分类号_____ 密级_____

U D C_____ 编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

能源互联网建模，分析，与优化理论研究

Energy Internet System Modelling, Analysis, and Optimization

华 昊 辰

工作完成日期 2016 年 9 月—2020 年 3 月

报告提交日期 2020 年 3 月

清 华 大 学 （北京）

2020 年 3 月

能源互联网建模，分析，与优化理论研究

Energy Internet System Modelling, Analysis, and Optimization

博　士　后　姓　名：华昊辰

流动站（一级学科）名称：计算机科学与技术

专　业（二级学科）名称：计算机软件与理论

合　作　导　师：邢春晓（研究员）

研究工作起止日期 2016 年 9 月-2020 年 3 月

摘 要

本文主要针对区域能源互联网进行动态系统建模、分析和优化理论研究。我们将以分布式可再生能源发电为主的能源互联网场景建模成随机系统，分别针对微网内直流母线电压控制、能量路由器最优和鲁棒控制、能源互联网自底向上能量管理机制、能源互联网内最优能量协调控制，四个问题进行具体研究。

主要研究结果如下：

1. 使用数学解析方法，获取了非脆弱鲁棒H_∞控制策略，使得能源互联网场景下基于直流母线设计的微网实现系统随机鲁棒性，并能够通过该控制策略，承受、抵御来自可再生能源发电、负荷功率波动、外部能量路由输入/输出等具有随机性的外部扰动，实现直流母线电压稳定抗干扰。

2. 通过混合H_2/H_∞控制理论设计基于直流母线的能量路由器控制策略，使得以下目标被同时满足：能量路由器直流母线电压稳定抗干扰；优先实现能量路由器所连接的本地设备能量供需平衡；能量路由器所连接可控发电设备和储能设备合理使用。

3. 基于采样的数据信息，提出联合使用神经网络和随机过程对光伏、负载动态功率进行建模，可以实现对两者功率大致趋势及动态随机波动的准确描述。针对能源互联网自底向上能量管理目标，提出基于动态规划的方法求解随机优化问题。

4. 通过深度强化学习方法，解决了能源互联网系统的最优能量管理问题，具体优化目标包括：最小化可控发电设备的发电成本，延长储能系统的使用寿命，实现能源互联网合理的能量调度准则。一个“无模型”的

方法被用于求解此能量管理问题。这样可以跳过繁琐的系统建模步骤，成功地避免系统建模时参数量测误差，使得所获得的控制策略更加可靠。

针对区域能源互联网相关的一系列优化控制问题，本文的研究思路从使用经典的随机控制手段，逐步发展到将随机控制和人工智能手段相结合。研究方法具有较强学科交叉性质，研究结果可以为今后开展能源互联网示范工程提供坚实的理论基础。

关键词：能源互联网，微网，能量路由器，随机控制，神经网络，强化学习

Abstract

This paper focuses on the dynamical system modeling, analysis and optimization of regional energy Internet. We model the energy Internet scenario in which power generation is mainly based on distributed renewable energy sources as a stochastic system, and we study four problems specifically, namely, DC bus voltage control in microgrid, optimal and robust control of energy router, bottom-up energy management scheme in energy Internet, and optimal energy management strategy in energy Internet.

The main results are as follows:

1. By using the analytical methods in mathematics, a non-fragile robust H_∞ control strategy is obtained, such that robustness of the DC microgrid system in the energy Internet scenario can be realized. Through this control strategy, the system can maintain the DC bus voltage stability and anti-interference against the external disturbances from renewable power generation, load power fluctuation, and external energy routing input/output.

2. A class of mixed H_2/H_∞ controller is designed for a DC bus-based energy router within the scenario of an energy Internet, such that the following targets can be achieved simultaneously. The DC bus voltage deviation within the energy router system is regulated. The autonomous power supply-demand balance within the considered energy router is achieved with priority. Besides, the rational utilization of controllable power generation devices and energy storage devices is realized.

3. Based on the sampled data information, we propose to use both neural network and stochastic process to model the dynamic power of photovoltaic panel and load, which can accurately describe both the general trend and the dynamic randomness of the power. Aiming at the bottom-up energy

management goal of energy Internet, a method based on dynamic programming is proposed to solve the formulated stochastic optimization problem.

4. Through deep reinforcement learning method, the optimal energy management issue of energy Internet system is solved. The specific optimization objectives include minimizing the cost of utilizing controllable power generation equipment, prolonging the service life of energy storage devices, and realizing the rational energy scheduling criteria of energy Internet. A “model-free” approach is used to solve such energy management problem. In this way, the complex steps of system modeling can be skipped, and the error of parameter measurement can be avoided successfully, which makes the control strategy more reliable.

Aiming at a series of optimization problems related to energy Internet, the research idea of this thesis is gradually developed from using classical stochastic control method to combining stochastic analysis with artificial intelligence method. It is notable that the specific research methods have strong interdisciplinary nature, and the research results can provide a solid theoretical basis for the future energy Internet demonstration projects.

Keywords: energy Internet, microgrid, energy router, stochastic control, neural network, reinforcement learning.

目录

第一章 绪论 1
1.1 能源互联网概述 1
1.2 研究报告概要 4
第二章 参数带不确定性的随机非线性能源互联网系统电压控制：非脆弱鲁棒$H\infty$方法 6
2.1 介绍 6
2.2 系统建模 9
2.3 问题架构 11
2.4 非脆弱鲁棒随机稳定化 16
2.5 非脆弱鲁棒$H\infty$控制 19
2.6 数值仿真 21
2.7 结论 27
第三章 基于能源互联网的能量路由器鲁棒混合$H2/H\infty$控制器设计 29
3.1. 介绍 29
3.2 系统建模 30
3.3 问题架构 34
3.4 混合$H2/H\infty$控制问题求解 38
3.5 数值仿真 40
3.6 结论 45
第四章 能源互联网随机优化控制：一个自底向上的能量管理方法 47
4.1 介绍 47
4.2 系统建模 50
4.3 随机最优控制问题架构和解决方案 56
4.4 数值仿真 60
4.5 结论 66
第五章 基于深度强化学习方法的能源互联网最优能量管理策略 68
5.1 介绍 68
5.2 系统描述 71
5.3 优化控制问题解决方案 77
5.4 数值仿真 83
5.5 结论 94
第六章 总结与展望 95
6.1 总结 95
6.2 展望 95
致谢 97
参考文献 98
个人简历与发表的学术论文 109

符 号 表

BES	Battery energy storage. 电池储能
DEG	Diesel engine generator. 柴油发电机
EI	Energy Internet. 能源互联网
ER	Energy router. 能量路由器
FC	Fuel cell. 燃料电池
FES	Flywheel energy storage. 飞轮储能
MT	Micro-turbine. 微型涡轮发电机
MG	Microgrid. 微网
NN	Neural network. 神经网络
PV	Photovoltaic panel. 光伏发电机
RNN	Recurrent neural network. 循环神经网络
SOC	State of charge. 荷电状态
WTG	Wind turbine generator. 风力发电机
ΔP_{BES}	BES 功率变化
ΔP_{DEG}	DEG 功率变化
ΔP_{ER}	ER 功率变化
ΔP_{FC}	FC 功率变化
ΔP_{FES}	FES 功率变化
ΔP_{Load}	负荷功率变化
ΔP_{MT}	MT 功率变化
ΔP_{PV}	PV 功率变化
ΔP_{WTG}	WTG 功率变化

T_{BES}	BES 时间常数
T_{DEG}	DEG 时间常数
T_{ER}	ER 时间常数
T_{FC}	FC 时间常数
T_{FES}	FES 时间常数
T_{MT}	MT 时间常数
T_{PV}	PV 时间常数
T_{WTG}	WTG 时间常数
Δf	频率偏差
ΔV	电压偏差

第一章 绪论

1.1 能源互联网概述

如今，人类正面临着环境污染，气候变化，石油危机等全球性挑战。可再生能源技术和现代信息技术的改进对这些问题的处理有着启发式的意义。近年来，随着全球环境问题的恶化和可再生能源技术的发展，研究人员越来越倾向于使用可再生能源，如风能、太阳能、水力发电等[1], [2], [3]。尽管可再生能源具有可持续和环境友好等优点，它们存在一些固有缺陷。如，可再生能源的发电量难以精确预测，大多取决于环境条件[4], [5]，导致其接入传统电力系统有巨大障碍。另一方面，微电网（简称：微网）被认为是解决传统电力系统所面临挑战的有效途径[6], [7]。当大量分布式可再生能源接入微网时，如果没有合适的管控，微网很难达到可靠的功率平衡（特别是孤岛微网）[8], [9], [10], [11]。

在未来，当大量可再生能源资源被作为能源系统供能的骨干支撑时，迫切需要实现能源基础设施本质的转变和升级[7],[12]。在针对现有能源系统信息化和智能化控制的智能电网基础上，里夫金（Rifkin）提出了一个能源和信息集成的新型能源系统，它首次被命名为“能源互联网”[13]。

能源互联网融合了最先进的能源技术和信息技术，为能源控制和传输提供了一个基础平台[14]。基于互联网的启发，区域能源互联网将微网视为未来能量系统端的基础设施，允许大量可再生能源的接入[15], [16]。能源互联网可以同时实现能量点对点交换和双向能量流动[17]。作为一种新型的能源架构，能源互联网可以与传统电网兼容，充分利用分布式可再生能源[18]。能源互联网的架构还能为用户提供一个交流与共享的平台[19]，并被认为可以促进能源产业链的整合，形成供需互动的新贸易机制[20]，

实现能源交易和需求响应管理[21]。关于能源互联网的基础设施、特性、架构、网络拓扑，和其他方面的研究工作，具体可以参见文献 [16], [22], [23], [24], [25], 等。

文献 [22]指出，能源互联网可以被视为智能电网的 2.0 版本。能源互联网是基于互联网的广域网，其直接集成信息和能量，以主电网为骨干网，而局域网可以是微电网或分布式能源。基于文献 [15], [16], [25], 能源互联网的基本能量管理准则是优先地、自主地实现单个微网功率供需平衡。如果该平衡难以实现，应当施加广域网络的能量交换。与其他形式的电力系统相比，能源互联网具有许多关键的技术特点。首先，在可再生能源高渗透下，能源互联网的能量控制与管理与传统电网有很大的区别[26]。值得注意的是，分布式可再生能源将成为未来能源互联网的主体，其存在着不确定性、功率输出间歇性等缺陷[27]。同时，当考虑电能交易时，实时电价的变化也具有随机性[28]。因此，出于能源互联网系统中的动态随机特性，相关的控制、优化和调度问题正变得越来越具有挑战性[29]。更重要的是，能源互联网运行在一个高信息量的环境中。分布式发电接入、储能和需求侧响应带来了海量数据，包括气象信息、用户功率特性和储能状态[30]。随着先进测量技术的普及和应用，能源互联网中具有测量功能的智能终端数量将大幅增加，生成的数据量也将大幅增长[31]。因此，能源互联网可以理解为一个由物质、能量和信息深度耦合的系统[32]。作为一个社会、信息、物理相互依存的超大规模复杂网络，能源互联网比传统电网具有更大的开放性和系统复杂性[33]。

为了实现能源网络的互联调度，提高能源生产和分配水平，研究人员提出并设计了一种新型的电力设备——能量路由器[34],[35]（或称为能量集线器 (energy hub)[36]，或电力路由器 (power router) [37]）。能量路由器的概念最早是由美国研究人员提出的。2008 年，一个名为未来可再生能源

输送与管理系统（FREEDM system）[38]的项目研究了一种基于可再生能源发电和分布式储能设备的新型电网结构。FREEDM 研究人员提出了能量路由器的概念，并实现了其原型设计 [35]。同年，瑞士的一个研究小组开发了所谓的能源中心 [36]。它源于计算机科学中的集线器概念，也称为能量控制中心。2013 年，日本研究人员提出了功率路由器的概念，即能够调度和管理一定区域功率的装置。与信息路由器在互联网中的作用类似，能量路由器可以看作是能源互联网中的能量转发和缓存节点。作为能量交换的中间媒体，能量路由器可以实现整个网络的功率平衡 [39], [40]。更重要的是，能量路由器还可以通过收集和处理能源信息，有效地控制电能质量，优化能源传输成本。在能源互联网场景中，能量路由器被视为核心功率路由和控制设备。

功率转换是电流互感器连接各种形式可再生能源的不可缺少的功能。能源网络各终端相互连接，大大提高了能源传输的可控性。文献 [41]提出了一种由通信平台、控制器和固态变压器组成的能量路由器结构。文献[42]概述了能量路由器在当前能源环境中的作用，介绍了由系统控制器、网络自适应模型、直流母线和多接口标准断路器组成的结构。文献 [43]提出了分层的能量路由器设计：信息支持层为能量控制层提供信息支持，并能够与保护单元等基础组件形成能量路由器独特的安全功能；功能层可以实现能源控制、优化管理、安全防护、管理维护等功能。目前对能量路由器体系结构的研究较为广泛，其中大部分是基于固态变压器等电力电子转换设备；具体可参见文献 [44], [45]。

对于一个典型的区域能源互联网场景，多个微网相互连接，电能可以通过能量路由器从某一个微网调度到其它微网 [14], [46]。对能源互联网中的每个单独的微网，母线上的主要能量波动可以被其本地储能设备和可控发电设备优先管控。如果“底层的”本地微网难以自主地实现功率平衡，

将通过能量路由器采用“上层的”广域能量路由策略，以便将外部电力输出/输入到本地微网[14],[39],[40],[46]。这被认为是能源互联网自底向上管理方法，与已有电力系统的自顶向下模式有显著不同。

1.2 研究报告概要

本节主要简单地介绍了本报告中接下来每个章节的主要研究内容及其贡献。

第二章针对能源互联网领域中的一个基于直流母线设计的微网进行动态建模和鲁棒控制研究。本章主要考虑了可再生能源和负载的不确定性、随机性和非线性，将微网中各设备动态功率建模成参数带不确定性的非线性随机微分方程，并针对此包含系统扰动输入的微分方程系统设计非脆弱鲁棒H_∞控制器，使得该微网可以抵御来自外部的扰动，如光照强度变化，风量变化，负荷功率突变，以及通过能量路由器能量传输导致的功率扰动，实现微网系统直流母线电压的稳定性。

第三章针对基于直流母线设计的能量路由器，研究设计混合H_2/H_∞控制策略，使得能量路由器可以实现与其相连设备的能量最优管理，以及能量路由器系统本身稳定抗干扰。具体来说，以下目标被同时实现：可以稳定能量路由器系统直流母线电压偏差；所考虑的能量路由器系统对参数不确定性具有较强的鲁棒性；优先实现各能量路由器内部自主的电能供需平衡；实现可控发电设备和储能设备的合理利用。

第四章从系统控制的角度实现了能源互联网自底向上的能量管理准则。相比于以前工作仅仅提出了自底向上的概念，本章第一次从动态系统建模、控制的视角在区域能源互联网场景中实现了此关键准则。在设计控制器时，考虑了储能设备的合理利用，以保证其寿命得到有效延长；同时，实现了可控发电设备的合理利用，避免了过度控制。除了能量管理问题上

的成果，通过使用结合了神经网络和随机过程的新型建模方法，本文提出了对光伏和负荷功率的精确模型，即同时使用循环神经网络和 Ornstein-Uhlenbeck 过程相关技术来建立动态模型。需要强调的是，通过上述新型建模方法，可以获得更可靠的能量管理控制结果。

第五章通过深度强化学习(deep reinforcement learning)研究了能源互联网系统的最优能量管理策略。研究对象包含多个优化目标，如，可控发电设备发电成本最小化，储能系统寿命延长，实现能源互联网合理能量调度准则。值得注意的是，本章不针对光伏、风机和负荷动态功率模型做“显式”表达，这与大多数已有工作显著不同。一个“无模型”的方法被用于解决此能量管理问题。这样可以跳过繁琐的系统建模步骤，成功地避免系统建模时参数量测误差，使求解的控制策略更加可靠。在具体算法方面，本章使用了 asynchronous advantage actor-critic (A3C)算法来解决该复杂优化控制问题。

第六章总结了本研究报告的主要成果，并对未来研究方向做出适当展望。

需要说明的是，第二章到第五章均为博士后在站期间研究成果，并均已在国际期刊以英文论文发表。

第二章 参数带不确定性的随机非线性能源互联网系统电压控制：非脆弱鲁棒H_∞方法

2.1 介绍

对于区域能源互联网场景，无论它的规模是大还是小，微网总是作为核心元素存在其中。微网有一种特殊的运行模式，特别是对于远离城市的微网，一般被称为孤岛（或离网）微网。利用这种模式的主要原因之一是远距离供电成本高昂。对于孤岛微网的真实案例，读者可以参考文献 [47], [48], [49], 等。在本章中，我们考虑的微网以离网模式运行，即这种类型的微网是脱离主干网运行的。 此外，出于环保因素考虑，我们假设该区域内的能源生产主要由分布式可再生能源提供。

在本章考虑的微网场景中，分布式能源资源的典型基础设施由以下要素组成：风力发电机、光伏发电机、燃料电池、微型涡轮发电机、电池储能和飞轮储能 [24]。在实际能源互联网应用中，能量路由器将能量生产装置、储能装置和负载连接起来，从而使不同来源的能量融合并相互作用 [22]。在该文献中，作者强调了能量路由器的一个关键功能是能量平衡，即，如果本地生产的能量多于本地负荷的需求，那么冗余的电力可以由能量路由器输送到其他互联的微网中，从而供相邻负荷消耗电能。相反地，当本地能量短缺时，能量路由器就可以从有能量剩余的微网中引入电能。

另一方面，作为区域能源互联网的核心组成部分，尽管分布式可再生能源具有许多环境和经济效益 [50]，但它们也存在着低惯性、不确定性、动态复杂性、非线性和间歇性等缺点 [5]，这些都给区域能源互联网系统控制带来了挑战。例如，风量和太阳辐射通常无法精确预测，它们实际上是随机变化的 [4], [51]。因此，风力发电机组和光伏发电会给能源互联网中

的电力系统带来不确定性。当我们对电力系统中的负荷进行建模时，我们将从大量独立的用户设备中提取样本数据。电力系统负荷的使用取决于时间、地理等各种因素，所以负荷也会随机变化[52]。在脱离主干网的区域能源互联网场景中，支持电能需求层面的分布式资源总发电量来自风电机组、光伏发电、燃料电池、微型涡轮发电机的电力输出，以及来自电池储能、飞轮储能和能量路由器的电力交换。当然，电源和负载之间的不匹配会导致微网母线电压偏差，甚至整个能源系统的断电。在这种情况下，对能源互联网系统的控制方案需要考虑鲁棒控制。

当系统中存在外部干扰时，我们通常需要设计一个控制律(control law)，以有效地消除干扰影响，这被称为H_∞控制方法。经典的H_∞理论研究确定性频域系统，其中H_∞范数由有理传递矩阵范数定义。频域方法的缺点是H_∞理论只能应用于线性及确定性系统。而这种限制可以通过考虑用时域的方法来解除，这使得H_∞理论也可以应用于非线性或随机系统[53], [54]。

对于电力系统而言，鲁棒控制方法已被广泛用于减少各种扰动对系统稳定性的影响，如文献 [5], [55], [56], [57], [58], [59]。其中，文献 [5], [57], [59]运用了鲁棒H_∞控制方法。值得注意的是，大多数关于H_∞控制方法在电力系统中应用的文献都采用频域方法，电力系统在确定性情况下由线性常微分方程描述。对于现实中大多数非线性的电力系统，研究人员通常将其近似为线性系统。例如，在微网范畴，文献 [60]的作者通过输入—输出反馈线性化将分布式发电机的非线性非均匀动态转化为线性动态。此外，为了简化模型或实验中的计算，一些随机模型通常被近似为确定性系统[5]。

在区域能源互联网运行管理方案中，我们需要保证较高的电能质量。但事实上，控制器参数的微小扰动很可能导致整个电力系统发生故障[24]。

因此，我们需要设计一个控制器，该控制器对其参数的变化具有鲁棒性。这被称为非脆弱(non-fragile)鲁棒控制。近年来，针对非脆弱鲁棒H_∞控制的有关研究有显著发展。例如，文献 [61]研究了具有时变时滞的中立系统，文献 [62]研究了模糊时滞系统相关的非脆弱鲁棒H_∞控制问题。

在处理电力系统的鲁棒控制问题时，大部分上述的现有研究都是将物理模型转化为线性常微分方程系统，然后直接应用经典鲁棒控制技术来获得所需结果，再利用 Matlab, PSCAD 等软件进行数值模拟。在此，我们强调上述研究方法的几个缺点。大部分研究没有考虑电力系统的建模误差。同时，为了得到理想的数学模型，建模不可避免地会需要近似化处理。特别是在频域系统中，不能考虑随机性和非线性的存在，这是十分保守和具有限制性的。此外，据作者所知，目前在电力系统领域中针对非脆弱鲁棒H_∞控制的研究还很少。

在本章中，我们研究了能源互联网的一个特殊场景，即离网运行的基于直流母线设计的微网系统（直流微网）。具体地，假设在一个特定区域内，只有两个直流微网通过它们的能量路由器相互连接。对于这些直流微网中的任何一个，我们的目标是找到一个非脆弱鲁棒H_∞控制器，使直流母线电压在规定的干扰衰减水平下稳定。值得注意的是，这种典型模型可以扩展到一个更普遍的场景，其中允许两个以上的直流微网相互连接。我们通过以下方法，来复原能源互联网动态系统特性，并以此来强调本章工作的重要性。在建立数学模型时，我们采用了时域方法，其中状态方程由一类非线性随机微分方程组描述。特别强调，在该随机微分方程中，定常项和随机项两部分都会出现非线性，并假设它们遵循一类范数有界条件。此外，由于某些不确定因素的存在，使得系统及控制器的参数都存在不确定性。这种特殊的随机非线性系统下的非脆弱鲁棒H_∞控制问题由于其复杂性，以前从未被考虑过。我们采用线性矩阵不等式（linear matrix

inequality, 简称 LMI）方法解决了该控制问题，并得到了两个定理。对于这种特殊的随机非线性系统，所得到的控制器与系统状态呈**线性**关系，这在系统本身是非线性的情况下很少见。不同于电力系统领域中大多数涉及计算算法的文献，本文着重于提供解析结果。此外，我们所提出的新控制系统不仅可以应用于能源互联网场景，还可以应用于各种工业和经济场景，如飞行控制、债券定价等。

本章的其余部分的概述如下：2.2 节给出了离网直流微网的动态模型。2.3 节对鲁棒控制问题进行了数学描述，并介绍了鲁棒H_∞控制问题的一些基础概念。在 2.4 节中，我们推导出使得系统具有鲁棒稳定性的充分条件。2.5 节解决了所研究的非脆弱鲁棒H_∞控制问题。2.6 节提供了一些数值模拟。2.7 节总结了本章工作。

注释：本章中，$\mathbb{R}^n$和$\mathbb{R}^{m\times n}$分别表示n维欧几里得空间和所有$m\times n$实矩阵的集合。上标 ’表示矩阵转置。矩阵中的$*$用于表示对称元素。对于对称矩阵X和Y，符号$x\geq y$ $(x>y)$表示矩阵$X-Y$为半正定（正定的）。I_m是m维单位矩阵。$\mathbb{E}$表示数学期望。概率测度用$\mathbb{p}$表示。$L_2[0,\infty)$是$[0,\infty)$上平方可积向量函数所在的空间。$|\cdot|$表示向量范数。$||\cdot||$指L_2 $[0,\infty)$上的范数。$\{\Omega,\mathcal{F},\mathbb{p}\}$表示概率空间，其中$\Omega$是样本空间，$\mathcal{F}$是由样本空间的一些子集构成的一个$\sigma$域。

2.2 系统建模

在本章中，我们考虑微网处于离网状态下的能源互联网场景，即，不考虑与主电网相连。我们只考虑在一个特定区域内的两个相互连接的直流微网。假设每个微网中都存在一个能量路由器，它可以被视为用于连接两个微网的桥梁。我们采用以下能量路由策略，参见文献 [25]及其中提到的文献。当一个直流微网能量不足时（特别是当其储能几乎为空时），

它的能量路由器能够将能量从另一个直流微网传输到该微网内；当一个微网有剩余能量时（特别是当其储能几乎满额时），多余的能量可以通过能量路由器传递给其它微网。

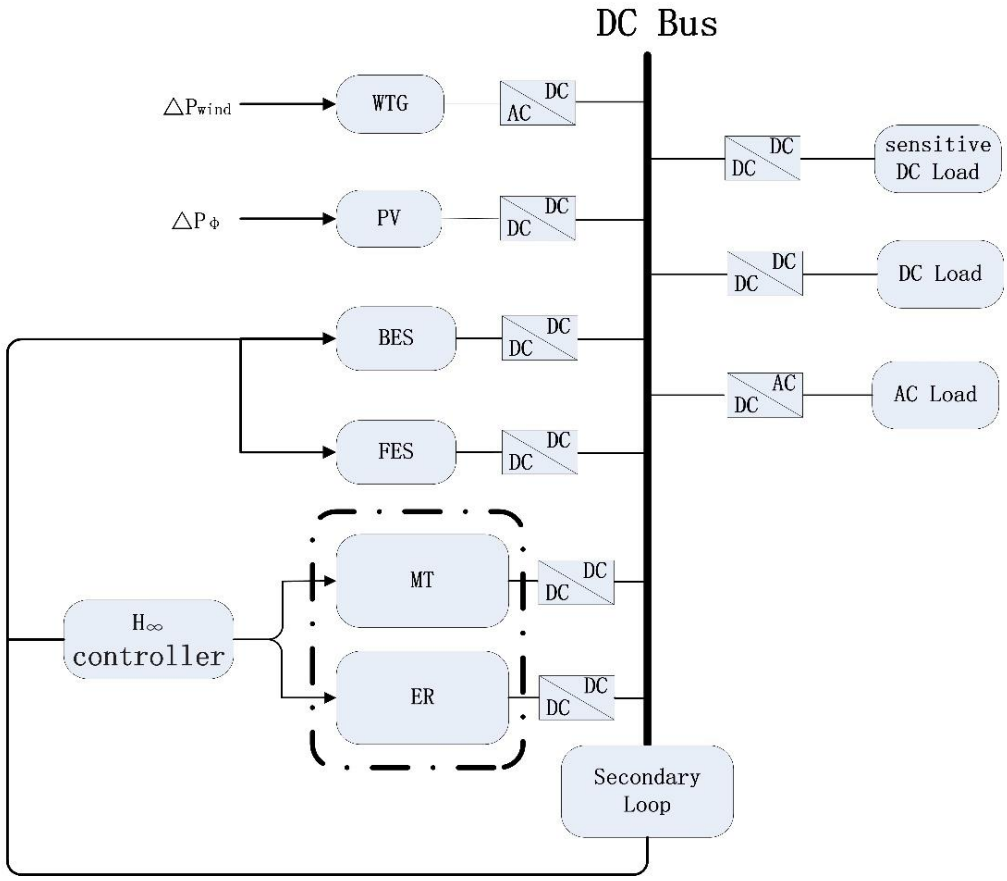

图 2.1 直流微网母线电压控制模型

针对直流母线电压偏差的鲁棒性和H_∞性能需要被控制实现这一目标，本章我们关注的是一个微网，其控制模型如图 2.1 所示。在图 2.1 中，风机、光伏、电池储能、飞轮储能、微型涡轮发电机、能量路由器和负载都连接在直流母线上。H_∞控制器设置在微型涡轮发电机和能量路由器中。我们分别用ΔP_{Wind}和ΔP_{φ}表示风力变化和太阳辐射功率变化。当电能通过能量路由器传输时，一个微网中能量路由器输出功率的变化不可避免地受到另一个微网输出功率的影响。而其它微网的输出功率可能是不稳定的，也可能是随时间变化的，这可以看作是对相连能量路由器输出功率的扰动。我们将这种功率扰动记为ΔP_M。如果能保证以下公式成立，则达到

图 2.1 中的功率平衡：

$$\Delta P_{WTG}+\Delta P_{PV}+\Delta P_{MT}+\Delta P_{BES}+\Delta P_{FES}+\Delta P_{ER}+\Delta P_{Load}=0. \quad (2.1)$$

在各种不同的研究中，如文献 [5], [55], [56], [60], [63], [64], [65], [66] 等，都提出了微网的建模，都用线性模型来描述微网动态系统。在下一节中，考虑到风量、太阳辐射和负载使用的随机性，我们提出了由一组常微分方程和随机微分方程建立的直流微网动态模型。

2.3 问题架构

给定概率空间$(\Omega,\mathcal{F},\mathbb{P})$，其中存在两个独立的标量布朗运动$W_{Wind}(t)$和$W_{\varphi}(t)$，它们分别表示风和太阳辐射引起的随机性。首先，如果我们排除了参数不确定性和系统非线性，那么直流微网系统可以用如下公式描述：

$$\begin{cases} d\Delta P_{WTG}=\left(-\dfrac{1}{T_{WTG}}\Delta P_{WTG}+\dfrac{1}{T_{WTG}}\Delta P_{Wind}\right)dt \\ \qquad\qquad +\left(-\dfrac{1}{S_{WTG}}\Delta P_{WTG}+\dfrac{1}{S_{WTG}}\Delta P_{Wind}\right)dW_{Wind}(t), \\ d\Delta P_{PV}=\left(-\dfrac{1}{T_{PV}}\Delta P_{PV}+\dfrac{1}{T_{PV}}\Delta P_{\varphi}\right)dt+\left(-\dfrac{1}{S_{PV}}\Delta P_{PV}+\dfrac{1}{S_{PV}}\Delta P_{\varphi}\right)dW_{\varphi}(t), \\ d\Delta P_{ER}=\left(-\dfrac{1}{T_{ER}}\Delta P_{ER}+\dfrac{1}{T_{ER}}u+\dfrac{1}{T_{ER}}\Delta P_{M}\right)dt, \\ d\Delta P_{MT}=\left(-\dfrac{1}{T_{MT}}\Delta P_{MT}+\dfrac{1}{T_{MT}}\Delta V\right)dt, \\ d\Delta P_{BES}=\left(-\dfrac{1}{T_{BES}}\Delta P_{BES}+\dfrac{1}{T_{BES}}V\right)dt, \\ d\Delta P_{FES}=\left(-\dfrac{1}{T_{FES}}\Delta P_{FES}+\dfrac{1}{T_{FES}}\Delta V\right)dt, \\ d\Delta V=\left(-\dfrac{1}{\alpha}\Delta V+\dfrac{1}{\beta}\Delta P_{Load}\right)dt, \end{cases} \quad (2.2)$$

其中，$\mathrm{S_{WTG}},S_{PV},\alpha,\beta$ 是系统参数，可以通过参数识别的方式获得。

由于我们的目的是寻找一个控制器以解决电压调节问题，同时实现

（2.1）中描述的功率平衡，则（2.2）中的ΔP_{Load}可根据（2.1）替换为-$\Delta P_{WTG}+\Delta P_{PV}+\Delta P_{MT}+\Delta P_{BES}+\Delta P_{FES}+\Delta P_{ER}$。我们将直流母线电压偏差$\Delta V$定义为系统（2.2）的被控输出。然后（2.2）可以被改写为线性随机状态空间控制系统：

$$dx(t)=[Ax(t)+Bu(t)+Cv(t)]dt+[D_1x(t)+E_1v(t)]dW_{Wind}(t)+[D_2x(t)+E_2v(t)]dW_{\varphi}(t), \tag{2.3}$$

$$z(t)=Fx(t), \tag{2.4}$$

其中$x(t)=\begin{bmatrix}\Delta P_{WTG}\\ \Delta P_{PV}\\ \Delta P_{FC}\\ \Delta P_{MT}\\ \Delta P_{ES}\\ \Delta P_{ER}\\ \Delta V\end{bmatrix}$是系统状态，$u(t)$是控制输入，$v(t)=\begin{bmatrix}\Delta P_{Wind}\\ \Delta P_{\varphi}\\ \Delta P_{M}\end{bmatrix}$是扰动输入，$z(t)=\Delta V$是被控输出。

由于我们对该微网建模的目的是为了获得一个数学上的控制系统，然后H_∞控制方法可以直接应用于鲁棒控制问题的求解，因此从求解控制问题的角度出发，我们更倾向于简单地假设$W_{Wind}(t)=W_{\varphi}(t)\triangleq W_1(t)$。这种假设不失一般性。此外，我们定义$D\triangleq D_1+D_2, E\triangleq E_1+E_2$,则（2.3）能够被写为

$$dx(t)=[Ax(t)+Bu(t)+Cv(t)]dt+[Dx(t)+Ev(t)]dW_1(t). \tag{2.5}$$

其中，系统参数如下

$$A=\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{WTG}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ER}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{MT}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{BES}} & 0 & \frac{1}{T_{BES}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{FES}} & \frac{1}{T_{FES}} \\ -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\alpha} \end{bmatrix},$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{ER}} \\ \frac{1}{T_{MT}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad C=\begin{bmatrix} \frac{1}{T_{WTG}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{PV}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ER}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad F=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}',$$

$$D=\begin{bmatrix} -\frac{1}{S_{WTG}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{S_{PV}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad E=\begin{bmatrix} \frac{1}{S_{WTG}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_{PV}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

我们认为，如果可以用（2.5）的形式来解决H_∞控制问题，那么同样的方法也可以应用于解决（2.3）的形式所表述的相同问题。

自 20 世纪 80 年代以来，人们对随机电力系统动态已经进行了一定的研究 [67], [68], [69], [70]。当系统中涉及到许多不确定因素时，近年来引起了研

究人员的注意，如文献 [71]。由于实际电力系统的建模存在误差和各种不确定因素，这使得系统（2.5）的某些参数无法准确测量。此外，研究的直流微网本身就具有非线性的动态复杂性。考虑到参数的不确定性和不可避免的非线性，我们提出了一个更适合描述真实环境下微网动态的模型。假设$W_2(t)$是一个独立于$W_1(t)$的一维标准布朗运动，这两个随机过程都在完备概率空间$(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{p})$中被定义。因此，我们考虑一类不确定的随机非线性系统，如下所示：

$$dx(t) = \big[\big(A + \Delta A(t)\big)x(t) + Bu(t) + Cv(t) + f(x,t)\big]dt + \big[\big(D + \Delta D(t)\big)x(t) + Ev(t)\big]dW_1(t) + g(x,t)dW_2(t), \quad (2.6)$$

$$z(t) = Fx(t). \quad (2.7)$$

在系统（2.6）-（2.7）中，A, B, C, D, E, F是已知的实数矩阵，而未知矩阵$\Delta A(t)$和$\Delta D(t)$有随时间变化的不确定性，假定为以下形式

$$[\Delta \mathrm{A(t)} \quad \Delta D(t)] = M_1 U_1(t)[N_a \quad N_d], \quad (2.8)$$

其中M_1, N_a和N_d是已知的实矩阵，$U_1(\cdot)$是一个未知的时变矩阵函数，对于所有时间t，满足

$$U_1(t)' U_1(t) \le I. \quad (2.9)$$

这种不确定性的结构已被许多文章的作者使用，如文献 [72], [73], [74],等。

在（2.6）中，$f(x(t))$表示为满足以下增益有界条件的非线性项：

$$f(x,t) = T\delta(x,t), \quad (2.10)$$

其中

$$\big|\big|\delta(x,t)\big|\big| \le \big|\big|Lx(t)\big|\big|. \quad (2.11)$$

在（2.6）中，$g(x(t))$是满足以下形式的非线性函数

$$g(x,t)' g(x,t) \le x(t)' G' G x(t), \quad (2.12)$$

注意，上述$g(x(t))$的非线性已用于已知文献，如文献 [75]。这里T, L和G是已知的具有适当维度的实数矩阵。这里我们强调，假设在$f\big(x(0)\big) =$

$[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]'$ 和 $g(x(0)) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]'$附近 $f(x(t))$和$g(x(t))$都是局部有界的，且满足局部利普希茨（Lipschitz）连续，从这个意义上说，可以保证随机微分方程（2.6）的解的存在性和唯一性，具体分析和解释可参见文献 [76], [77], [78]。

由于控制增益存在扰动，所以必须考虑非脆弱控制器，其形式如下：

$$u(t) = (K + \Delta K(t))x(t), \tag{2.13}$$

上式中，K是名义控制增益矩阵，而$\Delta K(t)$表示控制增益变化，其形式类似于（2.8），即：

$$\Delta K(t) = M_2 U_2(t) N_k, \tag{2.14}$$

其中M_2 和 N_k是已知的实数矩阵，$U_2(\cdot)$是未知的时变矩阵函数，对所有t满足

$$U_2(t)'U_2(t) \le I. \tag{2.15}$$

接下来，我们回顾鲁棒稳定性（stability）、稳定化（stabilization）和H_∞控制的一些基本定义。

定义2.1 （参见文献 [72]）系统（2.6）和（2.7）中假设$u(t) = 0$和$v(t) = 0$，如果对于任何初始条件，可以得到

$$\lim_{t\to\infty} \mathbb{E}|x(t)|^2 = 0,$$

则这样的系统称为**均方渐近稳定**的。

定义2.2 （参见文献 [79]）令$u(t) = 0$, $v(t) = 0$，如果系统（2.6）和（2.7）对于所有参数不确定性$\Delta A(t)$和$\Delta D(t)$是均方渐近稳定的，那么（2.6）和（2.7）所示的不确定随机系统就可以被认为是**鲁棒随机稳定**的。

定义2.3 （参见文献 [80]）给定一个标量$\gamma > 0$，对于系统（2.6）到（2.7），当$u(t) = 0$时，如果该系统是鲁棒随机稳定的，且在零初始条件下，所有非零$v(t)$和所有不确定性$\Delta A(t)$ 和 $\Delta D(t)$满足

$$||z(t)||_2 < \gamma ||v(t)||_2,$$

其中

$$||z(t)||_2 = \left(\mathbb{E}\left\{\int_0^\infty |z(t)|^2 dt\right\}\right)^{\frac{1}{2}},$$

那么，(2.6)到(2.7)的系统被称为是**具有干扰抑制γ的鲁棒随机稳定**的。

引理2.1（参见文献 [81]）给定具有适当维度的矩阵$M = M'$, N, $R = R'$，则下面的条件是等价的：

(i) $M - NR^{-1}N' \geq 0$ 和 $N(I - RR^{-1}) = 0$, $R \geq 0$,

(ii) $\begin{bmatrix} M & N \\ N' & R \end{bmatrix} \geq 0$,

(iii) $\begin{bmatrix} R & N' \\ N & M \end{bmatrix} \geq 0$.

引理2.2（参见文献 [82]）让$\mathcal{A}$, $\mathcal{D}$, $\mathcal{S}$, $\mathcal{W}$和F是适当维度的实矩阵，且满足$\mathcal{W} > 0$, $FF' \leq I$，然后有以下不等式成立：

对于标量$\epsilon > 0$和向量$x, y \in \mathbb{R}^n$，

$$2x'\mathcal{D}F\mathcal{S}y \leq \epsilon^{-1}x'\mathcal{D}\mathcal{D}'x + \epsilon y'\mathcal{S}'\mathcal{S}y.$$

对于任意标量$\epsilon > 0$满足$W - \epsilon DD' > 0$，

$$(\mathcal{A} + \mathcal{D}F\mathcal{S})'\mathcal{W}^{-1}(\mathcal{A} + \mathcal{D}F\mathcal{S}) \leq \mathcal{A}'(\mathcal{W} - \epsilon\mathcal{D}\mathcal{D}')^{-1}\mathcal{A} + \epsilon^{-1}\mathcal{S}'\mathcal{S}.$$

我们的目标是要确定（2.13）中K的值，从而解决非脆弱鲁棒化稳定问题和非脆弱鲁棒H_∞控制问题。从这个层面上说，模型的不确定性和外部干扰对微网直流母线电压的影响可被最小化。

2.4 非脆弱鲁棒随机稳定化

在本节中，我们为不确定随机非线性系统（2.6）设计了一个非脆弱状态反馈控制器，使得系统（2.6）可以被鲁棒随机稳定化。该问题通过线性矩阵不等式解决。

定理2.1 考虑$v(t) = 0$的不确定非线性随机微分方程（2.6），给定对称矩阵$N > 0$，如果存在标量$\epsilon_1 > 0$, $\epsilon_2 > 0$, $\epsilon_3 > 0$，矩阵Y和对称正定矩

阵$X>0$，使得线性矩阵不等式（2.16）成立

$$\begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_1 & M_1 & XN_a' & BM_2 & XN_k' & T & XL' & XG' & XN_d' & XD' \\ * & -\epsilon_1^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_2^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -N^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -X & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & \bar{\Gamma}_2 \end{bmatrix}$$

$$<0, \tag{2.16}$$

其中，$\bar{\Gamma}_1 = AX + BY + XA' + Y'B'$，$\bar{\Gamma}_2 = \epsilon_3 M_1 M_1' - X$，那么，我们称系统（2.6）在$K = YX^{-1}$的条件下被鲁棒随机稳定化。

证明：将非脆弱反馈控制器（2.13）代入系统（2.6）（其中$v(t)=0$）和满足（2.14）的不确定结构（2.8），我们得到如下闭环系统

$$\begin{aligned} dx(t) = {} & \left[\bar{A}x(t) + M_1U_1(t)N_a x(t) + BM_2U_2(t)N_k x(t) + f\big(x(t)\big)\right]dt \\ & + [Dx(t) + M_1U_1(t)N_d x(t)]dW_1(t) + g\big(x(t)\big)dW_2(t). \end{aligned} \tag{2.17}$$

其中，$\bar{A} = A + BK$。让$P = X^{-1}$,从（2.16）可以得到

$$P^{-1} - \epsilon_2 MM' > 0. \tag{2.18}$$

将李雅普诺夫函数定义为

$$V(x(t),t) = x(t)'Px(t). \tag{2.19}$$

根据伊藤引理，我们有

$$\begin{aligned} dV(x(t),t) = {} & \mathcal{L}V(x(t),t)dt + 2x(t)'Pg\big(x(t)\big)dW_2(t) \\ & + 2x(t)'P[Dx(t) + M_1U_1(t)N_a x(t)]dW_1(t), \end{aligned} \tag{2.20}$$

其中算子$\mathcal{L}V(x(t),t)$是

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V(x(t),t) = {} & 2x(t)'P\big[M_1U_1(t)N_a x(t) + BM_2U_2(t)N_k x(t) + \bar{A}x(t) \\ & + f\big(x(t)\big)\big] + g\big(x(t)\big)'Pg\big(x(t)\big) \\ & + x(t)'[D + M_1U_1(t)N_d]'P[D + M_1U_1(t)N_d]x(t). \end{aligned} \tag{2.21}$$

根据引理2.2和（2.10）到（2.12），我们有以下矩阵不等式成立:

$$2x(t)'PM_1U_1(t)N_ax(t) \leq x(t)'(\epsilon_1 PM_1M_1'P + \epsilon_1^{-1}N_a'N_a)x(t), \quad (2.22)$$

$$2x(t)'PBM_2U_2(t)N_kx(t) \leq x(t)'(\epsilon_2 PBM_2M_2'B'P + \epsilon_2^{-1}N_k'N_k)x(t), \quad (2.23)$$

$$2x(\mathrm{t})'Pf\big(x(t)\big) \leq x(t)'(PTN^{-1}T'P + L'NL)x(t), \quad (2.24)$$

$$[D + M_1U_1(t)N_d]'P[D + M_1U_1(t)N_d] \leq D'(P^{-1} - \epsilon_3 M_1M_1')^{-1}D + \epsilon_3^{-1}N_d'N_d, \quad (2.25)$$

$$g\big(x(t)\big)'Pg\big(x(t)\big) \leq x(t)'G'PGx(t), \quad (2.26)$$

其中N是具有适当维数的可逆矩阵。则（2.21）可以写为

$$\mathcal{L}\mathrm{V} \leq \mathrm{x(t)}'\Theta x(t), \quad (2.27)$$

其中

$$\begin{aligned}\Theta = {} & P(A+BK) + (A+BK)'P + \epsilon_1 PM_1M_1'P + \epsilon_1^{-1}N_a'N_a + \epsilon_2 PDM_2M_2'D'P \\ & + \epsilon_2^{-1}N_k'N_k + PTN^{-1}T'P + L'NL + G'PG + \epsilon_3^{-1}N_d'N_d \\ & + D'(P^{-1} - \epsilon_3 M_1M_1')^{-1}D. \end{aligned} \quad (2.28)$$

给前文的线性矩阵不等式（2.16）前乘后乘(pre- and post-multiply) $diag(P,I,I,I,I,I,I,I,I,I)$，然后我们得到下面的矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 & PM_1 & N_a' & PBM_2 & N_k' & PT & L' & G' & N_d' & D' \\ * & -\epsilon_1^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_2^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -N^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -P^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & \Gamma_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (2.29)$$

其中，$\Gamma_1 = P(A+BK) + (A+BK)'P, \Gamma_2 = \epsilon_3 M_1M_1' - P^{-1}$. 根据引理2.1，（2.29）意味着$\Theta < 0$。在（2.27）中，对于一切$x(t)' \neq 0$，都有$\mathcal{L}\mathrm{V(x(t),t)} <$

0成立。根据定义2.1、定义2.2和文献 [78]，闭环系统（2.6）被鲁棒随机稳定化。

2.5 非脆弱鲁棒H_∞控制

在这一节中，我们得到了一个解决了非脆弱鲁棒H_∞控制问题的充分条件。

定理2.2 对于规定的$\gamma > 0$和对称矩阵$N > 0$,假设存在对称的正定矩阵$X > 0, Y$和正标量$\epsilon_1 > 0,\ \epsilon_2 > 0,\ \epsilon_3 > 0$,使得线性矩阵不等式（2.30）成立，那么满足$K = YX^{-1}$的非线性随机系统(2.6)在扰动抑制$\gamma$下被鲁棒随机稳定化。

$$\begin{bmatrix} \overline{\Psi_1} & C & XF' & M_1 & XN_a' & BM_2 & XN_k' & T & XG' & XN_d' & XD' \\ * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E' \\ * & * & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_1^{-1} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\epsilon_2^{-1} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -N & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -X & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & \overline{\Psi_2} \end{bmatrix} < 0, \tag{2.30}$$

其中，$\overline{\Psi_1} = AX + BY + XA' + Y'B'$, $\overline{\Psi_2} = \epsilon_3 M_1 M_1' - X.$

证明：将状态反馈控制器（2.13）代入系统（2.6）中，得到

$$\begin{aligned} dx(t) = &\left[\bar{A}x(t) + M_1 U_1(t) N_a x(t) + BM_2 U_2(t) N_k x(t) + Cv(t)\right. \\ &\left. + \Delta f\big(x(t)\big)\right]dt + [Dx(t) + M_1 U_1(t) N_d x(t) + Ev(t)]dW_1(t) \\ &+ g\big(x(t)\big)dW_2(t) \end{aligned} \tag{2.31}$$

其中$\bar{A} = A + BK$. 由（2.30）可以明显地看出，线性矩阵不等式（2.16）成立，从定理2.1可以确保闭环系统(2.6)在参数不确定性下都是稳定的。

现在，让我们证明系统（2.6）对于所有参数不确定性都满足H_∞性能指标$\left|\left|z(t)\right|\right|_2 < \gamma\left|\left|v(t)\right|\right|_2$。类似的，（2.19）依然被选定为李雅普诺夫函数。对于$t > 0$，我们定义泛函

$$J(t) \triangleq \mathbb{E}\left\{\int_0^t [z(s)'z(s) - \gamma^2 v(s)'v(s)]ds\right\}. \tag{2.32}$$

根据伊藤公式，得到

$$\mathbb{E}[V(x(t),t)] = \mathbb{E}\left\{\int_0^t \mathcal{L}V(x(s),s)\right\}, \tag{2.33}$$

其中

$$\begin{aligned}\mathcal{L}V(x(t),t) = {} & 2x(t)'P\big[M_1U_1(t)N_dx(t) + BM_2U_2(t)N_kx(t) + \bar{A}x(t) \\ & + Cv(t) + \Delta f\big(x(t)\big)\big] \\ & + [Dx(t) + M_1U_1(t)N_dx(t) + Ev(t)]'P[Dx(t) \\ & + M_1U_1(t)N_dx(t) + Ev(t)] + g\big(x(t)\big)'Pg\big(x(t)\big).\end{aligned} \tag{2.34}$$

根据（2.33），我们可以将（2.32）改写为

$$\begin{aligned}J(t) \triangleq {} & \mathbb{E}\left\{\int_0^t [z(s)'z(s) - \gamma^2 v(s)'v(s)] + \mathcal{L}V(x(s),s)]ds\right\} \\ & - \mathbb{E}[V(x(t),t],\end{aligned} \tag{2.35}$$

这使得下述不等式成立，

$$J(t) \leq \mathbb{E}\left\{\int_0^t [z(s)'z(s) - \gamma^2 v(s)'v(s)] + \mathcal{L}V(x(s),s)]ds\right\}. \tag{2.36}$$

让$P = X^{-1}$. 根据（2.30），（2.18）可以被满足。同样地，根据引理2.2以及（2.10）到（2.20），我们有

$$J(t) \leq \mathbb{E}\left\{\int_0^t [x(s)' \quad v(s)']\Lambda[x(s)' \quad v(s)']'ds\right\}, \tag{2.37}$$

其中，

$$\Lambda=\begin{bmatrix}\Omega & PC\\ * & -\gamma^2 I\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}D'\\ E'\end{bmatrix}(P^{-1}-\epsilon_3 M_1 M_1')^{-1}[D\ \ E]+\epsilon_3^{-1}\begin{bmatrix}N_d'\\ 0\end{bmatrix}[N_d\ \ 0], \quad (2.38)$$

$$\Omega=F'F+P\bar{A}+\bar{A}'P+\epsilon_1 PM_1M_1'P+\epsilon_1^{-1}N_a'N_a+\epsilon_2 PBM_2M_2'B'P$$
$$+\epsilon_2^{-1}N_k'N_k+PTN^{-1}T'P+L'NL+G'PG. \quad (2.39)$$

给线性矩阵不等式（2.30）前乘后乘$diag(P,I,I,I,I,I,I,I,I,I)$，然后得到下列矩阵不等式（2.40），

$$\begin{bmatrix}\Psi_1 & PC & F' & PM_1 & N_a' & PBM_2 & N_k' & PT & G' & N_d' & D'\\ * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E'\\ * & * & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & -\epsilon_1^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & -\epsilon_2^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & * & * & -N & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & * & * & * & -P^{-1} & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0\\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & \Psi_2\end{bmatrix}$$
$$<0, \quad (2.40)$$

其中，$\Psi_1=P(A+BK)+(A+BK)'P$, $\Psi_2=\epsilon_3 M_1M_1'-P^{-1}$. 根据引理2.1，（2.40）意味着$\Gamma<0$。对于（2.37），我们有$\left||z(t)|\right|_2<\gamma\left||v(t)|\right|_2$成立。根据定义2.3，满足$K=YX^{-1}$的非线性随机系统（2.6）被鲁棒随机稳定化且满足干扰抑制γ。

值得一提的是，本章所得的主要结果定理2.1和定理2.2是以最一般的形式给出的。它们还可应用于许多其他领域，如飞行控制、债券定价，等。

2.6 数值仿真

在这一节中，我们给出了一些数值仿真例子来说明本章所得定理的有效性。

根据实际经验，我们假定系统（2.2）的时间常数如下：（省略时间单

位：秒）$T_{WTG}=1.5, T_{PV}=1.8, T_{ER}=1.15, T_{MT}=2.5, T_{BES}=0.12, T_{FES}=0.1, S_{WTG}=3, S_{PV}=2, \alpha=0.02, \beta=0.2$. 然后，对于系统（2.6），我们得到矩阵$A, B, C, D, E$。假设（2.6）中其余的系数如下：

$$M_1=\begin{bmatrix}0&0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&1&0\\0&0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&1\\1&0&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0\end{bmatrix},\quad M_2=0.8,\quad N_k=\begin{bmatrix}0.3\\0\\0.1\\0.3\\0.1\\0\\0.3\end{bmatrix}',$$

$$N_a=\begin{bmatrix}0&0&0&0&-3.333&0&3.333\\0&0&0&0&0&-4&4\\-2&-2&-2&-2&-2&-2&-20\\0&0&-0.348&0&0&0&0\\-0.267&0&0&0&0&0&0\\0&-0.22&0&0&0&0&0\\0&0&0&-0.16&0&0&0\end{bmatrix},$$

$$N_d=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\-0.133&0&0&0&0&0&0\\0&-0.2&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix},$$

$$T=0.2\boldsymbol{I_7},\quad L=0.1\boldsymbol{I_7},\quad G=0.3\boldsymbol{I_7},\quad N=\boldsymbol{I_7}.$$

首先，我们的目的是设计一个控制器，当所有潜在的参数不确定性被完全考虑到时，直流微网在该控制器下是稳定的。在数学上，对于2.4节中的非线性随机鲁棒稳定控制问题，我们的目的是设计一个非脆弱状态反馈控制器，使控制系统在允许的不确定性$\Delta A(t)$和$\Delta D(t)$下被鲁棒随机稳定化。我们使用Matlab LMI Control Toolbox来求解(2.16)的线性矩阵不等式，所得结果如下所示：

$$X=\begin{bmatrix} 5.7276 & -0.2634 & -0.1536 & -0.2404 & -0.3191 & -0.3307 & -0.3908 \\ -0.2634 & 4.5786 & -0.0706 & -0.0420 & -0.3146 & -0.3230 & -0.3260 \\ -0.1536 & -0.0706 & 6.4508 & -0.3603 & -0.2584 & -0.2741 & -0.4492 \\ -0.2404 & -0.0420 & -0.3603 & 6.5866 & -0.3278 & -0.3408 & -0.4628 \\ -0.3191 & -0.3146 & -0.2584 & -0.3278 & 1.6492 & 0.0897 & 0.1264 \\ -0.3307 & -0.3230 & -0.2741 & -0.3408 & 0.0897 & 1.4721 & 0.1483 \\ -0.3908 & -0.3260 & -0.4492 & -0.4628 & 0.1264 & 0.1483 & 0.7306 \end{bmatrix},$$

$$Y=[-0.7032\ \ -0.1563\ \ 1.3520\ \ -2.4060\ \ 0.2520\ \ 0.3625\ \ 2.4656],$$

$\epsilon_1=7.2374,\epsilon_2=7.4028,\epsilon_3=0.4864$. 根据定理2.1，非脆弱鲁棒稳定问题是可解的，控制矩阵（2.13）是

$$K=[0.1622\ \ 0.2567\ \ 0.4806\ \ -0.0610\ \ 0.0015\ \ 0.0288\ \ 3.8266].$$

当我们将鲁棒H_∞控制方法应用于能源互联网领域时，我们希望设计一个控制器，使得当存在风，太阳辐射和能量路由波动等外部干扰时，电压控制问题依然能被很好地解决。在数学层面上，除了需要鲁棒稳定性外，还需要达到规定的H_∞性能。利用和上述仿真相同的数据，假设干扰抑制$\gamma=0.9$，我们求解线性矩阵不等式（2.30），得到结果如下：

$$X=\begin{bmatrix} 183.4946 & -37.2029 & -44.6694 & -43.5199 & -5.1345 & -4.8872 & -2.5765 \\ -37.2029 & 124.8440 & -32.0690 & -28.5244 & -3.2578 & -3.1816 & -1.1194 \\ -44.6694 & -32.0690 & 249.1533 & -32.3942 & -3.8541 & -3.3047 & -5.1339 \\ -43.5199 & -28.5244 & -32.3942 & 208.1204 & -4.9923 & -4.4284 & -3.9003 \\ -5.1345 & -3.2578 & -3.8541 & -4.9923 & 54.4424 & 1.4888 & 1.4938 \\ -4.8872 & -3.1816 & -3.3047 & -4.4284 & 1.4888 & 49.2576 & 1.7354 \\ -2.5765 & -1.1194 & -5.1339 & -3.9003 & 1.4938 & 1.7354 & 22.8419 \end{bmatrix},$$

$$Y=[-110.323\ \ -38.086\ \ -5.986\ \ -179.593\ \ -64.498\ \ -53.081\ \ 388.615],$$

$\epsilon_1=282.8136,\epsilon_2=261.6877,\epsilon_3=19.2331$. 因此，根据定理2.2，我们可以看出非脆弱鲁棒$H_\infty$控制问题是可解的，控制矩阵（2.13）是

$$K=[-0.8542\ \ -0.7370\ \ -0.0950\ \ -0.9222\ \ -1.8157\ \ -1.8419\ \ 16.9607].$$

接下来，我们使用Matlab分别在图2.2、图2.3、图2.4、图2.5、图2.6和图2.7中绘制了光伏输出功率的变化、风机输出功率的变化，以及微型涡轮发电机、电池储能、能量路由器和飞轮储能在非受控/受控状态下输出

功率的变化图。图2.8给出了非受控和受控状态下微网直流母线电压偏差的比较结果。

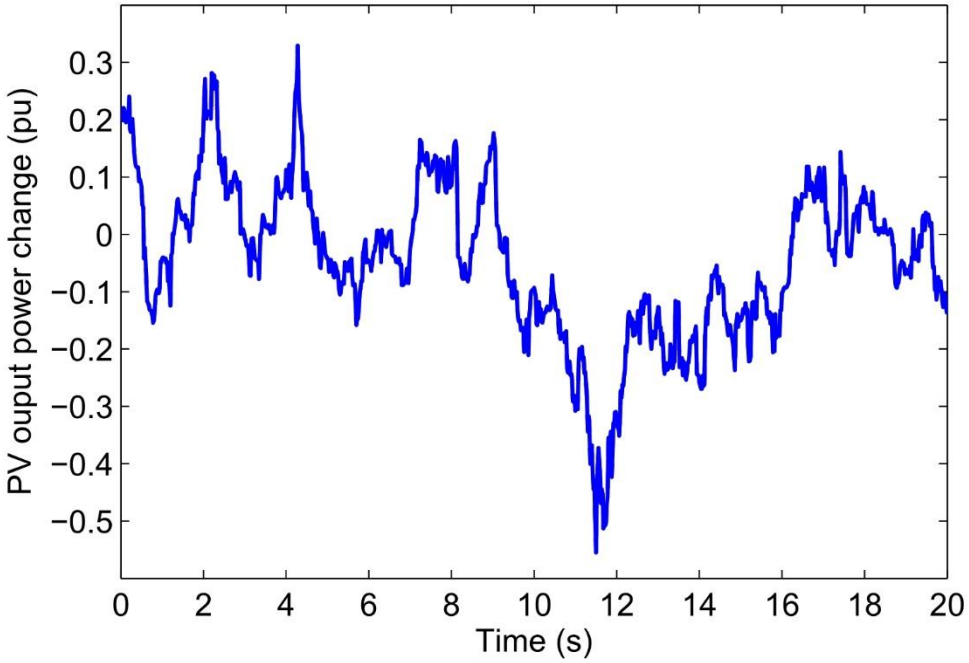

图2.2 光伏输出功率的变化

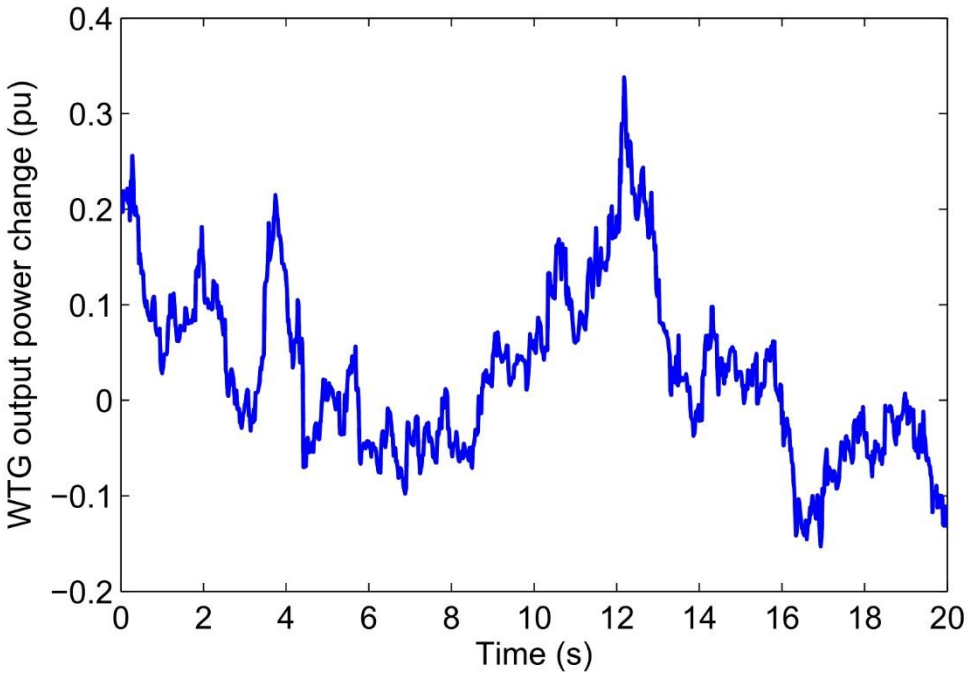

图2.3 风机输出功率的变化

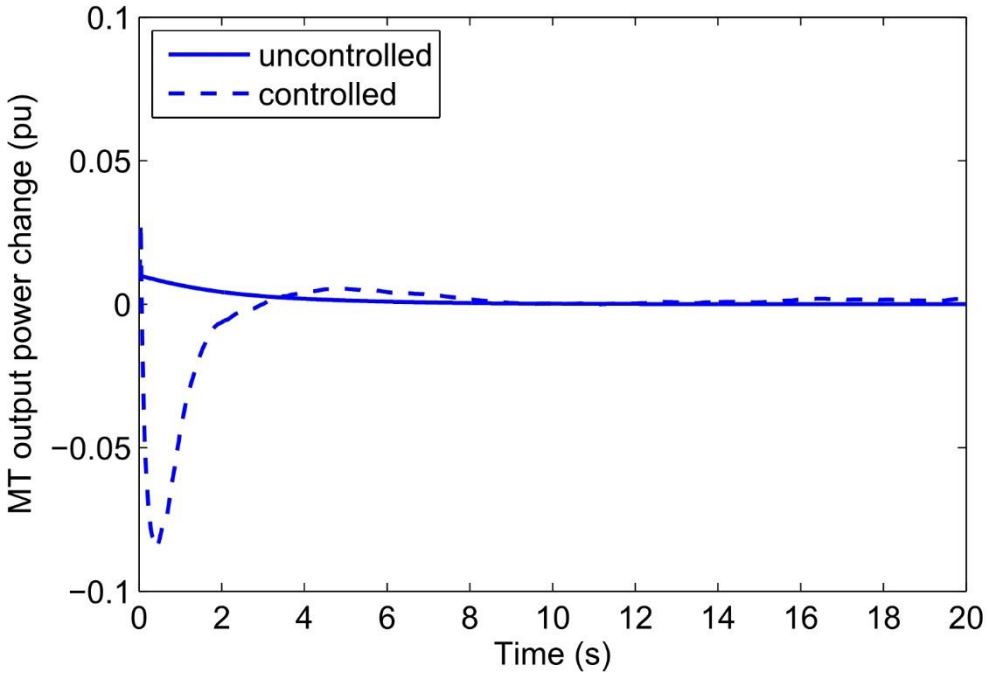

图2.4 微型涡轮发电机在非受控和受控状态下输出功率的变化

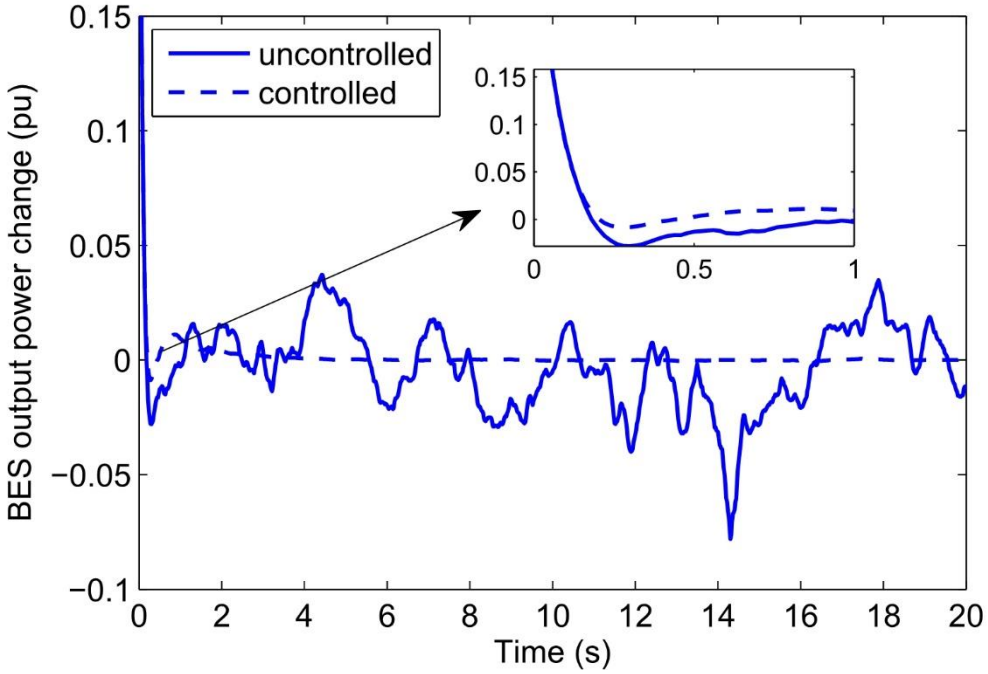

图2.5 电池储能在非受控和受控状态下输出功率的变化

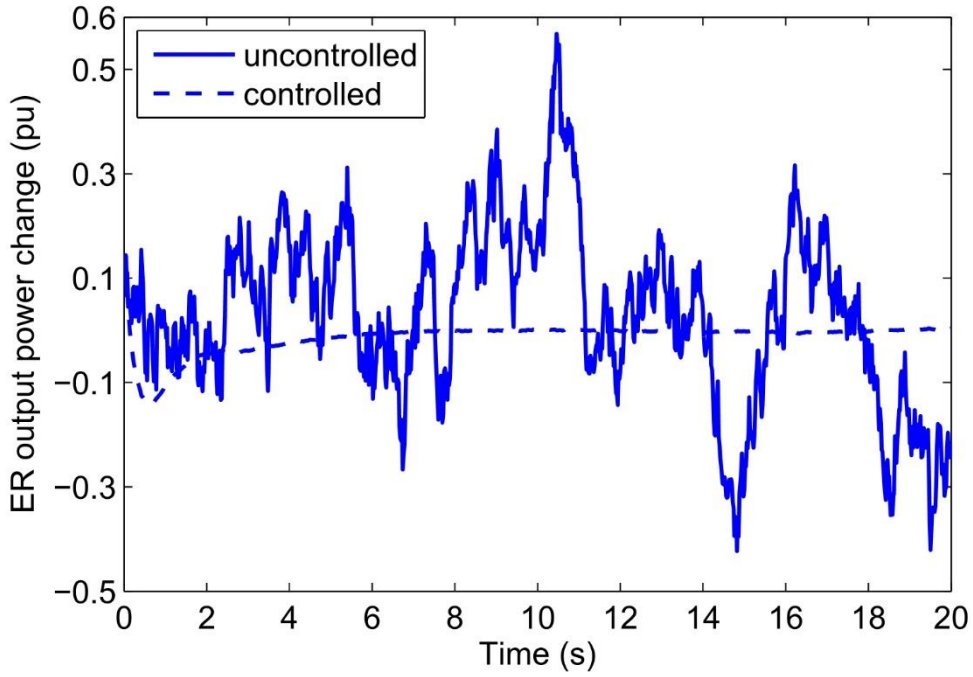

图2.6 能量路由器在非受控和受控状态下输出功率的变化

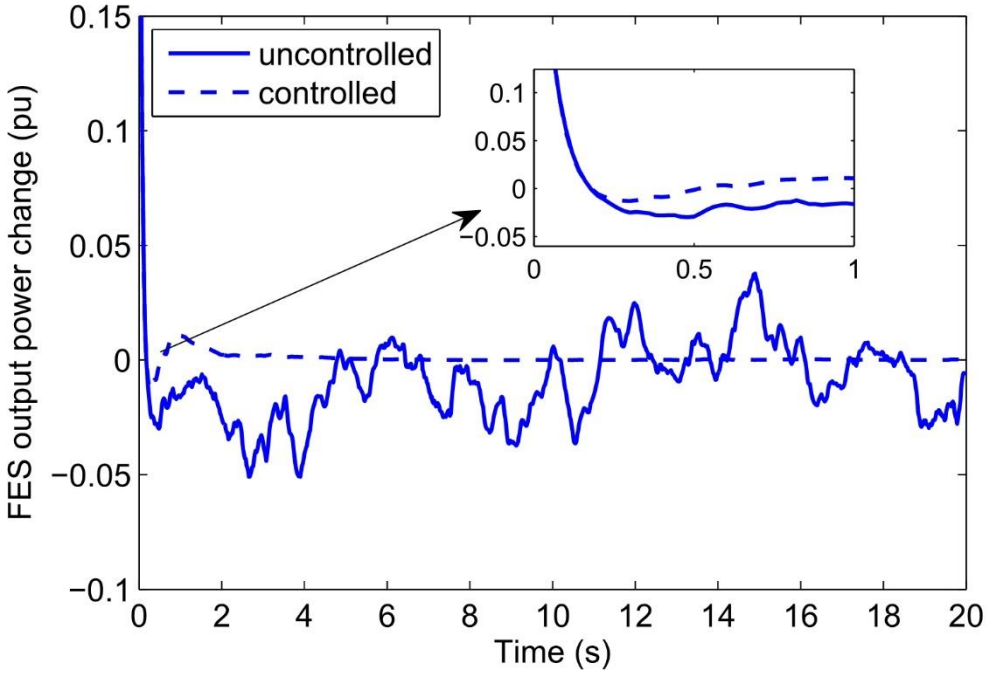

图2.7 飞轮储能在非受控和受控状态下输出功率的变化

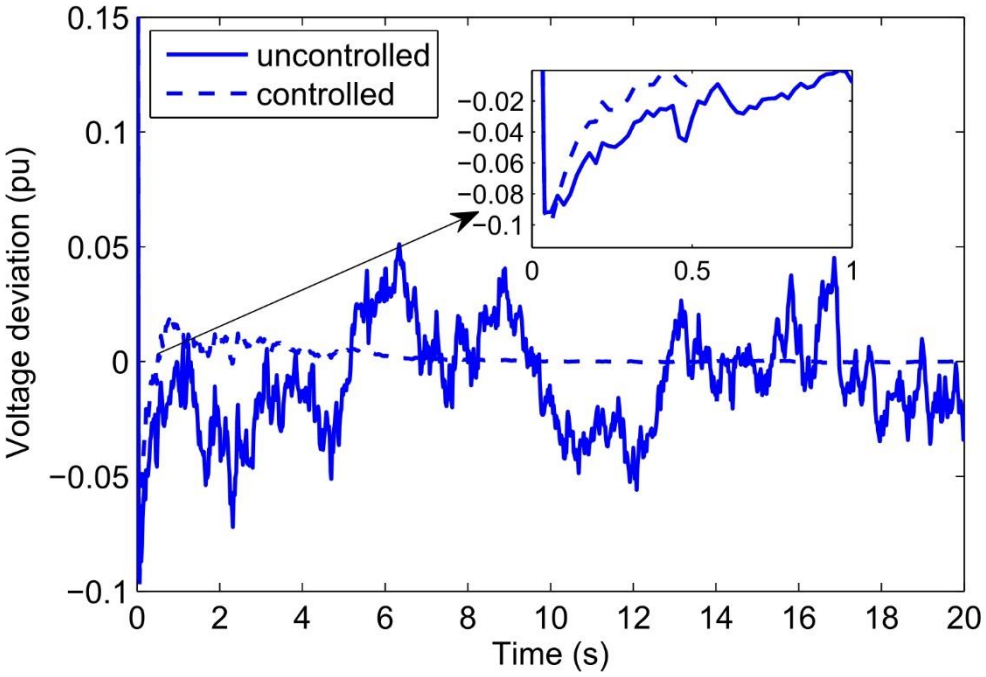

图2.8 不受控和受控状态下直流母线电压的偏差

数值模拟的结果表明，本章考虑的直流微网系统，特别是其直流母线电压偏差在给定的H_∞性能下，满足了鲁棒稳定性，表明了该方法的有效性。

2.7 结论

本章研究了区域能源互联网场景下离网的基于直流母线设计的微网电压控制问题。我们建立了一组常微分方程和随机微分方程来描述这种微网的动态变化。接下来，我们将上述微分方程改写为一个单一的非线性随机微分方程系统。我们允许这个集成系统存在参数不确定性，并且将控制器设置为非脆弱鲁棒控制器。从而使得被研究微网电压控制问题转化为非脆弱鲁棒随机稳定化问题和非脆弱鲁棒H_∞控制问题，并用线性矩阵不等式的方法求解。数值模拟表明，该方法是有效可行的。

今后，除了本章所考虑的电压稳定性控制问题外，我们还将考虑系统运行成本最优管理问题，该问题可以转化为H_2控制问题。因此，我们将在

下一章中研究一个能源互联网场景下的混合随机H_2/H_∞控制问题。

第三章 基于能源互联网的能量路由器鲁棒混合H_2/H_∞控制器设计

3.1. 介绍

近年来，与能量路由器相关的研究备受关注。文献 [83]研究了一种基于图论的能量局域网络路由算法。在文献 [15]中，作者采用能量路由器和微型涡轮发电机设计了随机最优控制器，实现了能源互联网中自底向上能量管理策略。文献 [84]研究了容错负载和移动能量缓冲器的能量路由问题。根据经济调度需求，文献 [85]给出了相应的能量路由策略。针对低压配电网，一种开放式能量路由网络被提出 [25]。文献 [86]针对孤岛微网设计了适用于能量路由器、可控发电设备的非脆弱H_∞控制器，实现了直流母线电压稳定性控制。关于能量路由器的其他相关研究成果，读者可参考文献 [46] , [87], [88]及其中的参考文献。值得注意的是，在能源互联网领域，从控制的角度研究能量路由器的频率/电压调节和最优运行成本管理问题的文献较少。此外，在考虑各种电气装置的动态功率时，大部分工作只关注短时间尺度内的控制问题，这是具有局限性的 [86]。

本章对基于直流母线拓扑结构设计的能量路由器系统同时考虑了电压调节和最优运行成本管理问题。本章所考虑的能量路由器系统假设能够接入可再生发电设备(光伏、风机)、可控发电设备(微型涡轮发电机、柴油发电机、燃料电池)、储能设备(电池、飞轮储能)和其他连接的能量路由器。相似的连接拓扑结构在许多工作中得到了应用；参见文献 [46], [86]。本章中将能量路由器系统的动态功率模型用常微分方程表示，并考虑了模型参数不确定性。对于所考虑的能量路由器系统，我们将电压稳定性控制问题表示为鲁棒H_∞控制问题，而能量管理优化问题表示为最优控制问题(也称为H_2控制)。本文的目的是设计一种能同时满足H_∞和H_2性能的能

量路由器系统控制器。由此，我们建立了一个H_2/H_∞混合控制问题，并进行了解析解形式的求解。从自动控制学的角度，给出了两个定理作为主要结果。然后，基于不同场景进行仿真，验证了该方法的可行性和有效性。

本章的主要贡献可以概括如下：

这是首次在考虑范数有界参数不确定性的情况下，在能源互联网场景下为能量路由器系统设计混合鲁棒H_2/H_∞控制器。本章同时实现了以下几个目标。

1) 控制能量路由器系统直流母线电压以实现稳定性。

2) 所考虑的能量路由器系统对参数不确定性具有较强的鲁棒性。

3) 优先实现各能量路由器内部自主的电力供需平衡。

4) 实现可控发电设备和储能设备的合理利用。

5) 可以调整目标函数中的权重因子，使得能量路由器系统的运行更加灵活。

6) 所考虑的能量路由器系统虽然以短期动态功率表示，但可以在技术上实现长期运行控制目标。

7) 考虑了不同场景的数值仿真，证明了我们提出的方法相对于传统方法的优势。

本章的其余部分组织如下：3.2 节介绍了能量路由器系统建模。3.3 节将实际控制问题改写为目标函数。3.4 节解决了H_2/H_∞控制问题。最后，3.5 节对本章进行了总结。

3.2 系统建模

本章在能源互联网场景中考虑了一种基于直流母线设计的能量路由器。具体地，所考虑的能量路由器系统物理结构如图 1 所示。

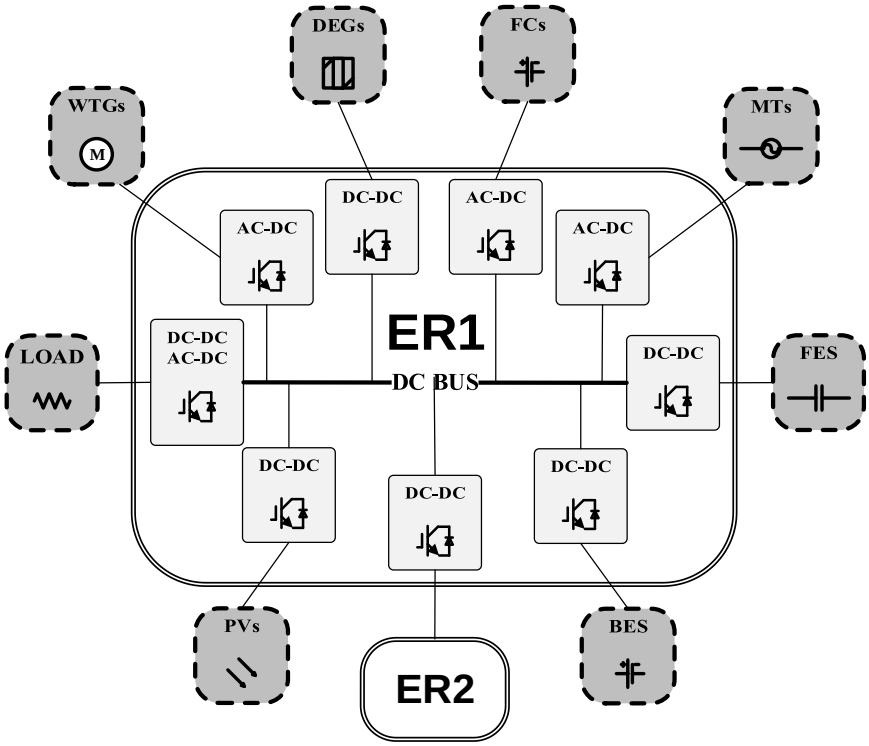

图 3.1 本章研究的能量路由器（ER）系统

我们将研究的能量路由器系统表示为 ER_1，它可以连接负载、光伏、风力发电机、微型涡轮发电机、柴油发电机、燃料电池、电池储能、飞轮储能，以及另一个能量路由器系统 ER_2。对于 ER_1，我们假设功率输入主要依赖于大规模光伏和风机的发电，而分布式可控发电设备，如，微型涡轮发电机、柴油发电机和燃料电池被认为是起补充作用的发电设备（不是主要发电设备）。受太阳辐射、风速等天气条件影响，光伏、风机和负荷的功率输出变化可能会导致能量路由器直流母线电压波动过大。为了补偿功率偏差，吸收多余的电能，ER_1 上安装了电池和飞轮储能。

本章研究的 ER 系统内部电力供需平衡表示为(时间t略)

$$\begin{aligned}\Delta P_{AER} = \Delta P_{PV} + \Delta P_{WTG} + \Delta P_{MT} + \Delta P_{FC} + \Delta P_{DEG} \\ -\Delta P_{BES} - \Delta P_{FES} - \Delta P_{L},\end{aligned} \tag{3.1}$$

其中，ΔP_{AER} 表示从$\mathrm{ER_1}$传输到$\mathrm{ER_2}$的多余的能量。

图 3.1 考虑的能量路由器系统各设备功率动态如下所示：

$$\begin{cases} \Delta\dot{P}_{PV} = -\left(\dfrac{1}{T_{PV}} + \Delta o_{PV}\right)\Delta P_{PV} + \dfrac{1}{T_{PV}} v_{PV}, \\ \Delta\dot{P}_{WT} = -\left(\dfrac{1}{T_{WT}} + \Delta o_{WT}\right)\Delta P_{WT} + \dfrac{1}{T_{WT}} v_{WT}, \\ \Delta\dot{P}_{L} = -\left(\dfrac{1}{T_{L}} + \Delta o_{L}\right)\Delta P_{L} + \dfrac{1}{T_{L}} v_{L}, \\ \Delta\dot{P}_{MT} = -\dfrac{1}{T_{MT}}\Delta P_{MT} + \dfrac{1}{T_{MT}}(b_{MT} + \Delta b_{MT})u_{MT}, \\ \Delta\dot{P}_{FC} = -\dfrac{1}{T_{FC}}\Delta P_{FC} + \dfrac{1}{T_{FC}}(b_{FC} + \Delta b_{FC})u_{FC}, \\ \Delta\dot{P}_{DEG} = -\dfrac{1}{T_{DEG}}\Delta P_{DEG} + \dfrac{1}{T_{DEG}}(b_{DEG} + \Delta b_{DEG})u_{DEG}, \\ \Delta\dot{P}_{BES} = -\dfrac{1}{T_{BES}}\Delta P_{BES} + \dfrac{1}{T_{BES}}(r_{BES} + \Delta r_{BES})\Delta V, \\ \Delta\dot{P}_{FES} = -\dfrac{1}{T_{FES}}\Delta P_{FES} + \dfrac{1}{T_{FES}}(r_{FES} + \Delta r_{FES})\Delta V, \\ \Delta\dot{V} = -\dfrac{1}{p}\Delta V + \dfrac{1}{q}\Delta P_{AER}, \end{cases} \tag{3.2}$$

其中，p，q为线性化电压偏差方程中的系数。读者可以通过阅读文献[5], [86], [89]来获取一些相似的动态功率模型。

负载装置的电能使用和可再生能源发电受需求侧用户行为、太阳辐射、风速风量等时变环境条件的影响较大。此外，本章所考虑的能量路由器线性系统参数测量误差是不可避免的。因此，(3.2)中的ER_1动态模型考虑了参数不确定性。

为了简洁起见，我们定义（时间t省略）

$$x = [\Delta P_{PV} \quad \Delta P_{WT} \quad \Delta P_L \quad \Delta P_{MT} \quad \Delta P_{FC} \quad \Delta P_{DEG} \quad \Delta P_{BES} \quad \Delta P_{FES} \quad \Delta V]',$$

这样，式(3.2)中的系统状态可以用状态变量x表示。通过定义系统(3.2)的控制输入和扰动输入分别为

$$u = [u_{MT} \quad u_{FC} \quad u_{DEG}]'$$

和

$$v = [v_{PV} \quad v_{WT} \quad v_L]',$$

式(3.2)中的动态功率表达式可以改写为（时间t略）

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Cv. \tag{3.3}$$

系统(3.3)中的系数矩阵$A, B, C, \Delta A$和ΔB如下所示，

A

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{WT}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{MT}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{DEG}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{BES}} & 0 & \frac{r_{BES}}{T_{BES}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{FES}} & \frac{r_{FES}}{T_{FES}} \\ \frac{1}{p} & \frac{1}{p} & -\frac{1}{p} & \frac{1}{p} & \frac{1}{p} & \frac{1}{p} & -\frac{1}{p} & -\frac{1}{p} & -\frac{1}{p} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{b_{MT}}{T_{MT}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{b_{FC}}{T_{FC}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_{DEG}}{T_{DEG}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad C = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{WT}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_L} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A=\begin{bmatrix} -\Delta O_{PV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta O_{WT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta O_{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta r_{BES}}{T_{BES}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta r_{FES}}{T_{FES}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta B=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta b_{MT}}{T_{MT}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta b_{FC}}{T_{FC}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta b_{DEG}}{T_{BEG}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

式(3.3)中的参数不确定性ΔA和ΔB的形式如式(3.4)所示，

$$[\Delta A(t)\Delta B(t)]=HF(t)[E_1\ E_2], \tag{3.4}$$

其中，$F(\cdot)$为未知时变矩阵，且满足

$$F(t)'F(t)\le I, \tag{3.5}$$

其中I为单位矩阵，H，E_1，E_2为实常数矩阵，其值来源于工程实际。(3.4)和(3.5)中所描述的参数不确定性结构已经得到了广泛的应用；相关工作如，文献 [72], [86], 等。

3.3 问题架构

在本节中，我们提出了保持能量路由器直流母线电压稳定的混合控制问题，并将能量路由器的最优能量调度策略架构为一个鲁棒混合H_2/H_∞控制问题。

3.3.1 鲁棒H_∞控制问题架构

在电力系统领域，鲁棒控制理论已被应用于电压稳定控制问题[86]和频率调节问题[46],[89]。对于本章所考虑直流型能量路由器，为了减小其母线电压动态偏差幅度，必须对微型涡轮发电机、燃料电池、柴油发电机等设备设计适当的控制输入信号。在本节中，我们提出了一个鲁棒H_∞控制问题，使得能量路由器系统直流母线电压稳定。

为了保持电压稳定，既要考虑系统内部参数不确定性，又要考虑系统外部扰动输入。首先，我们给出了鲁棒稳定性的定义，即能量路由器对系统参数建模误差具有鲁棒性。

定义 3.1 对于所有系统参数不确定性$\Delta A(t)$, $\Delta B(t)$, 如果对任何的$\varepsilon > 0$,可以实现$|x(t)|^2 < \varepsilon$, 那么，系统(3.3)在 $u = 0$ 且 $v = 0$的情况下是鲁棒稳定的。

其次，对于所考虑的能量路由器系统，为了保证直流母线电压在外部干扰输入下的稳定性，我们利用H_∞性能来描述光伏、风机和负载输出功率变化时能量路由器所需的抗干扰性能。式(3.2)中直流母线电压偏差ΔV被视为能量路由器系统被控输出，记为z_1。然后可以得到$z_1 = D_1 x$，其中，$D_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$.

H_∞性能的定义如下。

定义 3.2 (见文献 [72])给定一个标量$\gamma > 0$，能量路由器系统的H_∞性能被定义为$||z_1(t)|| < \gamma||v(t)||$，其中，$\|\cdot\|$被定义为

$$\|z_1(t)\| \triangleq \left(\int_0^\infty |z_1(t)|^2 dt\right)^{1/2}.$$

标量γ称为扰动衰减系数。H_∞代价函数$J_\infty(u,v)$可表示为

$$J_\infty(u,v) \triangleq \int_0^T (z_1{}'z_1 - \gamma^2 v'v)dt\,. \tag{3.6}$$

只要一个能量路由器动力系统同时满足定义 3.1 和定义 3.2，我们就认为可以得到鲁棒H_∞性能。除了具有鲁棒H_∞性能外，还需要考虑能量路由器的运行成本优化问题。从控制的角度我们将其称为H_2性能，这在下一小节中给出。

3.3.2 H_2控制问题架构

根据能源互联网的工作原理，期望优先实现各能量路由器自主电能供需平衡 [14], [15]。因此，任何一个能量路由器内的功率不平衡事件都会导致整个能量路由网络复杂的能量调度问题，给能源互联网运行带来额外的时间成本和经济成本。一般情况下，能量路由器系统的运行成本会受到许多不同因素的影响，例如可控分布式发电机的调控和不同能量路由器之间的功率交换。

为实现所考虑的能量路由器系统的灵活能量管理方案，将相应的系统观测值记为z_2，并给出其定义

$$\begin{aligned} &z_2 \\ &= [\alpha_1\Delta P_{AER} \quad \alpha_2\Delta P_{MT} \quad \alpha_3\Delta P_{FC} \quad \alpha_4\Delta P_{DEG} \quad \alpha_5\Delta P_{BES} \quad \alpha_6\Delta P_{FES}]', \end{aligned}$$

其中的系数$\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4,\alpha_5$和$\alpha_6$是用来调整相关因素的权重,从而影响能量路由器系统的运营成本。下面将讨论这些因素带来的影响。

首先，值得注意的是，如果两个相互连接的能量路由器相距较远，那么能量传输成本可能相对较高。此外，在能量路由器网络中，如果在多个连接节点之间频繁地传输电能，该行为成本较高 [13], [15]。在本章中，由于我们关注的是一个指定的能量路由器系统（特指ER_1），限制ER_1和ER_2之间的功率传输是有必要的。

此外，能量路由器系统中的分布式发电机和储能设备也会影响运行成本，因此它们的协同运行是实现理想能量管理方法的前提。然而，这些设备的不合理使用将增加额外的操作和维修费用。因此，在设计控制策略时，还应考虑可控发电设备的功率输出调整以及电池和飞轮储能的充放电带来的额外成本。

由(3.1)-(3.3)可以很容易地发现存在一个矩阵D_2，使得$z_2 = D_2 x$。D_2可以被表示如下

$$D_2 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_1 & -\alpha_1 & \alpha_1 & \alpha_1 & \alpha_1 & -\alpha_1 & -\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_6 & 0 \end{bmatrix}.$$

利用上述设计的系统观测值z_2，可以将H_2代价函数表达式为:

定义 3.3 考虑所有参数不确定性，将H_2代价函数$J_2(u,v)$表示为所研究系统(3.3)实现最坏情况扰动输入时H_2性能的上界，定义为:

$$J_2(u,v) = \sup_{F(t)} \int_0^T z_2'(t) z_2(t) dt\,. \tag{3.7}$$

3.3.3 混合H_2/H_∞控制问题架构

目前已建立了鲁棒H_∞控制和H_2控制的目标函数。因此，我们可以将所研究的能量路由器系统改写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Cv, \\ z_1 = D_1 x, \\ z_2 = D_2 x. \end{cases} \tag{8}$$

下面给出了研究的能量路由器系统的H_2/H_∞混合控制的定义。

定义 3.4 混合H_2/H_∞控制问题的目标是找到一个控制器$u(t) = Kx(t)$，从而实现下面两个条件：

(i) 参数带不确定性的系统是稳定的,且满足H_∞性能$||z_1(t)|| < \gamma||v(t)||$;

(ii) 为了实现H_2性能，(3.7)中定义的$J_2(u,v)$被最小化。

3.4 混合H_2/H_∞控制问题求解

基于文献 [72], [90]的结果，我们利用两个数学定理得到了能量路由器系统所需控制器。通过对定理 3.1 和定理 3.2 中引入的线性矩阵不等式进行求解，可以求解混合H_2/H_∞控制问题。

定理 3.1 (见文献 [72]) 对于一个给定的常数$\gamma > 0$和系统(3.8),存在一个控制器$u(t) = Kx(t)$,这样可以满足系统鲁棒稳定性和H_∞性能$||z_1(t)|| < \gamma||v(t)||$,当且仅当存在两个标量$\alpha > 0$, $\beta > 0$,一个对称正定矩阵X和一个矩阵V,下面的线性矩阵不等式成立,

$$\Gamma = \begin{bmatrix} W & W_1' & X'D_1' & X'D_0' \\ W_1 & -\alpha I & 0 & 0 \\ D_1X & 0 & -\beta I & 0 \\ D_0X & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{3.9}$$

其中

$$W = X'A' + V'B' + AX + BV + \alpha HH' + \beta\gamma^{-2}CC',$$

$$W_1 = E_1X + E_2V.$$

此外,如果(3.9)有一个可行的解决方案(α, β, X, V),那么状态反馈控制器可以被选为

$$u(t) = VX^{-1}x(t). \tag{3.10}$$

同时,将控制器(3.10)代入(3.8)得到H_2性能$J_2(u,v)$的上界可以由$J_2(u,v) = tr(C'X^{-1}C)$计算，其中$tr(\cdot)$表示矩阵的迹（trace)。

定理 3.2 (见文献 [90]) 考虑一个鲁棒稳定的系统,如果存在两个对称正定矩阵X, N,一个矩阵V和两个标量$\alpha > 0$, $\beta > 0$,那么这样的问题

$$\begin{aligned} \min_{\alpha,\beta,X,V,N} \quad & z = tr(N) \\ s.t. \quad & \Gamma < 0, \quad \begin{bmatrix} -N & C' \\ C & -X \end{bmatrix} < 0, \end{aligned} \tag{3.11}$$

有一组解决方案(α,β,X,V,N)，那么$u(t)=VX^{-1}x(t)$是H_2/H_∞控制器。

这两个定理的证明细节被省略了。

在本章中，由于分布式能源的随机性和环境因素的不确定性，式(3.2)中描述的光伏、风机和负载的动态功率只能在很短的时间内有效。从这个意义上讲，为了实现所研究的能量路由器系统的长期运行目标，需要将整个时间区间划分为一系列较小的时间区间，这样就可以利用线性化建模(3.8)对每个单独的时间区间得到一个合适的混合H_2/H_∞控制器。虽然线性模型有一定的局限性，但在较短的时间内，由于近似解的计算复杂度较低，因此通常很受欢迎。此外，我们还可以根据系统状态调整H_2性能中的权重因素，从而为能量路由器系统的运行提供更灵活的解决方案。更具体地说，所提出的混合H_2/H_∞控制方法的具体步骤如图 3.2 所示。

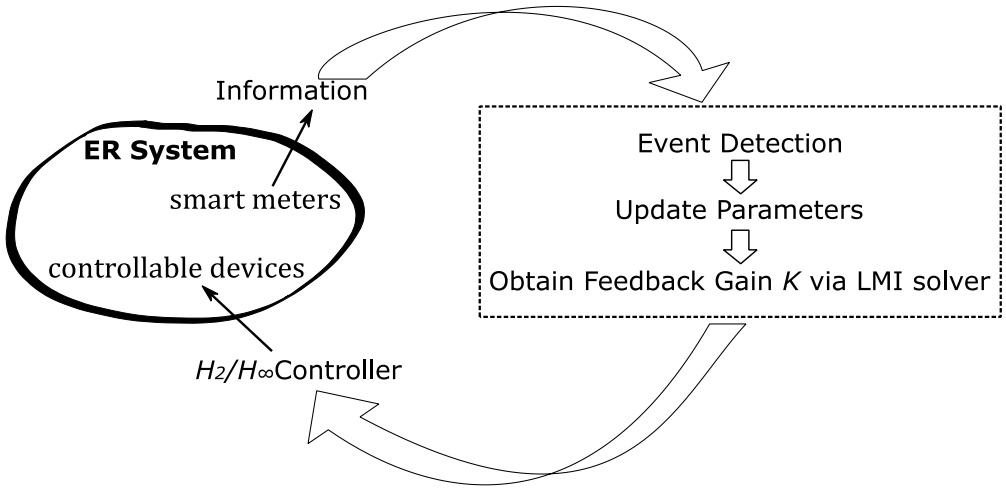

图 3.2 混合H_2/H_∞控制方法的实现过程

从图 3.2 中可以看出，在迭代过程中，D_2中的参数是根据之前智能电表获取的信息来设计的，可以很好地处理能量路由器系统中发生的不同事件。然后，利用系统(3.8)和H_2/H_∞控制方法，可以通过凸优化技术得到

控制器。因此，我们得到的控制器被应用于能量路由器系统的当前时间段，直到下一次迭代。通过重复这样的迭代，可以实现能量路由器系统的长期运行。

3.5 数值仿真

在本节中，我们以三种不同场景为例，验证了所提出的混合H_2/H_∞控制方法的有效性和可行性。所研究的能量路由器系统的参数是根据工程实践中的典型参数生成的，见表 3.1。

表 3.1 系统参数

参数	取值	参数	取值
T_{PV}	1.2	b_{MT}	1.2
T_{WTG}	1.7	b_{FC}	1.3
T_L	0.8	b_{DEG}	1.4
T_{MT}	0.05	r_{BES}	0.1
T_{FC}	0.06	r_{FES}	0.1
T_{DEG}	0.07	p	0.01
T_{BES}	0.9	q	0.49
T_{FES}	0.8		

利用 MATLAB R2018b 的 CVX 工具箱，对定理 3.1 中的线性矩阵不等式和(3.11)中的凸优化问题进行了求解。这样，可以得到混合H_2/H_∞控制器的反馈增益K。根据(3.7)，通过最小化H_2性能J_2，可以限制z_2的累积偏差。因此，为了满足不同场景下的需求，我们可以调整D_2中的权重因子，从而实现不同的目标。在仿真里，Python 包裹，即 Numpy, Scipy，等被用于计算画图。我们主要考虑以下三个场景。

3.5.1 场景一

我们对本章提出的H_2/H_∞混合控制器下的电压稳定性调节性能进行了评估。D_2中的参数设置为$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$。仿真结果如图 3.3 所示。

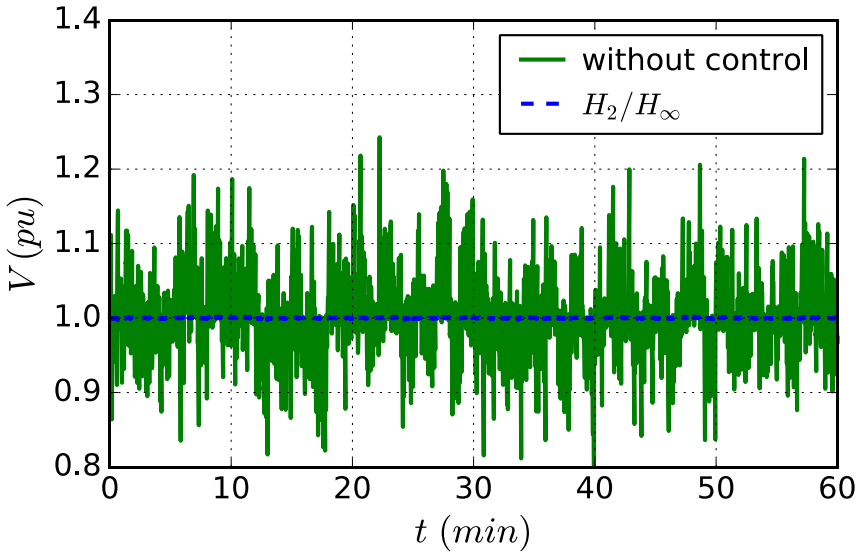

图 3.3 动态直流母线电压偏差

从图 3.3 中可以看出，当混合H_2/H_∞控制器应用于能量路由器系统时，直流母线电压的动态偏差成功地被控制在一个小范围内。此外，混合H_2/H_∞控制方法的电压调节性能明显优于未被控制的场景。仿真结果表明，该控制方法对稳定电压具有较好的控制效果。

3.5.2 场景二

在本例中，我们主要关注燃料电池的合理使用。如上文所述，燃料电池的输出功率可以根据光伏、风机和负载的功率偏差进行调整，从而实现对能量路由器系统的电压调节。然而，非必要的频繁调整将导致额外的燃料消耗。假设在考虑的时间段内，我们遇到了暂缺燃料的情况。因此，有必要避免燃料电池不必要的频繁电力调控。为了实现这一目标，z_2中燃料电池的权重因子α_3应该被放大。更具体地说，D_2中参数被设置为$\alpha_1 = 1, \alpha_3 = 3, \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$。此外，为了展示定理 3.1 中提出的

H_2/H_∞混合控制方法相对于H_∞控制器的优越性，其表现性能在图 3.4 和图 3.5 中分别被对比了。

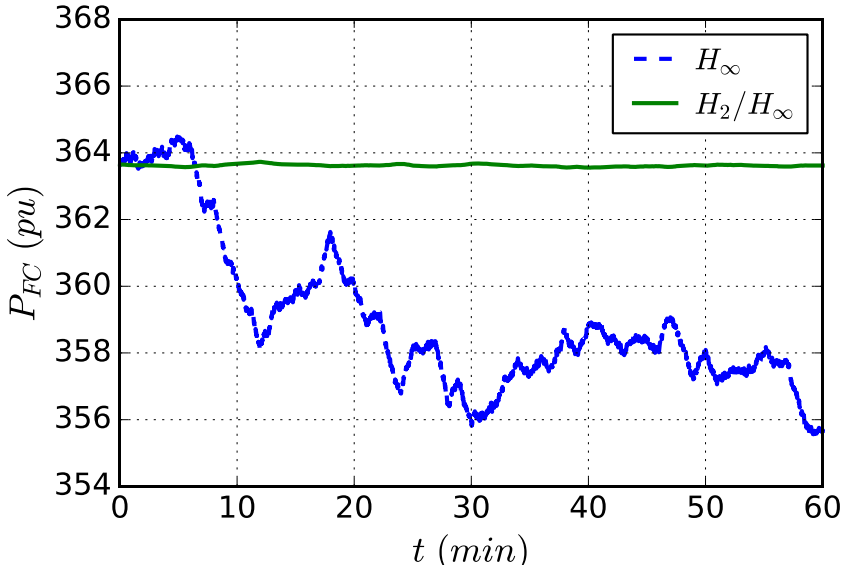

图 3.4 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下燃料电池功率输出曲线

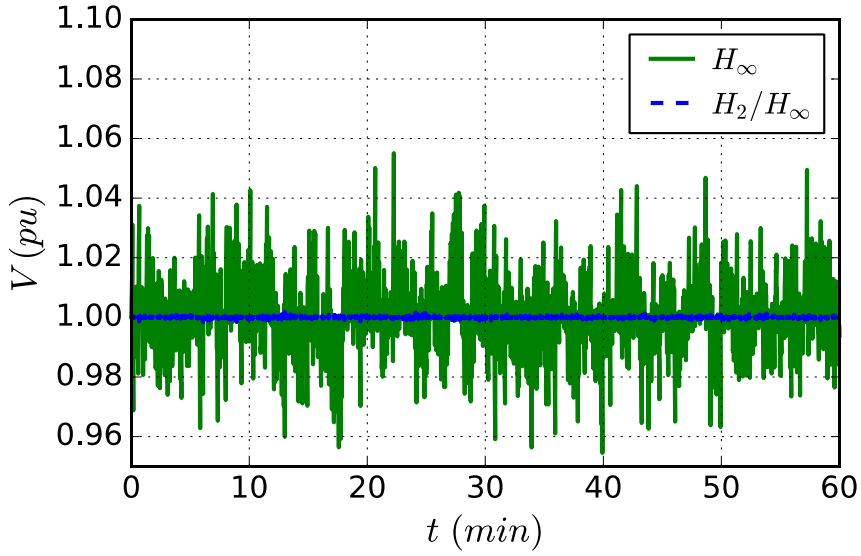

图 3.5 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下直流母线电压偏差曲线

很容易发现，在混合H_2/H_∞控制下，图 3.4 中燃料电池的功率动态波动明显小于其在H_∞控制下的功率波动。此外，从图 3.5 可以看出，文章提出的混合H_2/H_∞控制比H_∞控制对于电压稳定性控制来说效果更好。因

此，在这种场景下，我们认为提出的混合H_2/H_∞控制方法的是更具灵活性且令人满意的。

3.5.3 场景三

为了进一步验证所提控制方法的灵活性，我们考虑了一个不同的能量路由器系统场景，并考虑更长的时间尺度。假设三小时内，分布式发电机的部分微型涡轮发电机、柴油发电机、燃料电池可能发生损坏。这将导致可控发电设备控制能力的下降。为了保证 ER 系统的正常运行，控制器的设计方法也应相应地进行调整。针对这三小时，我们设置D_2的参数为$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1,\ \alpha_5 = \alpha_6 = 0$。

为了评价该控制方法的有效性，在仿真过程中，将仿真结果与H_∞控制结果进行了比较。图 3.6、图 3.7 和图 3.8 分别显示了微型涡轮发电机、柴油发电机、燃料电池在这三个小时内的动态功率。

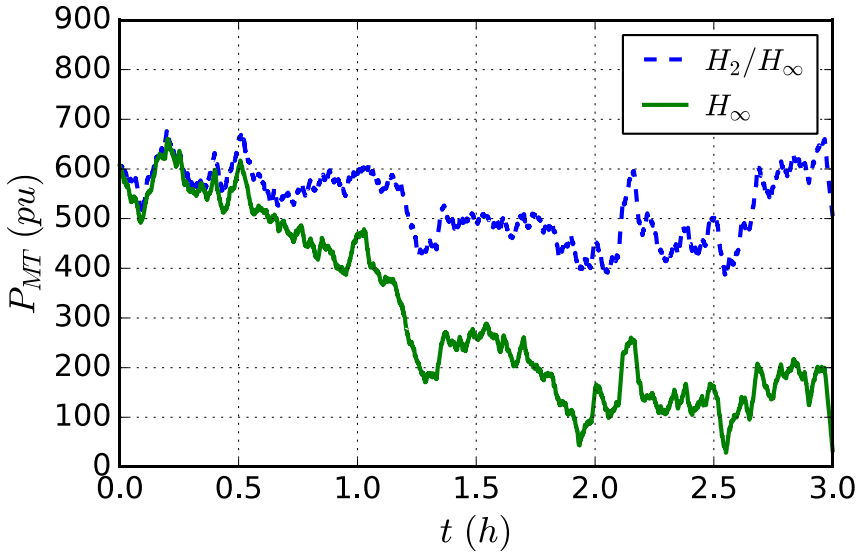

图 3.6 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下微型涡轮发电机功率动态

由图 3.6 可以看出，在混合H_2/H_∞控制方案下微型涡轮发电机的输出功率波动幅度小于其在H_∞控制器下。因此，微型涡轮发电机发生的故障

也被适当地考虑了。另一方面，我们认为H_∞控制器可能会导致系统出错，因为这样的影响没有被完全考虑到。

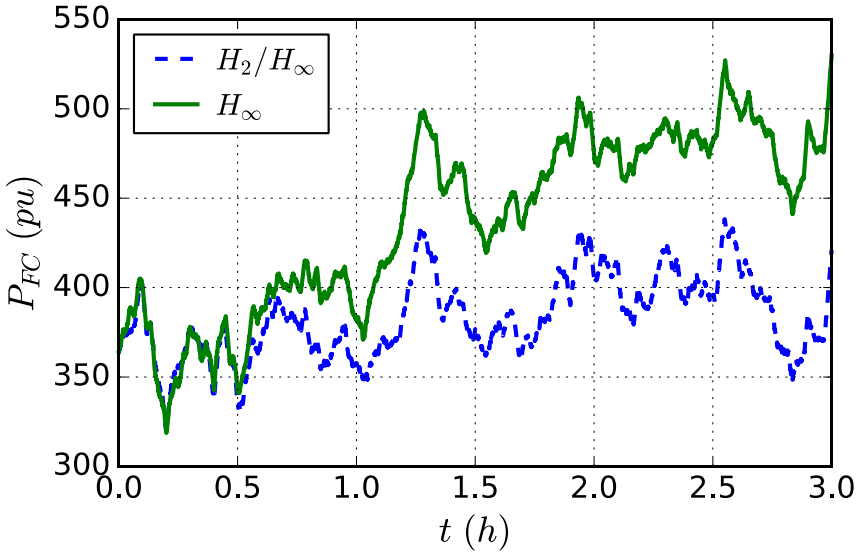

图 3.7 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下燃料电池动态功率

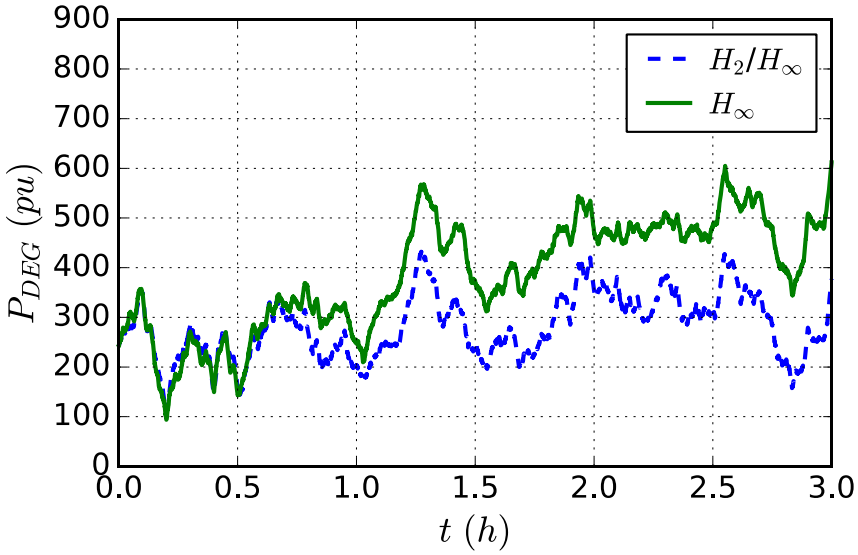

图 3.8 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下柴油发电机动态功率

对于燃料电池和柴油发电机的控制效果，我们也可以得出类似结论。由图 3.7 和图 3.8 可以看出，燃料电池和柴油发电机在三小时内的功率输出调整是受限的，即，这些设备发生故障。此外，从图 3.9 所示的电压偏

差动态可知，所提出的混合H_2/H_∞控制器能够考虑不同的系统状态，同时保证了与定理 3.1 中的H_∞控制几乎相同的电压调节性能。

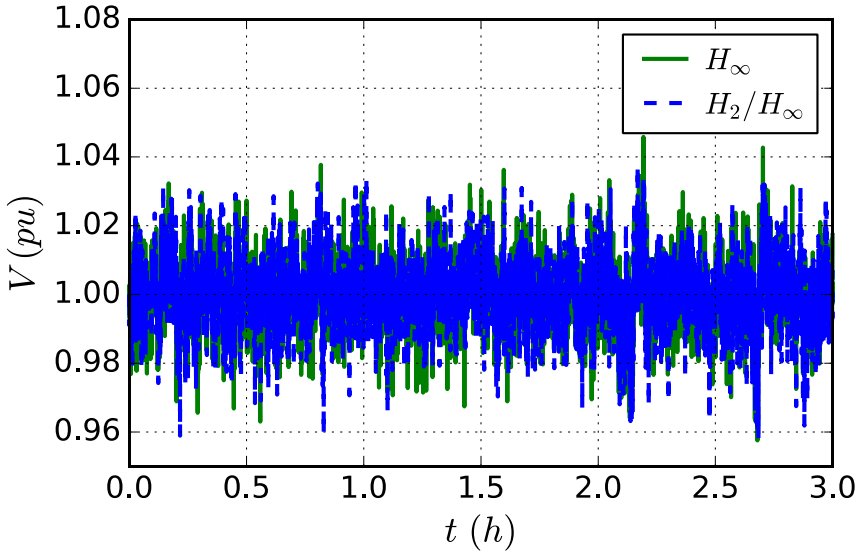

图 3.9 混合H_2/H_∞控制和H_∞控制下电压偏差曲线

通过对上述仿真的比较分析，可以说明本文提出的混合H_2/H_∞方法是较为令人满意的。此外，通过考虑能量路由器系统运行的限制条件，本章提出的方法能够实现对相关设备更加灵活的管理，从而使能量路由器系统稳定高效地运行。

3.6 结论

本章研究了能源互联网场景下典型的能量路由器系统。为了保证直流母线电压的鲁棒稳定性和合理的能量管理策略，采用常微分方程描述所考虑的能量路由器系统的功率动态，构造并求解了一个混合鲁棒H_2/H_∞控制问题。

值得注意的是，能量路由器直流母线的电压稳定可以通过一个直接连接到直流母线的电容器自然获得，这被认为是未来可能的补充工作。将超级电容直接连接到直流母线是提高系统短期暂态稳定性的重要措施。这

里，一个有趣的问题是，当超级电容器连接到直流母线时，直流母线到达稳定需要多长时间。如果希望系统立即稳定，而不是简单地等待自然稳定，如何设计一类控制策略仍然是一个悬而未决的问题。

第四章 能源互联网随机优化控制：一个自底向上的能量管理方法

变量与参数缩略词

P_{BES}^{L}	电池功率上限
P_{PV}	光伏输出功率
P_{solar}	理论太阳辐射值
P_{PV}^{D}	P_{PV}确定性部分
P_{PV}^{S}	P_{PV}随机性部分
P_{L}	负荷功率
P_{L}^{D}	P_{L}确定部分
P_{L}^{S}	P_{L}随机性部分
P_{MT}	微型涡轮发电机输出功率
P_{BES}	电池储能输入/输出功率
P_{ER}	能量路由器输入/输出能量
Q_{s}	电池容量
η_{in}	电池充电系数
η_{out}	电池放电系数

4.1 介绍

在过去的几十年里，微网能量管理问题受到了很大重视并得到了巨大发展[5], [91], [92], [93], [94]。文献 [91]考虑了与大电网相连的居住型微网的能量管理策略。一类微网能量管理问题通过文献 [92]的随机连续时间模型得到了研究。文献 [93]研究了微网的分布式控制和优化问题。文献 [94]研究了微网网络的协同能量管理策略。但是，出于区域能源互联网的系统复杂性，该场景的能量优化问题还有待进一步研究。

另一方面，针对光伏发电和负荷功率的预测和建模已经有许多基础性研究结果[95],[96],[97],[98]。然而，以前采用的发电建模方法存在诸多不足。例如，文献 [95]中使用半马尔可夫模型描述光伏发电，尽管该方法能描述光伏发电的随机性，但很难获得光伏发电的总体趋势。在文献 [96]和[98]中，作者使用神经网络对光伏功率和负荷功率建模。尽管神经网络能够描述该复杂模式，但对其随机性不能够完全描述。文献 [99]仅使用基于维纳过程获得的随机微分方程用于对负荷功率动态建模，并未考虑神经网络技术。

本章我们主要探索如何实现区域能源互联网场景下自底向上的能量管理准则，并探索设计相应的控制策略。特别的，本章研究的控制策略仅设置在微型涡轮发电机和能量路由器中，控制目标包含以下三个方面。首先，通过自底向上能量管理准则，本地微网能量波动应由本地储能设备和可控微型涡轮发电机优先管理。其次，基于部分储能设备成本较高，以及频繁大规模的充放电会减少其服务寿命的客观事实[100]，应将储能设备的运维成本控制在一定水平之下。第三，应该避免对微型涡轮发电机和能量路由器的过度控制，因为过强的控制会引入额外的操作成本并可能毁坏这些设备[46]。

过去对能源互联网的研究并未同时考虑以上三个准则。为了可靠地解决以上挑战，需要建立一个精确的能源互联网系统模型。基于文献 [101]的真实数据，一类同时考虑循环神经网络[102]和 Ornstein-Uhlenbeck 随机过程[103]的新型混合模型被用于光伏功率和负荷功率的建模。然后，所考虑的能源互联网能量管理问题被设计为一个随机优化控制问题。并通过开源 C++程序 BOCOPHJB[104]提供的动态规划方法得到解决。仿真显示了新型混合建模方法的有效性和设计控制器的可行性。

本文的主要贡献如下：

1) 通过所提方法，实现了能源互联网自底向上的能量管理准则。相比于以前工作仅仅提出了自底向上的概念，本章第一次从系统控制的视角在能源互联网中实现了以上关键准则。

2) 基于自底向上准则，优先实现了各个微网的能量供需平衡，并随后成功实现全网能量供需平衡。通过此种方法，可以更可靠地实现用户能量供给。

3) 在设计能量管理控制器时，考虑了储能设备的合理利用，以保证其寿命得到有效延长。

4) 基于所提出的控制器，实现了微型涡轮发电机这类分布式可控设备的合理利用，避免了该设备过度控制。

5) 过去在能源互联网领域并未同时考虑以上三个目标。本文提出，一旦获得单个微网的控制策略，该策略可以很容易被应用到区域能源互联网场景里的其它微网。

6) 我们通过数字仿真验证了本章所提出的控制策略的可行性和有效性，结果展示了所提方法优于传统的基于确定控制的方法。

7) 除了能量管理问题上的成果，本章通过使用结合神经网络和随机过程的新型建模方法，建立了对光伏功率和负荷功率的精确模型。特别的，此前并没有考虑同时使用循环神经网络和Ornstein-Uhlenbeck随机过程相关技术来建立发电模型。需要强调的是，通过以上提出的发电建模方法，可以获得更可靠的能量管理问题相关结果。

本章其它部分组织如下。4.2 节介绍了能源互联网场景中对一个微网的动态建模过程。4.3 节将实际能量控制问题转化成随机最优控制问题，并介绍了解决方法。4.4 节进行了相关仿真。最后，在 4.5 节进行了本章总结。

4.2 系统建模

本节介绍了能源互联网场景下微网的组成部分。随后建立相关发电模型。

4.2.1 微网成分和数据源

如图 4.1 所示，本章所研究的微网假定由分布式光伏、负荷、微型涡轮发电机和储能设备组成。这里假定该微网通过一个能量路由器与多个微网相连。控制器仅设置在微型涡轮发电机和能量路由器中。假定分布式光伏和负荷不能被控制。储能设备可以被动地吸收震荡功率。图 4.1 中，功率总线上的偏差既可以被储能吸收，也可以通过能量路由器基于与之相连接的多微网功率交换得以消纳。

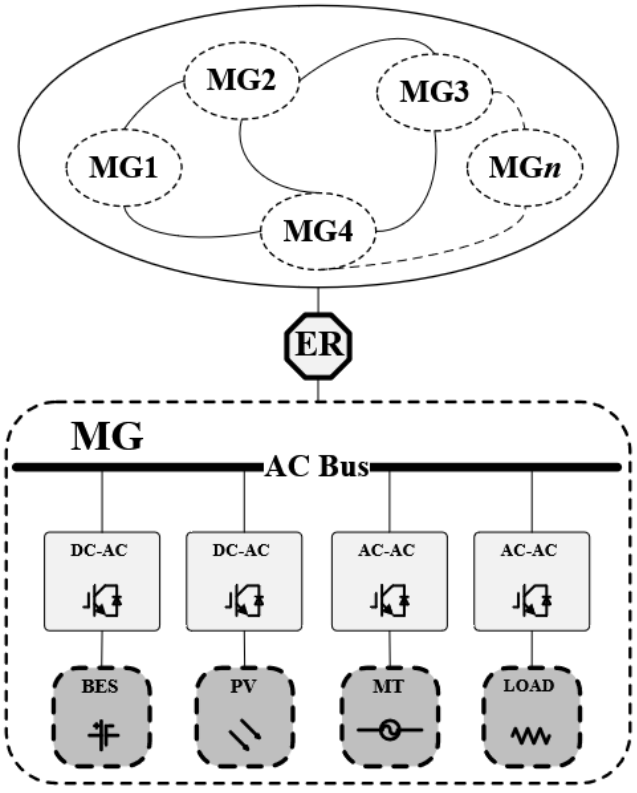

图 4.1 研究的微网结构

这里使用文献 [101]中整年的发电和天气数据来建立新的光伏发电和负荷功率模型。功率数据包括参加 Austin, Texas, USA 智能电网工程的城市建筑电力消费和光伏发电数据。分钟级的能源消费和生产数据被智

能电表所测量和记录。气象数据以小时为单位记录。所记录的气象信息包括天气概况，温度，湿度，气压，风速，云覆盖和降雨概率。

基于以上数据，所考虑的微网建模以分钟级进行。因为储能设备的反应时间通常为数百毫秒或更低 [105],[106]，这里假定功率总线的偏差能够立即被储能所吸收。因此，对储能动态功率的限制不在本章中考虑。

4.2.2 对光伏和负荷的混合功率建模方法

本章建立了一种针对光伏和负荷的新型功率模型，将其作为一类同时包含确定部分和随机部分的随机变量。数学上，我们将此类随机变量$X(t)$描述为

$$X(t) = X^D(t) + X^S(t), \qquad (4.1)$$

这里$X^D(t)$为确定部分，$X^S(t)$为随机部分。本章$X(t)$的值代表了文献 [101]中真实的光伏发电功率和负荷功率。

1）$X^D(t)$的预测模型

通过使用方窗函数（square window function）来平滑$X(t)$，能够去除$X^S(t)$的影响并获得$X^D(t)$的近似值。然后，通过使用 [101]中的相关数据来训练神经网络，我们能够预测$X^D(t)$。长短期记忆网络（long- and short-term memory network，简称为：LSTM）是一种循环神经网络，它能够描述隐藏在时间序列之中的相互关系 [96]。因为光伏发电的功率和负荷可能与历史数据有关。长短期记忆网络被用于预测$X^D(t)$。神经网络的结构如图 4.2 所示。

如图 4.2 所示，网络由一个长短期记忆网络层和 3 个全连接层（被称为：FC1，FC2，FC3）组成。长短期记忆网络层有 50 个节点，节点相关的激活函数为双曲正切（表示为图 4.2 的“tanh”）。三个全连接层分别包含 50，25 和 1 个节点，相关激活函数为修正线性单元（表示为图 4.2 中的“relu”）。对于时间t的每一个目标值，在过去的五个时间步长中（即$t-$

$4, t-3, t-2, t-1, t$）的相关特征被作为网络的输入。为了达到更好的性能，输入和目标数据均被缩放到[0,1]之间。均方误差被用作网络的损失函数。通过最小化网络输出的损失函数，可以获得$X^D(t)$的预测模型。

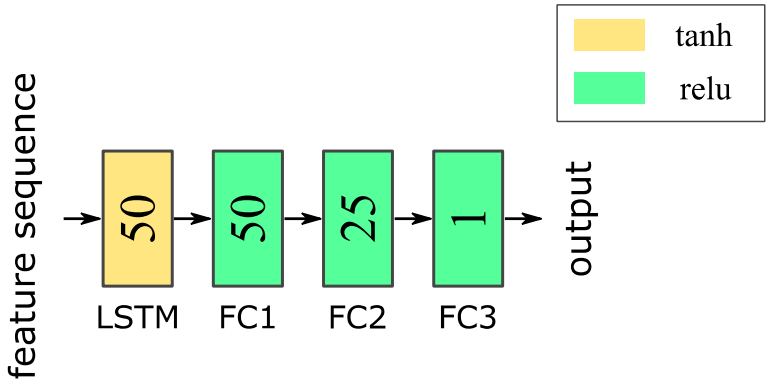

图 4.2 预测$X^D(t)$的神经网络结构

2）$X^S(t)$建模

因为光伏发电的输出功率受太阳能辐射和天气情况高度影响，真实的光伏输出功率存在较强的波动。类似的，人类活动影响负荷功率。为了用数学方法描述以上随机特征，文献 [86], [92], [99]引入了维纳过程对负荷功率进行建模。对于利用随机微分方程对光伏的功率建模的已有研究，读者可以参见文献 [86]。

在随机分析的分支中，存在许多类型的随机微分方程；例如，由维纳过程或 Levy 过程 [107]获得的随机微分方程，等。值得注意的是，由 Ornstein-Uhlenbeck 过程获得的随机微分方程 [103]在文献 [92]中被用于负荷功率建模。与文献 [92]中的建模技术类似，随机部分$X^S(t)$被假定为一个 Ornstein-Uhlenbeck 过程，相关表达式如下，

$$\mathrm{d}X^S(t) = k\big(\mu - X^S(t)\big)\mathrm{d}t + \sigma \mathrm{d}w(t), \qquad (4.2)$$

这里$w(t)$是一个维纳过程，k, μ和σ为常量参数。假定存在$X(t)$的真实值，只要获得$X^D(t)$的预测模型，$X^S(t)$的值可以立即计算得到。基于$X^S(t)$序

列，式（4.2）中的未知参数可以通过最大化似然估计方法得到 [108]。

假定这里有$n+1$个$X^S(t)$的连续值，时间步长为h。根据文献 [103]，X_{ih}^S和$X_{(i-1)h}^S$的转换密度为

$$X_{ih}^S|X_{(i-1)h}^S \sim N(\mu(1-e^{-kh})+e^{-kh}X_{(i-1)h}^S, \sigma^2(1-e^{-2kh})/(2k)). \tag{4.3}$$

相应的欧拉离散近似为

$$X_{ih}^S = k\mu h + (1-kh)X_{(i-1)h}^S + \sigma N(0,h), \tag{4.4}$$

这里$N(0,h)$代表正态分布。假定存在n对X_{ih}^S和$X_{(i-1)h}^S$，其对数似然函数为

$$H(k,\mu,\sigma) = -\frac{1}{2h\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}\left[X_{ih}^S - k\mu h + (kh-1)X_{(i-1)h}^S\right]^2 - n\ln(\sigma) - \frac{n}{2}\ln(2\pi h) \tag{4.5}$$

通过求解（4.6），

$$\begin{cases} \frac{\partial H(k,\mu,\sigma)}{\partial k} = 0, \\ \frac{\partial H(k,\mu,\sigma)}{\partial \mu} = 0, \\ \frac{\partial H(k,\mu,\sigma)}{\partial \sigma} = 0, \end{cases} \tag{4.6}$$

参数迭代公式在（4.7）中得到，

$$\begin{cases} k = -\frac{1}{h}\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{(i-1)h}^S-\mu)(X_{ih}^S-X_{(i-1)h}^S)}{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{(i-1)h}^S-\mu\right)^2}, \\ \mu = \frac{1}{khn}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{ih}^S + (kh-1)X_{(i-1)h}^S\right), \\ \sigma = \frac{1}{hn}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{ih}^S - X_{(i-1)h}^S + kh\left(X_{(i-1)h}^S-\mu\right)\right)^2. \end{cases} \tag{4.7}$$

因为（4.7）仍然很难直接求解，参数可以通过期望最大化算法得到 [109].

4.2.3 光伏功率建模

如上一小节中描述，光伏功率模型可以表示为

$$\begin{cases} P_{PV}(t) = P_{PV}^D(t) + P_{solar}(t)P_{PV}^S(t), \\ \mathrm{d}P_{PV}^S(t) = k_{PV}\left(\mu_{PV} - P_{PV}^S(t)\right)\mathrm{d}t + \sigma_{PV}\mathrm{d}w_{PV}(t), \end{cases} \tag{4.8}$$

这里$P_{PV}^{D}(t)$由图 4.2 中的神经网络预测得到。$P_{solar}(t)$是理论光伏辐射功率，$w_{PV}(t)$是一个定义在给定的完备滤波概率空间$(\Omega,\mathcal{F},\mathcal{P};\mathcal{F}_t)$内的标量维纳过程。

为获得一个$P_{PV}^{D}(t)$的预测模型，平滑后的光伏发电数据被作为网络输出的目标值。被用于网络输入的特征矢量由天气数据和理论太阳辐射功率组成。全年数据被随机划分为训练集和测试集；前一个被用于训练，后一个被用于测试。训练模型的性能如表 4.1 所示。

表 4.1 $P_{PV}^{D}(t)$模型的均方误差

数据集	均方误差
训练集	0.0072
测试集	0.0060

一旦获得$P_{PV}^{D}(t)$的模型，（4.8）中的不确定部分可以和（4.7）一起估计得到。

4.2.4 负荷功率建模

与光伏发电建模方法类似，负荷功率可以被表达为

$$\begin{cases} P_L(t) = P_L^D(t) + P_L^S(t), \\ \mathrm{d}P_L^S(t) = k_L\left(\mu_L - P_L^S(t)\right)\mathrm{d}t + \sigma_L \mathrm{d}w_L(t), \end{cases} \tag{4.9}$$

这里$P_L^D(t)$由图 4.2 中介绍的模型描述；$w_L(t)$是一个定义在给定的$(\Omega,\mathcal{F},\mathcal{P};\mathcal{F}_t)$内的标量维纳过程。我们假定$w_{PV}(t)$和$w_L(t)$是相互独立的。对于$P_L^D(t)$模型训练，天气数据，一天中的小时，一周中的天，一年中的天等相关数据被用作输入特征矢量。

训练和测试结果如表 4.2 所示。训练后的模型被用来估计$P_L^S(t)$的参数。最后得到：$k_L = 1.1372,\ \mu_L = 8.9251,\ \sigma_L = 61.8400$。

根据表 4.1 和表 4.2 中描述的结果，被训练网络的预测性能令人满意，

并没有发生过拟合。

表 4.2 $P_L^D(t)$模型的均方误差

数据集	均方误差
训练集	0.0030
测试集	0.0018

4.2.5 微网中其它部分功率建模

1）微型涡轮发电机输出功率建模

类似于文献 [5] , [86]中的微型涡轮发电机输出功率建模方法，本文应用以下线性常微分方程来描述其功率动态：

$$dP_{MT}(t) = -\frac{1}{T_{MT}}\big(P_{MT}(t) - K_{MT}u_{MT}(t)\big)dt, \tag{4.10}$$

这里K_{MT}是控制信号增益（最大化的微型涡轮发电机功率）；$u_{MT}(t)$为控制输入信号。

2）储能设备输出功率建模

这里标记储能设备在时间t的荷电状态值为$SOC(t)$。类似文献 [110]，以下常微分方程被用来描述$SOC(t)$，

$$\mathrm{d}SOC(t) = \frac{\eta\big(P_{BES}(t)\big)P_{BES}(t)}{Q_S}\mathrm{d}t, \tag{4.11}$$

这里，(4.11)中的系数$\eta\big(P_{BES}(t)\big)$定义如下：

$$\eta\big(P_{BES}(t)\big) \triangleq \begin{cases} \eta_{in} \ , & P_{BES}(t) \geq 0, \\ 1/\eta_{out}, & P_{BES}(t) < 0. \end{cases} \tag{4.12}$$

记储能荷电状态的下限为C_{min}，上限为C_{max}，那么荷电状态的可靠范围为$SOC(t) \in [C_{min}, C_{max}]$ [100] , [110]。

3）能量路由器输出功率建模

当指定微网缺少能量时，应当控制能量路由器从该微网的相邻微网协调输入功率。如果指定微网有剩余能量，且本地储能设备电量充足，冗

余能量应当被传输到其它相邻微网。当指定微网自主实现电能供需平衡时，所连接能量路由器无需工作。当广域范围内的所有能量路由器同时工作，则能量能够像因特网的信息交换一样被传输[14], [39], [40], [46]。

本章所研究的微网通过能量路由器与远端多微网相连。假定能量路由器有三种不同的工作模式：从指定微网向远端微网传输能量；停止工作；从远端微网向指定微网传输能量。将能量路由器的控制器标记为$u_{ER}(t)$，其在$[-1,1]$中取值。能量路由器的功率模型表达为

$$P_{ER}(t) = K_{ER}u_{ER}(t), \tag{4.13}$$

这里，K_{ER}为通过能量路由器传输功率的预设值。当$u_{ER}(t) = 0$时,能量路由器停止工作，当$u_{ER}(t)$在$(0，1]$中取任何正值时，能量路由器从指定微网向多微网传输能量；当$u_{ER}(t)$在$[-1,0)$中取任何负值时，能量路由器从多微网向指定微网传输能量。

4.3 随机最优控制问题架构和解决方案

在本节，控制目标被表达为一个随机最优控制问题，并通过动态规划方法解决。

4.3.1 系统数学化建模

基于动态功率表达式（4.8）-（4.13），我们将所考虑微网的合成系统表达为（4.14）和（4.15），

$$\begin{cases} P_{PV}(t) = P_{PV}^{D}(t) + P_{solar}(t)P_{PV}^{S}(t), \\ \mathrm{d}P_{PV}^{S}(t) = k_{PV}\left(\mu_{PV} - P_{PV}^{S}(t)\right)\mathrm{d}t + \sigma_{PV}\mathrm{d}w_{PV}(t), \\ P_{L}(t) = P_{L}^{D}(t) + P_{L}^{S}(t), \\ \mathrm{d}P_{L}^{S}(t) = k_{L}\left(\mu_{L} - P_{L}^{S}(t)\right)\mathrm{d}t + \sigma_{L}\mathrm{d}w_{L}(t), \\ dP_{MT}(t) = -\frac{1}{T_{MT}}\left(P_{MT}(t) - K_{MT}u_{MT}(t)\right)dt, \\ \mathrm{d}SOC(t) = \frac{\eta\left(P_{BES}(t)\right)P_{BES}(t)}{Q_S}\mathrm{d}t, \\ P_{ER}(t) = K_{ER}u_{ER}(t). \end{cases} \tag{4.14}$$

根据相关假设，功率总线上的能量波动可以通过能量路由器传输到其它微网，或者立即被储能所吸收，功率生产和消费的关系可以表达为

$$P_{MT}(t)+P_{PV}(t)-P_L(t)\pm P_{ER}(t)\pm P_{BES}(t)=0. \tag{4.15}$$

数学上，对于$t\in[0,T]$，（4.14）和（4.15）中定义的系统可以被改写为

$$\begin{cases}\mathrm{d}x(t)=[Ax(t)+Bu(t)+C]\mathrm{d}t+D\mathrm{d}W(t),\\ x(0)=x_0,\end{cases} \tag{4.16}$$

这里，$x(t)=[P_{PV}^S(t)\quad P_L^S(t)\quad P_{MT}(t)\quad SOC(t)]'$是系统状态，$u(t)=[u_{MT}\quad u_{ER}]'$是系统控制输入，随机过程$W(t)=[w_{PV}(t)\quad w_L(t)]'$.（4.16）中的系数$A$, B, C, D表达如下：

$$A=\begin{bmatrix}-k_{PV} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -k_L & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1/T_{MT} & 0\\ a(x(t),t)P_{solar}(t) & -a(x(t),t) & a(x(t),t) & 0\end{bmatrix},$$

$$B=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\\ \dfrac{K_{MT}}{T_{MT}} & 0\\ 0 & K_{ER}\end{bmatrix},\qquad C=\begin{bmatrix}k_{PV}\mu_{PV}\\ k_L\mu_L\\ 0\\ c(x(t),t)\end{bmatrix},\qquad D=\begin{bmatrix}\sigma_{PV} & 0\\ 0 & \sigma_L\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}.$$

此外，我们有

$$a(x(t),t)=\frac{\eta\big(P_{MT}(t)+P_{PV}(t)-P_L(t)+P_{ER}(t)\big)}{Q_S},$$

和

$$c(x(t),t)=a(x(t),t)\big(P_{PV}^D(t)-P_L^D(t)\big).$$

4.3.2 目标函数表达式

本章的主要目标是实现能源互联网自下而上的能量管理准则。本部分提出了描述此控制目标的一个目标函数的数学表达式。

但凡本地微网的自主功率平衡更倾向于被实现，那么经过能量路由器的功率流就应当被保持在相对较小的范围。另一方面，微型涡轮发电机、

储能设备和能量路由器间的协同操作，是自底向上能量管理方式的先决条件。非理性的使用微型涡轮发电机，储能设备和能量路由器会导致较高的操作和维护成本。当设计成本函数表达式时，需要考虑微型涡轮发电机功率管理，通过能量路由器实现能量交换以及储能设备充放电所带来的成本。

这里介绍特征函数

$$\mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]}SOC(t)=\begin{cases}1, & \text{if } SOC(t)\in[C_{min},C_{max}],\\ 0, & \text{if } SOC(t)\notin[C_{min},C_{max}].\end{cases} \tag{4.17}$$

基于（4.17），目标函数$J\big(0,x(0);u(\cdot)\big)$被定义如下，（省略时间$t$）

$$J\big(0,x(0);u(\cdot)\big)\triangleq\mathbb{E}\Bigg[\int_0^T\Bigg(\alpha_1\frac{p(|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L)}{P_{BES}^L}+\alpha_2u_{MT}^2+$$

$$\alpha_3u_{ER}^2\mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]}SOC(t)+\alpha_4\big[1-\mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]}SOC(t)\big]\Bigg)\,\mathrm{d}t\Bigg], \tag{4.18}$$

这里，$\mathbb{E}$代表数学期望。（4.18）中，常量α_1，α_2，α_3和α_4代表系统加权系数，公式（4.18）具体介绍如下。

因为储能设备的寿命与放电深度直接相关 [100]，为了合理利用储能设备，$P_{BES}(t)$应当被限制在最大功率输出P_{BES}^L范围内。（4.18）中的

$$\mathbb{E}\left[\int_0^T\frac{p(|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L)}{P_{BES}^L}dt\right]$$

对应以上管理准则。这里，惩罚函数$p(|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L)$被定义如下，

$$p(|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L)\triangleq\begin{cases}|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L, & |P_{BES}(t)|>P_{BES}^L,\\ 0, & |P_{BES}(t)|\le P_{BES}^L.\end{cases}$$

当储能设备的输入/输出功率位于上限P_{BES}^L之内，则

$$\frac{p(|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L)}{P_{BES}^L}=0.$$

如果储能设备的输入输出功率超过上限，该项将从 0 变化到一个正值$|P_{BES}(t)|-P_{BES}^L$（随超出数量增加）。因此，导致不合理利用储能设备的控制器将被此惩罚函数所惩罚。通过此方法，储能设备的服务寿命将被有

效延长。

尽管微型涡轮发电机强有力的控制器可以达到满意的控制效果，但可能发生过度控制，这会带来额外的设备维护费用。设定成本函数（4.18）中的项

$$\mathbb{E}\left[\int_0^T \alpha_2 u_{MT}^2\, dt\right],$$

并对其最小化，可以有效避免微型涡轮发电机过度控制的情形。

实现能源互联网自底向上管理准则的关键在于控制以下项的值

$$\mathbb{E}\left[\int_0^T \left(\alpha_3 u_{ER}^2 \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t) + \alpha_4[1 - \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t)]\right) dt\right], \tag{4.19}$$

将其控制在一个相对较低的水平。当$SOC(t) \in [C_{min}, C_{max}]$，$t \in [0,T]$，根据（4.17），可以得到$\mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t) = 1$，且（4.19）的被积函数变为$\alpha_3 u_{ER}^2 \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t)$.

因为自底向上准则优先解决实现本地自主功率平衡，在此情况下，通过能量路由器传递的能量应当被最小化，这被反映在设定成本函数（4.18）中的项

$$\mathbb{E}\left[\int_0^T \left(\alpha_3 u_{ER}^2 \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t)\right) dt\right].$$

在任何时间$t \in [0,T]$，如果本地储能设备几乎被完全充满，且在指定微网中，更多的能量一直不停地生产，（或者，如果本地储能设备能量几乎耗尽，且微网不断地需要更多能源），即，$SOC(t) \notin [C_{min}, C_{max}]$，则能量路由器的能量路由策略应当被实现。在此情况下，根据（4.17），我们有$\mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t) = 0$，且（4.19）式中的积分项变为

$$\alpha_4[1 - \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]} SOC(t)].$$

在此情形下，通过能量路由器的能量流不必被限制。然而，在实际微网操

作中，不推荐荷电状态 $SOC(t) \notin [C_{min}, C_{max}]$，这意味着

$$\mathbb{E}\left[\int_0^T \left(\alpha_4[1 - \mathbb{I}_{[C_{min},C_{max}]}SOC(t)]\right) dt\right]$$

的值需要被控制在一个相对较低的水平。

式（4.18）中，系数α_1，α_2，α_3和α_4的大小和权重可以根据实际工程的需要而调节。如果（4.18）中的成本函数$J\big(0, x(0); u(\cdot)\big)$被优化控制器$u(\cdot)$最小化，我们的控制目标将得以实现。

4.3.3 随机优化控制问题的解决方案

我们的目标是寻找一个控制器，以最小化（4.18）中的控制函数$J\big(0, x(0); u(\cdot)\big)$，同时符合系统（4.16）的条件，即，

$$\begin{aligned} \min_{u(\cdot)\in\mathcal{U}} \quad & J\big(0, x(0); u(\cdot)\big), \\ s.t. \quad & dx(t) = (Ax(t) + Bu(t) + C)dt + D\mathrm{d}W(t), \end{aligned} \tag{4.20}$$

这里设定$x(0) = x_0$; $\mathcal{U}$为所有可行控制器的集合。一个随机系统（4.16）的可行控制器是一个$\mathcal{F}_t$-自适应过程，在该过程下（4.16）有唯一解。

随机优化控制问题（4.20）能够用 BOCOPHJB 工具箱 [104]解决。主要结果在 4.4 节中验证。

4.4 数值仿真

4.4.1 针对光伏功率和负荷功率的混合建模验证

仿真使用文献 [101]中 2016 年 8 月 17 日的数据。首先获得光伏发电和负荷功率的预测值。图 4.3 和图 4.4 分别比较了真实数据和我们针对光伏发电和负荷功率提出的混合模型。真实功率数据以实线表示，神经网络的输出以点划线表示。图 4.3 中的划线对应一次仿真中通过式（4.8）预测的光伏发电功率。类似的，图 4.4 中的划线对应一次仿真中从（4.9）预测的负荷功率。在 200 次仿真中，几乎大多数所提混合光伏模型的输出功率位于图 4.3 的灰色区域。从图 4.3 中可以看出，真实光伏发电功率曲线

几乎位于灰色区域。类似的结果和评价可用于图 4.4。基于此，所提混合建模方法的有效性得到了验证。

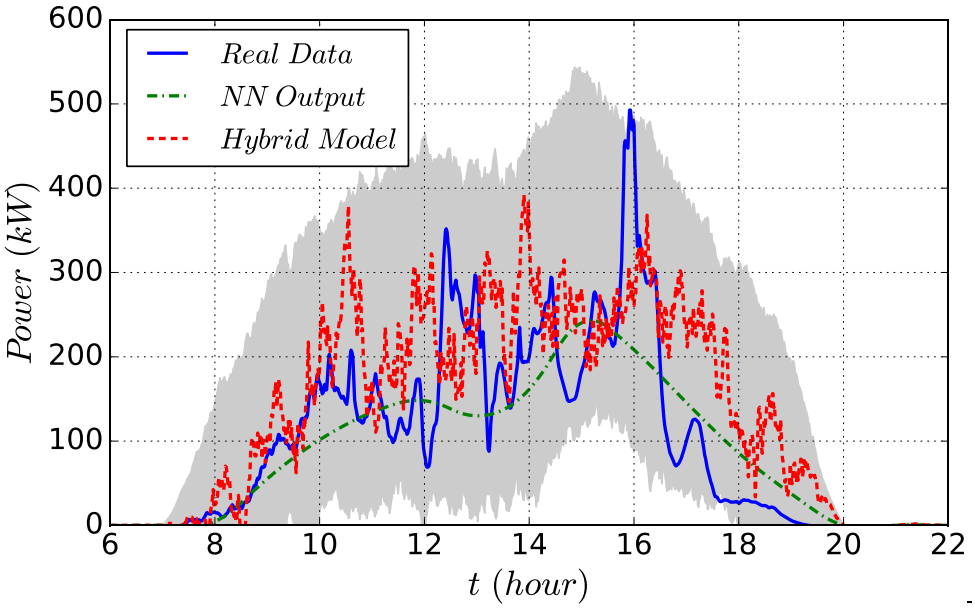

图 4.3 光伏发电典型建模结果

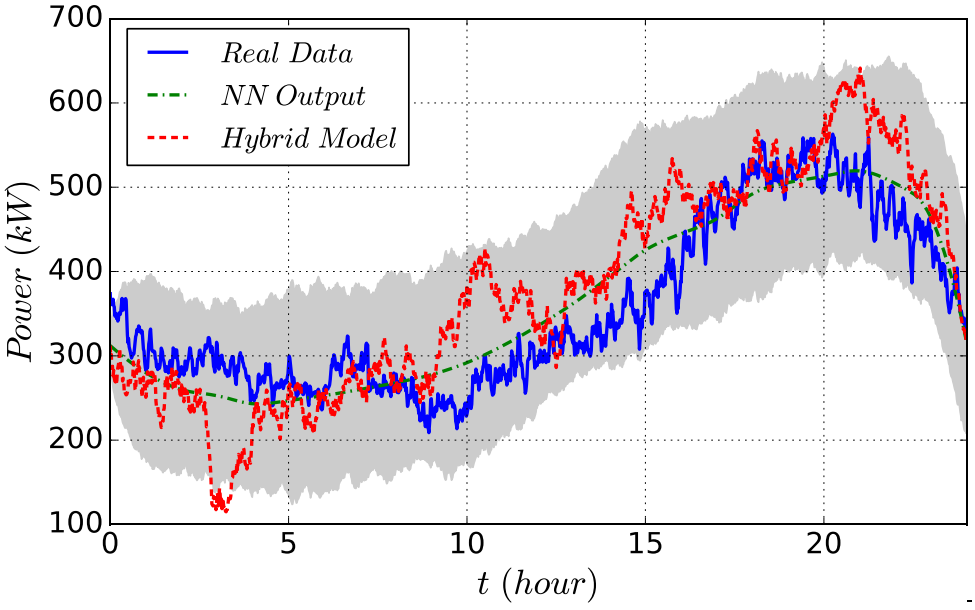

图 4.4 负荷功率典型建模结果

4.4.2 典型仿真结果

仿真时间间隔设置为从早上 6 点到下午 4 点，相关参数由表 4.3 提

供。

表 4.3 系统参数

参数	取值	参数	取值
T_{MT}	$3\ min$	C_{Min}	0.2
K_{MT}	$400\ kW$	C_{Max}	0.9
K_{ER}	$100\ kW$	C_{Min}^{T}	0.5
P_{BES}^{L}	$200\ kW$	C_{Max}^{T}	0.8
Q_S	$125\ kWh$	η_{in}	0.97
α_1	3.5	η_{out}	0.95
α_2	4.9	α_3	10.7
α_4	1×10^{20}		

图 4.5 描述了负荷、光伏发电和微型涡轮发电机的功率波动。图 4.6 显示了储能设备功率。如图 4.5 所示，微型涡轮发电机的输出功率对光伏发电和负荷功率波动进行了有效的响应。从图 4.6 可以看到，储能功率曲线的主要部分被限制在 200KW 以下。

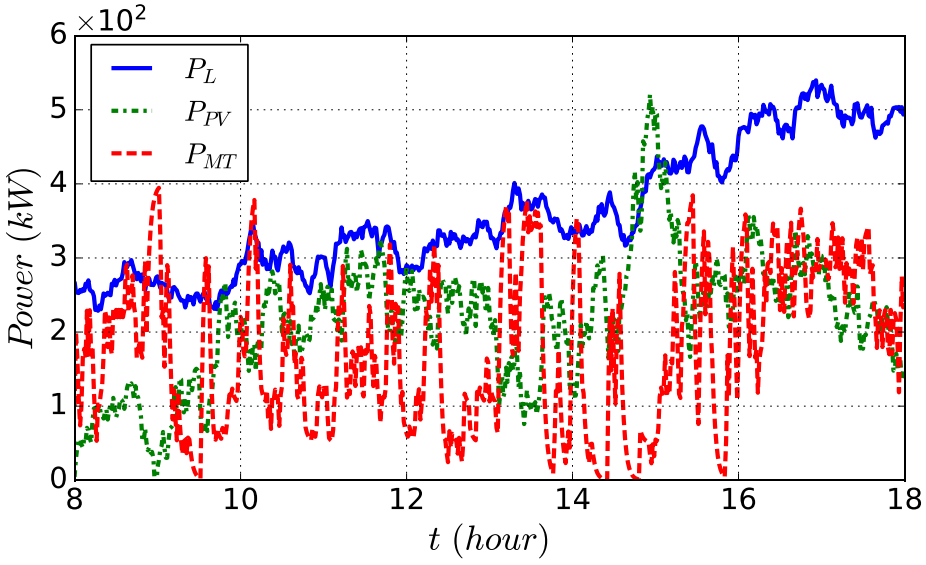

图 4.5 所提控制方法下光伏、微型涡轮发电机、负荷动态功率

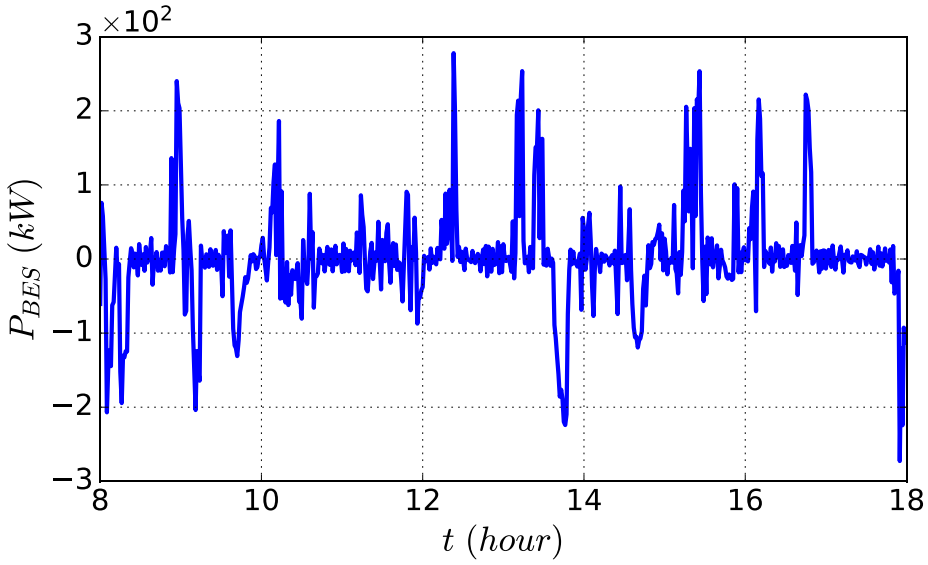

图 4.6 所提控制方法下储能设备动态功率

图 4.7 展示了储能设备和能量路由器的能量输出曲线。可以看到，功率总线上的剧烈功率波动大多被储能设备所消除。基于储能荷电状态的限制，有可能出现通过能量路由器传输的能量有时大于储能所吸收的能量的情况。

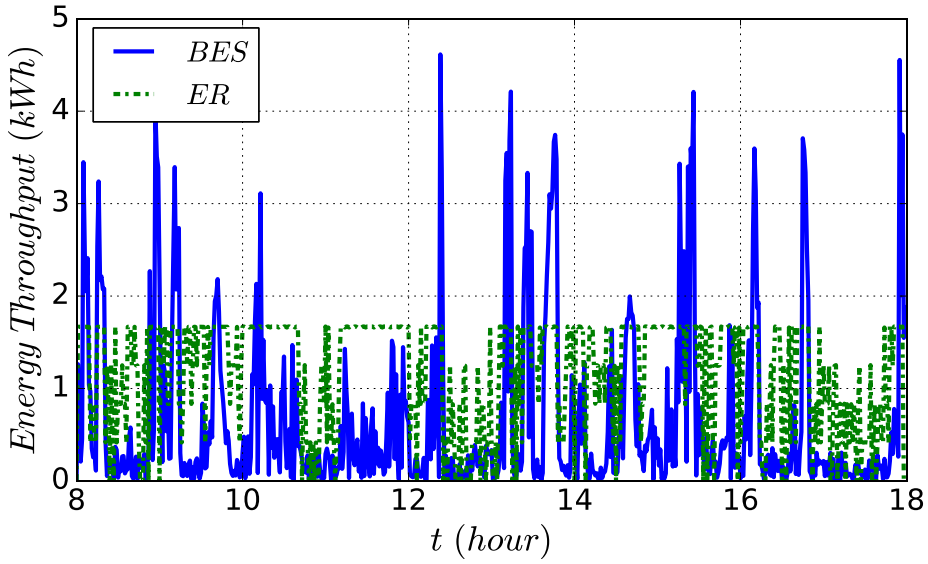

图 4.7 所提控制方法下储能设备和能量路由器能量输出

图 4.8 显示了储能荷电状态曲线。很明显，在仿真期间，储能荷电状

态成功地保持在（4.17）所提的约束范围内。

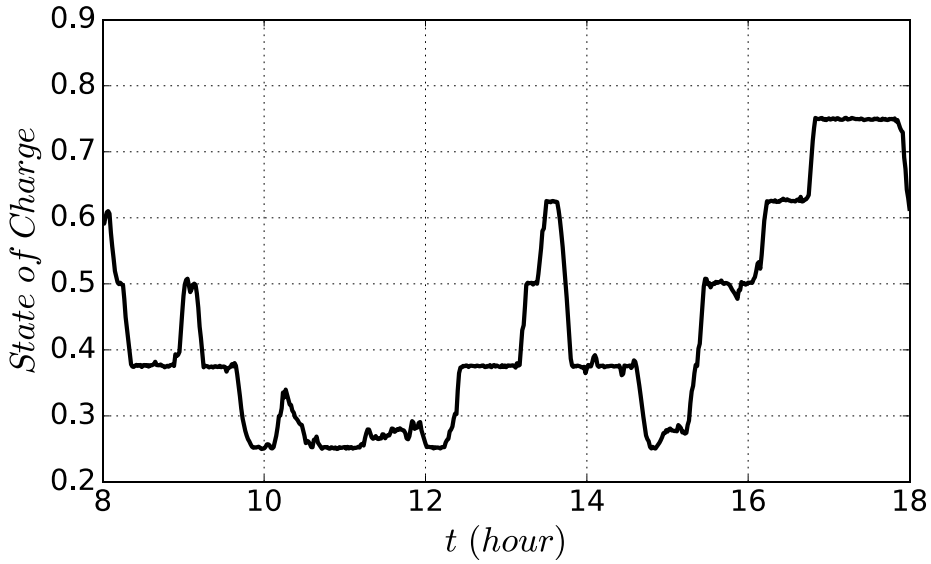

图 4.8 所提控制方法下储能荷电状态曲线

为了进一步验证在系统建模中引入随机性的优点，以下展示了确定性控制的表现。通过去掉（4.16）中的所有随机性因素，可以获得一个微网的确定系统。因此，我们能够在（4.20）中表达一个确定性控制问题。确定性系统的解决方案仿真结果如下。

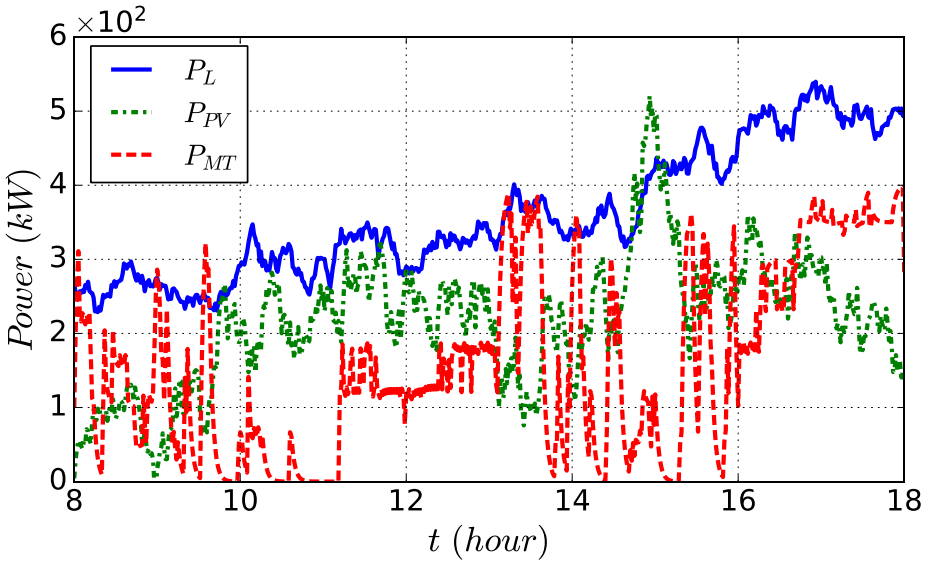

图 4.9 确定性控制机制下的负荷、光伏、微型涡轮发电机功率动态

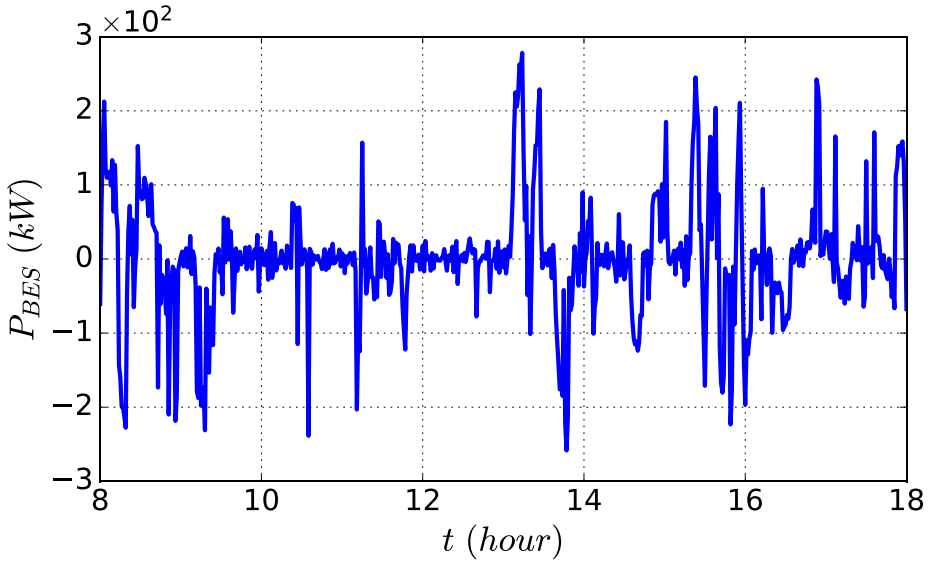

图 4.10 确定性控制机制下储能设备功率动态

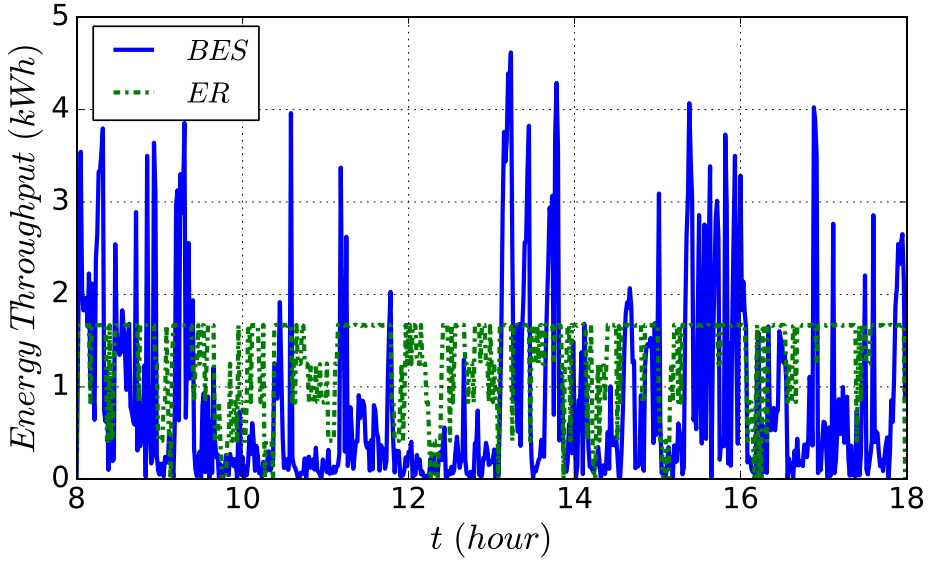

图 4.11 确定性控制机制下储能设备和能量路由器能量输出

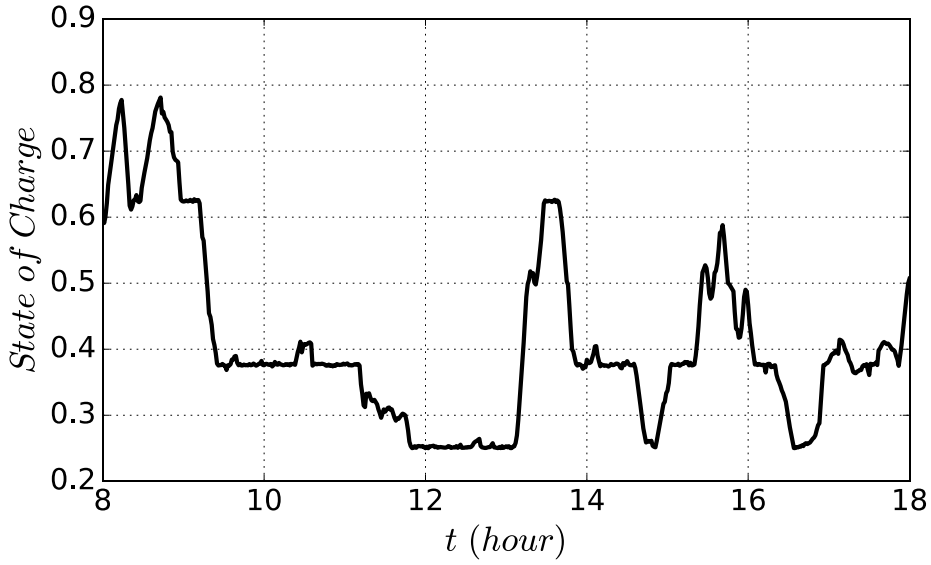

图 4.12 确定性控制机制下储能荷电状态曲线

图 4.9 描述了负荷，光伏和微型涡轮发电机的功率动态。图 4.10 显示了储能设备的功率。图 4.11 表达了储能设备和能量路由器的能量输入输出曲线。图 4.12 显示了储能荷电状态曲线。从图 4.6、图 4.7、图 4.10 和图 4.11 可以看出，所提控制方法下储能设备的能量吞吐量小于确定性控制方法。同时，在系统（4.16）中，由于忽略了随机性，确定性控制器不能够及时响应随机性能量波动。因此，在确定性性控制机制情况下，与图 4.8 相比，图 4.12 中的储能荷电状态曲线出现了更多的波动性，尤其是在时间段$[15,18](h)$中。通过这些仿真结果，显示了所提混合建模的优越性。

本节评价了所提控制机制的可行性和有效性。根据以上仿真结果，所提随机控制机制保证了功率总线上的能量波动主要被本地微网所吸收，同时实现了储能设备、微型涡轮发电机和能量路由器的合理利用。

4.5 结论

总的来说，本章将能源互联网自底向上的能量管理表达为一个随机

优化问题。该方法的亮点在于提出了一个混合建模方法用于对光伏发电和负荷功率进行建模，该方法同时结合了循环神经网络和 Ornstein-Uhlenbeck 随机过程。通过使用动态划方法，此随机优化控制问题可以被数值求解。仿真验证了所提方法的有效性。

由于文献 [104]中所提算法是一个基于网格的方法，它需要大量的时间和空间来获得解决方案，因此，下一步工作的主要方向是通过强化学习算法为能量管理问题设计高效的控制策略。这在下一章中得到具体研究。

第五章 基于深度强化学习方法的能源互联网最优能量管理策略

5.1 介绍

近年来在能源互联网领域，设计能量控制策略成为当下研究热点，并实现了重大发展 [83], [86], [89], [111]。文献 [86]将能源互联网场景的一个直流微网的电压管控问题转换为一个非脆弱鲁棒H_∞控制问题。除此之外，在能源互联网领域，H_∞控制理论被用来管控多个交流微网的频率偏差 [89]。文献 [111]提出了一类能源互联网的分布式协调控制算法。文献 [83]研究了一个基于图论的能源互联网能量路由算法。值得注意的是，大多数电力系统的控制问题基于不同电力设备的“显式”数学模型得到解决。例如，常微分方程被用来表示光伏、风力发电和负荷的功率动态 [5], [10], [112], [113]；同时，随机微分方程 [78]被用来表达可再生能源和负荷的功率动态 [11], [52], [86], [89]。尽管随机微分方程可以反映可再生能源的随机性，工程人员很难获得相关的精确数学模型。值得注意的是，为了表达相对较长时间的功率动态（如，一天），需要建立一个包含复杂微分方程的数学模型。在此种意义上，建立能源互联网中可再生能源发电功率及负荷用电功率数学模型既耗时又费成本。

另一方面，人工智能在电力系统的应用在近十年得以流行。电力预测是能源互联网的一个重要问题。这里存在一系列对光伏，风电和负荷的电力预测相关研究，如文献 [21], [96], [98]。在文献 [96] 和 [98]中，神经网络被分别用于光伏和负荷的功率建模。基于极限学习机和改进的重力搜寻算法，文献 [21]提出了一个新的短期负荷预测方法。除此之外，文献 [114]将增强学习应用到残差负荷控制。文献 [115]提出了一个新的基于深

度学习算法的分布式能量管理方法。因为这些研究提出的预测方法性能令人满意，这使得基于功率预测设计能源互联网系统控制策略具备了基础。

针对部署了可再生能源的电网的优化管理问题已经存在了许多相关研究。然而，增加电力系统的复杂性可能导致传统控制算法较差的控制性能。在文献 [112], [113]中，在传统建模中，启发算法，如粒子群滤波和混合蛙跳算法，被用于调整控制器参数。尽管此类控制器被报道具有相对较好的性能，当搜索空间变大，启发算法将具有较低的搜索效率。文献[15]中，微网通过一组随机微分方程实现建模，其中的非线性项从可再生能源的神经网络预测结果得到。非线性随机建模的功率优化管理问题通过基于网格的动态规划技术得到解决。然而，由于基于网格方法的相关限制，需要大量的计算来寻找达到满意精度的可行解。另外，以上提到的能量管理方法依赖于明确的系统建模，如，文献 [5], [10], [11], [52], [86], [89], [112], [113]；而本章所提方法为“无模型”方法。系统模型可以在神经网络的训练过程中潜在学习得到。在此意义上，它可以很容易应用到不同场景。受惠于神经网络的近似能力，在所提控制方法中，控制策略通过神经网络直接近似得到，因此不需要基于网格的方法对状态空间和动作空间的离散化。同时，因为控制信号由神经网络产生，避免了很多启发算法直接搜索高维动作空间的困难。

本章研究了能源互联网典型场景的能量管理问题。考虑了一个一般的能源互联网场景，其实现了多个子网的互联。每个子网假定包含光伏，风电，微型微涡轮发电机，燃料电池，柴油发电机，储能系统，负荷和能量路由器。网站 [101]中的历史数据被用来描述光伏、风机和负荷的功率预测结果。基于能源互联网的能量管理准则，优化能量管理的目标被数学表达为代价函数(cost function)。然后，提出一系列惩罚函数表达式。除此

之外，介绍了优化问题的相关约束条件。接下来，所考虑的能量管理问题被表达为一个优化控制问题。

本章的重要性和贡献总结如下：

1）考虑了一个普适性的能源互联网系统能量优化管理策略，允许多种优化目标。所考虑目标包括：微型涡轮发电机, 燃料电池和柴油发电机的发电成本最小化，储能设备的寿命延长，和实现能源互联网合理操作准则。不同类别的目标间博弈可以通过调整权重因子实现。

2）通过智能规划多子网和能量路由器的能量流，能量供需平衡不仅需要在每个单独的子网实现，也需要在整个能源互联网系统得以实现，以使用户能够在可靠电力供应中受益。

3）光伏、风电和负荷的功率直接通过数据表达。基于此，本章考虑了一个新的能量优化问题。值得注意的是，这里不存在光伏、风机和负荷功率的“显式”表达式。这与大多数已有工作显著不同，如文献 [10], [11], [112], [113], 等。它们的功率动态仅仅被假定为从合适的电力预测技术中获得的时间序列数据。一个“无模型”方法被用于解决此问题，因此可以跳过繁琐的系统建模步骤，成功地避免建模误差，使所获得的控制策略更加可靠。

4）基于本章所表达问题的复杂性，普通方法（如，粒子群滤波 [116]，遗传算法 [117]，模拟退火算法 [118]）并不适合用于本章优化问题求解。我们使用深度增强学习算法来解决该复杂优化控制问题。时下较新的 A3C 算法被用来实现该目标。仿真结果显示了所提方法的有效性。

本章其余内容组织如下：5.2 节介绍了能源互联网系统建模并提出优化控制问题的表达式。5.3 节提出对能量管理问题的解决方案。5.4 节给出了数字仿真。最后，5.5 节总结本章工作。

5.2 系统描述

如图 5.1 所示，本章所研究的能源互联网网络由若干子网组成。

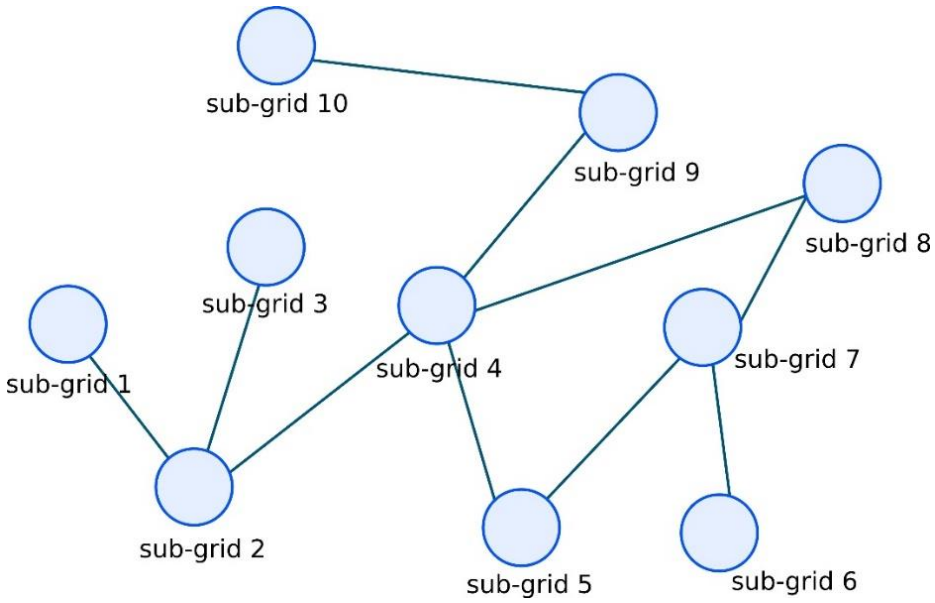

图 5.1 典型能源互联网网络拓扑

每个子网由一个能量路由器管控，子网通过传输线路互联。能量路由器的使用可以使得整个能源互联网系统操作和管理的标准化。更特别的是，一个能量路由器可以与云数据中心交换信息，并执行上游系统发来的命令。通过针对电力设备（如，发电机和储能）设计的控制系统集成到能量路由器中，能源互联网中子网的监控和控制可以通过能量路由器接口统一连接。本章中，位于每个子网内的可控设备假定由子网能量路由器控制。在此意义上，子网间的功率交换可以通过能量路由器调整。另外，本文所考虑的能源互联网网络可以与外部电网相连，外部电网既可以是更高等级的能源互联网系统，也可以式传统主干电网。每个子网可以安装多类设备，例如，一个包含光伏、柴油发电机和负荷的微网。

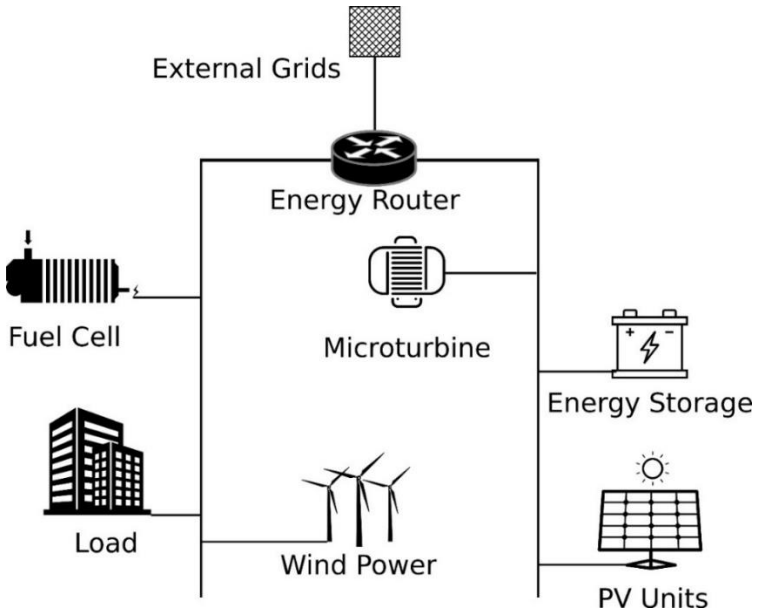

图 5.2 一个典型子网

为了简单起见，假定所有子网由以下器件的子集构成，包括光伏、风机、微型涡轮发电机、燃料电池、柴油发电机、储能和负荷。图 5.2 显示了一个典型的子网结构。相关设备的建模介绍如下。

本章中，光伏、风电和负荷的功率输出被认为是不可控的。基于它们的功率输出的随机性和不确定性，很难获得相关的精确模型。作为应用已有的功率预测技术的替代，文献 [101]的历史数据被直接用来产生光伏、风电和负荷的功率流。相关数据的采样频率为 1/60 赫兹，因此，光伏、风电和负荷的功率可以表示为步长为 1 分钟的离散时间序列。因为分布式能源和负荷的历史功率数据流是具有时间序列特性的，对相关设备采用离散时间的形式进行建模。对于第i个子网，光伏、风电和负荷的功率流被分别标记为P_i^{PV}, P_i^{WTG}和 P_i^{Load}。类似的，这些设备的历史功率流数据被标记为$P_{his,i}^{PV}, P_{his,i}^{WTG}$ 和 $P_{his,i}^{Load}$。标量维纳过程W_i^{PV}, W_i^{WTG} 和 W_i^{load}被用于对第i个子网的光伏、风机和负荷的真实功率流的随机特征进行近似。以此种方式，t时刻这些设备的功率流被表达为：

$$P_i^{PV}(t) = P_{his}^{PV}(t)\left(1 + W_i^{PV}(t)\right), \tag{5.1}$$

$$P_i^{WTG}(t) = P_{his,i}^{WTG}(t)\left(1 + W_i^{WTG}(t)\right), \tag{5.2}$$

$$P_i^{load}(t) = P_{his,i}^{load}(t)\left(1 + W_i^{load}(t)\right). \tag{5.3}$$

诸如微型涡轮发电机，柴油发电机和燃料电池等分布式可控发电设备被假定安装在能源互联网系统中，以便当可再生能源发电不能够达到负荷功率需求时，它们可以提供足够的能量。将安装在第i个子网的微型涡轮发电机，柴油发电机和燃料电池的所有功率输出分别标记为P_i^{MT}, P_i^{DEG}和P_i^{FC}。假定第i个子网分布式发电的控制信号为$u_i^{MT}, u_i^{DEG}, u_i^{FC}$，那么，对于时间$t$和$t+1$的分布式发电功率输出，可以得到

$$P_i^{MT}(t+1) = P_i^{MT}(t) + B_i^{MT}u_i^{MT}(t), \tag{5.4}$$

$$P_i^{DEG}(t+1) = P_i^{DEG}(t) + B_i^{DEG}u_i^{DEG}(t), \tag{5.5}$$

$$P_i^{FC}(t+1) = P_i^{FC}(t) + B_i^{FC}u_i^{FC}(t), \tag{5.6}$$

这里B_i^{MT}, B_i^{DEG}和B_i^{FC}为t到$t+1$时刻之间第i个子网上的微型涡轮发电机，柴油发电机和燃料电池的最大允许功率调整值。另外，这些可控发电设备的最大和最小允许功率输出被分别标记为$P_{max,i}^{MT}$，$P_{max,i}^{DEG}$，$P_{max,i}^{FC}$，$P_{min,i}^{MT}, P_{min,i}^{DEG}$和$P_{min,i}^{FC}$。

接下来讨论储能设备的建模。储能设备提供与能源互联网系统中的可控发电设备类似的功能以达到子网内的电能供需平衡。主要区别在于，当分布式发电产生的功率远超过负荷功率需求总量时，储能系统能够存储多余的能量以便后续利用。为了保护储能设备不被大的能量吞吐量所损坏，需要限制最大充放电功率。同时，在实际应用中需要将储能的荷电状态限制在合适的范围内。这里，将第i个子网的储能设备的控制信号标记为u_i^{BES}。将第i个子网中的储能设备的充放电功率和荷电状态分别标记为P_i^{BES}和SOC_i，相关参数限制为

$$-P_{max,i}^{BES} \le P_i^{BES} \le P_{max,i}^{BES}, \tag{5.7}$$

$$SOC_{min,i} \le SOC_i \le SOC_{max,i}. \tag{5.8}$$

根据文献 [92]，t和$t+1$时刻P_i^{BES} 和 SOC_i的动态性被表示为（5.9）和（5.10）。

$$P_i^{BES}(t+1) = P_i^{BES}(t) + B_i^{BES} u_i^{BES}(t), \tag{5.9}$$

$$SOC_i(t+1) = SOC_i(t) + \frac{\eta_i P_i^{BES}(t)}{Q_i}, \tag{5.10}$$

这里，B_i^{BES}为t到$t+1$时刻之间第i个子网上的储能设备最大允许充放电功率；Q_i为储能设备的容量，η_i为储能设备的充放电系数，定义于（5.11）中。

$$\eta_i \triangleq \begin{cases} \eta_{0,i} - \frac{\eta_{1,i}\left|P_i^{BES}\right|}{P_{max,i}^{BES}}, & P_i^{BES} \ge 0, \\ \frac{1}{\eta_{0,i} - \frac{\eta_{1,i}\left|P_i^{BES}\right|}{P_{max,i}^{BES}}}, & P_i^{BES} \le 0. \end{cases} \tag{5.11}$$

上式中的系数$\eta_{0,i}$ 和 $\eta_{1,i}$与储能系统的充放电效率有关 [119].

基于以上对所考虑微网设备描述，可以获得每个子网的功率需求。额外的，为了避免过控制造成的潜在损坏，所有控制输入，即$u_i^{MT}, u_i^{DEG}, u_i^{FC}$和 u_i^{BES}，被限定在范围$[-1,1]$之间。为了计算每个时间t 能源互联网网络所传输的功率流，我们使用 Python 包裹 pandapower [120]。

5.2.1 目标函数

考虑$[0,T]$期间对能源互联网系统的操作，假定此处功率数据流 [101]中总共有M个时间点，每两个时间点间的间隔为$\Delta t = T/M$。

首先考虑子网间的功率传输，从能源互联网的角度，功率供需平衡需要在一定的本地范围内优先实现，导致更容易以自底向上的方式架构能源互联网系统 [15]。功率供需间的失配将直接被子网间的功率流所反映。正如以上提到的，能源互联网网络的功率流能够通过 pandapower 所提供的函数计算。因此，所考虑能源互联网系统的功率传输不能够被直接计算，

这将成为应用基于模型方法的一大障碍。为了便于同寻常方法比较，子网和能源互联网间的能量交换被用于测量能源互联网网络的功率不平衡。

更明确的，通过将输入第i个子网的功率流标记为P_i^{BUS}，能源互联网网络功率传输的成本函数被计算为

$$\Delta J_{flow} = \sum_{i=1}^{N} P_i^{BUS}(t)^2. \tag{5.12}$$

这里，P_i^{BUS}可以通过 pandapower 直接获得。同时，它可以近似为

$$P_i^{BUS} = P_i^{PV} + P_i^{WTG} - P_i^{load} + P_i^{MT} + P_i^{DEG} + P_i^{FC} - P_i^{BES}.$$

在时间t，较小的ΔJ_{flow}值意味着大多数功率不平衡在子网内消除。相反，大的ΔJ_{flow}值表明子网不能够合适地将功率不平衡限制在自身内部。

除了能量传输问题，由分布式发电设备带来的明显操作代价也值得考虑。在能源互联网系统正常运行期间，分布式发电设备的输出功率可以被适当控制以满足负荷功率需求。如果应用不合理的控制机制，例如，在任意子网，如果光伏和风电产生的电能已经足够用于消费，分布式发电设备仍在持续发电，该状态会极大增加能源互联网系统的运维成本。这里，假定该成本正比于分布式发电设备的输出功率。从时间点t到$t+1$，发电机成本为：

$$\Delta J_{DG}(t) = \sum_{i=1}^{N} (C_i^{MT} P_i^{MT}(t) + C_i^{DEG} P_i^{DEG}(t) + C_i^{FC} P_i^{FC}(t)), \tag{5.13}$$

这里，C_i^{MT}, C_i^{DEG}和C_i^{FC}为子网i中分布式发电设备的常量系数，其与燃料价格和其它所考虑因素有关。所考虑时间周期内的总体发电成本由（5.13）给出。

依据文献 [100], [116], [119], [121], 储能设备的寿命会受充放电电流以及放电深度所影响。本文储能设备的充放电功率被限制为$P_{max,i}^{BES}$, $i = 1,2,\dots,N$。因为储能系统的一个主要功能是维持能源互联网系统的功率平

衡，很难限制储能设备的充放电电流。因此，荷电状态被期望维持在储能设备预设的上下限之间。（5.14）提供了相应的成本函数。

$$\Delta J_{BES} = \sum_{i=1}^{N} [SOC_i(t) - 0.5]^2. \tag{5.14}$$

对于所考虑的能源互联网系统能量管理问题，需要考虑(5.12)-(5.14)所产生的所有成本。为了实现成本的权衡，需要最小化的成本函数表达为它们的加权和，如下所示：

$$J = \sum_{t=1}^{M} [\alpha_{flow}\Delta J_{flow} + \alpha_{DG}\Delta J_{DG} + \alpha_{BES}\Delta J_{BES}]\Delta t, \tag{5.15}$$

这里标量$\alpha_{flow}, \alpha_{DG}$ 和 α_{BES}为加权系数。通过合适的调整（5.15）中的加权系数，可以实现不同的优化目标。例如，如果设置α_{flow}为远大于其余两个系数，优化控制机制将强调减少子网间的能量交换总量；如果强调J_{BES}最小化，优化控制策略将更多依靠子网间的功率共享来吸收所考虑能源互联网系统的功率波动。

5.2.2 系统约束条件

基于储能系统的约束，我们希望荷电状态和储能设备保持在一个合适的范围之内，以使储能设备能够有效地向能源互联网系统提供或消纳能源。在此意义上，对子网i中储能系统荷电状态的约束由（5.8）给出。

另一方面，基于前文介绍的能源互联网基本能量管理准则，希望由分布式能源产生的能量能够主要地在能源互联网中消费，因此，对于能源互联网网络和外部电网之间的能量交换（被标记为P^{EXT}）存在以下约束：

$$P_{min}^{EXT} \le P^{EXT} \le P_{max}^{EXT}. \tag{5.16}$$

5.2.3 优化控制问题描述

我们的目标是寻找最优控制机制$u^*(s(t), t)$，以便成本函数（5.15）和

惩罚函数（5.17）的和达到最小。在此意义上，优化控制问题被改写为（忽略时间t）

$$\begin{aligned} &\min_{u\in\mathcal{U}} && \mathbb{E}[J], \\ &s.t. && (5.1)-(5.16), \end{aligned} \tag{5.17}$$

这里$\mathbb{E}$为数学期望，$\mathcal{U}$为可行控制策略集。由于W_i^{PV}, W_i^{WTG} 和 W_i^{load}的随机特性，J和Φ均为随机过程。因此，有必要在此使用期望操作符。

5.3 优化控制问题解决方案

本章所考虑的能源互联网系统是一类马尔可夫决策过程 [117]，意味着给定能源互联网系统在时间t的状态和控制策略，$t+1$时刻的状态将独立于之前$t-1$，$t-2$时刻的状态。

总的来说，Hamilton-Jaccobi-Bellman(HJB)方程被用来寻找连续/离散时间优化控制问题的可行解 [118]，对于离散时间系统，经常被称作 Bellman 方程。基于 Bellman 方程，存在许多针对优化控制问题的算法，如文献[122], [123]。然而，这些方法不能够被用来解决本文的优化控制问题，原因分析如下：

首先，大多数针对 HJB 方程的已有解决方案采用基于网格的方法，意味着其依靠动作空间和状态空间的离散化。结果导致这些方法面临维数灾难。其计算和存储复杂度随动作空间和状态空间的维数上升而呈指数增长。尽管存在一些多项式时间的解决方案 [124]，这些方案取决于问题的一些特定性质。本文考虑的能源互联网系统相当复杂，不存在针对光伏、风机和负荷的显式表达式，这与大多数已有工作显著不同，如文献 [10], [11], [25], [112], [113]。它们的功率动态仅仅被假定为时间序列数据，数据从合适的电力估计技术中获得。

因此，使用上述提及的常用方法来解决本文所考虑能源互联网系统

的能量管理问题会变得非常困难。

另外，这里存在一定的启发算法可以被用于寻找问题(5.17)的可行解，例如粒子群滤波 [125]，遗传算法 [126]，模拟退火算法 [127]等。尽管这些算法不需要考虑指数灾难问题，当搜索空间的维数变大时，它们需要面对低探索效率的问题。

随着增强学习算法和理论的发展，它将有可能解决一般的优化控制问题。本文使用的增强学习算法被命名为 asynchronous advantage actor-critic (A3C) [128]，以解决（5.17）的问题。

5.3.1 将优化控制问题转换为增强学习问题

这里将优化控制问题转换为一个合适形式的增强学习问题。在增强学习问题中，存在环境（environment）和智能体（agent）。基于一定的控制策略以及从环境中观察到的状态，智能体同环境进行交互。在每个时间点，一个收益作为智能体所采用动作的反馈被提供给该智能体。通过搜索动作空间$\mathcal{U}$，智能体将学习到近似优化控制策略，以最大化总体收益。

本章能源互联网系统为智能体环境，一个智能体被用来控制安装在子网中的能量路由器和可控发电设备的功率。在时间t，环境提供给智能体一个对系统状态的观察。基于其控制策略π和观察到的系统状态$s(t)$，智能体产生动作$u(t)$。根据系统建模，能源互联网网络的状态$s(t) \in S$具有马尔可夫性质，意味着从$s(t-1)$ 到 $s(t)$的转移概率仅与动作$u(t-1)$和$s(t-1)$有关，描述为方程（5.18）。

$$P(s';s,u) = \mathbb{p}\{s(t) = s' | s(t-1) = s, u(t-1) = u\}, \qquad s, s' \in S, \quad a \in \mathcal{U}. \tag{5.18}$$

一个仿真从时间t开始，具有状态$s(t)$，其总体回报计算为

$$R(s(t),t) = \sum_{k=0}^{M-t} \gamma^k r(t+k), \tag{5.19}$$

这里$\gamma \in [0,1]$为衰减系数，$r(t+k)$为通过动作$u(t+k-1)$从$s(t+k-1)$状态转移到$s(t+k)$的回报。

在此意义上，假定一个策略π，对于状态s在时间点t的价值函数为

$$V^{\pi}\big(s(t)\big) = \mathbb{E}[R(s(t),t)|s(t)=s]. \tag{5.20}$$

智能体的目标是寻找最小化$V^{\pi}(s(0),0)$的优化控制策略π^{*}。

本章中，5.2 节提出的代价函数可以被用来作为智能体回报的主要部分。然而，能源互联网系统的约束在上述介绍的智能体回报中并没有被合适考虑。为解决以上约束，一些惩罚函数考虑如下。

为简化公式，使用特征函数$\mathrm{II}\,(x)$，被定义为

$$\mathrm{II}\,(x) \triangleq \begin{cases} 1, & if\ x\ is\ ture, \\ 0, & if\ x\ is\ fals, \end{cases} \tag{5.21}$$

这里，x代表逻辑表达式。

对于储能系统的约束，设置相应的惩罚函数如下

$$\varphi^{SOC}(t) = \varphi_c^{SOC}(t) + \varphi_r^{SOC}(t), \tag{5.22}$$

这里，$\varphi_r^{SOC}(t)$被定义为

$$\varphi_r^{SOC}(t) = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{II}\,(SOC_i(t) \le SOC_{min,i} \text{ or } SOC_i(t) \ge SOC_{max,i}), \tag{5.23}$$

项$\varphi_c^{SOC}(t)$为储能系统的累积惩罚量。如果在时间t没有对储能状态的约束超限，$\varphi_c^{SOC}(t)$被设为 0，如果任意储能状态约束被破坏，它将计算如下：

$$\varphi_c^{SOC}(t) = \beta\varphi_r^{SOC}(t) + (1-\beta)\varphi_c^{SOC}(t), \tag{5.24}$$

这里β为加权因子。

这意味着，当储能状态被保持在合适的范围，储能系统的惩罚量为 0。同时，如果破坏了任一约束，惩罚量将被连续累积，直到储能状态回到合适的水平。

类似的，对于外部电网和能源互联网网络间的功率交换，惩罚函数考虑如下：

$$\varphi^{EI}(t) = P^{EXT}(t)^2 \amalg \left(P^{EXT}(t) \geq P_{max}^{EXT} \; or \; P^{EXT}(t) \leq P_{min}^{EXT}\right). \tag{5.25}$$

另外，因为应用于能源互联网网络的控制信号值在$[-1,1]$之间，具有巨大值的控制信号不能被合适地应用到能源互联网系统，这可能导致能源互联网系统运行出错。因此，为了减少该类情况的发生，控制器的惩罚函数考虑如下：

$$\varphi^{u}(t) = \sum_{d\in\mathfrak{D}}\sum_{i=1}^{N} \amalg \left(|u_i^d(t)| \geq 1\right), \tag{5.26}$$

这里，$\mathfrak{D} = \{$储能,微型涡轮发电机,柴油发电机,燃料电池$\}$。

在时间点t，所有以上惩罚函数通过不同的加权因子累加到一起。所考虑时间周期的惩罚函数计算为

$$\Phi = \sum_{t=1}^{M} [\varepsilon_{SOC}\, \varphi^{SOC}(t) + \varepsilon_{EI}\varphi^{EI}(t) + \varepsilon_u \varphi^{u}(t)]\Delta t, \tag{5.27}$$

这里，$\varepsilon_{SOC}, \varepsilon_{EI}$ 和 ε_u 分别为对应$\varphi^{SOC}(t), \varphi^{EI}(t)$ 和 $\varphi^{u}(t)$的加权因子。

基于上面定义的问题表达式和惩罚函数，在每个时间点的收益计算如下：

$$r_t = \left[\alpha_{flow}\Delta J_{flow} + \alpha_{DG}\Delta J_{DG} + \alpha_{BES}\Delta J_{BES} + \varepsilon_{SOC}\varphi^{SOC} + \varepsilon_{EI}\varphi^{EI} + \varepsilon_u \varphi^{u}(t)\right]\Delta t. \tag{5.28}$$

因此，建立以下关系，

$$V^{\pi}(s(0), 0) = \mathbb{E}[J + \Phi]. \tag{5.29}$$

当惩罚函数的加权因子，即$\varepsilon_{SOC}, \varepsilon_{EI}$ 和 ε_u被合理设置，对于等式（5.17）的最优控制器u^*将接近最小化$V^{\pi}(s(t_0))$的最优策略π^*。

因此，离散时间能源互联网系统被描述为一个马尔可夫决策过程$(S, \mathcal{U}, P, r, \gamma)$，该优化问题可以通过增强学习方法解决 [129]。

5.3.2 A3C 算法和网络结构

在 A3C 算法中，应用了 actor 关键体系结构。价值函数$V^{\pi}(s(t_k))$由一个具有参数θ_c的神经网络 critic 估计得到。控制策略π由另一个具有参数θ_a的神经网络 actor 近似得到。为了从观察中捕捉时间特征，循环神经网络 [130]被构造为整个网络的第一层。本章中，循环神经网络被用来抽取能源互联网网络观察序列的潜在特征。在此意义上，actor 能够基于在一定时间期间内对系统的观察调整它的输出，这将有助于提高算法性能。

如图 5.3 所示，被观察到的系统状态$s(t)$首先被划分为 5 种类型，即，负荷、光伏、风电、柴油发电机和负荷状态。每种类型的观察基于其位置进行重排，如子网。因此，对于时间t的每类观察，可以建立N元素的特征矢量。因为安装在各个子网的设备并不完全相同，0 被用来填充丢失的数据。更明确的说，如果光伏并没有安装在子网i，光伏类型特征矢量的第i个元素被设置为0。这些被预处理的观察结果作为运往循环神经网络层的 5 个输入，并且这些层的输出被合并在一起，并同时分配到 critic 和 actor 网络的输入。Critic 网络包含 3 个全连接层，即，图 5.3 的密集层。输出为一个标量，被记为$v(s(t);\theta_c)$。与 critic 网络类似，actor 网络具有三个全连接层。

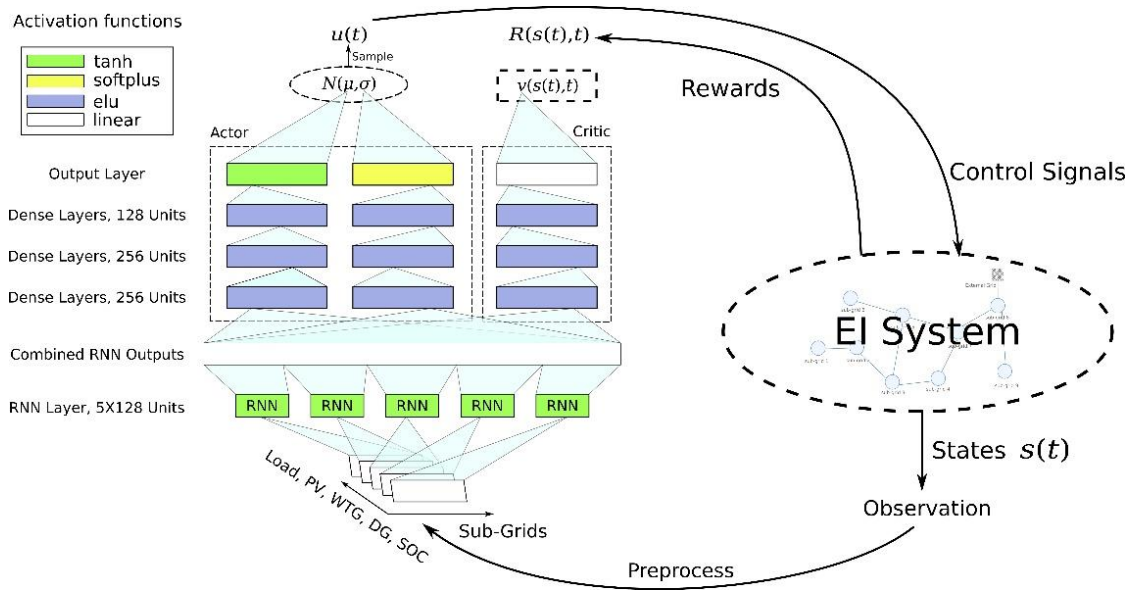

图 5.3 actor-critic 网络结构

图 5.3 标签中提到的术语$tanh$,elu和$softplus$涉及 actor-critic 网络神经元的激活函数。这些激活函数被广泛用到深度学习任务的神经网络设计中。术语$tanh$代表双曲正切函数。术语$relu$代表过滤线性单元函数，在后续研究中被更新为elu。术语elu代表指数线性单元函数。术语$softplus$代表elu函数的平滑近似。这些激活函数的显示表达式如下。

$$tanh(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}}, \tag{5.30}$$

$$relu(x) = max(0, x), \tag{5.31}$$

$$softplus(x) = log(1 + e^{x}). \tag{5.32}$$

elu函数被定义为

$$elu(x) = \begin{cases} x, & if\ x \geq 0, \\ a(e^{x} - 1), & otherwise, \end{cases} \tag{5.33}$$

这里a是待调整的超参数且$a \geq 0$。为了更好的开发性能，高斯策略 [131]被用于获得每个时间点的控制信号。因此，这里 actor 网络有两个输出。其中一个是动作的均值$\mu(s(t);\theta_a)$,另一个是动作的方差$\sigma(s(t);\theta_a)$。控制信号$u(t)$从正态分布$\mathcal{N}(\mu(s(t)), \sigma^2(s(t)); \theta_a)$中采样。基于函数$tanh$和$softplus$的输出范围，它们分别被用于输出层$\mu(s(t);\theta_a)$和$\sigma(s(t);\theta_a)$的激活函数。

Critic 和 actor 网络的损失函数分别计算如下，

$$Loss_C = \mathbb{E}\left[\left(R(s(t), t) - v(s(t);\theta_c)\right)^2\right], \tag{5.34}$$

和

$$Loss_A = \mathbb{E}_{\mathbb{p}\{u(t)|s(t);\theta_a\}}\left[\left(R(s(t), t) - \mathrm{v}(\mathrm{s}(\mathrm{t});\theta_c)\right)\right]. \tag{5.35}$$

通过运用梯度下降方法$Loss_C$，critic 网络的价值函数的估计精度可以得到连续提高。基于智能体基于 critic 网络的价值函数估计所获回报的优点，actor 网络控制策略的性能能够被进一步提高。基于此种方式，网络最终能够找到一个近似最优控制策略，以使（5.17）中的目标函数达到本

地最小化。值得注意的是，如图 5.3 所示，在基于 actor-critic 网络控制方法中不考虑能源互联网系统的特定模型。能源互联网系统的行为模式会在训练时逐渐被 actor-critic 网络所学习到。在此意义上，本文提出的控制方法为无模型方法。

在训练期间，会同时运行多个线程。每个线程中，会建立图 5.3 的网络，并在每个时间点产生控制器。不同线程的环境状态独立更新。同时需要维持一个全局网络，一旦一个线程在n步中收集一系列数据，全局网络的参数通过这些数据得到更新。在此之后，相同线程中的本地网络将与全球网络同步。通过以此异步方式进行训练，消除了训练数据的相关性。因此，训练可以以 on-policy 的方式达到。

通过在图 5.3 设计的神经网络使用 A3C 算法进行训练，能源互联网系统将最终得到一个智能的控制器。给定对能源互联网系统的一个观察，网络将产生相应的控制器，以达到智能操作。

5.4 数值仿真

尽管通过一些启发算法能够找到针对本章研究的优化控制问题的次优解，如粒子群优化，遗传算法，模拟退火算法等，由于搜索空间巨大，这些算法将很难找到针对该问题合适的可行解。

在本节中，传统的基于优化功率流（optimal power flow，简称 OPF）方法的结果将与所提方法相比较。

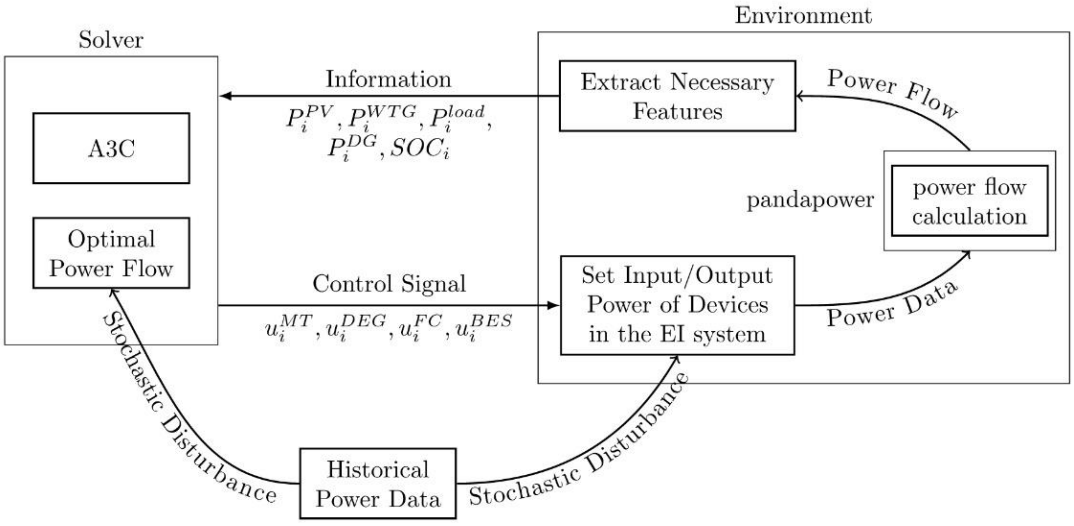

图 5.4 仿真过程

如图 5.4 所示，仿真将比较两类算法。前一个为本章所提基于 A3C 设计的方法。在每个时间t，包括$P_i^{PV}, P_i^{WTG}, P_i^{load}, P_i^{DG}, SOC_i,\ i = 1,2,\dots,N$等特征被输入 A3C 解析器。A3C 解析器将处理这些特征，图 5.3 网络的输出被作为控制信号提供给环境。基于等式（5.1）-（5.10），将计算光伏、风机、各可控发电设备、储能、负荷的功率输入/输出。通过利用这些功率数据，pandapower 将计算所考虑能源互联网系统的功率流。基于计算结果和等式（5.28），环境将计算相关回报，回报被用来训练 actor-critic 网络。另一种计算方法是 OPF 方法。OPF 计算运行由 pandapower 提供。

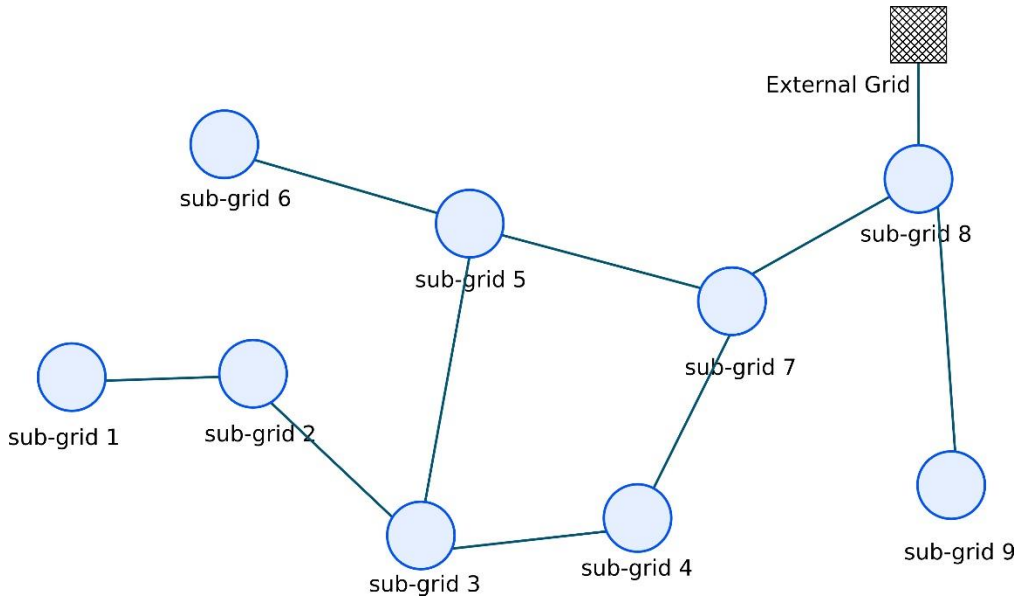

图 5.5 用于测试的能源互联网网络

不失一般性，数字仿真在一个包含 9 个子网和一个外网的网络中进行。所研究网络的拓扑如图 5.5 所示。在此能源互联网网络中，功率消费设备假定存在于每个子网中。光伏设备安装在子网 1，3，5，9 中；风机设备被安装在子网 2，4，7，9 中；柴油发电机安装在子网 4 和 5 中；燃料电池安装在子网 6 和 7 中；储能设备集成在子网 1，3，5，6，8，9 中。根据文献 [89]，此网络拓扑可以不失一般性地被扩展到一般的能源互联网场景。仿真时间周期的长度为 12 小时，即$t \in [8,20]$（忽略时间单位：小时）。负荷、光伏和风机的功率数据从文献 [101]中产生。这些设备的典型功率流分别描述在图 5.6，图 5.7，图 5.8 中。在仿真过程中，图 5.6，图 5.7，图 5.8 分别描述负荷、光伏和风电的功率曲线示例。子网和系统相关参数分别在表 5.1 和表 5.2 中给出。

表 5.1 子网间距离

子网	子网	距离(km)
sub-grid 1	sub-grid 2	12.82

sub-grid 2	sub-grid 3	24.42
sub-grid 3	sub-grid 4	10.61
sub-grid 3	sub-grid 5	6.56
sub-grid 4	sub-grid 7	3.56
sub-grid 5	sub-grid 6	21.54
sub-grid 5	sub-grid 7	13.67
sub-grid 7	sub-grid 8	8.32
sub-grid 8	sub-grid 9	2.77

表 5.2 系统参数

参数	取值	参数	取值
$P_{max,i}^{MT}, i = 2,4,7,9$	1500(kW)	$P_{min,i}^{MT}, i = 2,4,7,9$	0
$P_{max,i}^{DEG}, i = 4,5$	1500(kW)	$P_{min,i}^{DEG}, i = 4,5$	0
$P_{max,i}^{FC}, i = 6,7$	1500(kW)	$P_{min,i}^{FC}, i = 6,7$	0
$P_{max,i}^{BES}$, i = 1,3,5,6,8,9	500(kW)	$P_{min,i}^{BES}$, i = 1,3,5,6,8,9	500(kW)
$B_i^{MT}, i = 2,4,7,9$	30(kW)	$B_i^{DEG}, i = 4,5$	20(kW)
$B_i^{FC}, i = 6,7$	30(kW)	B_i^{BES}	80(kW)
$SOC_{max,i}, i = 1,3,5,6,8,9$	0.8	$SOC_{min,i}, i = 1,3,5,6,8,9$	0.2
Q_1	1066(kWh)	Q_3	1227(kWh)
Q_5	1426(kWh)	Q_6	1216(kWh)
Q_8	1094(kWh)	Q_9	1262(kWh)
$\eta_{0,i}, i = 1,3,5,6,8,9$	0.898	$\eta_{1,i}, i = 1,3,5,6,8,9$	0.173
$C_i^{MT}, i = 2,4,7,9$	1.0×10^{-1}	$C_i^{DEG}, i = 4,5$	1.2×10^{-1}
$C_i^{FC}, i = 6,7$	1.3×10^{-1}	P_{max}^{EXT}	1000(kW)
β	0.4	P_{min}^{EXT}	-1000(kW)
α_{flow}	1.736×10^{-7}	α_{BES}	5.0
α_{DG}	1.0	ε_u	200.0
ε_{SOC}	100.0	ε_{EI}	0.00005

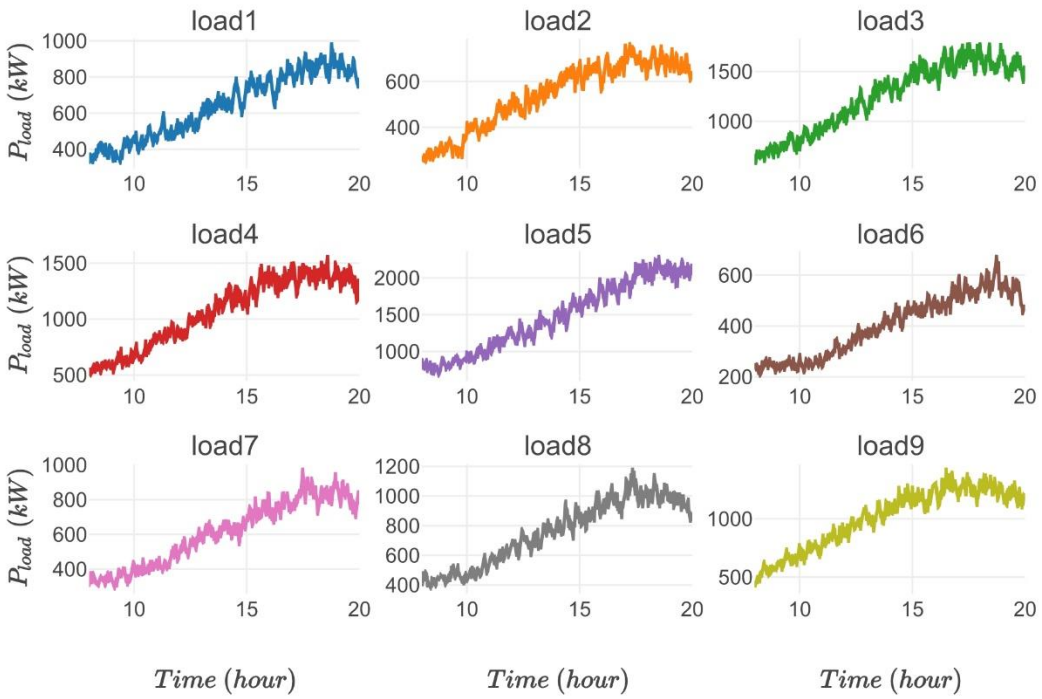

图 5.6 负荷功率流

图 5.3 所示的 actor-critic 网络通过 A3C 算法进行训练，训练环境为 Ubuntu 10.84 服务器和 Intel core i7-7700CPU 以及单个 2G 图形内存 GPU 卡。衰减参数γ设为0.9。8 个智能体在不同线程中运行，以使其能够独立与能源互联网网络进行交互。在训练过程中，维持了一个全局 actor-critic 网络，每个智能体保持一个全局网络的本地拷贝。每个智能体收集一定数量的交互数据，基于这些数据可以计算累积梯度。接着，梯度被发送给全局网络以更新参数。接着，智能体从全局网络同步相关参数。基于此，actor-critic 网络将最终学会生成合适的控制信号，以使目标函数达到本地最小。

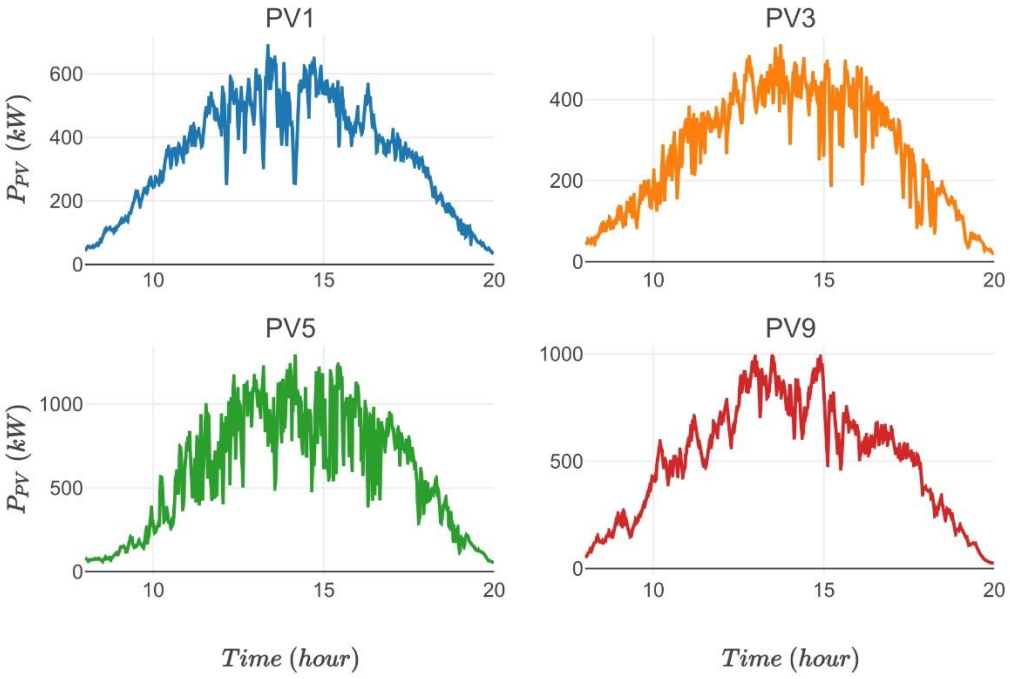

图 5.7 光伏功率

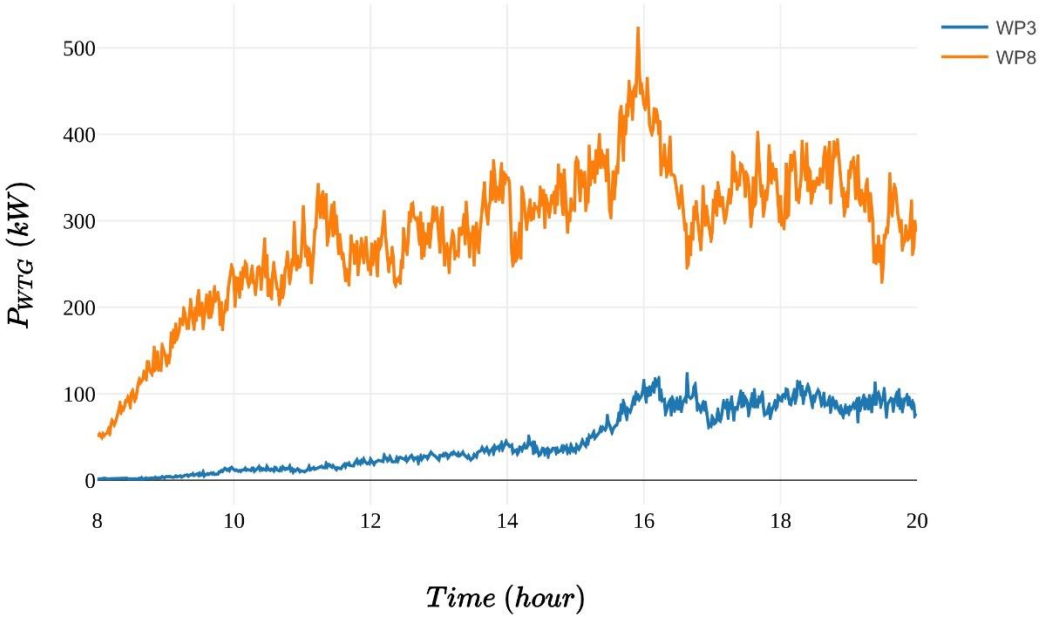

图 5.8 风机功率

在经过 12 小时 30 分钟 56 秒的训练后，actor-critic 网络所记录的性能变得平稳。因为不存在长期的巨大性能提升，训练被停止，所获得的调整参数被保存用于性能评估。

如前文所述，对于具有大量输入变量的优化问题，启发算法搜索效率较低。特别的，本文讨论的能量管理问题，很难减少控制器的可调参数数量。

为了评估增强学习算法的性能，将 pandapower 提供的 OPF 的仿真结果与之进行比较。对于 OPF 方法，子网间传输线路的最大允许负荷百分比被限制在 20%之内，其它约束保持不变。另外，OPF 方法的成本函数仅考虑可控发电设备的发电功率和与外部电网的功率交换。对于 OPF 方法，包括微型涡轮发电机，柴油发电机，燃料电池和储能被认为可控。然而，如果超过任意一个荷电状态约束，相应的储能设备将被设为不可控，且开始充放电直到荷电状态达到 0.5。

本章所提新方法和 OPF 方法的典型仿真结果如下所示。

为方便比较，两种被测方法的结果被同时描述。所提基于 A3C 方法的结果用实线表示，基于 OPF 方法的结果用跳线表示。图 5.9 画出了储能系统的充放电曲线。图 5.10 提供了对应的荷电状态曲线。图 5.11，图 5.12，图 5.13 分别表示了微型涡轮发电机，柴油发电机和燃料电池的功率流细节。图 5.14 描述了从能源互联网网络注入外部电网的功率。

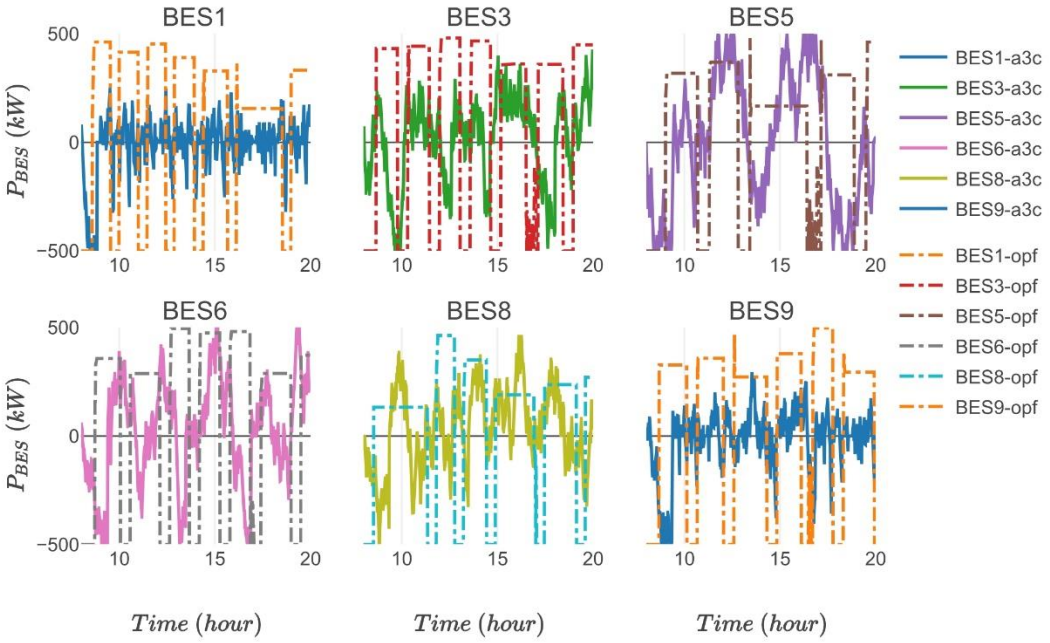

图 5.9 储能系统功率流

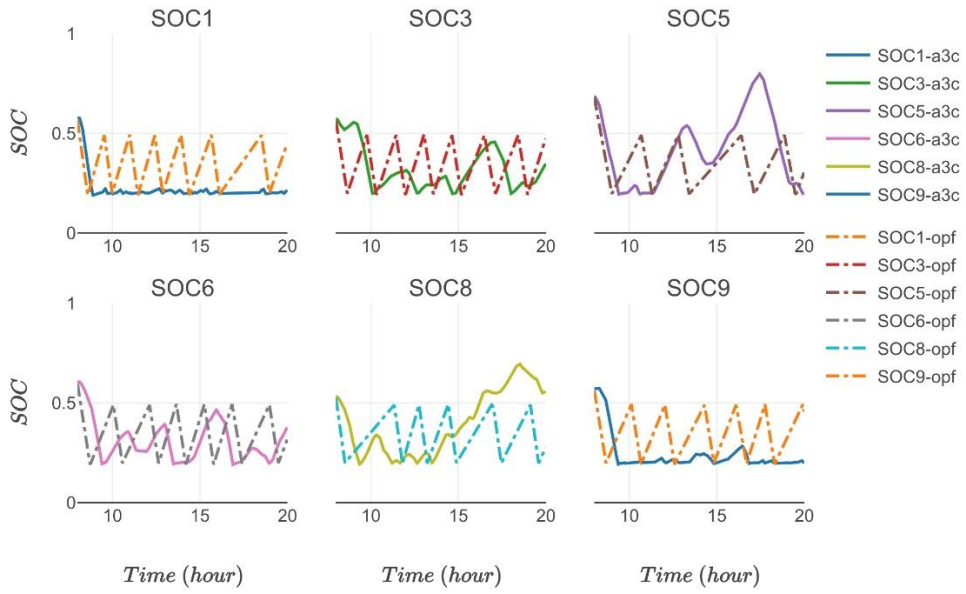

图 5.10 储能系统荷电状态曲线

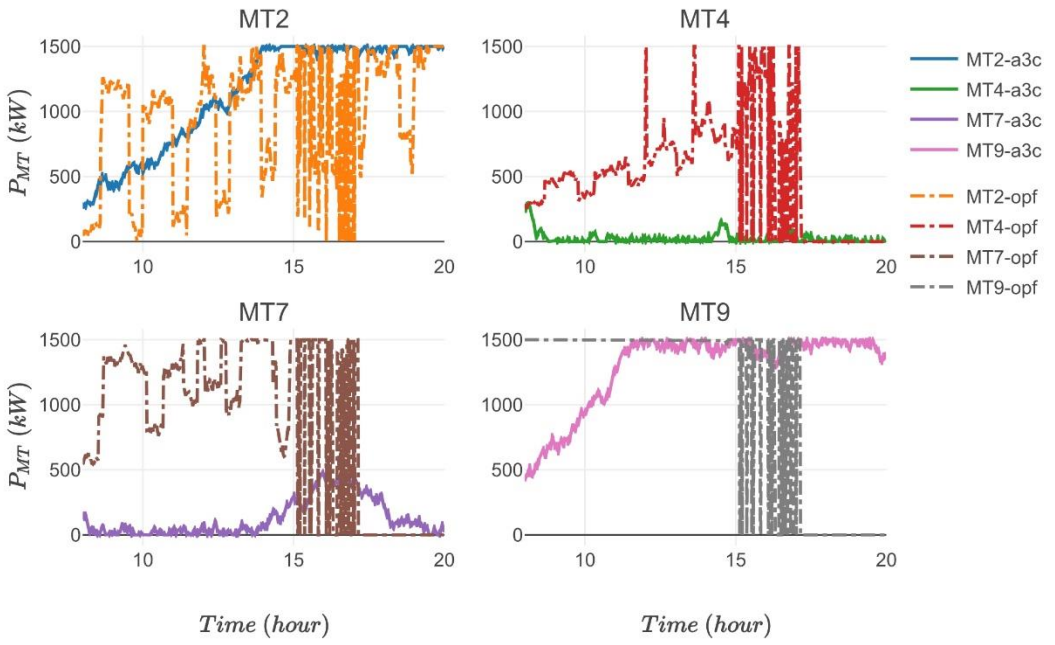

图 5.11 微型涡轮发电机功率

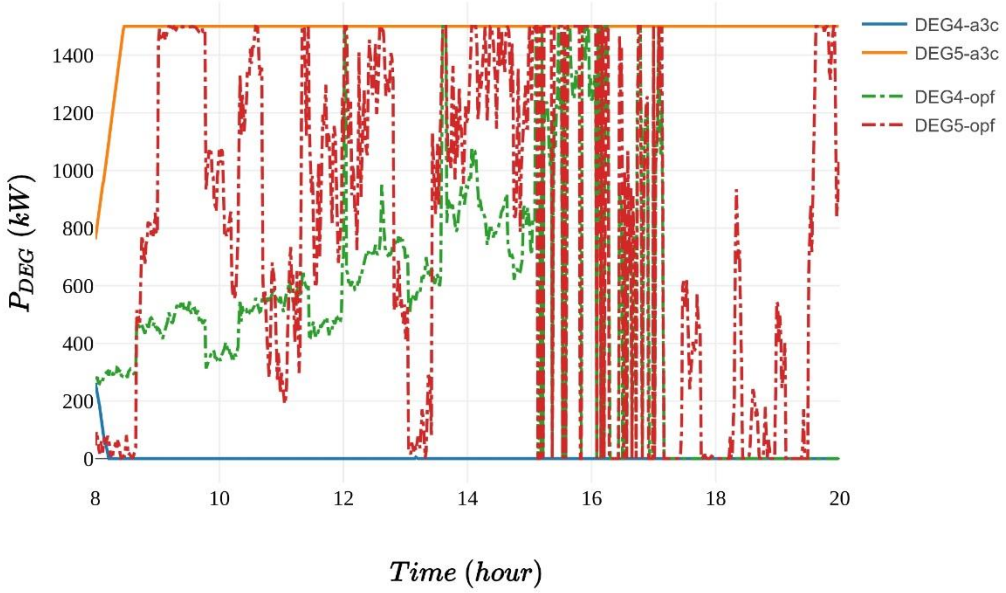

图 5.12 柴油发电机功率

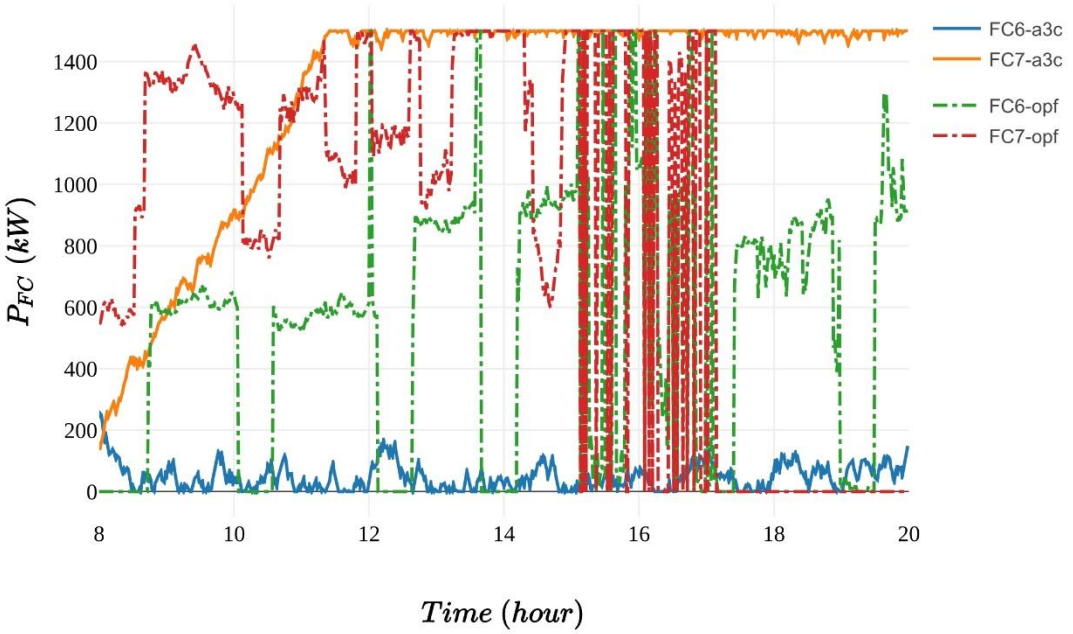

图 5.13 燃料电池功率

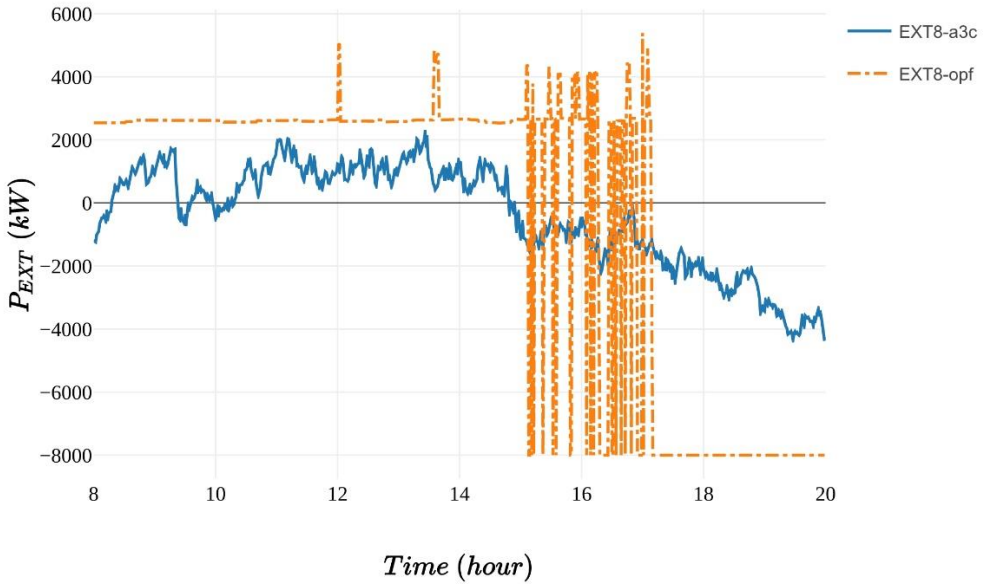

图 5.14 外部电网功率

从图 5.9 和图 5.10 可以发现，基于所提方法，储能系统的充放电被

合理控制，以使荷电状态保持在合理范围之内。在此意义之上，最大和最小荷电状态不被违反。然而，从仿真结果可以发现，在 OPF 方法控制之下，储能被大量用于所考虑能源互联网网络的功率调度，将有可能缩短其寿命。图 5.10 清楚地表明，使用基于 OPF 方法，在几乎一半的仿真期间内，储能系统处于不可控状态。因此，能源互联网网络仅能依靠可控发电设备和外部电网实现生产消费功率平衡。严重依靠外部电网的功率传输违反了能源互联网的自底向上的能量管理准则。因此，我们可以得出结论，在所提基于 A3C 方法下，储能设备能够得到更合理的利用。

基于图 5.11，图 5.12 和图 5.13，我们可以发现，这里微型涡轮发电机，柴油发电机和燃料电池的功率曲线不存在剧烈的波动，可控发电设备的输出功率变化在所提方法下得到很好的控制。相反，在 OPF 方法的控制之下，这里存在剧烈的波动，如图 5.11，图 5.12，图 5.13 所示。

另外，如图 5.14 所示，基于所提方法，能源互联网网络和外部网络的功率交换得到了成功控制。但此功率交换不会被 OPF 方法所约束，这表明基于 OPF 的方法不能被应用在所考虑的场景中。

与 OPF 方法比较，我们可以发现本章所提控制方法能够考虑能源互联网系统的暂时信息，以更有效地利用可控发电设备。另外，OPF 方法极大地依赖能源互联网系统建模。然而，本文所提的基于增强学习的控制方法为无模型方法。对于基于 actor-critic 的方法，没有必要建立明确的系统模型。对于图 5.3 的 actor-critic 网络参数调整，仅需要对所考虑能源互联网系统的观察。本文所提方法可以更容易地用于真实能源互联网场景。

基于仿真结果，我们对所提控制方法的可行性和有效性进行了评估。整个系统可以获得的资源和容量能被能源互联网网络全部利用，以便提供更可靠的能量供给。

5.5 结论

本章研究了能源互联网系统的能量管理问题。深度增强学习方法被用于解决该优化控制问题。在仿真部分，所提方法被用来和 OPF 方法进行比较。仿真结果的比较表明本文所提方法相对于 OPF 解决方案具有更好的性能。能源互联网网络和外部电网的功率交换被所提方法有效限制，子网间的功率共享被明确限制在局部范围之内。另外，基于所提方法的控制，储能设备得到了更合理的利用。

基于所提方法，荷电状态，负荷功率需求，光伏、风机和分布式可控发电设备被作为 actor-critic 网络的输入。值得注意的是，子网间的空间关系以及子网间传输的功率流没有被考虑为 actor-critic 网络的输入，这可能会影响所获得的控制机制的性能。在我们的下一步工作中，设计深度增强学习任务相关网络时，将考虑更多的信息，以进一步提升其控制效果。

第六章 总结与展望

6.1 总结

这个研究报告主要针对能源互联网系统动态建模、控制和优化做理论研究。从研究思路上，分为以下三个步骤。

首先，使用常微分或随机微分方程，对动态能源互联网系统进行建模，并使用解析方法，或数值求解方法，对能源互联网场景下鲁棒和最优控制问题求解。这具体指的是第二章和第三章。

然后，我们使用混合神经网络和随机分析的方法对能源互联网系统进行更为精准的建模。这体现在第四章。并针对带有系统限制条件的优化问题，即第四章研究的如何实现能源互联网自底向上的能量管理准则，使用动态规划的方法进行有效求解。

最后，针对能源互联网场景下最优能量管理问题，我们提出一种无模型的优化方法，通过深度强化学习手段进行求解控制策略。这样做的优势是可以跳过类似在第二章至第四章中复杂的系统建模步骤，同时也就成功地规避了参数量测误差等建模误差。

在这份研究报告里，我们的研究思路是从经典的系统建模控制，逐步发展到和人工智能手段相结合来求解能源互联网领域内系统控制问题。

6.2 展望

随着新一代信息技术的发展，我们有理由认为，未来能源互联网场景将充分融合人工智能、5G、边缘计算等先进技术。对于系统稳定性、能量管理等控制问题而言，可以实现实时变化的毫秒级的控制策略设计。这里，我们指出，将人工智能应用于能源系统应该是未来能源互联网发展的方向之一。

虽然目前已经有研究表明，在某些物理场景和控制要求下，人工智能

可以实现传统控制方法无法达到的控制效果。但是，我们仍需注意，很多人工智能算法在实际应用上仍存在缺陷。比如，使用强化学习解决能量控制优化问题时，存在的风险是现有的强化学习算法本身缺乏稳定性。基于神经网络的深度强化学习算法往往都是“黑盒模型”，缺乏可解释性。因而对于系统稳定性和可靠性要求较高的场合下，强化学习技术的应用不可避免地面临着诸多挑战。在实际电力系统中，一旦能量调度、控制算法发生错误，将对整个能源系统带来灾难性的打击。此外，数据采集、传输等一系列过程可能出错（如，传感器元器件损坏导致采集的数据不准确），这些因素将对强化学习算法的训练过程带来一定程度的干扰，并且导致强化学习算法得到的控制策略不稳定、不可靠。

因此，如何在实际能源互联网场景中灵活运用人工智能方法进行系统管控，在确保人工智能算法可靠的前提下，实现比传统控制方法更好的控制精度和效果，这应该是今后的工作的主要方向之一。

致谢

这项工作得到了国家自然科学基金（项目编号：61472200），国家重点研发计划（项目编号：2017YFE0132100）和北京市科学技术委员会（项目编号：Z161100000416004）的支持。

衷心感谢合作导师曹军威研究员和邢春晓研究员对本人的精心指导，他们的言传身教将使我终生受益。值此报告完成之际，向两位恩师致以最诚挚的谢意。

工作中，曹老师站位高远、知识渊博，给予我悉心指导；生活中，曹老师和蔼可亲、平易近人，对我关爱有加。这里向曹老师致以衷心的感谢和最崇高的敬意！

同时，我要感谢所有的同事们，特别是秦钰超，这三年以来给予我工作上的支持。

值此报告撰写完成之际，深深感谢我的夫人陆莉郡，来到北京陪伴、支持我从事博士后科研工作。此外，还要感谢支持我事业的父母等其他亲人，包括我博士后在站期间出生的女儿华一霏。

最后，真诚地感谢各位专家在百忙之中对我出站报告的审阅和指正。

参考文献

[1] M. Bhattacharya, S. R. Paramati, I. Ozturk and S. Bhattacharya, "The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries," *Appl. Energy,* vol. 162, pp. 733-741, 2016.

[2] B. V. Mathiesen, H. Lund, D. Connolly, H. Wenzel, P. A. Østergaard, B. Möller and et al, "Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions," *Appl. Energy,* vol. 145, pp. 139-154, 2015.

[3] S. Bilgen, K. Kaygusuz and A. Sari , "Renewable energy for a clean and sustainable future.," *Energy Source,* vol. 26, p. 1119–1129, 2004.

[4] J. G. Vlachogiannis, "Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 24, no. 4, p. 1808–1817, 2009.

[5] H. Bevrani, M. R. Feizi and S. Ataee, "Robust frequency control in an islanded microgrid: H∞and μ-synthesis approaches," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 7, no. 2, p. 706–717, 2016.

[6] G. Venkataramanan and C. Marnay, "A larger role for microgrids," *IEEE Power Energy Mag.,* vol. 6, pp. 78-82, 2008.

[7] T. Elsayed, A. A. Mohamed and O. A. Mohammed, "DC microgrids and distribution systems: An overview," *Elect. Power Syst. Res.,* vol. 119, pp. 407-417, 2015.

[8] P. Kou, D. Liang and L. Gao, "Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management," *Appl. Energy,* vol. 185, p. 939–952, 2017.

[9] C. D. Korkas, S. Baldi, I. Michailidis and E. Kosmatopoulos, "Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage," *Appl. Energy,* vol. 163, p. 93–104, 2016.

[10] H. Hua, Y. Qin and J. Cao, "A class of optimal and robust controller design for islanded microgrid," in *Proc. IEEE 7th international conference on power and energy systems*, Toronto, Canada, 2017.

[11] H. Hua, Y. Qin, J. Cao, W. Wang, Q. Zhou, Y. Jin and et al, "Stochastic optimal and robust control scheme for islanded AC microgrid," in *Proc. IEEE international conference on probabilistic methods applied to power systems*, Boise, Idaho, US, 2018.

[12] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su and J. M. Guerrero, "Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC

microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 7, no. 1, pp. 200-215, 2016.

[13] J. Rifkin, The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World, New York: Palgrave Macmillan, 2011.

[14] J. Cao, H. Hua and G. Ren, "Energy Use and the Internet," in *The SAGE Encyclopedia of the Internet*, Delhi, India, SAGE Publications, 2018, p. 344–350.

[15] H. Hua, Y. Qin, C. Hao and J. Cao, "Stochastic optimal control for energy Internet: A bottom-up energy management approach," *IEEE Trans. Ind. Inform.,* vol. 15, no. 3, pp. 1788-1797, 2019.

[16] L. H. Tsoukalas and R. Gao, "From smart grids to an energy Internet: assumptions, architectures and requirements," in *Proceedings of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 2008.

[17] A. Madhja, S. Nikoletseas, C. Raptopoulos and D. Tsolovos, "Energy Aware Network Formation in Peer-To-Peer Wireless Power Transfer," in *Proceedings of the ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Malta, 2016.

[18] Q. C. Zhong and G. Weiss, "Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy," in *Proceedings of the Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, USA, 2009.

[19] H. A. Aalami and S. Nojavan, "Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation," *IET Gener. Transm. Distrib.,* vol. 10, p. 107–114, 2016.

[20] D. Jane and J. Nitin, "Supply chain integration, product modularity, and market valuation: Evidence from the solar energy industry," *Prod. Oper. Manag.,* vol. 22, p. 1494–1508, 2013.

[21] W. Zhang, H. Hua and J. Cao, "Short term load forecasting based on IGSA- ELM algorithm," in *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Energy Internet*, Beijing, China, 2017.

[22] J. Cao and M. Yang, "Energy Internet – towards smart grid 2.0," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Networking & Distributed Computing*, Los Angeles, USA, 2013.

[23] Z. Dong, J. Zhao, F. Wen and Y. Xue, "From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework," *Autom. Electr. Power Syst.,* vol. 38, no. 15, p. 1–11, 2014.

[24] H. Guo, F. Wang, J. Luo and L. Zhang, "Review of energy routers applied for the energy internet integrating renewable energy," in *Proceedings of IEEE the 8th International Power Electronics & Motion*

Control Conference, Hefei, China, 2016.

[25] X. Han, F. Yang, C. Bai and et al., "An open energy routing network for low-voltage distribution power grid," in *Proceedings of the First IEEE International Conference on Energy Internet*, Beijing, China, 2017.

[26] W. Q. Zhang, X. Y. Zhang, S. W. Huang, Y. K. Xia, X. C. Fan and S. W. Mei, "Evolution of a transmission network with high proportion of renewable energy in the future," *Renew. Energy,* vol. 102, p. 372–379, 2016.

[27] Y. Kuang, Y. Zhang, B. Zhou, C. Li, Y. Cao and L. Li, "A review of renewable energy utilization in islands," *Renew. Sustain. Energy Rev.,* vol. 59, p. 504–513, 2016.

[28] L. P. Qian, Y. J. A. Zhang, J. Huang and Y. Wu, "Demand response management via real-time electricity price control in smart grids," *IEEE J. Sel. Areas Commun.,* vol. 31, p. 1268–1280, 2013.

[29] Y. Zhang, Z. Chen, Z. Cai and et al, "New generation of cyber-energy system:energy internet," *Electr. Power Autom. Equip.,* vol. 36, no. 9, pp. 1-7, 2016.

[30] C. Guo, Z. Wang, J. Ji and F. Ma, "Model simulation of electricity characteristics in power user data based on data mining," *Comput. Simul.,* vol. 33, p. 447–450, 2016.

[31] S. Yu, Y. Sun, X. Niu and C. Zhao, "Energy Internet system based on distributed renewable energy generation," *Electr. Power Autom. Equip.,* vol. 30, pp. 104-108, 2010.

[32] S. T. Shah, K. W. Choi, S. F. Hasan and M. Y. Chung, "Energy harvesting and information processing in two-way multiplicative relay networks," *Electron. Lett.,* vol. 52, p. 751–753, 2016.

[33] Z. Chen, Y. Zhang, Z. Cai, L. Li and P. Liu, "Characteristics and technical challenges in energy Internet cyber-physical system," in *Proceedings of the PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Torino, Italy, 2017.

[34] Y. Ma, X. Wang, X. Zhou and Z. Gao, "An overview of energy routers," in *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference*, Chongqing, China, 2017.

[35] Y. Xu, J. H. Zhang and W. Y. Wang, "Energy router: Architectures and functionalities toward energy internet," in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communication*, Brussels, Belgium, 2011.

[36] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson and K. Frohlich, "Energy hubs for the future," *IEEE Power Energy Mag. ,* vol. 5, p. 24–30, 2007.

[37] J. Boyd , "An internet-inspired electricity grid," *IEEE Spectr.,* vol. 50, p. 12–14, 2013.

[38] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng and S. J. Dale, "The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet," *Proc. IEEE,* vol. 99, p. 133–148, 2010.

[39] J. Miao, N. Zhang, C. Kang, J. Wang, Y. Wang and Q. Xia, "Steady-state power flow model of energy router embedded AC network and its application in optimizing power system operation," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 9, no. 5, pp. 4828-4837, 2018.

[40] M. Gao, K. Wang and L. He, "Probabilistic model checking and scheduling implementation of energy router system in energy Internet for green cities," *IEEE Trans. Ind. Inform.,* vol. 14, no. 4, pp. 1501-1510, 2018.

[41] W. Fu, T. Song, S. Wang and X. Wang, "Dynamic frequency scaling architecture for energy efficient router," in *Proceedings of the Eighth ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking & Communications Systems*, Austin, TX, USA, 2012.

[42] J. Zhang, W. Wang and S. Bhattacharya, "Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic," in *Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies*, Washington, DC, USA, 2012.

[43] J. Cao, K. Meng, J. Wang, M. Yang, Z. Chen, W. Li and C. Lin, "An energy internet and energy routers," *SCIENTIA SINICA Informationis,* vol. 6, pp. 714-727, 2014.

[44] T. Zhao, G. Wang and S. Bhattacharya, "Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer," *IEEE Trans. Power Electron.,* vol. 28, p. 1523–1532, 2013.

[45] S. Bifaretti, P. Zanchetta, A. Watson, L. Tarisciotti and J. C. Clare, "Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 2, p. 231–243, 2011.

[46] H. Hua, C. Hao, Y. Qin and J. Cao, "A class of control strategies for energy Internet considering system robustness and operation cost optimization," *Energies,* vol. 11, p. 1593, 2018.

[47] W. Al-Saedi, S. Lachowicz, D. Habibi and O. Bass, "Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.,* vol. 42, no. 1, p. 139–149, 2012.

[48] J. Dekker, M. Nthontho, S. Chowdhury and S. P. Chowdhury, "Economic analysis of PV/diesel hybrid power systems in different climatic zones of South Africa," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.,* vol. 40, no. 1, p. 104–112, 2012.

[49] G. D. Kamalapur and R. Y. Udaykumar, "Rural electrification in India and feasibility of photovoltaic solar home systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.,* vol. 33, no. 3, p. 594–599, 2011.

[50] N. Hatziargyriuo, H. Assano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power Energy Mag.,* vol. 5, no. 4, p. 78–94, 2007.

[51] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.

[52] T. Odun-Ayo and M. L. Crow, "Structure-preserved power system transient stability using stochastic energy functions," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 27, no. 3, p. 1450–1458, 2012.

[53] D. Hinrichsen and A. J. Pritchard, "Stochastic H∞," *SIAM J. Control Optim.,* vol. 36, no. 5, p. 1504–1538, 1998.

[54] A. J. Van der Schaft, "L2-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback H∞control," *IEEE Trans. Automat. Control,* vol. 37, no. 6, p. 770–784, 1992.

[55] S. Yang, Q. Lei, F. Z. Peng and Z. Qian, "A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.,* vol. 58, no. 1, p. 202–212, 2011.

[56] M. J. Hossain, H. R. Pota, M. A. Mahmud and M. Aldeen, "Robust control for power sharing in microgrids with low-inertia wind and PV generators," *IEEE Trans. Sustain. Energy,* vol. 6, no. 3, p. 1067–1077, 2014.

[57] V. P. Singh, S. R. Mohanty, N. Kishor and P. K. Ray, "Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.,* vol. 46, no. 1, p. 294–305, 2013.

[58] H. Karimi, H. Nikkhajoei and R. Iravani, "A linear quadratic Gaussian controller for a stand-alone distributed resource unit-simulation case studies," in *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 2007.

[59] A. Mohamed, H. H. Zeineldin, M. M. A. Salama and R. Seethapathy, "Seamless formation and robust control of distributed generation microgrids via direct voltage control and optimized dynamic power sharing," *IEEE Trans. Power Electron.,* vol. 27, no. 3, p. 1283–1294, 2012.

[60] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis and J. M. Guerrero, "Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback

linearization," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 28, no. 3, p. 3462–3470, 2013.

[61] S. Xu, J. Lam, Y. Zou and M. Sun, "H∞ control for uncertain neutral systems via non-fragile state feedback controllers," in *Proceedings of 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference*, Kunming, China, 2004.

[62] Z. Li, Y. Chu and S. Xu, "Delay-dependent nonfragile robust H∞ filtering of T-S fuzzy time-delay systems," *Circuits Systems Signal Process,* vol. 29, no. 3, p. 361–375, 2010.

[63] S. Adhikari and F. Li, "Coordinated V-f and P-Q control of solar photovoltaic generators with MPPT and battery storage in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 5, no. 3, p. 1270–1281, 2014.

[64] D. J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.,* vol. 23, no. 1, p. 311–320, 2008.

[65] X. Tang, X. Hu, N. Li, W. Deng and G. Zhang, "A novel frequency and voltage control method for islanded microgrid based on multienergy storage," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 7, no. 1, p. 410–419, 2015.

[66] R. Majumder, "Some aspects of stability in microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 28, no. 3, p. 3243–3252, 2013.

[67] R. Billinton and P. R. S. Kuruganty, "Probabilistic assessment of transient stability in a practical multimachine system,," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.,* vol. 100, no. 7, p. 3634–3641, 1981.

[68] F. F. Wu and Y. K. Tsai, "Probabilistic dynamic security assessment of power systems: Part I – basic model," *IEEE Trans. Circuits Syst.,* vol. 30, no. 3, p. 148–159, 1983.

[69] K. J. Timko, A. Bose and P. M. Anderson, "Monte Carlo simulation of power system stability," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.,* vol. 102, no. 10, p. 3453–3459, 1983.

[70] M. B. D. Coutto Filho, A. M. Leite Da Silva, V. L. Arienti and S. M. P. Ribeiro, "Probabilistic load modelling for power system expansion planning," in *Proceedings of the Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems*, London, UK, 1991.

[71] H. Mohammed and C. O. Nwankpa, "Stochastic analysis and simulation of grid-connected wind energy conversion system," *IEEE Trans. Energy Convers.,* vol. 15, no. 1, p. 85–90, 2000.

[72] S. Xu and T. Chen, "Robust H∞ control for uncertain stochastic systems with state delay," *IEEE Trans. Automat. Control,* vol. 47, no. 12, p.

2089–2094, 2002.

[73] L. Hu and X. Mao, "Almost sure exponential stabilisation of stochastic systems by state-feedback control," *Automatica,* vol. 44, no. 2, p. 465–471, 2008.

[74] Z. Wang, H. Qiao and K. J. Burnham, "On stabilization of bilinear uncertain time-delay stochastic systems with Markovian jumping parameters," *IEEE Trans. Automat. Control,* vol. 47, no. 4, p. 640–646, 2002.

[75] G. Chen and Y. Shen, "Robust reliable H∞ control for nonlinear stochastic Markovian jump systems," *Math. Probl. Eng.,* vol. 2012, no. 5, p. 1–16, 2012.

[76] P. Florchinger, "Lyapunov-like techniques for stochastic stability," *SIAM J. Control Optim.,* vol. 33, no. 4, p. 1151–1169, 1995.

[77] B. Oksendal, Stochastic Differential Equations, Berlin: Springer, 2007.

[78] X. Mao, Stochastic Differential Equations and Applications, Chichester, UK: Horwood Publishing, 2007.

[79] C. Wang and Y. Shen, "Delay-dependent non-fragile robust stabilization and H∞ control of uncertain stochastic systems with time-varying delay and nonlinearity," *J. Franklin Inst.,* vol. 348, no. 8, p. 2174–2190, 2011.

[80] H. Li and Y. Shi, "State-feedback H∞ control for stochastic time-delay nonlinear systems with state and disturbance-dependent noise," *Internat. J. Control,* vol. 85, no. 10, p. 1515–1531, 2012.

[81] A. Albert, "Conditions for positive and nonnegative definiteness in terms of pseudo-inverse," *SIAM J. Appl. Math.,* vol. 17, no. 2, p. 434–440, 1969.

[82] Y. Wang, L. Xie and C. E. De Souza, "Robust control of a class of uncertain nonlinear systems," *Systems Control Lett.,* vol. 19, no. 2, p. 139–149, 1992.

[83] R. Wang, J. Wu, Z. Qian and Z. Lin, "A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network," *IEEE Trans. Ind. Inform.,* vol. 13, p. 3275–3285, 2017.

[84] M. Erol-Kantarci, J. H. Sarker and H. Mouftah, "Energy routing in the smart grid for delay-tolerant loads and mobile energy buffers," in *Proceedings of the 2013 IEEE Symp. on Computers and Communications*, Split, Croatia, 2013.

[85] S. Hambridge, A. Q. Huang and R. Yu, "Solid state transformer (SST) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy," in *Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Montreal, QC, Canada, 2015.

[86] H. Hua, J. Cao, G. Yang and G. Ren, "Voltage control for uncertain stochastic nonlinear system with application to energy Internet: Non-fragile robust H∞ approach," *J. Math. Anal. Appl.,* vol. 463, p. 93–110, 2018.

[87] Y. Liu, Y. Fang and J. Li, "Interconnecting microgrids via the energy router with smart energy management," *Energies,* vol. 10, p. 1297, 2017.

[88] P. Yi, T. Zhu, B. Jiang, R. Jin and B. Wang, "Deploying energy routers in an energy Internet based on electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 65, p. 4714–4725, 2016.

[89] H. Hua, Y. Qin and J. Cao, "Coordinated frequency control for multiple microgrids in energy Internet: A stochastic H∞ approach," in *Proceedings of the 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia*, Singapore, 2018.

[90] G. Chen, M. Yang and L. Yu, "Mixed H2/H∞ optimal guaranteed cost control of uncertain linear systems," *J. Syst. Sci. Inf.,* vol. 2, p. 409–416, 2004.

[91] A. Anvari-Moghaddam, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, H. Monsef and A. Rahimi-Kian, "Efficient energy management for a grid-tied residential microgrid," *IET Generation Transmission & Distribution,* vol. 11, no. 11, pp. 2752-2761, 2017.

[92] B. Heymann, J. F. Bonnans, F. Silva and G. Jimenez, "A stochastic continuous time model for microgrid energy management," in *Proc. 2016 European Control Conf.*, Aalborg, Denmark, 2016.

[93] J. Zhao and F. Dörfler, "Distributed control and optimization in DC microgrids," *Automatica,* vol. 61, pp. 18-26, 2015.

[94] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, M. M. Begovic and C. Chen, "Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 6, no. 1, p. 45–53, 2015.

[95] K. Barnes, J. C. Balda and A. Escobar-Mejía, "A semi-Markov model for control of energy storage in utility grids and microgrids with PV generation," *IEEE Trans. Sust. Energy,* vol. 6, no. 2, pp. 546-556, 2015.

[96] D. L. Marino, K. Amarasinghe and M. Manic, "Building energy load forecasting using deep neural networks," in *Proc. 42nd Ann. Conf. IEEE Ind. Elect. Soc.*, Florence, Italy, 2016.

[97] M. Y. Zhai, "A new method for short-term load forecasting based on fractal interpretation and wavelet analysis," *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.,* vol. 69, pp. 241-245, 2015.

[98] H. Zhu, X. Li, Q. Sun, L. Nie, J. Yao and G. Zhao, "A power prediction method for photovoltaic power plant based on wavelet decomposition and artificial neural networks," *Energies,* vol. 9, no. 1, p. 11, 2015.

[99] F. Milano and R. Zárate-Miñano, "A systematic method to model power systems as stochastic differential algebraic equations," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 28, no. 4, pp. 4537-4544, 2013.

[100] D. Tran and A. M. Khambadkone, "Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 4, no. 3, pp. 1289-1296, 2013.

[101] Pecan Street Inc., "Dataport," [Online]. Available: https://dataport.cloud/.

[102] I. Sutskever, O. Vinyals and Q. V. Le, "Sequence to sequence learning with neural networks," *Advances in Neural Information Processing Syst.,* pp. 3104-3112, 2014.

[103] Q. Zang and L. Zhang, "Asymptotic behaviour of the trajectory fitting estimator for reflected Ornstein–Uhlenbeck processes," *J. Theoretical Probability,* vol. 3, pp. 1-19, 2017.

[104] F. Bonnans, D. Giorgi, B. Heymann, P. Martinon and O. Tissot, "BocopHJB 1.0. 1--User Guide," 2015.

[105] R. Carnegie, D. Gotham, D. Nderitu and P. V. Preckel, "Utility scale energy storage systems," vol. 1, 2013.

[106] H. Bevrani, B. François and T. Ise, Microgrid Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 2017.

[107] S. Albeverio, L. D. Persio, E. Mastrogiacomo and B. Smii, "A class of Lévy driven SDEs and their explicit invariant measures," *Potential Anal.,* vol. 45, no. 2, pp. 229-259, 2016.

[108] A. Amiri, M. R. Maleki and F. Sogandi, "Estimating the time of a step change in the multivariate-attribute process mean using ANN and MLE," *Int. J. Data Analy. Tech. & Strategies,* vol. 10, no. 1, pp. 81-89, 2018.

[109] R. Gupta, K. Audhkhasi, Z. Jacokes, A. Rozga and S. Narayanan, "Modeling multiple time series annotations as noisy distortions of the ground truth: an expectation-maximization approach," *IEEE Trans. Affective Computing,* vol. 9, no. 1, pp. 76-89, 2018.

[110] B. Heymann, J. F. Bonnans, P. Martinon, F. J. Silva, F. Lanas and G. Jimenez-Estevez, "Continuous optimal control approaches to microgrid energy management," *Energy Syst.,* vol. 9, no. 1, pp. 59-77, 2018.

[111] Q. Sun, R. Han, H. Zhang, J. Zhou and J. M. Guerrero, "A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 6, p. 3006–3019, 2015.

[112] S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo , "Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid

system with plug-in hybrid electric vehicles," *Elect. Power Energy Syst.,* vol. 43, p. 804–811, 2012.

[113] S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo , "Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed H2/H∞ control technique," *Appl. Energy,* vol. 88, p. 3860–3868, 2011.

[114] B. J. Claessens, P. Vrancx and F. Ruelens , "Convolutional neural networks for automatic state-time feature extraction in reinforcement learning applied to residential load control," *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 9, no. 4, pp. 3259 - 3269, 2016.

[115] G. Yang, J. Cao, H. Hua and Z. Zhou, "Deep learning-based distributed optimal control for wide area energy Internet," in *Proc. 2nd IEEE international conference on energy Internet*, 2018.

[116] C. R. Lashway and O. A. Mohammed , "Adaptive battery management and parameter estimation through physics-based modeling and experimental verification," *IEEE Trans. Transport Electrif.,* vol. 2, p. 454–464, 2016.

[117] M. I. Jordan and T. M. Mitchell , "Machine learning: trends, perspectives, and prospects," *Science,* vol. 349, pp. 255-260, 2015.

[118] A. Festa , R. Guglielmi , C. Hermosilla , A. Picarelli , S. Sahu , A. Sassi and et al, "Hamilton–Jacobi–Bellman equations. Optimal control: novel directions and applications," *Springer,* p. 127–261, 2017.

[119] Q. Wei, D. Liu, Y. Liu and R. Song, "Optimal constrained self-learning battery sequential management in microgrid via adaptive dynamic programming," *IEEE/CAA J. Automat. Sinica.,* vol. 4, pp. 168-176, 2017.

[120] L. Thurner , A. Scheidler , F. Schäfer , J. Menke, J. Dollichon , F. Meier and et al, "Pandapower - an open source python tool for convenient modeling, analysis and optimization of electric power systems," *IEEE Trans. Power Syst.,* vol. 33, p. 6510–6521, 2018.

[121] A. Cordoba-Arenas , S. Onori , Y. Guezennec and G. Rizzoni, "Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes," *J Power Sources,* vol. 278, pp. 473-483, 2015.

[122] A. Szpiro and P. Dupuis , "Second order numerical methods for first order Hamilton-Jacobi equations," *SIAM J. Numer. Anal.,* vol. 40, p. 1136–1183, 2002.

[123] M. Falcone and R. Ferretti , "Convergence analysis for a class of high-order semi-Lagrangian advection schemes," *SIAM J. Numer. Anal.,* vol. 35, p. 909–940, 1998.

[124] W. M. McEneaney , A. Deshpande and S. Gaubert, "Curse-of-complexity attenuation in the curse-of-dimensionality-free method for HJB PDEs," in *American control conference*, Seattle, US, 2008.

[125] M. Couceiro and P. Ghamisi , "Particle swarm optimization. ;," in *Fractional order Darwinian particle swarm optimization Springer International Publishing*, 2016.

[126] J. Wang, O. K. Ersoy, M. He and F. Wang, "Multi-offspring genetic algorithm and its application to the traveling salesman problem," *Appl. Soft Comput.,* vol. 43, p. 415–423, 2016.

[127] S. V. Isakov , I. N. Zintchenko , T. F. Rønnow and M. Troyer , "Optimised simulated annealing for Ising spin glasses," *Comput. Phys. Commun.,* vol. 192, p. 265–271, 2015.

[128] V. Mnih, A. P. Badia, M. Mirza , A. Graves , T. Lillicrap , T. Harley and et al, "Asynchronous methods for deep reinforcement learning," in *International conference on machine learning*, New York, US, 2016.

[129] M. Turchetta, F. Berkenkamp and A. Krause , "Safe exploration in finite Markov decision processes with Gaussian processes," in *Proc. Advances in Neural Information Processing*, Barcelona, Spain, 2016.

[130] H. Sak, A. Senior and F. Beaufays , "Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling," *Comput Sci.,* p. 338–342, 2014.

[131] H. Hachiya, J. Peters and M. Sugiyama , "Efficient sample reuse in EM-based policy search," in *Joint European conference on machine learning and knowledge discovery in databases*, 2009.

个人简历与发表的学术论文

个人简历

华昊辰（1988-），男，汉族，江苏无锡人，2011 年本科毕业于英国利物浦大学（The University of Liverpool, UK）数学系，金融数学专业，获理学学士学位。2016 年博士研究生毕业于英国利物浦大学数学系，获哲学博士学位，主要研究方向为非线性随机最优和鲁棒控制。

2016 年 9 月开始至今，在清华大学信息技术研究院能源互联网技术研究中心任职博士后，合作导师是曹军威研究员与邢春晓研究员，主要从事能源互联网系统建模，分析与优化理论研究。

博士后在站期间撰写、发表的学术论文

期刊论文：

1. **H. Hua**, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao, “Optimal energy management strategies for energy Internet via deep reinforcement learning approach,” *Applied Energy*, vol. 239, pp. 598-609, Apr. 2019.
2. **H. Hua**, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao, “Stochastic optimal control for energy Internet: A bottom-up energy management approach,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1788-1797, Mar. 2019.
3. Y. Qin, **H. Hua**, and J. Cao, “Stochastic optimal control scheme for battery lifetime extension in islanded microgrid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4467-4475, Jul. 2019.
4. **H. Hua**, Y. Qin, H. Xu, C. Hao, and J. Cao, “Robust control method for DC

microgrids and energy routers to improve voltage stability in energy Internet," *Energies*, vol. 12, Art. no. 1622, 2019.

5. **H. Hua**, Y. Qin, J. Geng, C. Hao, and J. Cao, "Robust mixed H_2/H_∞ controller design for energy routers in energy Internet," *Energies*, vol. 12, no. 3, Art. no. 340, 2019.
6. J. Cao, W. Zhang, Z. Xiao, and **H. Hua**, "Reactive power optimization for transient voltage stability in energy Internet via deep reinforcement learning approach," *Energies*, vol. 12, Art. no. 1556, 2019.
7. J. Cao, Y. Wan, **H. Hua**, and G. Yang, "Performance modelling for data monitoring services in smart grid: A network calculus-based approach," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, accepted.
8. **H. Hua**, J. Cao, G. Yang, and G. Ren, "Voltage control for uncertain stochastic nonlinear system with application to energy Internet: non-fragile robust H_∞ approach," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 463, no. 1, pp. 93-110, 2018.
9. **H. Hua**, C. Hao, Y. Qin, and J. Cao, "A class of control strategies for energy Internet considering system robustness and operation cost optimization," *Energies*, vol. 11, no. 6, Art. no. 1593, 2018.
10. J. Cao, Y. Wan, **H. Hua**, and Y. Qin, "Delay analysis for end-to-end synchronous communication in monitoring systems," *Sensors*, vol. 18, no. 11, 3615, 2018.
11. 任光，杨刚，**华昊辰**，杨方，白翠粉，邱忠涛，曹军威，基于链式路由网络的能源接入管理策略研究. 计算机研究与发展, 54(4), 695-702, 2017.
12. 肖泽青，**华昊辰**，曹军威，人工智能在能源互联网中的应用综述. 电力建设，40(5): 63-70, 2019.
13. 李洋，肖泽青，聂松松，曹军威，**华昊辰**，生成对抗网络与新能源数

据质量研究综述. 南方电网技术。（已录用）

14. 郭健，曹军威，杨洋，陆超，张东霞，刘敦楠，**华昊辰**，面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析. 电网技术，44(2): 493-504，2020.

国际会议论文：

15. Z. Qin, **H. Hua**, H. Liang, R. Herzellah, Y. Zhou, C. Xing, and J. Cao, "Optimal electricity trading strategy for a household microgrid," in Proc. 16th IEEE International Conference on Control & Automation, Sapporo, Hokkaido, Japan, July. 2020. （已投出）
16. J. Wang, Y. Li, J. Guo, J. Cao, **H. Hua**, C. Xing, C. Qi, and Z. Pi, "Data quality analysis framework and evaluation methods for power system operation with high proportion of renewable energy penetration," in Proc. IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Bangkok & Phuket, Thailand, Apr. 2020. (已录用)
17. Y. Li, Z. Qin, F. Zhang, Y. Qin, **H. Hua**, and J. Cao, "Distributed power dispatching solution for a future economic and environment-friendly energy Internet," in Proc. 9th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, Amsterdam, The Netherlands, Mar. 2020. (已录用)
18. G. Zhang, Y. Qin, Y. Li, **H. Hua**, Z. Qin, and J. Cao, "Stochastic distributed control for frequency regulation in energy Internet: An ADMM approach," in Proc. 9th IEEE International Conference on Power and Energy Systems, Perth, Australia, Dec. 2019. (已录用)
19. Y. Qin, **H. Hua**, and J. Cao, "Energy Internet system control and optimization: A stochastic risk-sensitive control approach," in Proc. 15th IEEE International Conference on Control & Automation, Edinburgh, UK,

July. 2019, pp. 79-84.

20. **H. Hua** and J. Cao, "Towards intelligent energy control and optimization in energy Internet: A review," in Proc. 3rd IEEE International Conference on Energy Internet, Nanjing, China, May 2019, pp. 573-578.
21. Y. Qin, **H. Hua**, and J. Cao, "Short-term energy cache regulation for energy router: A robust H-infinity approach," in Proc. 3rd IEEE International Conference on Energy Internet, Nanjing, China, May 2019, pp. 161-166.
22. H. You, **H. Hua**, and J. Cao, "A smart contract-based energy trading strategy in energy Internet," in Proc. 3rd IEEE International Conference on Energy Internet, Nanjing, China, May 2019, pp. 478-483.
23. **H. Hua**, Y. Qin, J. Cao, W. Wang, Q. Zhou, Y. Jin, *et al.*, "Stochastic optimal and robust control scheme for islanded AC microgrid," in Proc. Probabilistic Methods Applied into Power Systems, Boise, Idaho, US, Jun. 2018, pp. 1-6.
24. **H. Hua**, Y. Qin, and J. Cao, "Coordinated frequency control for multiple microgrids in energy Internet: A stochastic H_∞ approach," in Proc. 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, Singapore, May 2018, pp. 810-815.
25. G. Yang, J. Cao, **H. Hua**, and Z. Zhou, "Deep learning-based distributed optimal control for wide area energy Internet," in Proc. 2nd IEEE International Conference on Energy Internet, Beijing, China, May 2018, pp. 292-297.
26. **H. Hua**, C. Hao, Y. Qin, and J. Cao, "Stochastic robust H_∞ control strategy for coordinated frequency regulation in energy Internet considering time delay and uncertainty," in Proc. The 13th World Congress on Intelligent Control and Automation, Changsha, China, Jul. 2018, pp. 111-118.
27. C. Hao, **H. Hua**, Y. Qin, and J. Cao, "A class of optimal and robust controller design for energy routers in energy Internet," in Proc. IEEE

International Conference on Smart Energy Grid Engineering, Oshawa, Canada, Aug. 2018, pp. 14-19.

28. **H. Hua**, C. Hao, Y. Qin, J. Cao, and Y. Yang, "Stochastic optimal control scheme for operation cost management in energy Internet," in Proc. 10th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Sabah, Malaysia, Oct. 2018, pp. 445-450.
29. C. Hao, **H. Hua**, Y. Qin, and J. Cao, "Robust controller design for energy router in energy Internet via mixed H_2/H_∞ control technique," in Proc. 10th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Sabah, Malaysia, Oct. 2018, pp. 457-462.
30. **H. Hua**, Y. Qin, and J. Cao, "A class of optimal and robust controller design for islanded microgrid," in Proc. 7th IEEE International Conference on Power and Energy Systems, Toronto, Canada, Nov. 2017, pp. 111–116.
31. X. Han, F. Yang, C. Bai, G. Xie, G. Ren, **H. Hua**, and J. Cao., "An open energy routing network for low-voltage distribution power grid," in Proc. 1st IEEE International Conference on Energy Internet, Beijing, China, Apr. 2017, pp. 320-325.
32. W. Zhang, **H. Hua**, and J. Cao, "Short term load forecasting based on IGSA-ELM algorithm," in Proc. 1st IEEE International Conference on Energy Internet, Beijing, China, Apr. 2017, pp. 296-301.

专著：

33. J. Cao, **H. Hua**, and G. Ren, "Energy use and the Internet," *The SAGE Encyclopedia of the Internet*. Newbury Park, CA, USA: Sage, 2018, pp. 344-350.
34. C. Hao, Y. Qin, and **H. Hua**, "Energy routers in energy Internet," Energy Internet - Systems and Applications, Springer. (已录用)
35. J. Yang and **H. Hua**, "Power quality and power experience," Energy

Internet - Systems and Applications, Springer. (已录用)

36. **H. Hua**, C. Hao, and Y. Qin, “Internet thinking for layered energy infrastructure,” Energy Internet - Systems and Applications, Springer. (已录用)

37. 主编：曹军威；副主编：**华昊辰**，郭健，肖泽青，杨洁，袁仲达，明阳阳，梁宏，王同贺.《电力物联网概论》，中国电力出版社，2020.