在 0.5~1s 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，传统功率分配策略下的超级电容放电，而二次功率分配策略下蓄电池充电，吸收超级电容释放的部分功率，有效防止超级电容出现过充的现象。

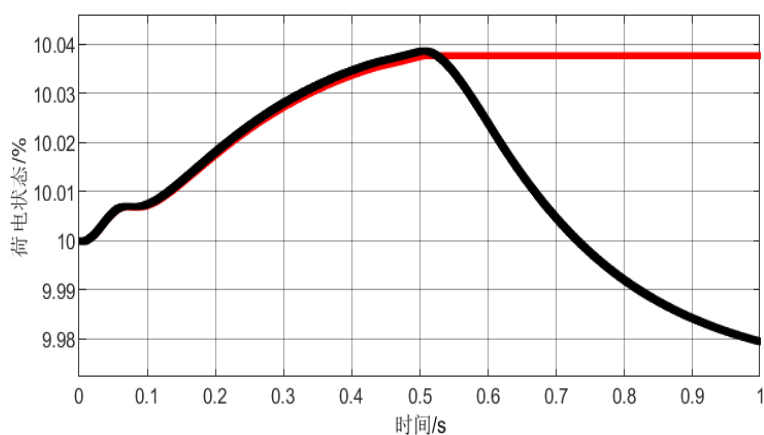


图 5-20 工作区域 7 蓄电池 SOC

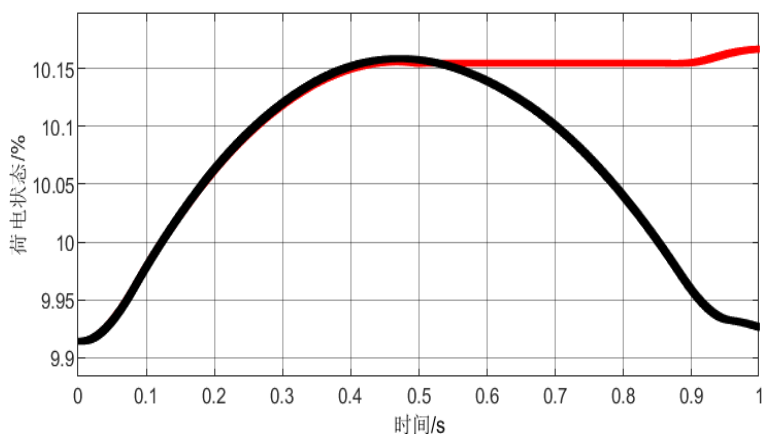


图 5-21 工作区域 7 超级电容 SOC

图 5-20 和图 5-21 分别为工作区域 7 内的蓄电池 SOC 曲线和超级电容 SOC 曲线，黑、红线表示意义分别同图 5-12 和图 5-13 一致。在工作区域 7 时，蓄电池和超级电容均处于过放区，为防止损害混合储能单元，蓄电池和超级电容应充电或者停止工作。在 $0 \sim 0.5\text{s}$ 内， $P_{pv} > P_{load}$ ，在两种功率分配策略下蓄电池和超级电容均充电，满足充电要求；在 $0.5 \sim 1\text{s}$ 内， $P_{pv} < P_{load}$ ，在传统功率分配策略下的蓄电池和超级电容均放电，蓄电池和超级电容出现过放现象，在二次功率分配策略下蓄电池和超级电容停止工作，有效防止蓄电池和超级电容出现过充的现象。

在 $0.5 \sim 1\text{s}$ 内，在二次功率分配策略下两种储能单元均停止工作，虽有效防止混合储能出现过放的现象，但此时系统功率不平衡。因光伏微电网系统并网运行，不平衡功率也可直接由电网进行补偿。

5.3 本章小结

本章首先在 Matlab/Simulink 中搭建了光储直流微电网模型，模型包括光伏发电系统、混合储能系统、负载以及光伏并网系统。接着对提出的考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略和传统功率分配策略进行仿真验证、对比。针对两种储能装置 SOC 划分的 9 个工作区域，因工作区域 1、2、4 二次功率分配规则一致，只对工作区域 1 进行仿真验证，同理，工作区域 6、8、9 亦如此，只对工作区域 6 进行仿真验证，本章针对 5 个工作区域进行了详细仿真，仿真结果与理论分析结果一致。采用二次功率分配策略，防止两种储能装置过充过放。

第6章 总结与展望

6.1 全文总结

由于光伏发电系统受光照强度和温度影响,会导致光伏微电网系统出现功率波动的问题,这不仅会使得光伏发电不可靠,也会造成电网不稳定。为解决这一问题,可以将混合储能系统加入到光伏微电网系统中,混合储能可以根据自身的特性对系统中的功率波动进行平抑,维持微电网安全稳定地运行。但由于储能装置自身容量有限,可能会出现过充过放的现象,影响混合储能的使用寿命。因此,本文提出了一种考虑双重 SOC 的混合储能系统二次功率分配策略,对两种储能的 SOC 划分为 9 个工作区域,根据实时 SOC 和实际功率进行二次功率分配,这种方法不仅能平抑系统的功率波动,也能有效防止储能单元过充过放。具体研究内容和结论如下:

(1) 分析光伏微电网系统结构、混合储能系统结构及控制策略研究。对光储直流微电网系统中的各个组成部分进行介绍,接着分析了光伏发电单元,对其进行建模分析并仿真,然后对光伏发电单元的控制策略进行研究。分析了常用储能装置的优缺点,选择蓄电池和超级电容组成混合储能系统。最后介绍了混合储能系统的两种连接结构,并对双向 DC/DC 变换器进行建模并分析其工作原理,又详细阐述了充放电控制策略。

(2) 详细的介绍了光伏微电网功率波动的原因,先是利用二阶低通滤波器法对系统不平衡功率进行高、低频分解,接着用混合储能系统承担高、低频功率,平抑了系统的功率波动。混合储能系统在平抑光伏微电网功率波动时发挥着关键作用,然而由于储能装置自身容量的限制,会造成储能装置出现过充过放的现象,影响其使用寿命。为了解决这一问题,提出了一种二次功率分配策略,该策略综合考虑了两种储能装置的荷电状态,并通过精细划分工作区域和优化功率分配,防止储能装置过充过放。

(3) 在 Matlab/Simulink 中搭建光储直流微电网模型,对控制策略进行仿真验证。

6.2 工作展望

由于客观上时间原因以及本人科研能力有限，本课题仅对混合储能平抑光伏微电网的功率波动进行初步研究，后面提出了二次功率分配的控制策略，对二次功率分配进行理论分析以及仿真验证，后续还可以在一下几个方面继续开展工作：

（1）本文选取的混合储能装置为超级电容和蓄电池这两种储能单元，没有考虑更清洁、环保的其它新型储能装置。

（2）本文在进行混合储能二次功率分配时，部分特殊场景下采取增加负载来维持微电网系统的稳定，没有考虑到用户侧实际功率需求，这一影响因素还有待进一步研究。

（3）本文仅对光储直流微电网将进行研究，后续还需对交流微电网或者交直流混合微电网进行研究。

参考文献

- [1] 吴笛. 新能源接入智能电网的技术分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 554.
- [2] 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(7): 2983-2994.
- [3] 张云鹏. “双碳”背景下光伏产业发展政策研究[J]. 节能与环保, 2022(12): 30-31.
- [4] 舟丹. 太阳能光伏产业发展现状[J]. 中外能源, 2023, 28(2): 50.
- [5] Tajamal K, Omar M, Usman M, etc. A Review on the Hybrid Solar-Wind-Pumped Hydroelectric Energy Storage Systems[C]//International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). Kuala Lumpur, Malaysia, 2022: 1-5.
- [6] 张鸽. 太阳能光伏发电技术现状及其发展方向研究[J]. 光源与照明, 2023(12): 132-134.
- [7] Zhang X, Huang C, Shen J. Energy Optimal Management of Microgrid With High Photovoltaic Penetration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 128-137.
- [8] 赵欣宇. 光伏发电系统功率预测的研究与实现[D]. 华北电力大学, 2012.
- [9] 申舒琪. 光伏微电网能量优化研究[D]. 太原理工大学, 2021.
- [10] 沈严. 分布式光伏微电网供能系统的分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(2): 64-65.
- [11] 张守一. 分布式发电微网系统建模及控制策略研究[D]. 北京交通大学, 2014.
- [12] Zhang G, Wang Y, Guo P, etc. Characteristics Analysis of Short-Circuit and Ground Fault in Photovoltaic Storage and Charging Integrated DC Microgrid[C]//International Conference on Power System Technology (PowerCon). Jinan, China, 2023: 1-6.
- [13] Zhang K, Zou G, Rong Y, etc. Economic Energy Management of Microgrid Considering Multiple Factors of Source and Storage[C]//. 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China, 2023: 838-842.

-
- [14] Xu Y, Fan W. Power Coordination Control of Hybrid AC/DC Microgrid Based on Battery's State of Charge[C]//. IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS). Jinan, China, 2020: 897-902.
 - [15] Yan N, Zhang B, Li W, etc. Hybrid Energy Storage Capacity Allocation Method for Active Distribution Network Considering Demand Side Response[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-4.
 - [16] 田洪福. 光伏发电系统接入配电网的保护策略研究[D]. 四川师范大学, 2020.
 - [17] 杜林. 孤岛型直流微电网能量协调控制策略研究[D]. 武汉理工大学, 2019.
 - [18] 张晓瑛. 风力和光伏发电技术接入电网的电压控制方法探析[J]. 光源与照明, 2023(12): 80-82.
 - [19] 侯汝印. 光伏发电中储能系统的容量配置及运行技术研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023.
 - [20] 李相男. 混合储能技术在微电网中的应用[D]. 燕山大学, 2014.
 - [21] Wen T, Zhang Z, Lin X, etc. Research on Modeling and the Operation Strategy of a Hydrogen-Battery Hybrid Energy Storage System for Flexible Wind Farm Grid-Connection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 79347-79356.
 - [22] 刘君瑶. 考虑“源荷储”协调互动的并网型光伏微电网调度策略研究[D]. 华中科技大学, 2020.
 - [23] 李彦哲, 郭小嘉, 董海鹰, 等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 123-128.
 - [24] 武鑫, 尚文举, 马志勇, 等. 抽水蓄能-飞轮混合储能系统协调控制方法[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 468-476.
 - [25] 程曦. 光储直流微电网系统控制策略研究[D]. 武汉理工大学, 2019.
 - [26] 易宗澳. 基于改进下垂控制的直流微电网协调运行研究[D]. 湖南工业大学, 2021.
 - [27] 陈裕. 分布式新能源发电的混合储能控制策略研究[D]. 华北理工大学, 2023.
 - [28] Yang J, Liu Y, Wang X, etc. Zero-carbon Emission Microgrid Control Based on Photovoltaic Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage[C]. International Conference on Smart Electrical Grid and Renewable Energy (SEGRE). Changsha,

- China, 2023: 276-281.
- [29] Cui J, Tian G, Liu G, etc. Power Distribution Control Strategy of Hybrid Energy Storage System in Isolated DC Microgrid[C]//. IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE). Wuhan, China, 2021: 300-305.
- [30] 黄文俊. 基于混合储能的光伏发电并网控制策略研究[D]. 东华理工大学, 2018.
- [31] 吴炎. 直流微电网中混合储能三端口 DC/DC 变换器研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [32] 宋元明, 刘亚杰, 金光, 等. 锂离子电池/超级电容器混合储能系统能量管理方法综述[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 652-668.
- [33] 朱志鹏. 基于多场景变权的 UPFC 在风电并网系统中的多目标优化配置研究[D]. 合肥工业大学, 2019.
- [34] 张大波, 朱志鹏, 连帅, 等. 基于多场景变权多目标优化的 UPFC 在风电并网系统中的配置方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 638-645.
- [35] 徐荣松. 风光互补分布式发电系统中的能量管理研究[D]. 东北大学, 2020.
- [36] 李春玲. 基于离散粒子群算法的光伏微电网储能容量优化配置[J]. 电工技术, 2023(22): 93-96.
- [37] 贾宏刚, 岳园园, 严欢, 等. 基于粒子群算法的混合储能系统容量优化研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(10): 282-287.
- [38] 方伟中, 张勇军. 基于粒子群优化神经网络光伏并网最大功率点跟踪技术研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(8): 1181-1185.
- [39] Liu G, Song D, Li J. Economical Optimal Configuration of Electric-heat Hybrid Energy Storage System Based on Improving Wind Power Consumption[C]//. IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China, 2020: 1680-1684.
- [40] Si D, Tang Z, Li L, etc. Reliability Evaluation of Hybrid Energy Storage System Considering Flexible Resources of Source, Network and Load[C]//. IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Chengdu,

- China, 2022: 144-148.
- [41] Wang J, Wang Y, Wang L, etc. Optimization Configuration of Hybrid Energy Storage System Capacity with Grid-connecting Wind Power[C]//. IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE).Wuhan, China, 2022: 1-5.
- [42] An Y, Wu D, Wang H, etc. Hybrid Wavelet Packet-Fuzzy Control for Energy Storage in Photovoltaic DC Microgrid[C]//. 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Hefei, China, 2022: 1732-1736.
- [43] Akarne Y, Essadki A, Nasser T, etc. Enhanced Power Optimization of Photovoltaic System in a Grid-Connected AC Microgrid Under Variable Atmospheric Conditions Using PSO-MPPT Technique[C]. 4th International Conference on Clean and Green Energy Engineering (CGEE). Mianyang, China, 2023: 19-24.
- [44] Yan H W, Farivar G G, Tafti H D, etc. Simplified Hybrid Control Strategy for Stand-Alone DC Microgrid with Photovoltaic System to Extend Battery Lifespan[C]//. IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia). Vancouver, Canada, 2021: 303-307.
- [45] Calloquispe-Huallpa R, Darbali-Zamora R, Aponte-Bezares E E, etc. Energy Management in a Dynamic Microgrid Using Genetic Algorithms[C]//. IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Puerto Rico, United States, 2023: 1-8.
- [46] Liu Y, Bu H, Liu K, etc. A VSG-based Grid-Connected Photovoltaic Generation System with Hybrid Energy Storage[C]//. IEEE 4th China International Youth Conference On Electrical Engineering (CIYCEE). Chengdu, China, 2023: 1-5.
- [47] 张源. 平抑光伏功率波动的混合储能功率配置以及控制策略研究[D]. 浙江大学, 2023.
- [48] Cong L, Chuanpu Z, Kuan W, etc. Multi-objective Capacity Optimal Allocation Of Photovoltaic Microgrid Energy Storage System Based On Time-sharing Energy Complementarity[C]. International Conference on Power System

- Technology (POWERCON). Online, 2021: 1123-1129.
- [49] Tianqi L, Guochen Y, Jing G, etc. Research on control strategy of storage and DC hybrid energy storage based on new energy microgrid[C]//. IEEE 2nd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA). Dalian, China, 2022: 328-333.
- [50] 沈继宝. 光伏发电系统与储能装置的协调运行以及控制研究[J]. 中国设备工程, 2024(4): 99-101.
- [51] 张永新, 李飞, 张榴晨, 等. 基于线路阻抗聚类的分布式光伏电站等效建模[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 312-318.
- [52] 卢慧斌. 基于最大功率点跟踪的室内环境能量收集电路设计与实现[D]. 东南大学, 2022.
- [53] 马晓磊, 李永光, 段鹏飞, 等. 光伏发电参与电网供电功率稳定性调节技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 105-110.
- [54] 胡佳. ZnO 电子选择层的制备方法对反向有机太阳能电池性能的影响[D]. 苏州大学, 2013.
- [55] 夏天豪, 陶煜. 太阳能电池的原理、发展及测量参数[J]. 上海计量测试, 2011, 38(5): 41-43.
- [56] 吴增强, 邹海荣, 魏浩. 新型面积差法光伏 MPPT[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 87-91.
- [57] 甄子阳. 电网友好型交直流混合微电网协调控制策略研究[D]. 安徽工程大学, 2023.
- [58] 高旭. 分布式储能对配电网电能质量的影响[D]. 山东大学, 2020.
- [59] 王日明. 三相光伏发电并网逆变器研究与设计[D]. 华中科技大学, 2012.
- [60] 刘琳. 光伏并网发电系统综合控制与分析[D]. 华北电力大学, 2013.
- [61] 涂文奇. 光伏发电系统功率控制策略研究[D]. 华中科技大学, 2019.
- [62] 张海钰. 单相光伏并网发电系统关键技术的研究[D]. 浙江大学, 2011.
- [63] 任建红. 光伏微电网混合储能控制策略研究[D]. 中北大学, 2021.
- [64] 曾云路. 压力对软包锂离子电池性能及寿命的影响研究[D]. 湖南大学, 2020.
- [65] 潘佳琪. 电池管理系统 SOC 估计及均衡策略优化研究[D]. 北京交通大学,

2022.

- [66] 雷旭, 张春玲, 于明加, 等. 退役电池快速检测分类方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 213-222.
- [67] 冯继峰, 周美兰, 肖建峰. 纯电动汽车复合电源的仿真与实验[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2018, 35(3): 356-363.
- [68] 李聪, 秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 426-434.
- [69] 邵泽广, 李永丽, 李怡, 等. 计及混合储能寿命损耗的光伏功率平抑策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(2): 97-104.
- [70] 郭潇潇. 基于混合储能系统的风储微电网运行控制策略[D]. 太原理工大学, 2021.
- [71] 汪凯琳, 许仪勋, 潘瑞媛, 等. 考虑风光可靠性的微电网混合储能优化配置[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 39-44+50.

攻读硕士期间取得的学术成果

- [1] Ao L, Qigong C, Junqiu W. Research on secondary power allocation strategy of two types of energy storage units considering dual SOC[C]//.2024 3rd International Conference on Smart Grid and Green Energy (ICSGGE). Chengdu, China, 2024.

致谢

在完成这篇硕士学位论文之际，我深感内心的激动与感慨。回顾这段学术旅程，我得到了许多人的帮助、支持和鼓励，没有他们，我无法独自完成这一重要任务。在此，我谨向所有帮助过我的人表示最诚挚的感谢。

首先，我要特别感谢我的导师陈其工教授。从论文的选题、开题、实验设计到论文的撰写和修改，每一步都离不开导师的悉心指导和耐心教诲。导师严谨的学术态度、深厚的学术造诣和独特的研究视角，使我受益匪浅。在学术上，他是我前进的灯塔。我深感荣幸能够成为他的学生，并在此表示由衷的敬意和感谢。

其次，我要感谢实验室的同学们。在论文撰写过程中，我们共同探讨问题、分享经验、互相鼓励，度过了许多难忘的时光。他们的陪伴和支持让我在学术道路上不再孤单，也让我更加坚定了自己的研究方向。在此，我向他们表示深深的感谢。

此外，我还要感谢我的家人。他们一直是我坚强的后盾，在我遇到困难和挫折时给予我无微不至的关怀和鼓励。他们的爱和支持让我能够勇往直前，不断追求自己的梦想。

同时，我也要感谢学校为我提供的优质学术资源和良好的学习环境。学校的实验室和各类学术活动，为我的论文撰写提供了极大的便利和支持。

最后，我要感谢所有参与论文评审和答辩的专家和教授们。您的宝贵意见和建议使我的论文更加完善，也为我未来的学术发展指明了方向。

再次感谢所有帮助过我的人，你们的支持和鼓励是我前进的动力。在未来的道路上，我将不忘初心、砥砺前行，为实现自己的人生价值和社会价值而努力奋斗。