

# 基于通用模块的能量路由器设计 与开发

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 : 自动化系  
学 科 : 控制科学与工程  
研 究 生 : 郝 传 统  
指 导 教 师 : 曹 军 威 研 究 员

二〇一九年五月



# **Design and Development of Universal Module Based Energy Router**

Thesis Submitted to

**Tsinghua University**

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

**Master of Science**

in

**Control Science and Engineering**

by

**Chuantong Hao**

Thesis Supervisor : Professor Junwei Cao

**May, 2019**



## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：  
清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：  
（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；  
（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

**（保密的论文在解密后遵守此规定）**

作者签名： \_\_\_\_\_ 导师签名： \_\_\_\_\_

日 期： \_\_\_\_\_ 日 期： \_\_\_\_\_



## 摘要

能源互联网整合了双向信息流和电力流，被视为解决能源和环境问题的互联网特色的解决方案。在能源互联网场景中，能源生产和消费是分布协调的，可以实现开放对等和点对点的能源共享，发电、储能和耗能之间达到动态平衡。能量路由器是能量转化、缓存、交易的节点，不仅能实现电能的变换，也在提升电能质量，在分布式发电、储能装置和负荷之间实现优化的能源管理策略等方面发挥重大作用。常见的能量路由器往往都是针对特定的工况研发特定的设备，可移植性非常弱，与能量路由器即插即用、可扩展性的理念有很大出入，本文寻求设计一种通用模块，不改变主体架构即可实现电力变换的功能。本文针对基于通用模块的能量路由器设计与开发，主要研究工作包括以下几个方面：

(1) 通过常微分方程和随机微分方程对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统的动态特性进行时域建模。针对两个系统的不同控制目标，分别设计了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器，通过 MATLAB 的线性矩阵不等式工具箱求解，相比传统方法取得了更好的控制效果。

(2) 从频域角度对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统进行建模，同时考虑了多种分布式能源的接入、母线频率或电压的管理以及成本优化运行等问题，通过粒子群算法得到最优解，获得最佳的 PI 控制器参数。通过与其他方法对比验证了本方法的优越性。

(3) 以二极管钳位型三电平变流器的结构为基础，提出交直流通用的标准化功率模块设计方案，可以同时实现交直流切换及直流斩波变换用语言描述来代替。通用的通信模块整合 RS485、RS232、以太网、CAN 和光纤等通信单元，可以与通用功率模块协调工作，实现能量路由器搭建、电能质量控制和电压等级提升。完成交直流通用模块的实验平台的设计与搭建，通过硬件实验验证了模块的通用性。

(4) 提出自治微网能量路由器设计方案。分别设计了整体的结构、功能和运行模式，给出了各个模式中每个能量路由器模块的具体响应模式。参与能量路由器装置的研制，装置通过第三方认证的硬件实验验证，证明其具备良好的潮流调节及电能质量调节等功能，并且满足优越的性能指标。

**关键词：**能源互联网；能量路由器；时域控制；频域控制；交直流通用模块

## Abstract

Energy Internet integrates information flow and power flow, and is regarded as the solution of energy and environmental problems. In the energy Internet scenario, energy production and consumption are distributed and coordinated, open energy sharing, and dynamic balance between power generation, energy storage and energy consumption can be achieved. Energy router is the node of energy conversion, caching and trading. It not only realizes the transformation of electric energy, but also improves the quality of electric energy, and plays an important role in the optimization of energy management strategies. Common energy routers are often designed for specific conditions. This paper seeks to design a general module, without changing the main structure can achieve the power conversion function. Aiming at the design and development of energy router based on general module, the contents include:

(1) The dynamic characteristics of energy router system and typical energy Internet system are modeled in time domain by differential equations. For different control objectives of the two systems, robust mixed  $H_2/H_\infty$  controller and stochastic robust  $H_\infty$  controller are designed and verified.

(2) Taking into account the access of multiple distributed energy sources, frequency management and cost optimization operation, the optimal solution is obtained by particle swarm optimization, and the optimal PI controller parameters are obtained. The superiority of this method is verified by comparing with other methods.

(3) Based on the structure of diode-clamped three-level converter, a design scheme of standard AC/DC power module is proposed, which can realize AC/DC switching and DC chopper conversion at the same time. Universal communication module integrates several communication units. The universality of the module is verified through electrical experiments.

(4) The design scheme of energy router is proposed. The overall structure, function and operation mode are designed respectively, and the specific response mode of each energy router module in each mode is given. The energy router device has been verified by experiments, which proves that it has good power flow regulation and power quality regulation functions.

**Key words:** Energy Internet; Energy Router; Time Domain Control; Frequency Domain Control; AC/DC General Module

## 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 能源互联网 .....	1
1.1.2 能量路由器 .....	2
1.1.3 控制方法综述 .....	3
1.2 论文主要贡献 .....	4
1.3 章节安排 .....	5
第 2 章 时域控制方法 .....	7
2.1 本章引言 .....	7
2.2 系统建模 .....	7
2.2.1 单个能量路由器系统 .....	7
2.2.2 典型能源互联网系统 .....	9
2.3 解决方案 .....	14
2.3.1 鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器 .....	14
2.3.2 随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器 .....	16
2.4 仿真结果分析 .....	18
2.4.1 单个能量路由器系统仿真 .....	18
2.4.2 典型能源互联网系统仿真 .....	19
2.5 本章小结 .....	22
第 3 章 频域控制方法 .....	23
3.1 本章引言 .....	23
3.2 系统建模 .....	23
3.2.1 单个能量路由器系统 .....	23
3.2.2 典型能源互联网系统 .....	27
3.3 解决方案 .....	31
3.3.1 混合 $H_2/H_\infty$ 控制器 .....	31
3.3.2 混合鲁棒和最优控制器 .....	33
3.4 仿真结果分析 .....	35

---

3.4.1	单个能量路由器系统仿真 .....	35
3.4.2	典型能源互联网系统仿真 .....	38
3.5	本章小结 .....	44
<b>第4章</b>	<b>交直流通用模块设计 .....</b>	<b>45</b>
4.1	本章引言 .....	45
4.2	通用模块设计 .....	45
4.2.1	通用功率模块 .....	45
4.2.2	通用通信模块 .....	46
4.2.3	通用模块应用 .....	48
4.3	仿真实验 .....	51
4.3.1	ACDC 变换 .....	51
4.3.2	DCAC 变换 .....	51
4.3.3	DCDC 变换 .....	52
4.4	硬件实验 .....	53
4.4.1	电气结构设计 .....	53
4.4.2	实验平台搭建 .....	53
4.4.3	实验结果 .....	54
4.5	本章小结 .....	56
<b>第5章</b>	<b>自治微网能量路由器开发 .....</b>	<b>57</b>
5.1	本章引言 .....	57
5.2	总体设计 .....	57
5.3	能量路由器样机 .....	60
5.4	实验结果 .....	61
5.4.1	系统容量和端口接入多类源荷实验 .....	61
5.4.2	有功调节实验 .....	62
5.4.3	无功调节实验 .....	62
5.4.4	稳定功率因数实验 .....	62
5.4.5	谐波补偿实验 .....	63
5.4.6	系统响应时间实验 .....	63
5.4.7	电压跌落补偿能力实验 .....	64
5.5	本章小结 .....	65

第 6 章 总结与展望 .....	67
6.1 论文工作总结 .....	67
6.2 未来工作展望 .....	67
参考文献 .....	69
致 谢 .....	72
声 明 .....	73
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	74

# 第1章 引言

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 能源互联网

在过去几十年中，全球变暖、能源危机和生态问题促进了可再生能源发电和分布式能源网络研究的发展。对于分布式能源的集成，微网发挥着重要的作用。根据电力系统信息化和智能化的原则，为解决多个互联微网场景中的挑战，专家们提出了能源互联网的新概念<sup>[1]</sup>。在互联网核心的启发下，通过整合双向信息流和电力流，能源互联网可以被视为解决能源相关问题的互联网特色的解决方案<sup>[2]</sup>。在能源互联网场景中，能源生产和消费是分布协调的，可以实现开放对等和点对点的能源共享，发电、储能和耗能之间达到动态平衡。

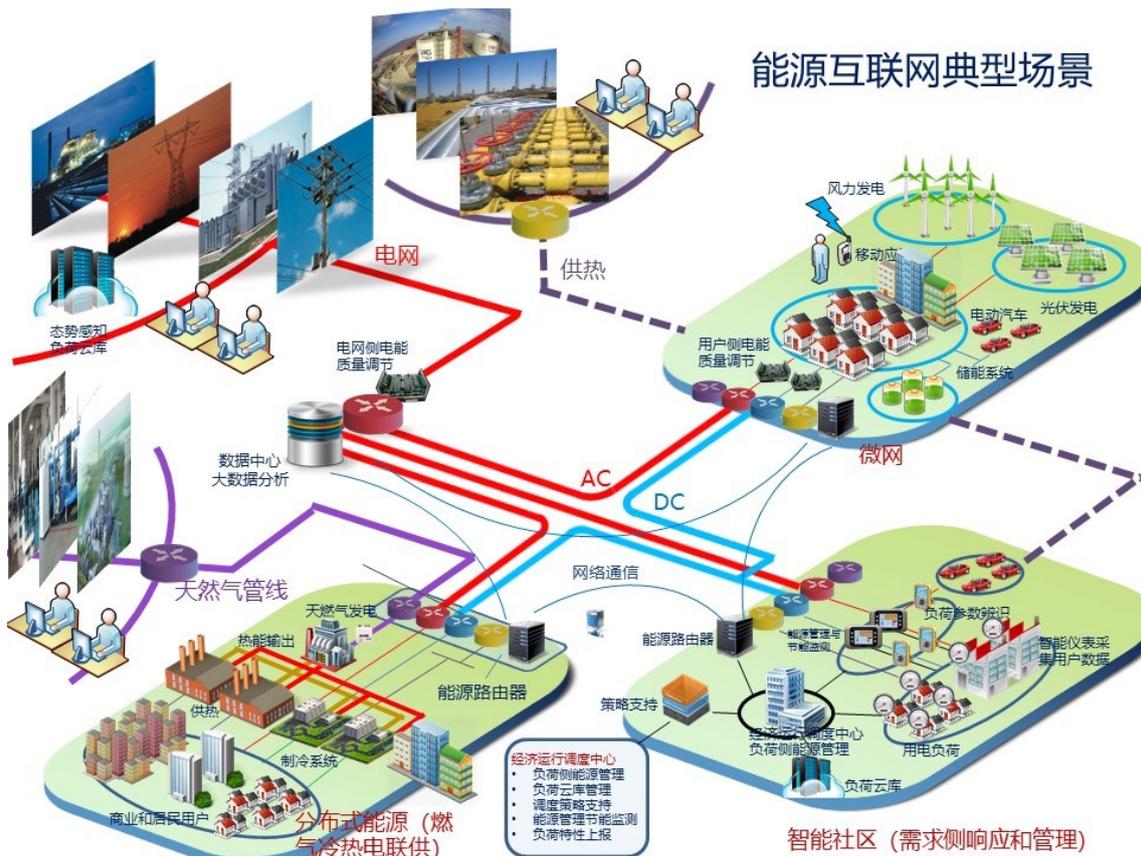


图 1.1 能源互联网典型场景

在如图 1.1 所示的能源互联网典型场景中，电网、微网、智能社区和分布式能

源（燃气冷热电联供）通过交流或直流的输电线路及各种能源交换、控制和优化的设备互联起来。电网、供热系统和天然气管线为整个能源互联网场景提供能源。园区级微网中除电动汽车电站、楼宇建筑等一般负载外，也建立了风力发电、光伏发电等环境友好型分布式发电装置，并配备了储能系统，以削峰填谷，实现局域电能的合理利用。在燃气冷热电联供区域，不同形式的能源以电能为中心，按需转化，协调调配，实现多能流综合管理。智能社区主要承担着需求侧响应和管理的任务，利用智能仪表采集的海量数据进行大数据分析，科学管理能源与监测节能，同时也为经济运行调度中心的负荷侧能源管理提供支持，包括负荷侧能源管理、负荷云库管理、调度策略支持、能源管理节能监测、负荷特性上报等功能。

能源互联网是解决当前环境与能源问题的可行之路。习近平主席曾提出：“建设全球能源互联网，实现绿色低碳发展。”能源互联网“开放、互联、对等、分享”的特点与习近平主席强调的“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念<sup>[3]</sup>不谋而合，是改善全球环境、缓解能源危机、实现可持续性发展的不二法门。

### 1.1.2 能量路由器

能量路由器作为能量转化、缓存、交易的节点，在能源互联网中发挥了重要的作用。通过信息与能量的整合，可以实现能量的双向流动和动态平衡。能量路由器不仅能实现电能的变换，也在提升电能质量，在分布式发电、储能装置和负荷之间实现优化的能源管理策略等方面发挥重大作用。

近年来，人们在研制能量路由器方面做了大量的工作。文献[4]介绍了一种以固态变压器结构为基础的能量路由器。在文献[5]中，作者提出了一类用于能量路由器的电路拓扑。文献[6]提出了一种具有多个高压交流端口的新型配电能量路由器拓扑。

同时，对能量路由策略的研究也引起了人们的广泛关注，相关方面也取得了重大进展。针对局域能源网络，文献[7]提出了一种基于图论的能量路由算法。在文献[8]中，作者研究了一系列的能量路由策略，用于延迟容限负载和移动能量缓冲。文献[9]研究了基于能量路由器的配电网电能质量控制问题。在文献[10]中作者提出了一种基于经济效益的能源路由策略。文献[11]提出了能量路由器嵌入式交流电网稳态潮流模型及其在优化电力系统运行中的应用。

在能源互联网的场景下，每个微网中的发电或耗电设备都连接到内部的能量路由器上，再通过能量路由器之间的连接与其他微网相连，共享储能装置的容量<sup>[12]</sup>。文献[13]对协调随机能量管理的分布经济模型预测控制进行了研究。对于与主电网断开连接的能源互联网，文献[14]研究了多个合作自治孤岛微网中的协调能量

调度问题。在文献[15]中，作者考虑了通过能量路由器互连的多微网智能能源管理问题。在文献[16]中研究了如何在基于电动车辆的能源互联网中部署能量路由器。

能源互联网是自下而上构建的开放互联、对等分享的新型能源电力基础设施，能量路由器是能源互联网实现的关键装备。随着电力电子技术、储能技术以及信息通信技术的发展，能量路由器解决能源互联网中设备互联、信息共享的前景成为可能。

### 1.1.3 鲁棒优化控制研究现状

近年来，学者们在微网、能源互联网与能量路由器控制方面做了大量的研究。

当多个微网相互连接时，相关的能源管理和控制问题比孤岛微网中的问题更为复杂。关于能源管理的最优控制问题已经很普遍。文献[17]研究了多个微网中智能配电管理系统的协调最优控制算法。文献[18]应用多目标随机优化方法解决了微网中的最优能量管理问题。在文献[19]中，作者研究了微网在离网和并网模式下的最优控制策略。文献[20]研究了直流微网的分布式控制和优化问题。

另一方面，能源互联网领域的鲁棒控制问题也受到了广泛关注。例如，在文献[21]中， $H_\infty$ 和 $\mu$ 分析方法都被用于调节孤岛微网中的交流母线频率偏差。在文献[22]中，作者研究了混合分布式发电系统的鲁棒 $H_\infty$ 负载频率控制。

对于文献[17-20]中提到的不同的最优控制问题，评价 $H_2$ 性能时考虑了多种的优化目标。对于在文献[21]和文献[22]中讨论的鲁棒控制问题，重点讨论了 $H_\infty$ 性能。当同时考虑 $H_2$ 和 $H_\infty$ 性能时，相关问题称为混合 $H_2/H_\infty$ 控制问题。混合 $H_2/H_\infty$ 控制理论在能源互联网领域的应用也取得了重大进展。在文献[23]中，为了提高孤岛微网的稳定性和故障穿越能力，作者设计了鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 电压控制器。文献[24]中的研究表明，采用固定结构混合 $H_2/H_\infty$ 控制技术，可以在智能电网中获得协调的车网控制和鲁棒负载频率控制器。文献[25]提出了一种基于 $H_2/H_\infty$ 的鲁棒混合负载频率控制器，涉及一种包含超导磁能存储器的非管制电力系统。尽管混合 $H_2/H_\infty$ 控制技术在传统电力系统中得到了广泛的应用，但在能源互联网领域应用此类控制方案的工作很少。

很多学者通过遗传算法来解决微网中的控制问题。本文中主要介绍粒子群算法(PSO)。PSO是一种从随机解开始，通过迭代找到最优解的遗传算法<sup>[26]</sup>，通过适应性评价解的最优性。PSO根据当前搜索的最优值来查找全局最优值，由于粒子群算法的高精度和快速收敛性，引起了学术界的关注，并在解决实际问题上显示出其优越性<sup>[27]</sup>。

在本文涉及的问题中所使用的 PSO 算法流程图如图 1.2 所示。利用相关控制目标函数计算粒子的适配值。粒子*i*的最佳访问位置被标记为 $pbest_i$ 。整个群落中最佳个体位置被定义为全局最佳位置，标记为 $gbest_i$ 。粒子*i*的速度和新位置由 $v_i$ 和 $x_i$ 表示，由如下等式更新：公式编号哩

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_i - x_i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_i - x_i) \quad (1-1)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (1-2)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} iter \quad (1-3)$$

其中， $c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子。 $rand_1$ 和 $rand_2$ 是范围在 0 到 1 之间的随机数。 $w$ 为权重系数。 $w_{min}$ 和 $w_{max}$ 分别为权重系数的最小值和最大值。 $iter$ 和 $iter_{max}$ 分别是为迭代次数和最大迭代次数。

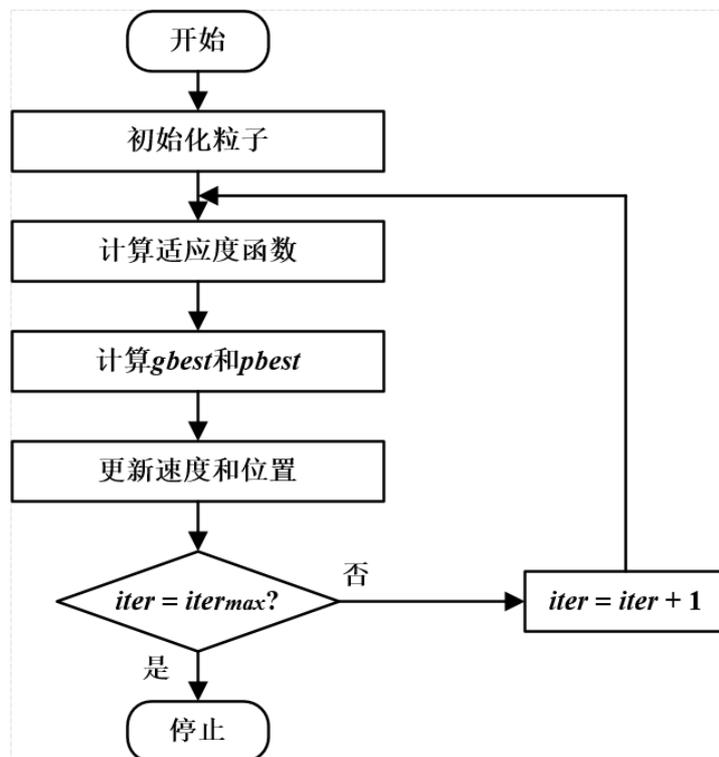


图 1.2 PSO 算法流程图

## 1.2 论文主要贡献

本文从时域控制方法、频域控制方法、交直流通用变流器设计和自治微网能量路由器开发四个方面介绍了基于通用模块的能量路由器设计与开发的研究。论文的主要贡献有以下四个方面。

(1) 通过常微分方程和随机微分方程对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统的动态特性进行时域建模,考虑了多种分布式能源的接入。针对两个系统的不同控制目标,考虑了电压/频率稳定问题和能源互联网“广域互联、局域自治”的特点,分别设计了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器,并通过MATLAB的线性矩阵不等式工具箱求解。仿真结果验证了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器的有效性。

(2) 从频域角度对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统进行建模,同时考虑了多种分布式能源的接入、母线频率或电压的管理以及成本优化运行等问题。综合控制问题被转化为混合 $H_2/H_\infty$ 控制问题,通过粒子群算法得到最优解,获得最佳的PI控制器参数。在Simulink中的仿真结果证明了该方法的有效性,在工程实践中有较大意义。

(3) 以二极管钳位型三电平变流器的结构为基础,设计了交直流通用的标准化功率模块,可以同时实现整流、逆变和直流斩波功能。通用的通信模块整合RS485、RS232、以太网、CAN和光纤等通信单元,可以与通用功率模块协调工作,用于能连路由器搭建、电能质量控制和电压等级提升。设计并搭建了交直流通用模块的实验平台,通过硬件实验验证了模块的通用性。

(4) 对自治微网能量路由器进行了设计,并参与装置研发工作。设计了整体的结构、功能和运行模式,详细介绍了各个模式中每个能量路由器模块的具体响应模式。通过七个方面的硬件实验验证,表明已完成装置研制与调试。本文设计的能量路由器电压等级为380V,系统容量达到320kVA,响应时间为8.8毫秒,接入电源种类有四种:电网、风电、光伏、储能。负荷种类四类:阻性负载、电力电子负载、容性负载和电动机负荷。能量路由器具有潮流调节模式,包含有功调节和无功调节,稳定功率因数达到95%以上。具有电能质量调节模式,包含电能质量暂态、稳态指标的统一调节,暂态电压补偿能力超过30%,电流谐波含量小于5%。

### 1.3 章节安排

第1章介绍了本文的研究背景,对能源互联网和能量路由器的控制方法进行了综述。

第2章介绍了时域的能量路由器和能源互联网建模与控制方法,给出了仿真结果,验证了本章所提出方法的可行性。

第3章介绍了频域的能量路由器和能源互联网建模与控制方法,通过典型的仿真结果对提出的控制器进行的验证。

第4章介绍了交直流通用变流器的设计,给出了仿真与硬件实验的结果。

第 5 章介绍了自治微网能量路由器样机的开发，给出了经第三方认证的实验结果。

第 6 章是总结和展望。

## 第2章 能量路由器时域控制方法

### 2.1 本章引言

在能源互联网领域中，从控制的角度来看，很少有人关注能量路由器的频率/电压调节和最优能量分配问题。本节首先考虑了基于直流母线拓扑结构设计的能量路由器的上述两个问题。从控制角度针对能源互联网中的典型能量路由器场景设计了一组最优和鲁棒控制器。作为能源互联网的核心器件，本节关注的能量路由器连接到负载（LOAD）、光伏机组（Photovoltaic unit, PV）、风力发电机组（Wind Turbine Generator, WTG）、可控发电机（Micro Turbine, MT）、超级电容（Super capacitor, SC）、储能设备（Battery Energy Storage Devices, BES）和其他能量路由器（ER2）上。考虑两个控制目标：（1）由于大量分布式可再生能源的接入会导致能量路由器直流母线的电压波动，控制器需要有效地抑制电压变化；（2）根据能源互联网的运行原则，当多个能量路由器互联时，需要优先实现单个路由器的自治功率平衡，同时也要考虑最优的能量分配策略。本节构建了一个混合的鲁棒 $H_2/H_\infty$ 问题，并用数值方法求解，仿真结果体现出所设计控制器的有效性。

同时，本节也考虑了一定范围内的能源互联网的协调频率控制问题。假设多个交流微电网通过能量路由器互连，并且电力通过直流输电技术在微网之间传输，因而每个微网中的交流母线频率是独立的。此外，假设能源互联网系统与主电网隔离。然后，将上述各分量的动态特性描述为一类具有参数不确定性和状态时滞的常微分方程和随机微分方程。为了减小各个微网的频率波动，将协调频率控制问题表述为鲁棒稳定问题和鲁棒 $H_\infty$ 控制问题。利用线性矩阵不等式方法，充分解决了这两个问题，得到了所需的状态反馈控制器。数值仿真结果表明了该控制器的有效性。

### 2.2 能量路由器系统建模

#### 2.2.1 单个能量路由器系统

本节研究的能量路由器系统拓扑结构如图 2.1 所示。假设 ER1 的能量输入主要由光伏机组和风力发电机组提供。光伏发电机组、风力发电机组和负荷的功率分别受到太阳辐射、风力发电和各种负荷条件的影响，这可能导致直流母线电压偏差过大。储能装置和超级电容都用于消耗多余的电力，并在发电量低于 ER1 用电需求时供能。对于单个能量路由器系统，控制目标为调节直流总线功率偏差。同时确

保 ER1 和 ER2 之间传输的功率趋于恒定。

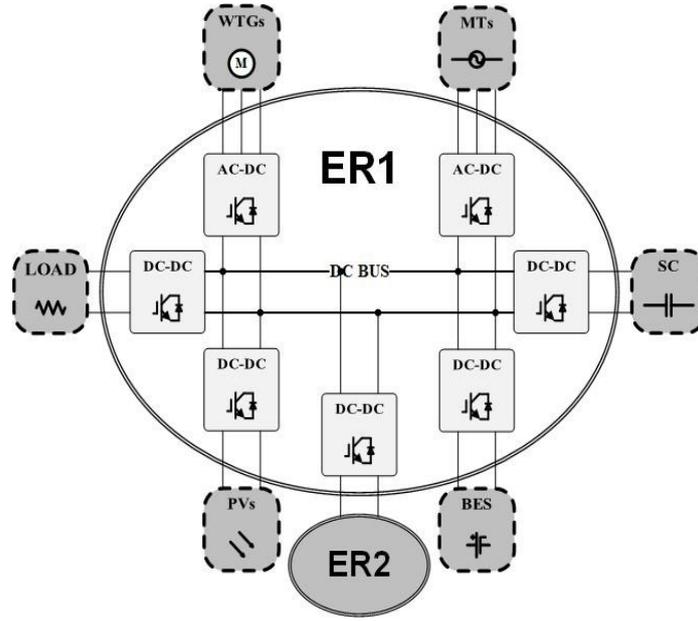


图 2.1 典型能量路由器应用场景

假设储能和超级电容对直流母线电压偏差有快速的响应。直流母线电压偏差表示为  $\Delta V$ 。为了进一步模拟所研究的能量路由器系统的每个组件，将光伏机组、风电机组、负荷、可控发电机、储能和超级电容的功率变化表示为  $\Delta P_{PV}$ ,  $\Delta P_{WTG}$ ,  $\Delta P_L$ ,  $\Delta P_{MT}$ ,  $\Delta P_{BES}$  和  $\Delta P_{SC}$ 。ER1 和 ER2 之间传输的功率变化表示为  $\Delta P_{AER}$ 。功率平衡关系可以表示为：（省略时间  $t$ ）

$$\Delta P_{AER} = -(\Delta P_{PV} + \Delta P_{WTG} + \Delta P_{MT} + \Delta P_{BES} + \Delta P_{SC} + \Delta P_L) \quad (2-1)$$

此外，将光伏机组、风力发电机组、负荷、可控发电机、储能和超级电容的时间常数分别表示为  $T_{PV}$ ,  $T_{WTG}$ ,  $T_L$ ,  $T_{MT}$ ,  $T_{BES}$  和  $T_{SC}$ 。然后，通过一组常微分方程可以描述整个系统的功率动态特性，如式 (2-2) 所示（省略时间  $t$ ）。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{P}_{PV} = -\left(\frac{1}{T_{PV}} + \Delta o_{PV}\right) \Delta P_{PV} + \frac{1}{T_{PV}} v_{PV}, \\ \Delta \dot{P}_{WTG} = -\left(\frac{1}{T_{WTG}} + \Delta o_{WTG}\right) \Delta P_{WTG} + \frac{1}{T_{WTG}} v_{WTG}, \\ \Delta \dot{P}_L = -\left(\frac{1}{T_L} + \Delta o_L\right) \Delta P_L + \frac{1}{T_L} v_L, \\ \Delta \dot{P}_{MT} = -\frac{1}{T_{MT}} \Delta P_{MT} + \frac{1}{T_{MT}} (b_{MT} + \Delta b_{MT}) u_{MT}, \\ \Delta \dot{P}_{BES} = -\frac{1}{T_{BES}} \Delta P_{BES} + \frac{1}{T_{BES}} (r_{BES} + \Delta r_{BES}) \Delta V, \\ \Delta \dot{P}_{SC} = -\frac{1}{T_{SC}} \Delta P_{SC} + \frac{1}{T_{SC}} (r_{SC} + \Delta r_{SC}) \Delta V, \\ \Delta \dot{V} = -\frac{1}{p} \Delta V + \frac{1}{q} \Delta P_{AER}. \end{array} \right. \quad (2-2)$$

光伏发电机组和风力发电机组的发电严重依赖于随时间变化的环境条件，如太阳辐射强度和风力大小等。另外，需求侧的用电状态是可变的，导致负荷的耗电量不断变化。在式 (2-2) 中， $v_{PV}$ 、 $v_{WTG}$  和  $v_L$  分别表示太阳辐射、风功率和负荷功率干扰的变化。将  $u_{MT}$  表示为可控发电机的控制输入信号。常数  $b_{MT}$ 、 $r_{BES}$ 、 $r_{SC}$ 、 $p$  和  $q$  均为可在工程项目中测量的系统参数。由于测量误差是不可避免的，本文考虑了 ER1 功率动态模型的参数不确定性。将系数  $b_{MT}$ 、 $r_{BES}$  和  $r_{SC}$  的不确定性分别表示为  $\Delta b_{MT}$ 、 $\Delta r_{BES}$  和  $\Delta r_{SC}$ 。此外，将时间常数  $T_{PV}$ 、 $T_{WTG}$  和  $T_L$  的倒数的不确定性分别表示为  $\Delta o_{PV}$ 、 $o_{WTG}$  和  $\Delta o_L$ 。令

$$\Delta A = \begin{bmatrix} -\Delta o_{PV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta o_{WTG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta o_L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta r_{BES}}{T_{BES}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta r_{SC}}{T_{SC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

且  $\Delta B = [0 \ 0 \ 0 \ \Delta b_{MT} \ 0 \ 0 \ 0]$ 。参数不确定性的结构<sup>[28]</sup>由式 (2-3) 给出：

$$[\Delta A(t) \ \Delta B(t)] = HF(t)[E_1 \ E_2] \quad (2-3)$$

其中  $H$ 、 $E_1$  和  $E_2$  为时不变实数矩阵，矩阵元素由实际工程状况决定。此外， $F(\cdot)$  是一个未知的时变矩阵，满足：

$$F(t)'F(t) \leq I \quad (2-4)$$

令  $u = u_{MT}$ ， $v = [v_{PV} \ v_{WTG} \ v_L]'$ ， $x = [\Delta P_{PV} \ \Delta P_{WTG} \ \Delta P_L \ \Delta P_{MT} \ \Delta P_{BES} \ \Delta P_{SC} \ \Delta V]'$ ，可以用状态空间控制系统来表示 (2-2) 中的能量路由器系统动态特性：

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Cv \quad (2-5)$$

在系统 (2-5) 中， $u(t)$  为系统控制输入，向量  $x(t)$  为系统状态， $v(t)$  为系统扰动输入。

至此，能量路由器动态特性物理系统已转化为标准的数学模型。

### 2.2.2 典型能源互联网系统

考虑一个由四个交流微网 ( $MG_1$ 、 $MG_2$ 、 $MG_3$  和  $MG_4$ ) 组成的能源互联网场景，每个微网通过能量路由器与其他微网互连，如图 2.2 所示。假设每个微网中含有一个本地负载和一个储能设备 ( $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  分别代表  $MG_1$ 、 $MG_2$ 、 $MG_3$  和  $MG_4$  中的负载； $BES_1$ 、 $BES_2$ 、 $BES_3$  和  $BES_4$  分别代表  $MG_1$ 、 $MG_2$ 、 $MG_3$  和  $MG_4$  中的储能设备)。

假设负载和储能设备是不受控的。此外，假设MG<sub>1</sub>中含有一个光伏机组（PV1）、一个超级电容(FC1)和一个风电机组(WTG1)；MG<sub>2</sub>中含有一个可控发电机(MT2)和一个光伏机组（PV2）；MG<sub>3</sub>中含有一个超级电容（FC3）；MG<sub>4</sub>中含有一个可控电机（MT4）和一个风电机组（WTG4）。同时假设能量路由器之间传输的电能为直流电，因此每个路由器的母线频率是独立的。

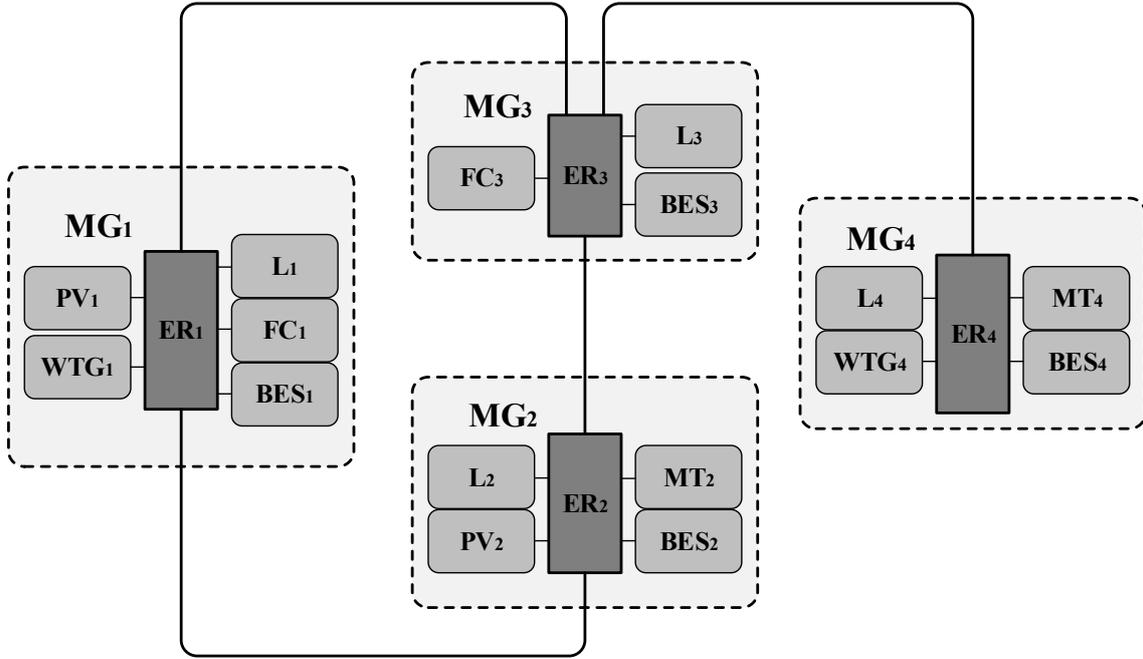


图 2.2 典型能源互联网场景

在图 2.2 中，MG<sub>4</sub>仅与MG<sub>3</sub>相连，MG<sub>1</sub>和MG<sub>2</sub>与另外两个微网相连，并且MG<sub>3</sub>与所有剩余的微网相连。这种拓扑结构可以扩展到广义能源互联网结构。一般来说，如果一个能源互联网由 $n$ 个相互连接的微网组成，那么对于某一个微网，任何连接模式都可以描述为一个微网连接到一个或两个，或最多 $n - 1$ 个其他微网。基于这种拓扑结构，本小节的研究具有一定的代表性，可以推广到多种实际工程场景。

此处用 $\Delta P_{L_1}$ ， $\Delta P_{PV_1}$ ， $\Delta P_{WTG_1}$ ， $\Delta P_{FC_1}$ 和 $\Delta P_{BES_1}$ 分别表示MG<sub>1</sub>中L<sub>1</sub>，PV<sub>1</sub>，WTG<sub>1</sub>，FC<sub>1</sub>和BES<sub>1</sub>的功率变化；用 $\Delta P_{L_2}$ ， $\Delta P_{PV_2}$ ， $\Delta P_{MT_2}$ 和 $\Delta P_{BES_2}$ 分别表示MG<sub>2</sub>中L<sub>2</sub>，PV<sub>2</sub>，MT<sub>2</sub>和BES<sub>2</sub>的功率变化；用 $\Delta P_{L_3}$ ， $\Delta P_{FC_3}$ 和 $\Delta P_{BES_3}$ 分别表示MG<sub>3</sub>中L<sub>3</sub>，FC<sub>3</sub>和BES<sub>3</sub>的功率变化；用 $\Delta P_{L_4}$ ， $\Delta P_{WTG_4}$ ， $\Delta P_{MT_4}$ 和 $\Delta P_{BES_4}$ 分别表示MG<sub>4</sub>中L<sub>4</sub>，WTG<sub>4</sub>，MT<sub>4</sub>和BES<sub>4</sub>的功率变化。 $\Delta f_1$ ， $\Delta f_2$ ， $\Delta f_3$ 和 $\Delta f_4$ 分别表示MG<sub>1</sub>，MG<sub>2</sub>，MG<sub>3</sub>和MG<sub>4</sub>中交流母线的频率变化。ER<sub>1</sub>，ER<sub>2</sub>，ER<sub>3</sub>和ER<sub>4</sub>分别表示MG<sub>1</sub>，MG<sub>2</sub>，MG<sub>3</sub>和MG<sub>4</sub>中的能量路由器。所有的能源互联网系统中元素的时间常数被表示为与下标对应的 $T_{L_1}$ ， $T_{L_2}$ ， $T_{L_3}$ ， $T_{L_4}$ ， $T_{PV_1}$ ， $T_{PV_2}$ ， $T_{WTG_1}$ ， $T_{WTG_4}$ ， $T_{MT_2}$ ， $T_{MT_4}$ ， $T_{FC_1}$ ， $T_{FC_3}$ ， $T_{BES_1}$ ， $T_{BES_2}$ ， $T_{BES_3}$ ， $T_{BES_4}$ ，

$T_{ER_1}$ ,  $T_{ER_2}$ ,  $T_{ER_3}$ 和 $T_{ER_4}$ 。为了描述交流母线频率的系数,用 $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ 和 $M_4$ 分别表示 $MG_1$ ,  $MG_2$ ,  $MG_3$ 和 $MG_4$ 的惯性常数,用 $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ 和 $D_4$ 分别代表 $MG_1$ ,  $MG_2$ ,  $MG_3$ 和 $MG_4$ 的阻尼系数。

$$\left\{ \begin{array}{l} d\Delta P_{L_1} = \left[ -\left(\frac{1}{T_{L_1}} + \Delta O_{L_1}\right)\Delta P_{L_1} + \frac{1}{T_{L_1}}v_{L_1} \right] dt + r_{L_1}\Delta P_{L_1}dW(t), \\ d\Delta P_{PV_1} = \left[ -\left(\frac{1}{T_{PV_1}} + \Delta O_{PV_1}\right)\Delta P_{PV_1} + \frac{1}{T_{PV_1}}v_{PV_1} \right] dt + r_{PV_1}\Delta P_{PV_1}dW(t), \\ d\Delta P_{WTG_1} = -\left(\frac{1}{T_{WTG_1}} + \Delta O_{WTG_1}\right)\Delta P_{WTG_1}dt + \frac{1}{T_{WTG_1}}v_{WTG_1}dt + r_{WTG_1}\Delta P_{WTG_1}dW(t), \\ \Delta \dot{P}_{FC_1} = -\frac{1}{T_{FC_1}}\Delta P_{FC_1}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{FC_1}}(b_{FC_1} + \Delta b_{FC_1})u_{FC_1}, \\ \Delta \dot{P}_{BES_1} = -\frac{1}{T_{BES_1}}\Delta P_{BES_1} + \frac{1}{T_{BES_1}}(r_{BES_1} + \Delta r_{BES_1})\Delta f_1, \\ \Delta \dot{f}_1 = -\frac{2D_1}{M_1}\Delta f_1 + \frac{2}{M_1}\Delta P_1. \end{array} \right. \quad (2-6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d\Delta P_{L_2} = \left[ -\left(\frac{1}{T_{L_2}} + \Delta O_{L_2}\right)\Delta P_{L_2} + \frac{1}{T_{L_2}}v_{L_2} \right] dt + r_{L_2}\Delta P_{L_2}dW(t), \\ d\Delta P_{PV_2} = \left[ -\left(\frac{1}{T_{PV_2}} + \Delta O_{PV_2}\right)\Delta P_{PV_2} + \frac{1}{T_{PV_2}}v_{PV_2} \right] dt + r_{PV_2}\Delta P_{PV_2}dW(t), \\ \Delta \dot{P}_{MT_2} = -\frac{1}{T_{MT_2}}\Delta P_{MT_2}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{MT_2}}(b_{MT_2} + \Delta b_{MT_2})u_{MT_2}, \\ \Delta \dot{P}_{BES_2} = -\frac{1}{T_{BES_2}}\Delta P_{BES_2} + \frac{1}{T_{BES_2}}(r_{BES_2} + \Delta r_{BES_2})\Delta f_2, \\ \Delta \dot{f}_2 = -\frac{2D_2}{M_2}\Delta f_2 + \frac{2}{M_2}\Delta P_2. \end{array} \right. \quad (2-7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d\Delta P_{L_3} = \left[ -\left(\frac{1}{T_{L_3}} + \Delta O_{L_3}\right)\Delta P_{L_3} + \frac{1}{T_{L_3}}v_{L_3} \right] dt + r_{L_3}\Delta P_{L_3}dW(t), \\ \Delta \dot{P}_{FC_3} = -\frac{1}{T_{FC_3}}\Delta P_{FC_3}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{FC_3}}(b_{FC_3} + \Delta b_{FC_3})u_{FC_3}, \\ \Delta \dot{P}_{BES_3} = -\frac{1}{T_{BES_3}}\Delta P_{BES_3} + \frac{1}{T_{BES_3}}(r_{BES_3} + \Delta r_{BES_3})\Delta f_3, \\ \Delta \dot{f}_3 = -\frac{2D_3}{M_3}\Delta f_3 + \frac{2}{M_3}\Delta P_3. \end{array} \right. \quad (2-8)$$

每个微网中的光伏发电机组和风力发电机组的发电量取决于太阳辐射和风力发电的条件,内部负荷的状态可以改变耗电量。用 $v_{L_1}$ ,  $v_{L_2}$ ,  $v_{L_3}$ ,  $v_{L_4}$ ,  $v_{PV_1}$ ,  $v_{PV_2}$ ,  $v_{WTG_1}$ 和 $v_{WTG_4}$ 分别表示与下标对应的本地负荷、光伏机组和风力发电机组功率变化的扰动输入。每个微网中的负荷、风力发电机组和光伏机组所包含的随机性由标准 Weiner 过程 $W(t)$ 描述。用 $u_{FC_1}$ ,  $u_{MT_2}$ ,  $u_{FC_3}$ ,  $u_{MT_4}$ ,  $u_{ER_{12}}$ ,  $u_{ER_{13}}$ ,  $u_{ER_{23}}$ 和 $u_{ER_{43}}$ 来表示与下标对应的控制输入。考虑状态延迟和参数不确定性,在本节中通过常微分方程和随机微分方程结合的形式描述了 $MG_1$ ,  $MG_2$ ,  $MG_3$ 和 $MG_4$ 中各个元素的动态特性,如式(2-6)至式(2-9)所示。在式(2-10)中,把 $\Delta P_{ER_{12}}$ ,  $\Delta P_{ER_{13}}$ ,  $P_{ER_{23}}$

和 $\Delta P_{ER43}$ 分别定义为从MG<sub>1</sub>到MG<sub>2</sub>，从MG<sub>1</sub>到MG<sub>3</sub>，从MG<sub>2</sub>到MG<sub>3</sub>和从MG<sub>4</sub>到MG<sub>3</sub>的传输功率变化。

$$\left\{ \begin{array}{l} d\Delta P_{L_4} = \left[ -\left( \frac{1}{T_{L_4}} + \Delta O_{L_4} \right) \Delta P_{L_4} + \frac{1}{T_{L_4}} v_{L_4} \right] dt + r_{L_4} \Delta P_{L_4} dW(t), \\ d\Delta P_{WTG_4} = -\left( \frac{1}{T_{WTG_4}} + \Delta O_{WTG_4} \right) \Delta P_{WTG_4} dt + \frac{1}{T_{WTG_4}} v_{WTG_4} dt + r_{WTG_4} \Delta P_{WTG_4} dW(t), \\ \Delta \dot{P}_{MT_4} = -\frac{1}{T_{MT_4}} \Delta P_{MT_4}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{MT_4}} (b_{MT_4} + \Delta b_{MT_4}) u_{MT_4}, \\ \Delta \dot{P}_{BES_4} = -\frac{1}{T_{BES_4}} \Delta P_{BES_4} + \frac{1}{T_{BES_4}} (r_{BES_4} + \Delta r_{BES_4}) \Delta f_4, \\ \Delta \dot{f}_4 = -\frac{2D_4}{M_4} \Delta f_4 + \frac{2}{M_4} \Delta P_4. \end{array} \right. \quad (2-9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{P}_{ER12} = \frac{1}{T_{ER12}} \Delta P_{ER12}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{ER12}} (b_{ER12} + \Delta b_{ER12}) u_{ER12}, \\ \Delta \dot{P}_{ER13} = -\frac{1}{T_{ER13}} \Delta P_{ER13}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{ER13}} (b_{ER13} + \Delta b_{ER13}) u_{ER13}, \\ \Delta \dot{P}_{ER23} = -\frac{1}{T_{ER23}} \Delta P_{ER23}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{ER23}} (b_{ER23} + \Delta b_{ER23}) u_{ER23}, \\ \Delta \dot{P}_{ER43} = -\frac{1}{T_{ER43}} \Delta P_{ER43}(t - \tau(t)) + \frac{1}{T_{ER43}} (b_{ER43} + \Delta b_{ER43}) u_{ER43}. \end{array} \right. \quad (2-10)$$

将MG<sub>1</sub>，MG<sub>2</sub>，MG<sub>3</sub>和MG<sub>4</sub>的交流母线功率变化分别表示为 $\Delta P_1$ ， $\Delta P_2$ ， $\Delta P_3$ 和 $\Delta P_4$ 。整个能源互联网系统的功率平衡方程如式(2-11)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_1 = \Delta P_{PV1} + \Delta P_{WTG1} + \Delta P_{BES1} + \Delta P_{FC1} - \Delta P_{L1} - \Delta P_{ER12} - \Delta P_{ER13}, \\ \Delta P_2 = \Delta P_{PV2} + \Delta P_{MT2} + \Delta P_{BES2} - \Delta P_{L2} + \Delta P_{ER12} - \Delta P_{ER23}, \\ \Delta P_3 = \Delta P_{FC3} + \Delta P_{BES3} - \Delta P_{L3} + \Delta P_{ER13} + \Delta P_{ER23} + \Delta P_{ER43}, \\ \Delta P_4 = \Delta P_{WTG4} + \Delta P_{MT3} + \Delta P_{BES3} - \Delta P_{L3} - \Delta P_{ER43}. \end{array} \right. \quad (2-11)$$

在含有控制信号的方程中引入时变的延迟 $\tau(t)$ <sup>[28]</sup>，假设 $0 < \tau(t) \leq \mu < \infty$ 且 $\tau(t) \leq h < 1$ ，其中 $\mu$ 和 $h$ 为实常数标量。

式(2-6)至式(2-9)中的时间常数和元素 $r_{L1}$ ， $r_{L2}$ ， $r_{L3}$ ， $r_{L4}$ ， $r_{PV1}$ ， $r_{PV2}$ ， $r_{WTG1}$ ， $r_{WTG4}$ ， $r_{BES1}$ ， $r_{BES2}$ ， $r_{BES3}$ ， $r_{BES4}$ ， $b_{MT2}$ ， $b_{MT4}$ ， $b_{FC1}$ ， $b_{FC3}$ ， $b_{ER12}$ ， $b_{ER13}$ ， $b_{ER23}$ 和 $b_{ER43}$ 由实际的工程场景决定，可以通过参数估计的方法测量，而测量过程中的误差是不可避免的。对于本节中考虑的能源互联网系统，使用式(2-6)至式(2-9)中的参数不确定性来描述这种误差。元素 $r_{BES1}$ ， $r_{BES2}$ ， $r_{BES3}$ ， $r_{BES4}$ ， $b_{MT2}$ ， $b_{MT4}$ ， $b_{FC1}$ ， $b_{FC3}$ ， $b_{ER12}$ ， $b_{ER13}$ ， $b_{ER23}$ 和 $b_{ER43}$ 的参数不确定性根据下标分别定义为 $\Delta r_{BES1}$ ， $\Delta r_{BES2}$ ， $\Delta r_{BES3}$ ， $\Delta r_{BES4}$ ， $\Delta b_{MT2}$ ， $\Delta b_{MT4}$ ， $\Delta b_{FC1}$ ， $\Delta b_{FC3}$ ， $\Delta b_{ER12}$ ， $\Delta b_{ER13}$ ， $\Delta b_{ER23}$ 和 $\Delta b_{ER43}$ 。把式(2-6)至式(2-9)中其他的系统参数不确定性（尤其对时间常数）分别定义为 $\Delta O_{L1}$ ， $\Delta O_{L2}$ ， $\Delta O_{L3}$ ， $\Delta O_{L4}$ ， $\Delta O_{PV1}$ ， $\Delta O_{PV2}$ ， $\Delta O_{WTG1}$ ， $\Delta O_{WTG4}$ ， $\Delta O_{MT2}$ ，

$\Delta O_{MT_4}$ ,  $\Delta O_{FC_1}$ ,  $\Delta O_{FC_3}$ ,  $\Delta O_{BES_1}$ ,  $\Delta O_{BES_2}$ ,  $\Delta O_{BES_3}$ ,  $\Delta O_{BES_4}$ ,  $\Delta O_{ER_{12}}$ ,  $\Delta O_{ER_{13}}$ ,  $\Delta O_{ER_{23}}$  和  $\Delta O_{R_{43}}$ 。

为了简化表述, 令:

$$\Delta O_1 = \begin{bmatrix} \Delta O_{L_1} \\ \Delta O_{PV_1} \\ \Delta O_{WTG_1} \\ \Delta r_{BES_1} \end{bmatrix}, \Delta O_2 = \begin{bmatrix} \Delta O_{L_2} \\ \Delta O_{PV_2} \\ \Delta r_{BES_2} \end{bmatrix}, \Delta O_3 = \begin{bmatrix} \Delta O_{L_3} \\ \Delta r_{BES_3} \end{bmatrix}, \Delta O_4 = \begin{bmatrix} \Delta O_{L_4} \\ \Delta O_{WTG_4} \\ \Delta r_{BES_4} \end{bmatrix},$$

$$\Delta B_{MG} = \begin{bmatrix} \Delta b_{FC_1} \\ \Delta b_{MT_2} \\ \Delta b_{FC_3} \\ \Delta b_{MT_4} \end{bmatrix}, \quad \Delta B_{ER} = \begin{bmatrix} \Delta b_{ER_{12}} \\ \Delta b_{ER_{13}} \\ \Delta b_{ER_{23}} \\ \Delta b_{ER_{43}} \end{bmatrix}$$

引入  $\Delta O = [\Delta O_1 \quad \Delta O_2 \quad \Delta O_3 \quad \Delta O_4]'$  和  $\Delta B = [\Delta B_{MG} \quad \Delta B_{ER}]'$ , 参数不确定性的结构与上一小结中的相同, 此处不再赘述。

为了简化式 (2-6) 至式 (2-11) 中的等式描述, 此处定义一些向量:

$$\begin{aligned} x_L &= [\Delta P_{L_1} \quad \Delta P_{L_2} \quad \Delta P_{L_3} \quad \Delta P_{L_4}]' \\ x_{PV} &= [\Delta P_{PV_1} \quad \Delta P_{PV_2}]' \\ x_{WTG} &= [\Delta P_{WTG_1} \quad \Delta P_{WTG_4}]' \\ x_{MT} &= [\Delta P_{MT_2} \quad \Delta P_{MT_4}]' \\ x_{FC} &= [\Delta P_{FC_1} \quad \Delta P_{FC_3}]' \\ x_{BES} &= [\Delta P_{BES_1} \quad \Delta P_{BES_2} \quad \Delta P_{BES_3} \quad \Delta P_{BES_4}]' \\ x_{ER} &= [\Delta P_{ER_{12}} \quad \Delta P_{ER_{13}} \quad \Delta P_{ER_{23}} \quad \Delta P_{ER_{43}}]' \\ x_f &= [\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \quad \Delta f_3 \quad \Delta f_4]' \end{aligned}$$

令:

$$x = \begin{bmatrix} x_L \\ x_{PV} \\ x_{WTG} \\ x_{MT} \\ x_{FC} \\ x_{BES} \\ x_{ER} \\ x_f \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{FC_1} \\ u_{MT_2} \\ u_{FC_3} \\ u_{MT_4} \\ u_{ER_{12}} \\ u_{ER_{13}} \\ u_{ER_{23}} \\ u_{ER_{43}} \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v_{L_1} \\ v_{L_2} \\ v_{L_3} \\ v_{L_4} \\ v_{PV_1} \\ v_{PV_2} \\ v_{PV_4} \\ v_{WTG_1} \\ v_{WTG_4} \end{bmatrix},$$

且  $z = x_f$ 。通过这些新的符号, 可以把式 (2-6) 至式 (2-11) 转化为下列独立的随机系统:

$$\begin{cases} dx = [(A + \Delta O)x + A_d x(t - \tau(t)) + (B + \Delta B)u + Cv]dt + RxdW(t) \\ z = Dx \end{cases} \quad (2-12)$$

在系统(2-12)中,  $x(t)$ ,  $u(t)$ 和 $v(t)$ 分别表示系统状态, 控制输入和扰动输入。整个系统的受控输出是每个微网的频率波动, 用 $z(t)$ 表示。此处 $D$ 满足:

$$D = \begin{bmatrix} O_{12 \times 12} & O_{12 \times 4} \\ O_{4 \times 12} & I_4 \end{bmatrix}$$

其中 $I_n$ 是一个 $n \times n$ 的单位矩阵,  $O_{m \times n}$ 是一个 $m \times n$ 的零矩阵。

## 2.3 能量路由器控制解决方案

本节中, 2.3.1 小节介绍了针对 2.2.1 小节中单个能量路由器系统的解决方案, 将直流母线电压稳定问题和能量路由器最优能量调度策略问题综合为鲁棒混合  $H_2/H_\infty$  成本控制问题并分析求解; 2.3.2 小节介绍了针对 2.2.2 小节中能源互联网系统的解决方案, 把能源互联网系统的协同频率控制问题构建为一个鲁棒稳定和鲁棒  $H_\infty$  控制问题, 并求解。

### 2.3.1 鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器设计

ER1 的鲁棒性是以直流母线电压稳定为前提的,  $H_\infty$  控制理论与电压调节等电力系统领域的鲁棒性问题密切相关。本节在可控发电机中设计控制器来调节直流母线电压偏差。首先, 对系统参数不确定性  $\Delta O_{PV}$ ,  $\Delta O_{WTG}$ ,  $\Delta O_L$ ,  $\Delta b_{MT}$ ,  $\Delta r_{BES}$  和  $\Delta r_{SC}$  的鲁棒稳定<sup>[29]</sup>定义如下。

定义 1: 当  $u = 0$  且  $v = 0$  时, 如果对所有的  $\varepsilon > 0$ , 都有:

$$\mathbb{E}|x(t)|^2 < \varepsilon, \quad t > 0,$$

则系统(2-5)是均方稳定的。如果系统对任意初始状态还满足:

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

那么在  $u = 0$  且  $v = 0$  状态下的系统(2-5)被称为均方渐进稳定。如果在  $u = 0$  且  $v = 0$  状态下的系统(2-5)对所有的系统参数不确定性都均方渐进稳定, 则不确定系统(2-5)是鲁棒稳定的。

将直流母线电压波动  $\Delta V$  记为受控输出  $z_1$ , 则有  $z_1 = D_1 x$ , 其中

$$D_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

依据定义 1, 电压控制问题的鲁棒  $H_\infty$  特性<sup>[29]</sup>定义如下:

定义 2: 给定一个标量  $\gamma > 0$ , 单个能量路由器系统的鲁棒  $H_\infty$  特性定义为  $\|z_1(t)\| < \gamma \|v(t)\|$ 。其中的范数  $\|\cdot\|$  定义为:

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

式中标量 $\gamma$ 为扰动衰减， $\mathbb{E}$ 为数学期望。根据以上介绍的 $H_\infty$ 特性，可以得到 $H_\infty$ 成本函数。

$$J_\infty(u, v) \triangleq \mathbb{E} \left[ \int_0^T (z_1' z_1 - \gamma^2 v' v) dt \right] \quad (2-13)$$

对于典型的能源互联网场景，多个能量路由器相互连接，形成电力调度网络。根据能源互联网的工作原理，当多个能量路由器相互连接时，需要优先实现每个能量路由器的自治功率平衡<sup>[30],[31]</sup>。如果本地局域能量路由器的功率平衡不能自动实现，那么可以通过与其他能量路由器的能量传输实现整个能源互联网系统的功率平衡。如果本地能量路由器的功率总是变化的，这意味着没有实现本地功率平衡，那么应在互连的能量路由器之间传输功率。如果两个相互连接的能量路由器相距较远，能量传输成本可能很明显。此外，能量路由器之间频繁的电力传输成本也很高。因此，控制目标是将 ER1 和 ER2 之间传输的功率调节为常数，这相当于将 $\Delta P_{AER}$ 的值最小化。这样的最优能量分配目标被抽象为 $H_2$ 性能。将另一个受控输出表示为 $z_0 = \Delta P_{AER}$ ，则有 $z_0 = D_0 x$ ，其中

$$D_0 = [-1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 0]$$

$H_2$ 成本函数定义如下：

**定义 3:**  $H_2$ 成本目标函数被定义为所研究系统的最差 $H_2$ 性能的上界，表示为：

$$J_2(u, v) = \sup_{F(t)} \lim_{t \rightarrow \infty} E\{z_0^T(t) z_0(t)\}. \quad (2-14)$$

在分别定义了鲁棒 $H_\infty$ 控制问题和 $H_2$ 控制问题后，本节所研究的控制系统可重新表示为：

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Cv, \\ z_0 = D_0 x, \\ z_1 = D_1 x. \end{cases} \quad (2-15)$$

当同时考虑 $H_\infty$ 性能和 $H_2$ 性能时，混合 $H_2/H_\infty$ 成本控制问题的定义如下：

**定义 4:** 混合 $H_2/H_\infty$ 成本控制问题的目标在于找到一个控制器 $u(t) = Kx(t)$ ，满足下列三个条件：

- (1) 对于所有可接受的参数不确定性，控制系统是渐进稳定的；
- (2) 针对 $H_\infty$ 性能，满足 $\|z_1(t)\| < \gamma \|v(t)\|$ 。

(3) 针对  $H_2$  性能, 由 (2-14) 定义的  $J_2(u, v)$  最小化。

至此已经将能量路由器最优和鲁棒控制器设计问题转化为一个混合  $H_2/H_\infty$  成本控制问题。该问题的解决方案由下列两个定理给出。

定理 1<sup>[28]</sup>: 对于一个给定常数  $\gamma > 0$  和系统 (2-15), 存在一个控制器  $u(t) = Kx(t)$ , 使得受控系统渐进稳定的并且满足  $\|z_1(t)\| < \gamma\|v(t)\|$ , 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  $V$ , 使下列的线性矩阵不等式成立:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} W & W_1' & (D_1X)' & (D_0X)' \\ W_1 & -\alpha I & 0 & 0 \\ D_1X & 0 & -\beta I & 0 \\ D_0X & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (2-16)$$

其中

$$\begin{aligned} W &= (AX + BV)' + AX + BV + \alpha HH' + \beta \gamma^{-2} CC', \\ W_1 &= E_1X + E_2V. \end{aligned}$$

如果 (2-16) 有一个可行解  $(\alpha, \beta, X, V)$ , 那么状态反馈控制器可以通过下式选择:

$$u(t) = VX^{-1}x(t). \quad (2-17)$$

闭环系统的  $H_2/H_\infty$  成本边界  $J_2(u, v)$  可由  $J_2(u, v) = \text{tr}(C'X^{-1}C)$  计算出, 此处  $\text{tr}(\cdot)$  表示矩阵  $(\cdot)$  的迹。

定理 2<sup>[28]</sup>: 对于一个鲁棒稳定的系统, 如果存在两个标量  $\alpha > 0, \beta > 0$ , 两个对称正定矩阵  $X, N$  和一个矩阵  $V$ , 使得如下优化问题

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, \beta, X, V, N} z &= \text{tr}(N), \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} \Gamma < 0, \\ \begin{bmatrix} -N & C' \\ C & -X \end{bmatrix} < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (2-18)$$

有解  $(\alpha, \beta, X, V, N)$ , 那么  $u(t) = VX^{-1}x(t)$  为  $H_2/H_\infty$  成本控制器。

定理 1 与定理 2 的证明的详细步骤请参考文献[20], 此处省略证明细节。

### 2.3.2 随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器设计

随机鲁棒  $H_\infty$  控制器由本小节中的两个定理求出, 引理 1 为推导过程中的必要条件。

引理 1<sup>[32]</sup>: 令  $D, S$  和  $F$  为实矩阵, 满足  $F^T F \leq I$ 。那么对于标量  $\epsilon > 0$  和向量  $x, y \in \mathbb{R}^n$ ,

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

随机稳定问题由定理 1 解决。

定理 3<sup>[28]</sup>: 考虑  $v = 0$  的不确定随机系统 (2-12), 当存在一个大于 0 的标量  $\epsilon_1$ , 正定矩阵  $X, S$  和矩阵  $Y$ , 使下列的线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Gamma & A_d X & X N_o' + Y' N_b' & X R' \\ X A_d' & (h-1)S & 0 & 0 \\ N_o X + N_b Y & 0 & -X & 0 \\ R X & 0 & 0 & -\epsilon_1 I \end{bmatrix} \leq 0$$

其中

$$\Gamma = A X + X A' + B Y + Y' B' + S + \epsilon_1 M M'$$

则系统是鲁棒随机稳定的。状态反馈控制器可以通过下式选择:

$$u^* = Y X^{-1} x(t) \quad (10)$$

根据定理 3, 随机鲁棒  $H_\infty$  控制策略就是找到一个控制器  $u^*$ , 使得对所有的非零扰动  $v(t)$ ,  $J(u^*, v) \leq 0$  均成立。

定理 4<sup>[28]</sup>: 考虑不确定随机系统 (2-12), 给定一个标量  $\gamma > 0$ , 当存在大于 0 的标量  $\epsilon_1$ , 正定矩阵  $X, S$  和矩阵  $Y$ , 使下列的线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Gamma & X D' & X R' & C & X N_o' + Y' N_b' & A_d X \\ D X & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R X & 0 & -X & 0 & 0 & 0 \\ C' & 0 & 0 & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ N_o X + N_b Y & 0 & 0 & 0 & -\epsilon_1 I & 0 \\ X A_d' & 0 & 0 & 0 & 0 & (h-1)S \end{bmatrix} \leq 0$$

其中

$$\Gamma = A X + X A' + B Y + Y' B' + S + \epsilon_1 M M'$$

则系统是带有扰动抑制  $\gamma$  的鲁棒随机稳定的。状态反馈控制器为:  $u^* = Y X^{-1} x$ 。

## 2.4 仿真结果分析

### 2.4.1 单个能量路由器系统仿真

本小节给出了一些数值仿真结果，以证明鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器的有效性。能量路由器系统的参数如表 2.1 所示。在仿真中假设 $\gamma = 10$ ,  $E_1 = [0.58 \ -0.74 \ 0.73 \ 0.70 \ 0.01 \ -1.25 \ 0.06]$ ,  $E_2 = 0.62$ ,  $H = [6.45 \ -14.65 \ 3.85 \ 11.18 \ -0.05 \ -2.55 \ -11.69]'$ 。利用 Matlab LMI 控制工具箱<sup>[33]</sup>求解定理 1 和定理 2。

表 2.1 时域能量路由器系统参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$T_{PV}$	1.2	$b_{MT}$	1.2	$T_{SC}$	0.3
$T_{WTG}$	1.7	$r_{BES}$	1.1	$T_{BES}$	0.5
$T_L$	0.8	$r_{SC}$	1.2	$T_{MT}$	0.05
$p$	0.01	$q$	0.03		

选择一维随机函数 $F(t)$ ，其波形如图 2.3 所示。光伏机组、风力发电机组和负荷的功率波动如图 2.4 所示。

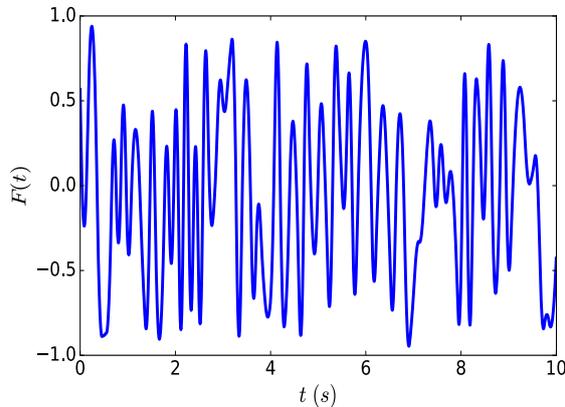


图 2.3  $F(t)$ 波形

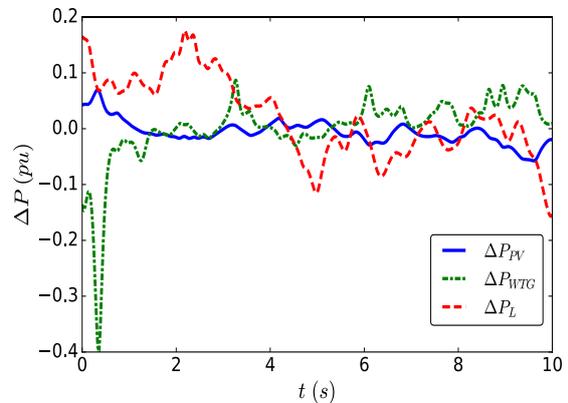


图 2.4 功率波动

在传统的鲁棒控制方法中，通过定理 1 求解 $H_\infty$ 控制器。当传统控制器作用时，可控发电机、储能设备和超级电容的功率波动如图 2.5 (a) 所示。在本节提出的 $H_2/H_\infty$ 成本控制器作用下，可控发电机、储能设备和超级电容的功率波动如图 2.5 (b) 所示。结果表明， $H_2/H_\infty$ 成本控制器下的可控发电机功率波动幅度明显小于传统 $H_\infty$ 控制器下的可控发电机功率波动幅度。结果显示本节提出的方法可以有效地避免过度控制的情况。

图 2.6 (a) 给出了混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和 $H_\infty$ 控制器下直流母线的功率偏差。仿真结果表明，两种方法的 $H_\infty$ 控制效果相当接近。然而，在考虑 $H_2$ 的性能时，本节

提出的方法显示出相对于传统方法的优越性。混合 $H_2/H_\infty$ 控制器的 $H_2$ 性能优于传统方法，如图 2.6 (b) 所示。

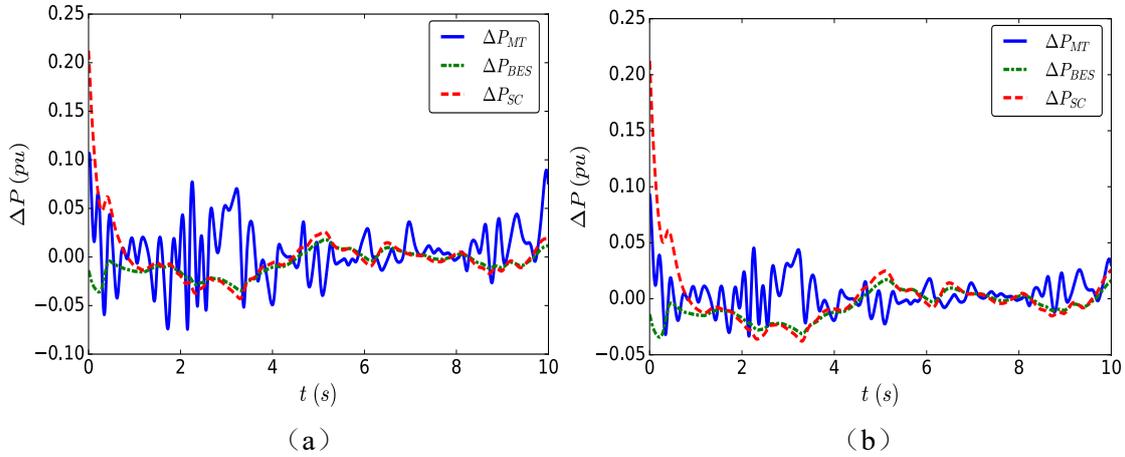


图 2.5 不同控制器作用下的功率波动： (a)  $H_\infty$ 控制器 (b) 混合 $H_2/H_\infty$ 控制器

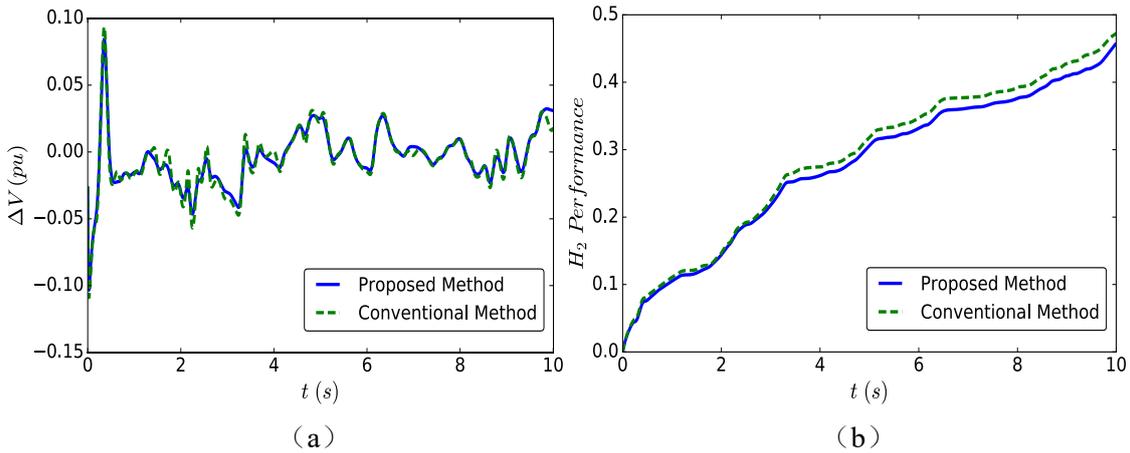


图 2.6 传统方法与本节提出方法的比较 (a) 电压波动 (b)  $H_2$ 性能

### 2.4.2 典型能源互联网系统仿真

本节中出了几种典型的仿真结果，来证明所提出的鲁棒 $H_\infty$ 控制方案的可行性。根据实际数据，所考虑的能源互联网系统 (1) - (9) 的参数如表 2.2 所示。对于随机鲁棒 $H_\infty$ 控制问题，假设 $\gamma=0.3$ ,  $\varepsilon_1=0.5$ ,  $h=0.8$ ,  $\mu=0.8$ 。描述系统 (9) 的系统不确定性的矩阵 $M$ 、 $N_o$ 和 $N_b$ 是从三个正态分布中随机生成的。用 MATLAB 中 LMI 控制工具箱求解了定理 3 和定理 4 中的 LMI 问题。

首先，证明了定理 3 中提出的随机鲁棒稳定控制器有效地稳定了系统(2-12)。系统的扰动输入设置为零。状态变量 $x$ 的初始值被设置为一个小的非零向量。如图 2.7 (a) 所示，在没有控制信号的情况下，参数不确定的系统 (2-12) 往往会迅速

发散。在图 2.7 (b) 中, 当通过定理 3 得到的控制器应用到系统 (2-12) 中时, 四个微网中能量路由器的频率偏差是稳定的。

表 2.2 时域典型能源互联网系统参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$T_{L_1}$	1.3	$T_{L_2}$	2.1	$T_{BES_3}$	0.1	$T_{BES_4}$	0.11
$T_{L_3}$	1.8	$T_{L_4}$	1.6	$T_{FC_1}$	1.1	$T_{FC_3}$	1.2
$T_{PV_1}$	1.4	$T_{PV_2}$	0.6	$T_{MT_2}$	1.3	$T_{MT_4}$	1.5
$T_{WTG_1}$	2.1	$T_{WTG_4}$	1.6	$T_{ER_{12}}$	0.1	$T_{ER_{13}}$	0.11
$T_{BES_1}$	0.14	$T_{BES_2}$	0.16	$T_{ER_{23}}$	0.12	$T_{ER_{43}}$	0.16
$r_{L_1}$	0.9	$r_{L_2}$	0.8	$r_{BES_3}$	1.4	$r_{BES_4}$	1.2
$r_{L_3}$	0.7	$r_{L_4}$	0.6	$b_{FC_1}$	2.6	$b_{FC_3}$	1.5
$r_{PV_1}$	0.8	$r_{PV_2}$	0.9	$b_{MT_2}$	3.1	$b_{MT_4}$	2.8
$r_{WTG_1}$	0.6	$r_{WTG_4}$	0.9	$b_{ER_{12}}$	1.1	$b_{ER_{13}}$	1.2
$r_{BES_1}$	1.2	$r_{BES_2}$	1.1	$b_{ER_{23}}$	1.4	$b_{ER_{43}}$	1.3
$D_1$	0.012	$M_1$	0.20	$D_3$	0.020	$M_3$	0.22
$D_2$	0.010	$M_2$	0.19	$D_4$	0.016	$M_4$	0.21

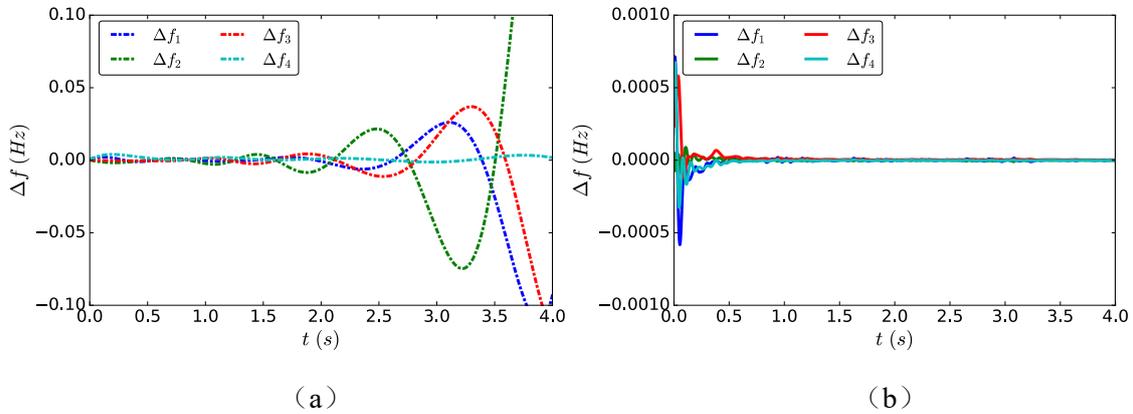


图 2.7 交流母线频率波动 (无扰动输入) (a) 无控制器 (b) 鲁棒  $H_\infty$  控制器

接下来评估在定理 4 中得到的协调频率控制器的有效性。系统 (2-12) 的扰动输入如图 2.8 所示。不可控制部件 (包括负载、光伏机组和风力发电机组) 的相应功率波动如图 2.9 (a) 和图 2.9 (b) 所示。当没有实施控制方案时, 四个微网中能量路由器交流母线上频率偏差的波动如图 2.10 (a) 所示。而在本节提出的随机鲁棒  $H_\infty$  控制策略下, 四个微网中母线的频率波动如图 2.10 (b) 所示。显然, 定理 4 中设计的控制器有效地实现了频率稳定。

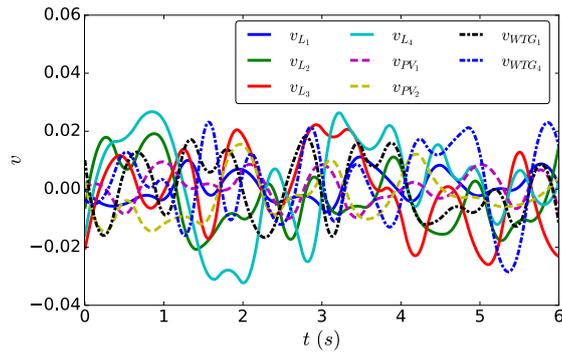


图 2.8 系统扰动输入

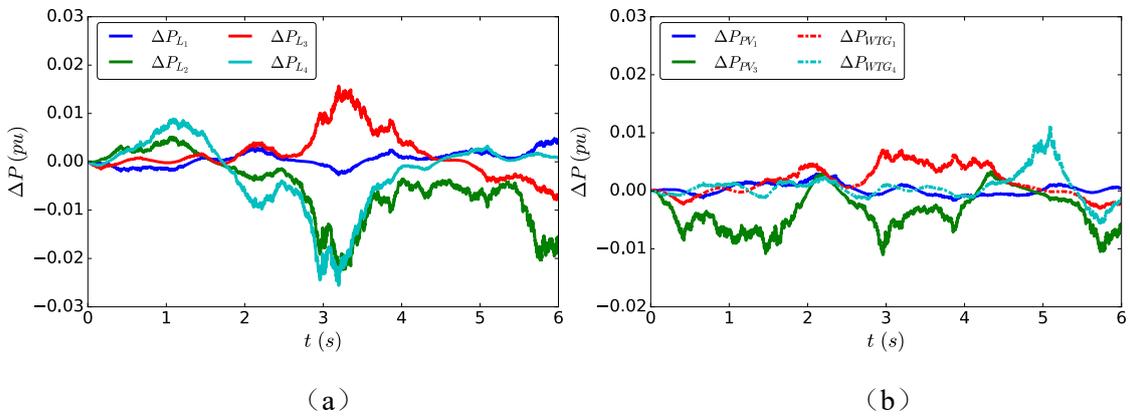


图 2.9 功率波动 (a) 负载 (b) 光伏与风机

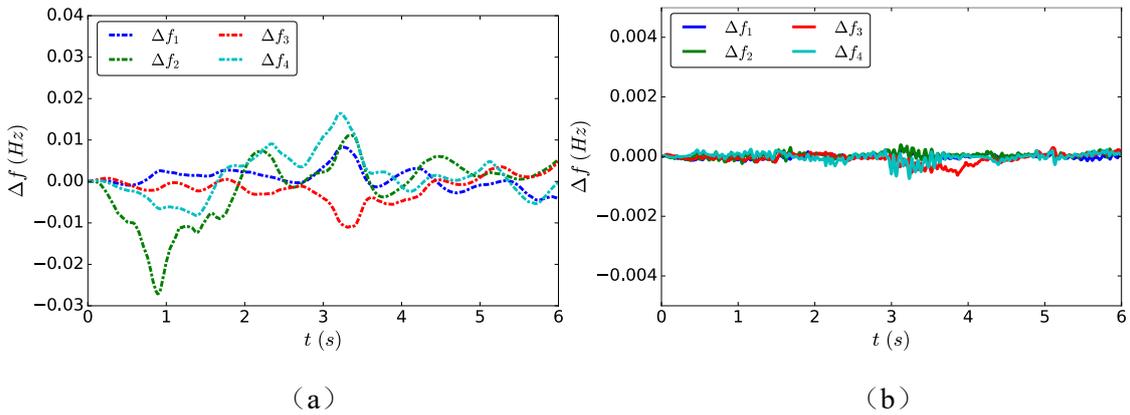


图 2.10 交流母线频率波动 (有扰动输入) (a) 无控制器 (b) 鲁棒 $H_{\infty}$ 控制器

图 2.11 (a) 说明了在所提出的 $H_{\infty}$ 控制器下, 燃料电池和可控发电机的发电变化。图 2.11 (b) 显示了微网之间通过能量路由器传输的能量的波动。从仿真结果中可以看出, 利用 ER 可以有效平衡能源互联网中可再生能源的发电情况和负载用电情况。

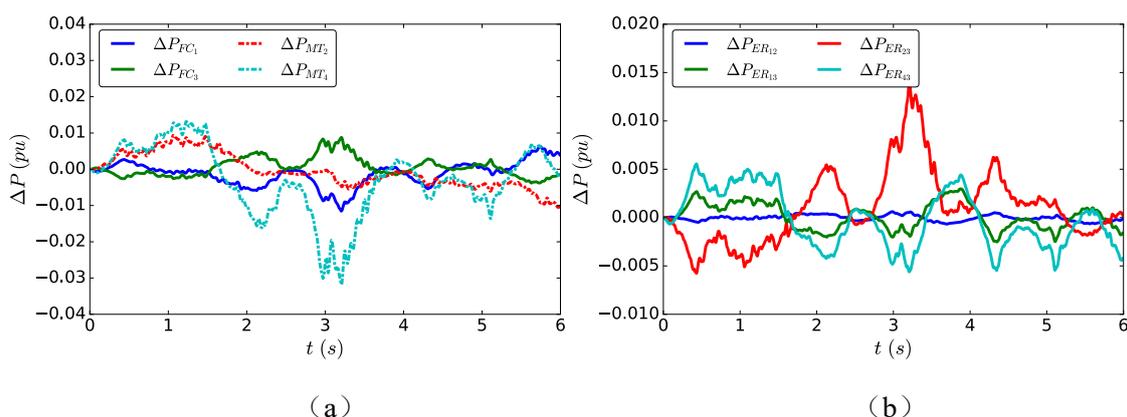


图 2.11 发电部分功率波动 (a) 燃料电池与可控发电机 (b) 能量路由器

## 2.5 本章小结

本节通过常微分方程和随机微分方程对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统的动态特性进行建模，考虑了多种分布式能源的接入。针对两个系统的不同控制目标，考虑了电压/频率稳定问题和能源互联网“广域互联、局域自治”的特点，分别设计了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器，并通过MATLAB的线性矩阵不等式工具箱求解。仿真结果验证了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器的有效性。

## 第3章 能量路由器频域控制方法

### 3.1 本章引言

频域控制方法广泛应用于能源互联网、电力电子和电力系统等领域。本章对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统进行频域建模。

在能量路由器控制问题中，本章提出新的鲁棒控制器设计方案，用于频率调节。光伏发电机组的间歇发电和 PHEV 的随机功耗会导致能量路由器中出现严重的频率振荡。为了减小频率偏差，本章设计了比例积分 (PI) 控制器。对于能量路由器系统，在描述  $H_\infty$  性能时，考虑了逆输出乘性扰动，同时将跟踪误差最小化和避免过控制的情况都表示为  $H_2$  性能。然后将能量路由器控制问题转化为混合  $H_2/H_\infty$  控制问题，通过粒子群优化算法求解。最后，依据数值仿真结果说明了该方法的可行性。

在典型能源互联网控制问题中，本章研究了一个线性连接形状的能源互联网场景，三个微网依次互连，其中的一个微网连接到主电网上。通过频域方法对能源互联网建模，在同时考虑鲁棒性和最优控制目标的情况下，将 PI 控制器应用于系统中，同时实现以下目标。(1) 实现了系统对参数不确定性和外部干扰的鲁棒性。

(2) 跟踪误差控制在较低水平。(3) 实现自下而上的能源管理原则，优先实现各 MG 的自主功率平衡。(4) 考虑了从电网到能源互联网的供电成本。(5) 合理利用能源互联网中的可控装置，避免了过度控制的情况。(6) 考虑到系统管理者的不同偏好，可以通过改变相应加权系数的大小来调整每个控制目标的重要性。仿真结果表明，该控制器性能优于传统控制器，在工程实践中具有重要意义。

### 3.2 系统建模

#### 3.2.1 单个能量路由器系统

本节介绍一个典型的能量路由器 (ER1) 场景，能量路由器内部集成了电力电子变换器，连接到光伏机组 (PV)、风力发电机组 (WTG)、电解制氢器 (HS)、可控发电机 (MT)、燃料电池 (FC)、电动汽车 (PHEV)、负荷和其他能量路由器 (ER2)，如图 3.1 所示。本节使用常微分方程 (ODES) 来描述该系统的动态性能。

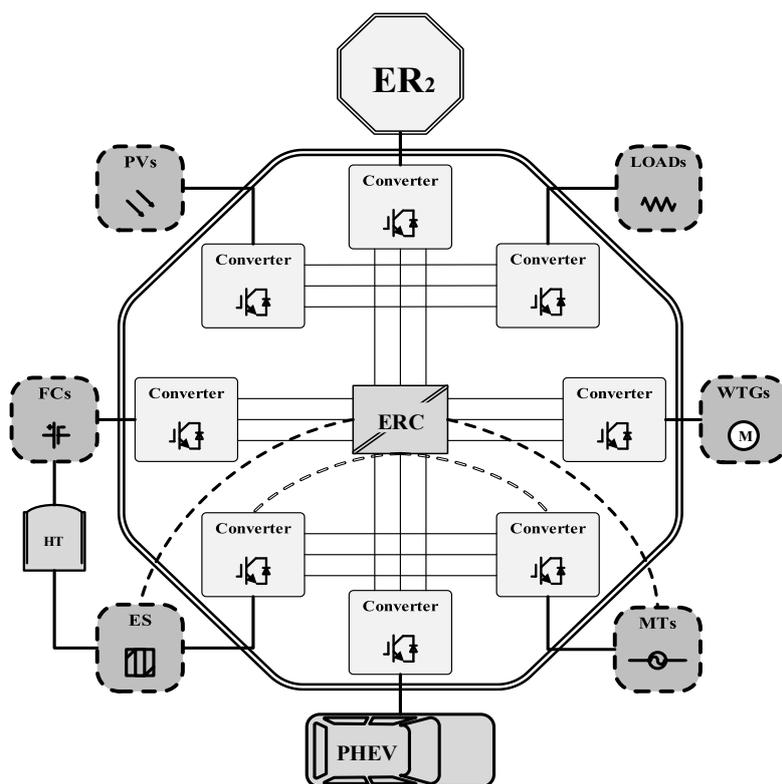


图 3.1 能量路由器的典型场景

在图 3-1 所示的系统中，主要的发电设备是大型分布式发电设备，如光伏机组和风力发电机组。当分布式发电设备发电不能满足负载使用时，可控的发电机和燃料电池将用于发电，以实现能量路由器的功率平衡。电解制氢器用于将多余的电能转化为环境友好的氢能源。储氢设备（HTS）用于储存燃料电池发电所需的氢气。各种具有不同充电策略和充电状态的电动汽车可以视为一类功率偏差较大的特殊负载来处理。此外，ER1 可以连接工厂或楼宇建筑等常见负载。虽然两个互连的能量路由器之间的功率流是高度可控的，但由于能量切换本身的成本相对较高，因此不应频繁更改能量路由策略<sup>[34]</sup>。本节研究重点是动态能量路由器系统，通常考虑的时间段不超过 3000 秒，假设 ER1 为其他能量路由器提供恒定功率。控制器（ERC）设计用于控制电解制氢器和可控发电机的输出功率，另外，假定燃料电池输出功率为一个恒定值，类似假设应用于很多文献中<sup>[35]</sup>。

能量路由器的大频率偏差（ $\Delta f$ ）可能导致严重问题，甚至会导致能量路由器系统的崩溃。由于  $\Delta f$  主要受交流母线功率波动的影响（ $\Delta P$ ），通过保持能量路由器系统功率平衡可以实现频率稳定。ER1 的总发电量和消耗量分别表示为  $P_G$  和  $P_L$ 。符号  $P_{PV}$ 、 $P_{WTG}$ 、 $P_{FC}$  和  $P_{MT}$  分别代表光伏、风机、燃料电池和可控发电机的发电功

率。符号 $P_{ES}$ 、 $P_{ER2}$ 、 $P_{PHEV}$ 和 $P_{LOAD}$ 分别表示 ESS、ER2、PHEV 和负载的功率消耗。因此，有：

$$P_G = P_{PV} + P_{WTG} + P_{FC} + P_{MT} \quad (3-1)$$

$$P_L = P_{ES} + P_{ER2} + P_{PHEV} + P_{LOAD} \quad (3-2)$$

$$\Delta P = P_G - P_L \quad (3-3)$$

分别用 $\Delta P_{ES}$ 、 $\Delta P_{FC}$ 和 $\Delta P_{MT}$ 表示 ES 电能消耗、FC 发电和 MT 发电的功率变化。 $K_{ES}$ 、 $K_{FC}$ 和 $K_{MT}$ 分别代表 ES、FC 和 MT 的增益。ES 和 MT 控制输出信号分别表示为 $\Delta P_{ESC}$ 和 $\Delta P_{MTC}$ 。 $T_{ES}$ 表示 ES 的时间常数。阻尼系数和惯性常数分别表示为 $D$ 和 $M$ 。ERC 中的 MT 和 FC 的 PI 控制器分别表示为 $K_{MTC}$ 和 $K_{ESC}$ 。参考电池储能设备的建模，用一阶传递函数来近似估计 $\Delta P_{ES}$ 和 $\Delta P_{FC}$  [36]，如 (3-4) 和 (3-5) 所示：

$$\Delta P_{ES} = \frac{K_{ES}}{1+T_{ES}s} \Delta f \quad (3-4)$$

$$\Delta P_{FC} = \frac{K_{FC}}{1+T_{FC}s} \Delta f \quad (3-5)$$

考虑到线性功率与频率衰减特性， $\Delta P_{MT}$ 由以下方程得出：

$$\Delta P_{MT} = \frac{1}{-K_{MT}} \Delta f. \quad (3-6)$$

根据系统中各元素的建模，得到如图 3.2 所示的线性框图。

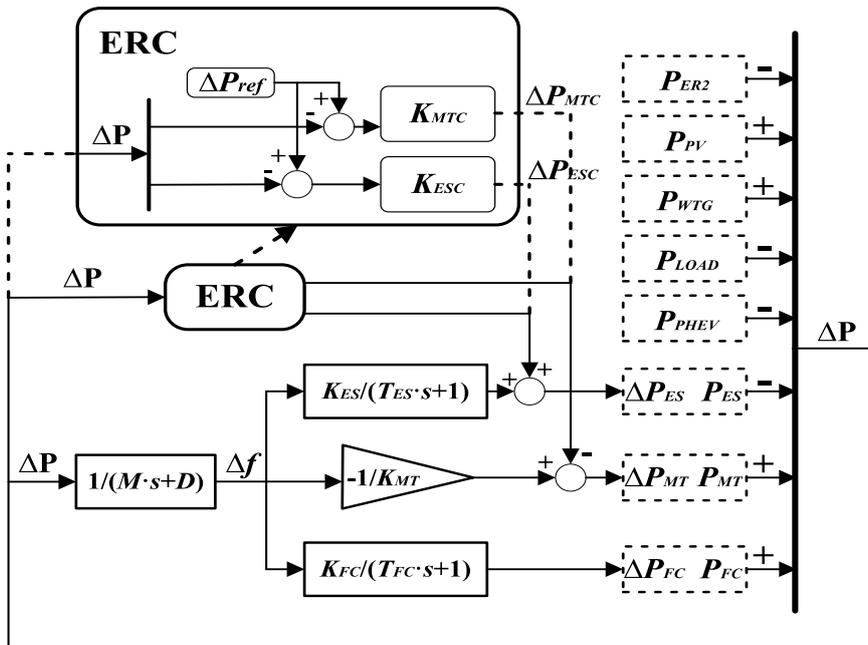


图 3.2 能量路由器系统的线性框图

ES 的功率动态特性和能量路由器的频率波动 $\Delta f$ 如式 (3-7) 所示:

$$\begin{cases} \Delta \dot{P}_{ES} = -\frac{1}{T_{ES}} \Delta P_{ES} + \frac{K_{ES}}{T_{ES}} \Delta f \\ \Delta \dot{f} = -\frac{1}{M} \Delta P_{ES} - \frac{D \cdot K_{MT} + 1}{M \cdot K_{MT}} \Delta f + \frac{1}{M} \Delta P_{ESC} + \frac{1}{M} \Delta P_{MTC} \end{cases} \quad (3-7)$$

根据图 3-2, 有:

$$\Delta P = -\Delta P_{ES} - \frac{1}{K_{MT}} \Delta f + \Delta P_{ESC} + \Delta P_{MTC} \quad (3-8)$$

为了简化动态特性式 (3-7) 和式 (3-8), 此处定义了状态向量 $x(t)$ 、输出向量 $y(t)$ 和控制信号向量  $u(t)$ :

$$x = \begin{bmatrix} \Delta P_{ES} \\ \Delta f \end{bmatrix}, \quad y = \Delta P, \quad u = \begin{bmatrix} \Delta P_{ESC} \\ \Delta P_{MTC} \end{bmatrix}$$

根据式 (3-7) 和式 (3-8), 本节考察的能量路由器系统可以转化为如下所示的控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du, \end{cases} \quad (3-9)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ES}} & \frac{K_{ES}}{T_{ES}} \\ -\frac{1}{M} & -\frac{D \cdot K_{MT} + 1}{M \cdot K_{MT}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} -1 & -\frac{1}{K_{MT}} \end{bmatrix}, \quad D = [1 \quad 1].$$

当 PI 控制器控制 ERC 时, 受控输出信号及 ESs 和 MTs 的控制器为:

$$\Delta P_{ESC} = K_{ESC}(s) \cdot \Delta P \quad (3-10)$$

$$\Delta P_{MTC} = K_{MTC}(s) \cdot \Delta P \quad (3-11)$$

$$K_{ESC}(s) = K_{P_{ES}} + \frac{K_{I_{ES}}}{s} \quad (3-12)$$

$$K_{MTC}(s) = K_{P_{MT}} + \frac{K_{I_{MT}}}{s} \quad (3-13)$$

不难看出, 式 (3-9) 中的能量路由器系统是一个多输入单输出 (MISO) 控制系统, 系统传递函数为 $G$ , 控制器传递函数为 $K$ 。

## 3.2.2 典型能源互联网系统

本节重点介绍一个具有三个能量路由器的串联型能源互联网系统。利用频域一阶传递函数对系统各组成部分进行建模，得到控制系统的数学模型。在能源互联网系统中，三个微网 $MG_1$ 、 $MG_2$ 和 $MG_3$ 依次连接，假设 $MG_1$ 连接到大电网。所有能量路由器都设计为交流母线模式。图3.3给出了能源互联网系统的拓扑结构。

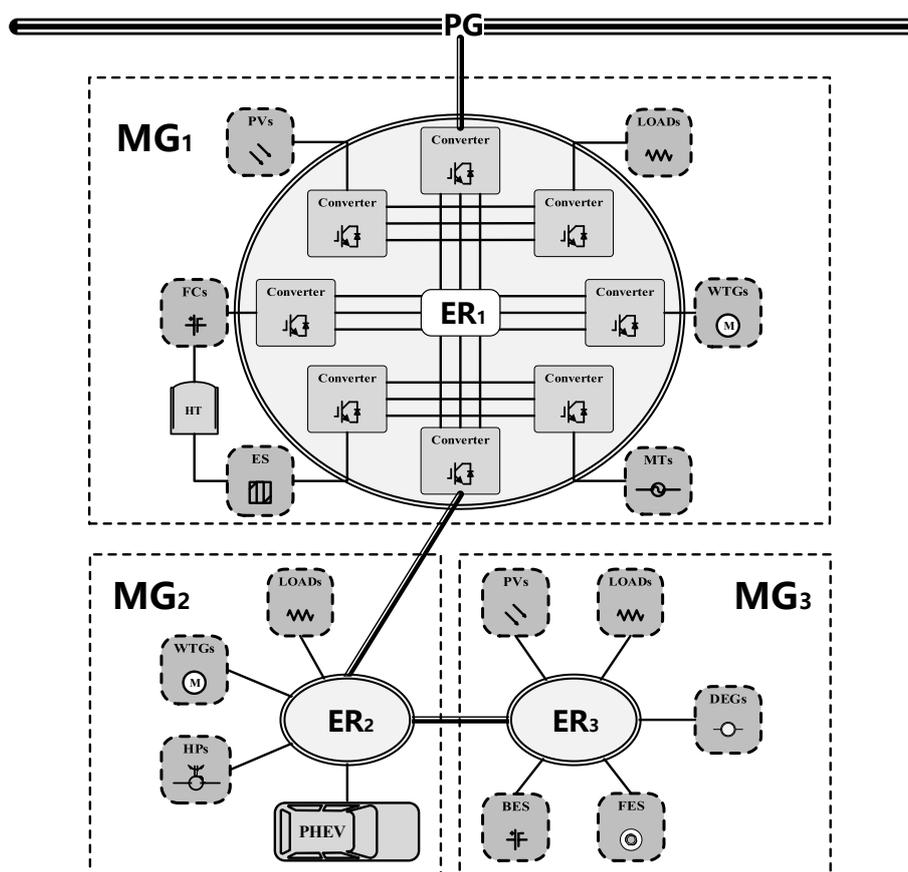


图 3.3 线性连接的能源互联网系统

在 $MG_1$ 中，光伏机组、风力发电机组、负荷、FC、MT、HT 和 ES 通过变流器与 $ER_1$ 相连。假设 $MG_1$ 中的主要的能源供应来自光伏机组和风力发电机组的功率输出。如果光伏机组和风力发电机组的发电量不足以满足 $MG_1$ 的电力消耗，则利用高度可控的发电单元（如 MT 和 FC）来填补电力供需缺口。当 $MG_1$ 中产生多余能量时，ES 用于将电能转化为储存在 HT 中的氢能，用于燃料电池发电。

$MG_2$ 连接到 $ER_1$ 上，以风力发电机组为主要发电机。假设 $MG_2$ 装配于在居民区和集群充电站附近，大量高度可控的热泵（HP）和 PHEV 与 $ER_2$ 相连。当发电量大于 $MG_2$ 的消耗量时，热泵和 PHEV 的接入应能保证 $MG_2$ 的功率平衡。当 $MG_2$ 内部功率不足时， $MG_1$ 和 $MG_3$ 分别通过 $ER_1$ 和 $ER_2$ 向其传输电力。

假设MG<sub>3</sub>只与MG<sub>2</sub>相连，且彼此相距很远。因此，输电线的动态响应比MG<sub>3</sub>中的本地设备慢。假设MG<sub>3</sub>对功率偏差敏感，其中的储能装置（如 BES 和 FES）对于保持功率平衡至关重要。另外，高度可控的柴油发电机（DEG）与MG<sub>3</sub>相连。MG<sub>3</sub>中也连接了光伏机组和一般负荷。

MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub>和MG<sub>3</sub>的功率平衡由以下三个等式表示：

$$\Delta P_1 = P_{PV1} + P_{WTG1} + P_{FC} + P_{MT} + P_{PG} - (P_{ES} + P_{ER12} + P_{LOAD1}) \quad (3-14)$$

$$\Delta P_2 = P_{WTG2} + P_{ER12} - (P_{PHEV} + P_{HP} + P_{ER23} + P_{LOAD2}) \quad (3-15)$$

$$\Delta P_3 = P_{PV3} + P_{DEG} + P_{ER23} - P_{LOAD3} \pm (P_{BES} + P_{FES}) \quad (3-16)$$

用一阶传递函数来近似估计 $\Delta P_{ES}$ 和 $\Delta P_{FC}$ ，如式（3-17）和式（3-18）所示：

$$\Delta P_{ES} = \frac{K_{ES}}{1+T_{ESS}} \Delta f_1 \quad (3-17)$$

$$\Delta P_{FC} = \frac{K_{FC}}{1+T_{FCS}} \Delta f_1 \quad (3-18)$$

考虑到线性功率与频率衰减特性， $\Delta P_{MT}$ 由式（3-19）得出：

$$\Delta P_{MT} = -\frac{1}{K_{MT}} \Delta f_1 \quad (3-19)$$

把大电网与ER<sub>1</sub>之间的相对相角表示为 $\theta$ ，把传输电抗表示为 $X_{PG}$ ， $P_{PG}$ 表示电网与ER<sub>1</sub>间传输的功率，则有：

$$\theta = 2\pi f_0 \int \Delta f_1 dt \quad (3-20)$$

$$P_{PG} = \frac{\sin\theta}{X_{PG}} \quad (3-21)$$

根据文献<sup>[37]</sup>， $P_{HP}$ 、 $P_{PHEV}$ 和 $P_{ER12}$ 通过以下三个等式得出：

$$P_{HP} = \frac{K_{HP}}{1+T_{HPS}} K_{HPC} \Delta f_2 \quad (3-22)$$

$$P_{PHEV} = \frac{K_{PHEV}}{1+T_{PHEVS}} K_{PHEVC} \Delta f_2 \quad (3-23)$$

$$P_{ER12} = \frac{b_{ER12}}{1+T_{ER12S}} K_{ER12C} \Delta f_2 \quad (3-24)$$

此处假设 BES 和 FES 设备有内部控制器，可以对交流母线频率偏差做出响应[21]，功率 $P_{BES}$ 和 $P_{FES}$ 为：

$$P_{BES} = \frac{1}{1+T_{BESS}} \Delta f_3 \quad (3-25)$$

$$P_{FES} = \frac{1}{1+T_{FESS}} \Delta f_3 \quad (3-26)$$

$P_{DEG}$ 和 $P_{ER23}$  由以下两个等式获得：

$$P_{DEG} = \frac{1}{1+T_{DEGS}} K_{DEGC} \Delta f_3 \quad (3-27)$$

$$P_{ER12} = \frac{b_{ER23}}{1+T_{ER23}s} K_{ER23C} \Delta f_3 \quad (3-28)$$

过快或过大的功率偏差可能导致能量路由器中交流母线频率波动的不稳定。对MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub>和MG<sub>3</sub>进行有效的控制，可以实现整个能源互联网系统的功率平衡，避免了 $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$ 和 $\Delta f_3$ 的不稳定。PI控制器作用于ES、MT、HP、PHEV、DEG、MG1与MG2之间的传输线以及MG2与MG3之间的传输线。则有：

$$\begin{cases} \Delta P_{ESC} = K_{ESC}(s) \cdot P_{PG}, \\ \Delta P_{MTC} = K_{MTC}(s) \cdot P_{PG}, \\ U_{ER12} = K_{ER12C}(s) \cdot \Delta f_2, \\ U_{HP} = K_{HPC}(s) \cdot \Delta f_2, \\ U_{PHEV} = K_{PHEVC}(s) \cdot \Delta f_2, \\ U_{DEG} = K_{DEGC}(s) \cdot \Delta f_3, \\ U_{ER23} = K_{ER23C}(s) \cdot \Delta f_3. \end{cases} \quad (3-29)$$

式(3-29)中

$$\begin{cases} K_{ESC}(s) = K_{P_{ES}} + K_{I_{ES}}/s, \\ K_{MTC}(s) = K_{P_{MT}} + K_{I_{MT}}/s, \\ K_{ER12C}(s) = K_{P_{ER12}} + K_{I_{ER12}}/s, \\ K_{HPC}(s) = K_{P_{HP}} + K_{I_{HP}}/s, \\ K_{PHEVC}(s) = K_{P_{PHEV}} + K_{I_{PHEV}}/s, \\ K_{DEGC}(s) = K_{P_{DEG}} + K_{I_{DEG}}/s, \\ K_{ER23C}(s) = K_{P_{ER23}} + K_{I_{ER23}}/s. \end{cases}$$

根据前文的分析，可得MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub>和MG<sub>3</sub>的线性框图，分别如图3.4、图3.5和图3.6所示。通过逆拉普拉斯变换和频域框图，可以将所研究的能源互联网系统转换为式(3-30)所示的控制系统：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du, \end{cases} \quad (3-30)$$

其中 $x$ 为状态向量， $y$ 为输出向量， $u$ 为控制信号，表示为：

$$\begin{aligned} x &= [\Delta P_{ES} \quad P_{PG} \quad \Delta f_1 \quad P_{HP} \quad P_{PHEV} \quad P_{ER12} \quad \Delta f_2 \quad P_{DEG} \quad P_{ER23} \quad \Delta f_3]', \\ y &= [\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \quad \Delta f_3]', \\ u &= [\Delta P_{MTC} \quad \Delta P_{ESC} \quad U_{ER12} \quad U_{HP} \quad U_{PHEV} \quad U_{DEG} \quad U_{ER23}]. \end{aligned}$$

能源互联网系统(3-30)是一个多输入多输出(MIMO)控制系统，系统传递函数为 $G$ ，控制器传递函数为 $K$ 。

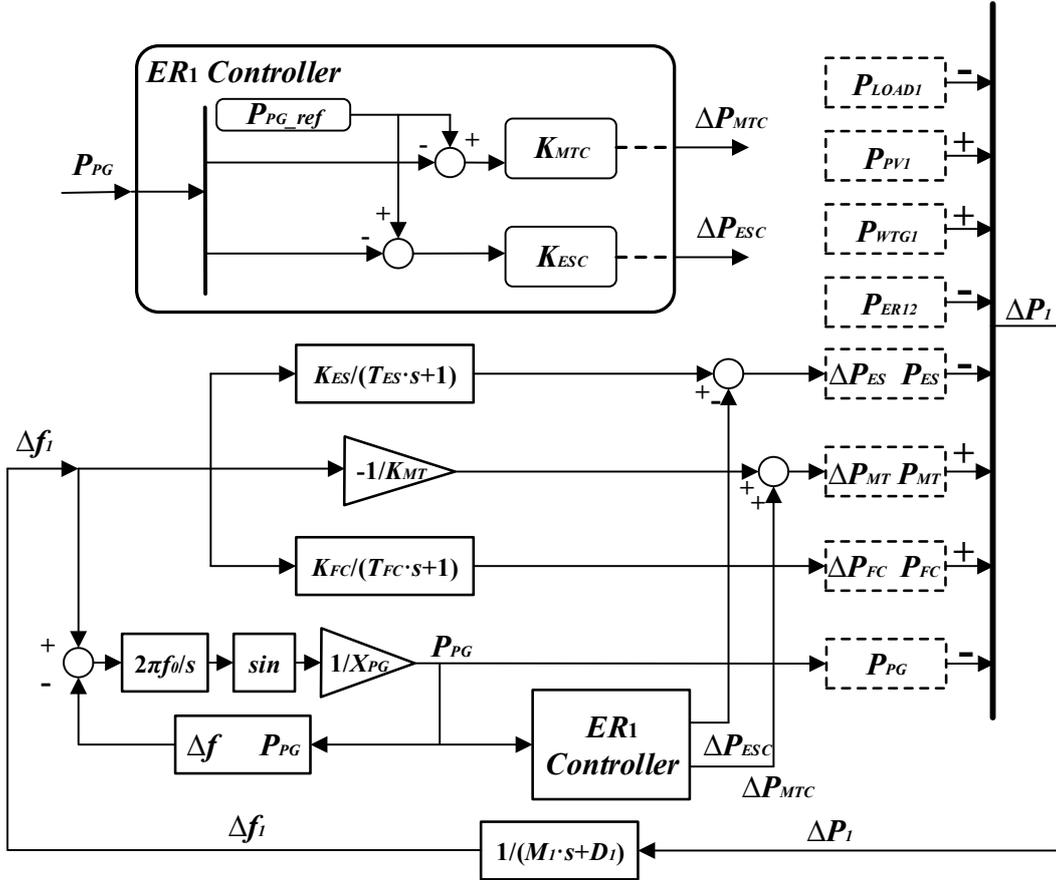


图 3.4 MG<sub>1</sub>的线性框图

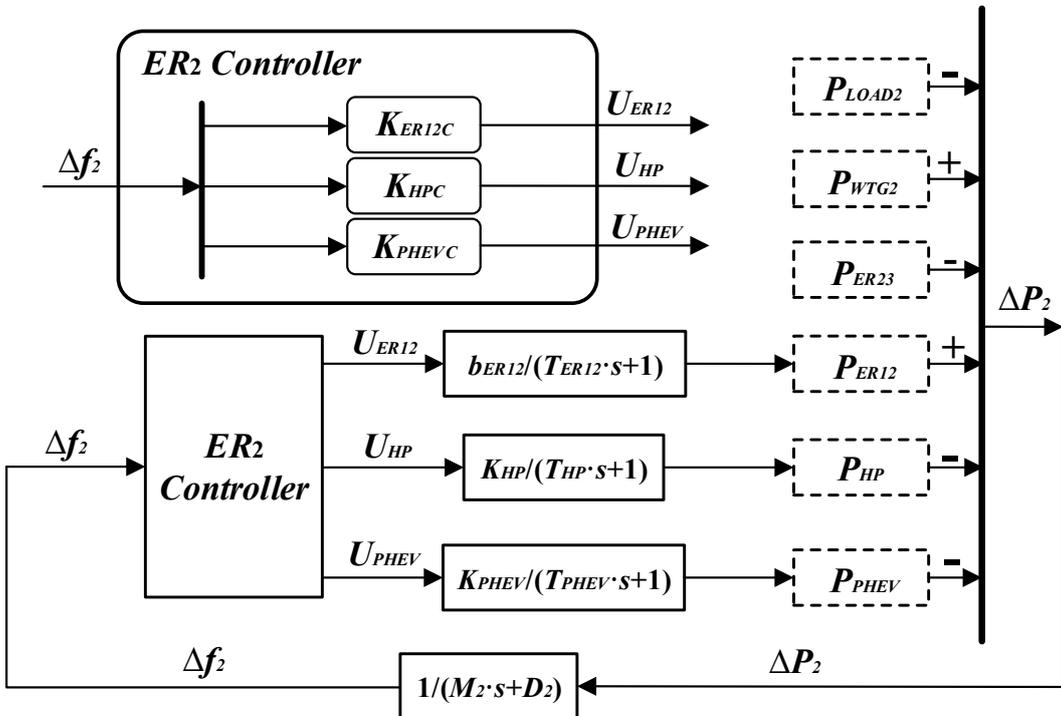


图 3.5 MG<sub>2</sub>的线性框图

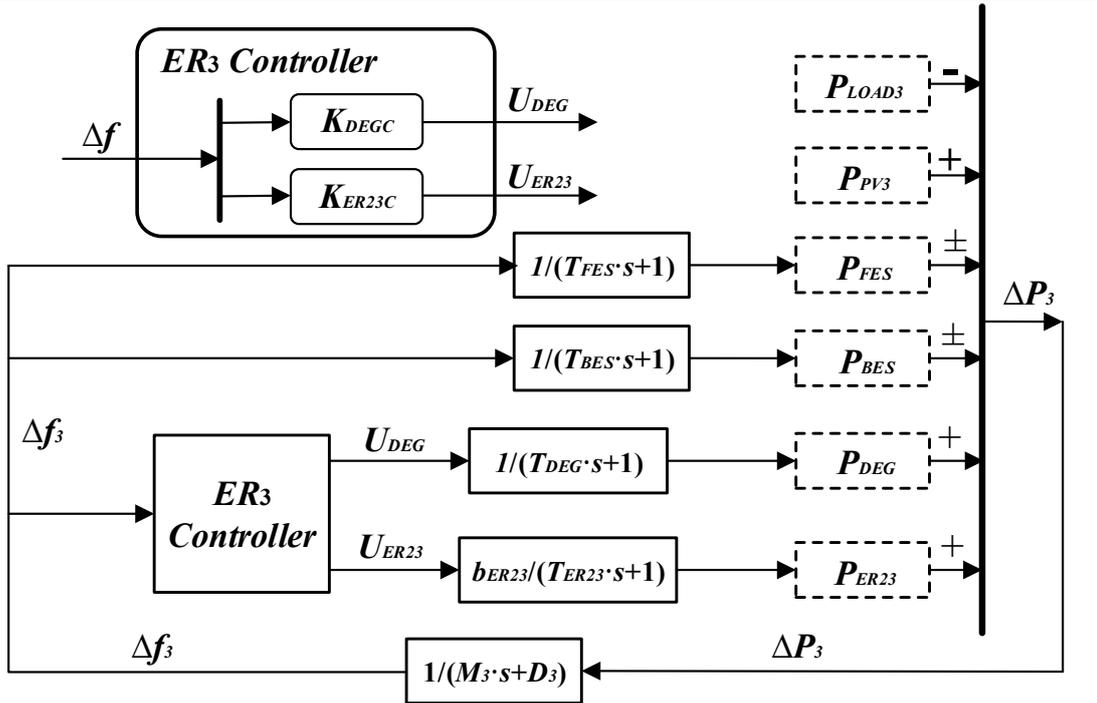


图 3.6  $MG_3$ 的线性框图

### 3.3 解决方案

#### 3.3.1 混合 $H_2/H_\infty$ 控制器

本节将能量路由器控制问题转化为混合 $H_2/H_\infty$ 问题。通过 PSO 算法，将公式化的成本函数最小化，得到最优的控制器参数。

考虑如图 3.7 所示的带外部干扰和参数不确定性的能量路由器控制系统， $G$  为系统传递函数， $K$  为第二节中介绍的 ERC。参考输入、跟踪误差、控制输出、外部干扰和系统输出分别用 $r(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $d(t)$ 和 $y(t)$ 表示。

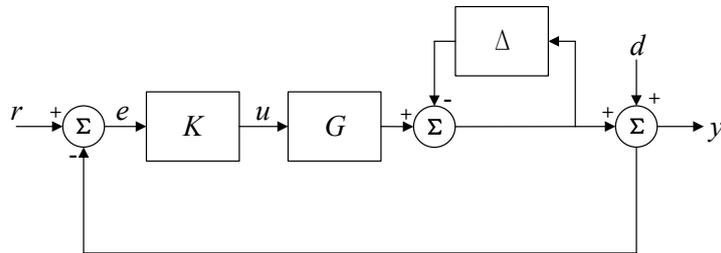


图 3.7 控制系统框图

此外，本节还考虑了由参数测量误差和各种功率振荡引起的系统不确定性。假设非结构化不确定性由乘性不确定性构成，表示为 $\Delta$ 。引入反输出乘性扰动<sup>[38]</sup>来评估鲁棒控制效果。

根据小增益定理, 如果式(3-31)成立, 则具有稳定乘性不确定性的系统是稳定的。

$$\|\Delta \cdot (I + GK)^{-1}\|_{\infty} < 1 \quad (3-31)$$

由此可得:

$$\|\Delta\|_{\infty} < \frac{1}{\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}}$$

系统不确定性的鲁棒稳定裕度表示为 $1/\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$ 。通过最小化 $\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$ 的值, 可以得到最大的鲁棒稳定裕度, 进而求得鲁棒 $H_{\infty}$ 控制器。 $H_{\infty}$ 控制成本函数记为 $J_{\infty}$ :

$$J_{\infty} = \|(I + GK)^{-1}\|_{\infty} \quad (3-32)$$

为了进一步提高系统控制性能, 除了考虑鲁棒稳定性和干扰衰减外, 还应最小化跟踪误差<sup>[39]</sup>。跟踪误差成本函数如下:

$$J_e = \int_0^{\infty} e'(t)e(t)dt = \|E(s)\|_2^2 \quad (3-33)$$

$$E(s) = (I + GK)^{-1}R(s) \quad (3-34)$$

其中 $e(t) = r(t) - y(t)$ 为跟踪误差。令 $\Delta = 0$ 且 $d(t) = 0$ , 根据 $E(s)$ 的反拉普拉斯逆变换计算得出 $e(t)$ 。

由于过大的控制器可能导致能量路由器系统中硬件设备的过度损耗, 应考虑控制器所涉及的额外成本。 $J_k$ 用于估算所需控制器的成本。

$$J_k = [(K_{P_{ES}} + K_{P_{MT}}) \cdot (K_{I_{ES}} + K_{I_{MT}})]^2$$

最优 $H_2$ 控制成本函数 $J_2$ 由跟踪误差和控制器所涉及的附加成本之和表示, 表示为 $J_2 = J_e + \varepsilon J_k$ 。此处 $\varepsilon$ 是加权系数。为了实现能量路由器系统的鲁棒稳定和最优跟踪性能, 同时避免出现过度控制的情况, 将总的目标函数 $J$ 定义为:

$$J = J_2 + J_{\infty} \quad (3-35)$$

控制目标为最小化式(3-35)中的 $J$ , 使得

$$K_{P_{ES},min} < K_{P_{ES}} < K_{P_{ES},max},$$

$$K_{I_{ES},min} < K_{I_{ES}} < K_{I_{ES},max},$$

$$K_{P_{MT},min} < K_{P_{MT}} < K_{P_{MT},max},$$

$$K_{I_{MT},min} < K_{I_{MT}} < K_{I_{MT},max}$$

其中 $K_{P_{ES},min}$ 和 $K_{I_{ES},min}$ 分别为 ES 控制器的比例部分和积分部分的最小值； $K_{P_{MT},min}$ 和 $K_{I_{MT},min}$ 分别为 MTS 控制器的比例部分和积分部分的最小值； $K_{P_{ES},max}$ 和 $K_{I_{ES},max}$ 分别为 ESS 控制器的比例部分和积分部分的最大值； $K_{P_{MT},max}$ 和 $K_{I_{MT},max}$ 分别为 MTS 控制器的比例部分和积分部分的最大值。加权系数 $\varepsilon$ 设置为 0.1。通过 PSO 算法对 $K_{P_{ES}}$ 、 $K_{I_{ES}}$ 、 $K_{P_{MT}}$ 和 $K_{I_{MT}}$ 的值进行调整。

基于 PSO 的控制器设计过程如下：

- (1) 用随机位置和速度初始化粒子。
- (2) 评估每个粒子的目标函数。利用 MATLAB  $\mu$ -Analysis and Synthesis Toolbox 对目标函数中的 $H_\infty$ 范数和 $H_2$ 范数进行了评价。
- (3) 将每个粒子的适配度值与 $pbest_i$ 进行比较，所有 $pbest$ 中的最佳适配度值为 $gbest$ 。
- (4) 更新速度 $v_i$ 和粒子 $x_i$ 的位置。
- (5) 当达到 $iter_{max}$ 时，停止循环。否则，转到过程(2)。

本节将 PI 控制器的最小边界 $K_{P_{ES},min}$ 、 $K_{I_{ES},min}$ 、 $K_{P_{MT},min}$ 、 $K_{I_{MT},min}$  设置为 0.0001，最大边界 $K_{P_{ES},max}$ 、 $K_{I_{ES},max}$ 、 $K_{P_{MT},max}$ 、 $K_{I_{MT},max}$  设置为 1。群的大小和最大迭代次数分别设置为 50 和 30。 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w_{min}$ 和 $w_{max}$ 的值分别设置为 2、2、0.4 和 0.9。

### 3.3.2 混合鲁棒和最优控制器

在本节中，将能源互联网系统鲁棒性问题定义为结构确定的混合 $H_2/H_\infty$ 控制问题，而能源互联网中的运营成本管理问题定义为多目标优化问题。同时考虑了这种混合鲁棒和最优控制目标，并通过 PSO 算法解决了这一控制问题。

#### 3.3.2.1 鲁棒控制

对于实际系统，参数测量误差和各种功率振荡是不可避免的，这会带来系统不确定性。此外，PV 发电功率严重依赖于光照条件，而风力发电机组发电严重依赖于风力条件。而且各种用电设备可以改变功率损耗。因此，在设计鲁棒控制器时，应考虑对系统的外部干扰。

考虑具有外部干扰和系统不确定性的多输入多输出 (MIMO) 控制系统， $G$  为系统传递函数， $K$  表示所提出的控制器。 $r(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $d(t)$ 和 $y(t)$ 分别代表参考输入、跟踪误差、控制输出、外部干扰和系统输出。反向输出的乘法不确定性 [35]表示为 $\Delta$ ，用于对系统不确定性进行建模。系统的鲁棒性和跟踪性能分别表示为 $H_\infty$ 和 $H_2$ 性能。混合 $H_2/H_\infty$ 控制系统的结构如图 3-7 所示。

因此，考虑到系统的鲁棒性，结构固定的混合 $H_2/H_\infty$ 控制目标函数由 $J_1$ 得到，如式(3-36)所示：

$$J_1 = J_e + J_\infty \quad (3-36)$$

### 3.3.2.2 运行成本优化控制

本节研究的系统有三个运行成本目标函数。

第一个目标是将每两个连接的微网之间的电力传输调节到一个相对较低的水平。根据能源互联网自下而上的原则，需要优先实现各微网中的自主功率平衡。同样地，传输的功率 $P_{ER12}$ 和 $P_{ER23}$ 预期将保持在相对较小的数值。根据 $MG_2$ 和 $MG_3$ 的线性框图，目标函数可表示为 $J_{Trans}$ ：

$$J_{Trans} = \left\| \frac{b_{ER12}}{1+T_{ER12}S} K_{ER12C} \right\|_2^2 + \left\| \frac{b_{ER23}}{1+T_{ER23}S} K_{ER23C} \right\|_2^2 \quad (3-37)$$

第二个目标是降低从大电网到能源互联网的电力输送成本。在能源互联网范围内，优先实现电能的自给自足。如果能源互联网严重依赖与大电网的电力交换来维持其运营，那么不仅违反了能源互联网的能源管理原则，还会产生昂贵的购电成本。当考虑到经济效益时，应同时考虑电价和大电网向能源互联网传输的电量。通常情况下，电价会随着时间的推移而变化<sup>[40]</sup>。本文将重点放在一个不超过一小时的时段内，在此时段内，假定电价为常数。从大电网向能源互联网供电所涉及的经济成本表示为：

$$J_{Cost} = \left\| Price_e \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi f_0}{s}\right)}{X_{PG}} \right\|_2^2 \quad (3-38)$$

其中 $Price_e$ 是基于实时电力市场的电价， $J_{Cost}$ 可视为第二目标函数。

第三个目标函数旨在降低所研究能源互联网系统中使用的所有控制器所涉及的额外成本。虽然一个更强的控制器可以带来更好的性能，但过度控制的可能性大大增加，将为能源互联网的运行带来额外的成本。成本函数 $J_{Ctl}$ 用于估计控制器所涉及的成本，

$$J_{Ctl} = \sum_{k \in \Omega} \|k\|_2^2 \quad (3-39)$$

其中， $\Omega$ 是所研究能源互联网系统中所有控制器的集合。根据第3.2.2节，有 $\Omega = \{K_{ESC}, K_{MTC}, K_{HPC}, K_{PHEVC}, K_{DEGC}, K_{ER12C}, K_{ER23C}\}$ 。通过最小化 $J_{Ctl}$ ，可以有效地避免过度控制的情况。

考虑三个目标函数和决策者的偏好，系统总的运行成本函数为：

$$J_2 = \omega_1 J_{Trans} + \omega_2 J_{Cost} + \omega_3 J_{Ctl} \quad (3-40)$$

式中， $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 和 $\omega_3$ 为加权系数。

### 3.3.2.3 混合控制目标

混合控制目标由指定的混合 $H_2/H_\infty$ 控制目标函数和系统成本优化控制目标之和描述：

$$J = J_1 + J_2 \quad (3-41)$$

在本文中，控制目标为将 $J$ 最小化，使得：

$$\begin{cases} K_{P_{min}} < K_P < K_{P_{max}} \\ K_{I_{min}} < K_I < K_{I_{max}} \end{cases} \quad (3-42)$$

在式 (3-42) 中， $K_P \in \Phi_P$ 且 $K_I \in \Phi_I$ 。  $\Phi_P$ 是所有的比例参数的集合，有 $\Phi_P = \{K_{P_{ES}}, K_{P_{MT}}, K_{P_{ER12}}, K_{P_{HP}}, K_{P_{PHEV}}, K_{P_{DEG}}, K_{P_{ER23}}\}$ 。  $\Phi_I$ 是所有积分参数的集合，有 $\Phi_I = \{K_{I_{ES}}, K_{I_{MT}}, K_{I_{ER12}}, K_{I_{HP}}, K_{I_{PHEV}}, K_{I_{DEG}}, K_{I_{ER23}}\}$ 。  $K_{P_{min}}$ 和 $K_{P_{max}}$ 分别是控制器比例部分的最大值和最小值。  $K_{I_{min}}$ 和 $K_{I_{max}}$ 分别是控制器积分部分的最大值和最小值。

## 3.4 仿真结果分析

### 3.4.1 单个能量路由器系统仿真

在本节中，通过 PSO 算法计算了 ERC 的最优参数。给出了几种典型的仿真结果，证明了该方案的可行性。

系统参数主要基于文献[41]中的数据，如表 3.1 所示。选择 $R(s) = 1/(s + 1.1)$ 作为能量路由器系统的参考输入。 PSO 算法目标函数值与迭代次数的关系如图 3.8 所示。基于 PSO 的最优解， $J$ 的最优值为 0.8827，混合 $H_2/H_\infty$ 控制器为：

$$K_{ESC}(s) = 0.3372 + \frac{0.9916}{s}$$

$$K_{MTC}(s) = 0.2775 + \frac{0.5653}{s}$$

表 3.1 频域能量路由器系统参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$K_{ES}$	100	$P_{FC}^{ini}$	5kW	$K_{MT}$	0.04
$T_{ES}$	60	$M$	10	$P_{ER2}^{ini}$	50kW
$f_0$	50Hz	$D$	1		

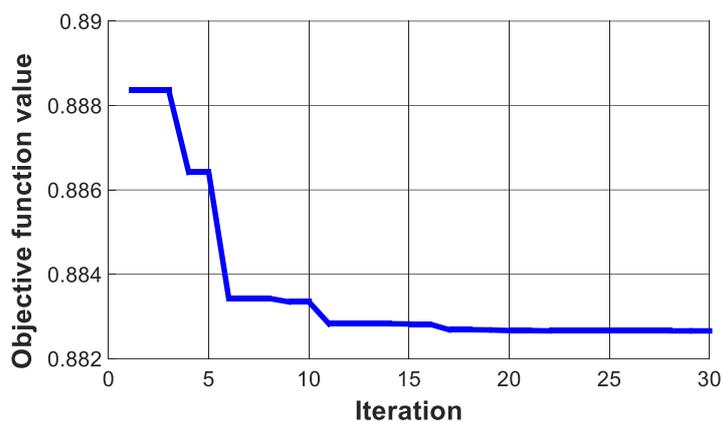


图 3.8 目标函数值随迭代次数变化曲线

光伏发电机组、风力发电机组和负载的功率分别由随机波动的预测模型模拟<sup>[41]</sup>，如图 3.9 (a)、图 3.9 (b) 和图 3.10 (a) 所示。利用带通滤波器的白噪声模块建立了 PHEV 功率偏差模型，功率波动如图 3.10 (b) 所示。

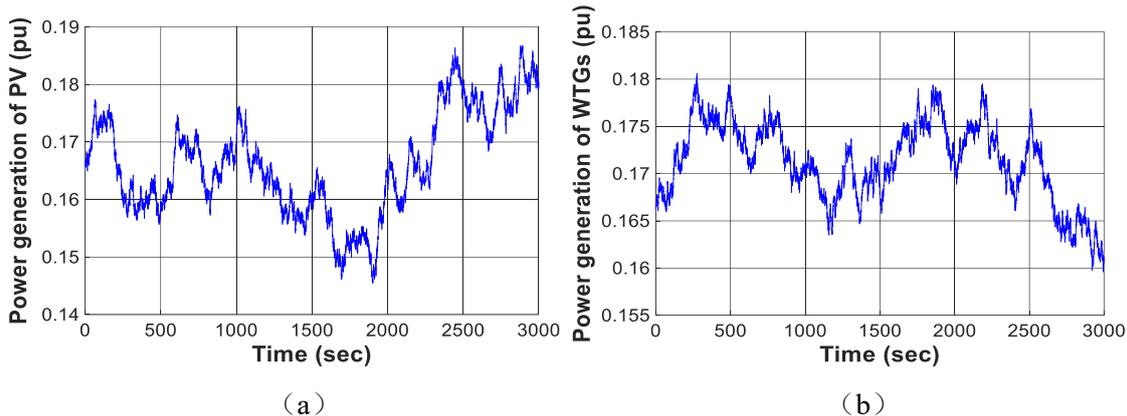


图 3.9 发电功率 (a) 光伏 (b) 风机

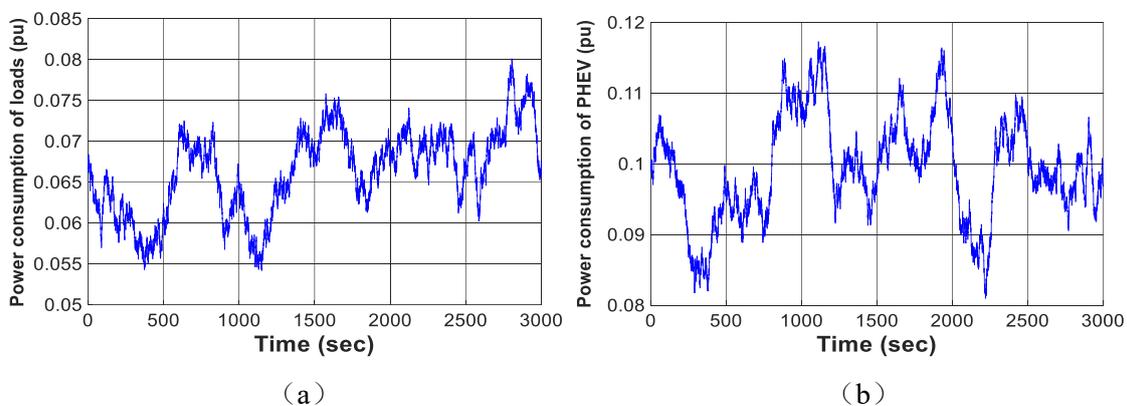


图 3.10 功率消耗 (a) 负载 (b) PHEV

假设能量路由器系统功率在初始时间不平衡。有控制和无控制的交流母线频率偏差如图 3.11 (a) 所示。显然, 本节所提出的 ERC 方案有效地实现了频率稳定。在仿真中, 将 ERC 的控制效果与 CMT&CES 控制系统<sup>[41]</sup>和鲁棒 MT 和 ES 控制器 RMT&RES 控制器[30]的控制效果进行了比较。

CMT&CES 和 ERC 作用下的下的系统功率和频率波动分别如图 12 和图 13 所示。从图 3.11 (b) 和图 3.12 (a) 可以看出, 与 CMT&CES 相比, ERC 可以更有效地平衡能量路由器中的功率。此外, 用 ERC 可以更有效地抑制频率振荡。RMT&RES 和 ERC 下的频率偏差如图 3.12 (b) 所示。结果表明, 两种方案的 $H_{\infty}$ 控制效果相当接近。但是, ERC 和 RMT&RES 的量化控制成本分别为 0.9228 和 1.8317, ERC 的额外成本约为 RMT&RES 成本的一半, 本节所提出方法的优越性得到了验证。

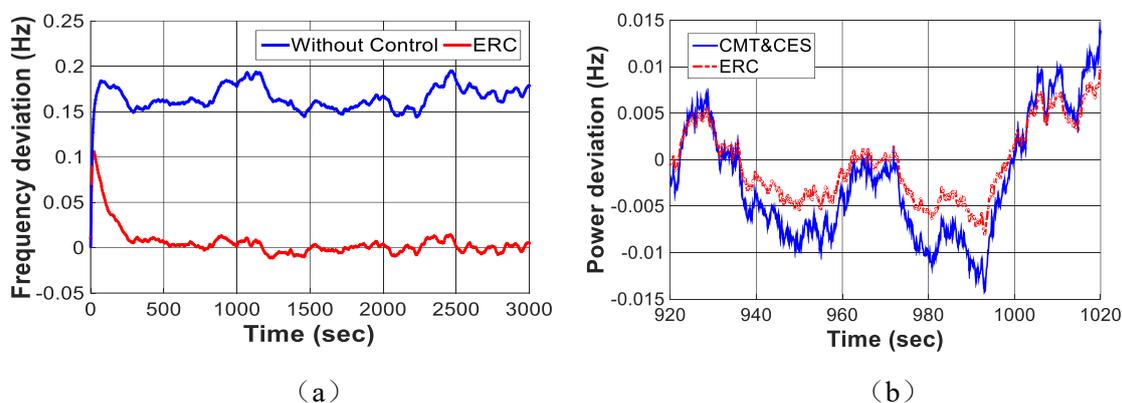


图 3.11 (a) 频率波动 (b) 功率波动

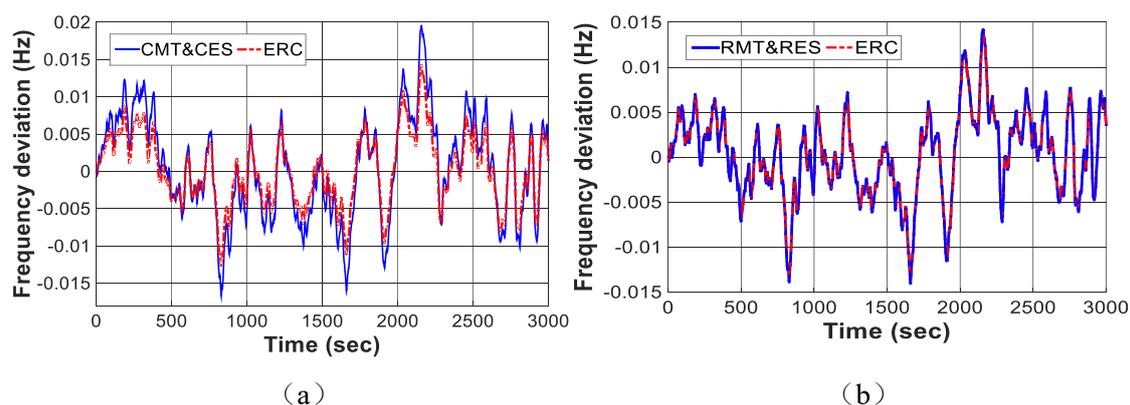


图 3.12 不同控制器下的频率波动 (a) CMT&CES 和 ERC (b) RMT&RES 和 ERC

### 3.4.2 典型能源互联网系统仿真

本节给出了一些仿真结果和分析，验证了该控制器与传统控制器相比的有效性混合 $H_2/H_\infty$ 控制器的仿真结果

根据文献[42]、文献[43]和文献[44]中的数据，系统参数如表 3.2 所示。对于系统的跟踪性能，选择(22)中的参考输入 $R(s)$ 为 $1/(s+5)$ 。粒子群算法的参数为：群大小=50；最大迭代次数=30； $c_1=0.2$ ； $c_2=0.2$ ； $w_{min}=0.4$ ， $w_{max}=0.9$ 。根据图 3.13 中的仿真结果，最优的目标函数值为 18.3267。

表 3.2 频域能源互联网系统参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$M_1$	10	$K_{ES}$	100	$K_{MT}$	0.04
$D_1$	1	$T_{ES}(s)$	60	$T_{DEG}(s)$	2
$M_2$	15	$b_{ER12}$	10	$b_{ER23}$	10
$D_2$	2	$T_{ER12}(s)$	1.15	$T_{ER23}(s)$	1.15
$M_3$	20	$X_{PG}$	0.072	$T_{BES}(s)$	0.15
$D_3$	1.5	$f_0(Hz)$	50	$T_{FES}(s)$	0.12
$K_{HP}$	10	$K_{PHEV}$	10	$T_{PHEV}(s)$	0.3
$T_{HP}(s)$	0.2				

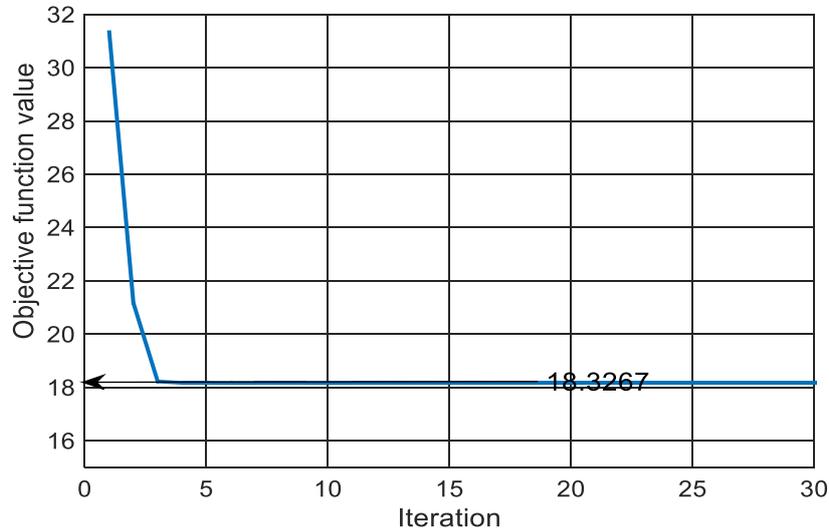


图 3.13 目标函数值

本节提出的混合 $H_2/H_\infty$ 控制器为：

$$\begin{cases} K_{ESC}(s) = 0.1246 + 0.2710/s, \\ K_{MTC}(s) = 0.3056 + 0.4100/s, \\ K_{ER12C}(s) = 0.4206 + 0.2710/s, \\ K_{HPC}(s) = 0.6666 + 0.2571/s, \\ K_{PHEVC}(s) = 0.3326 + 0.2948/s, \\ K_{DEGC}(s) = 0.1000 + 0.1000/s, \\ K_{ER23C}(s) = 0.7008 + 0.3066/s. \end{cases}$$

如图 3.14 所示, 假设所研究能源互联网系统中 PV 和 WTG 的发电量以及所研究能源互联网系统中负载的功耗在考察的时间段内是随机的, 并通过文献[43]中的预测模型进行模拟。

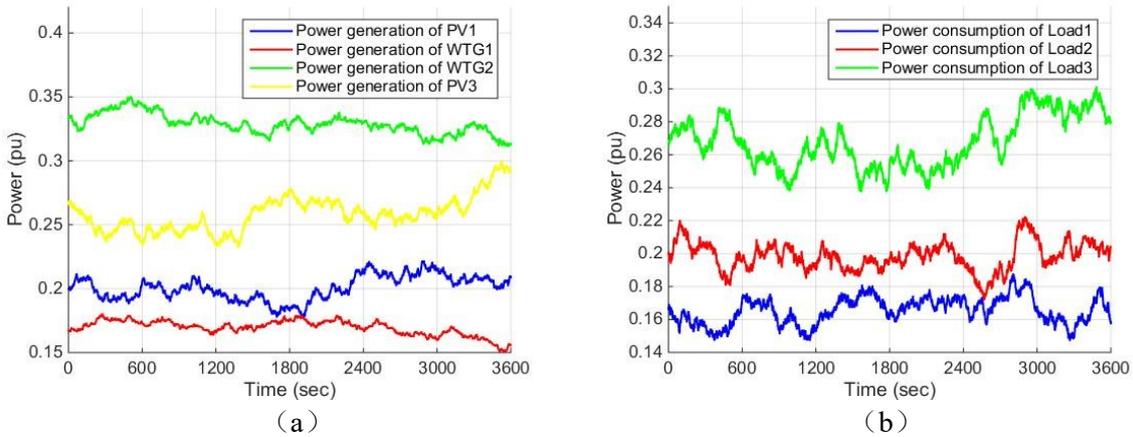


图 3.14 本地发电与消耗功率 (a) 光伏与风机 (b) 负载

本节提出方法的结构并与传统方法进行比较。传统的方法包括在满足 (30) 的前提下, 仅使用鲁棒控制将 (23) 中的  $J_1$  最小化, 或仅使用最优控制将 (27) 中的  $J_2$  最小化。

### 3.4.2.1 与最优控制器的比较

通过最小化  $J_2$  获得最优控制器。在本小节中, 参数不确定性为表 3.2 中原始系统参数增加 50%, 三个微网中负载功率的突增 ( $P_{LOAD1}$ 、 $P_{LOAD2}$ 、 $P_{LOAD3}$  增加 10%) 则作为施加的外部干扰。

由本节所提出的方法和传统方法得到的  $MG_1$  的受控频率偏差如图 3.15 所示, 包括以下四种情况: (a) 无外部干扰或系统参数不确定性, (b) 仅外部干扰, (c) 仅系统参数不确定性, (d) 同时有外部干扰和系统参数不确定性。由于  $MG_1$  与大电网相连, 电网的调节使  $MG_1$  的频率偏差相对较小, 本文提出的方法与常规方法的控制效果差异不明显。

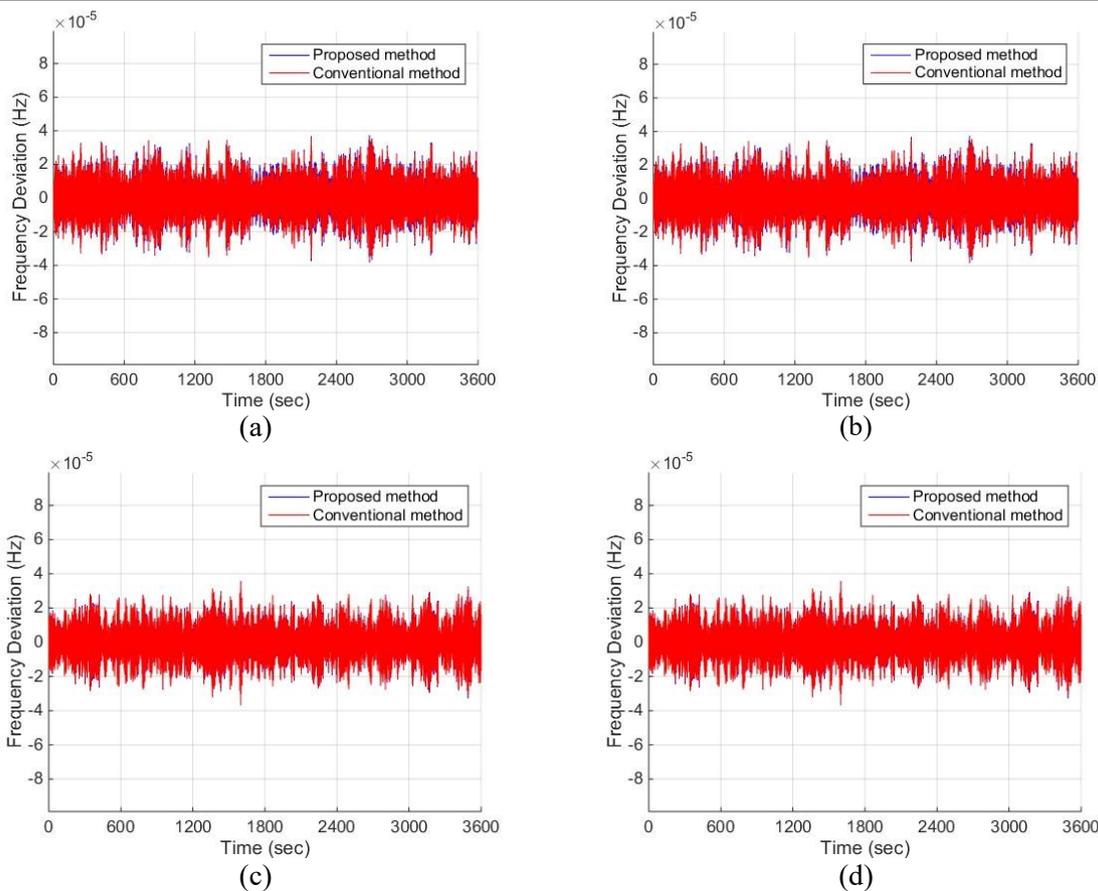


图 3.15  $MG_1$  的频率波动 (a)无扰动无不确定性 (b)仅有扰动 (c)仅有参数不确定性 (d)既有扰动又有参数不确定性

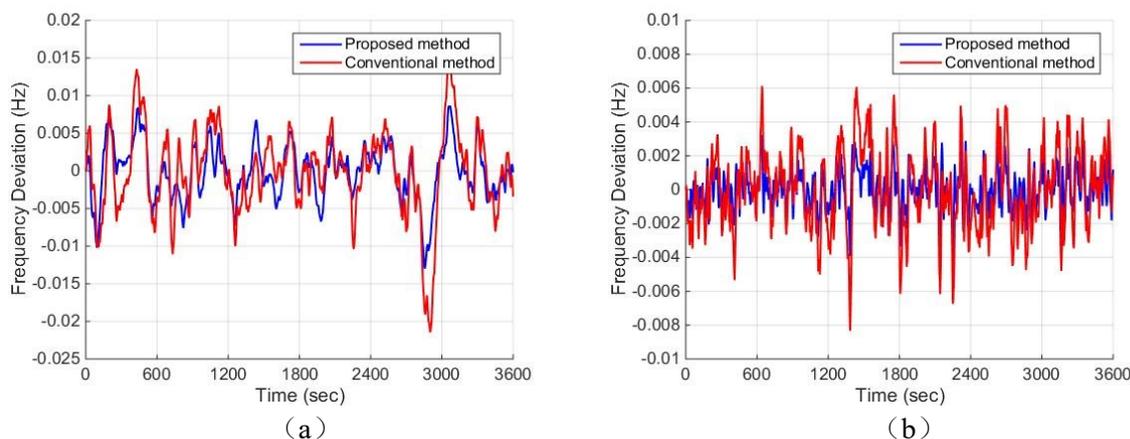


图 3.16 无扰动无不确定性时的频率波动 (a)  $MG_2$  (b)  $MG_3$

没有干扰或不确定性的 $MG_2$ 和 $MG_3$ 的频率偏差如图 3.16 所示。显然，本文的方法能更有效地稳定 $MG_2$ 和 $MG_3$ 中交流母线的频率。当只考虑外部干扰时，如图 3.17 所示，本文的方法具有响应速度快、超调量小、过渡时间短等优点。当只考虑系统参数的不确定性时， $MG_2$ 和 $MG_3$ 的频率偏差如图 3.18 所示。结果表明本文的控制

器的有效性。此外，在外部干扰和系统不确定性的情况下，所研究的能源互联网系统在本文的方法下表现出更好的性能，如图 3.19 所示。

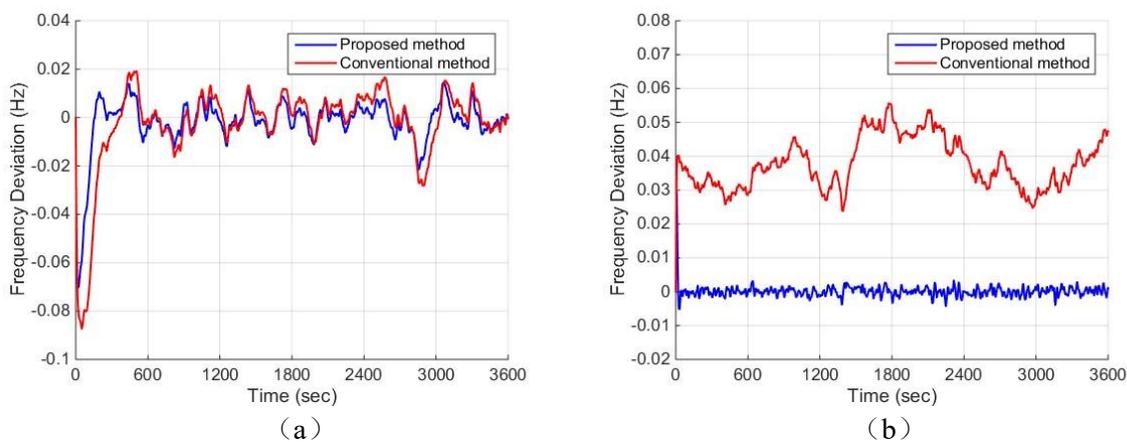


图 3.17 有外部扰动时的频率波动 (a)  $MG_2$  (b)  $MG_3$

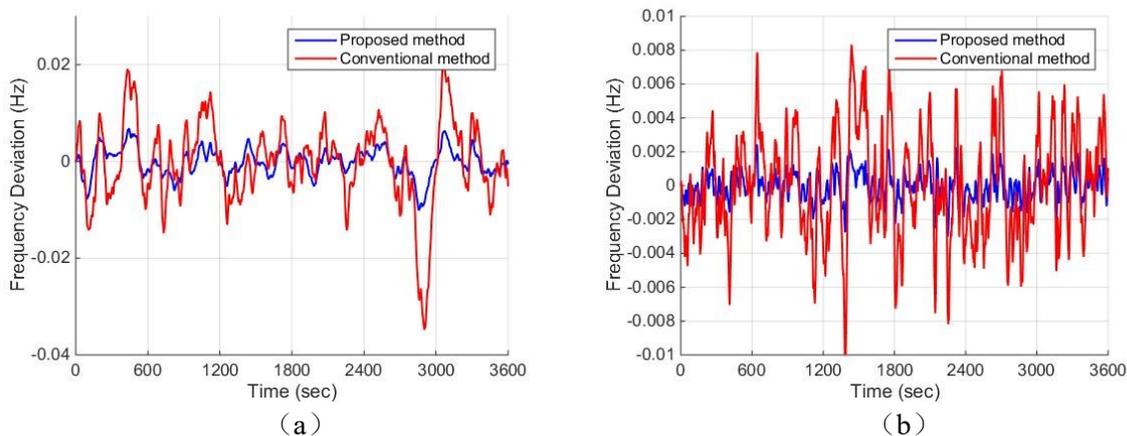


图 3.18 有参数不确定性时的频率波动 (a)  $MG_2$  (b)  $MG_3$

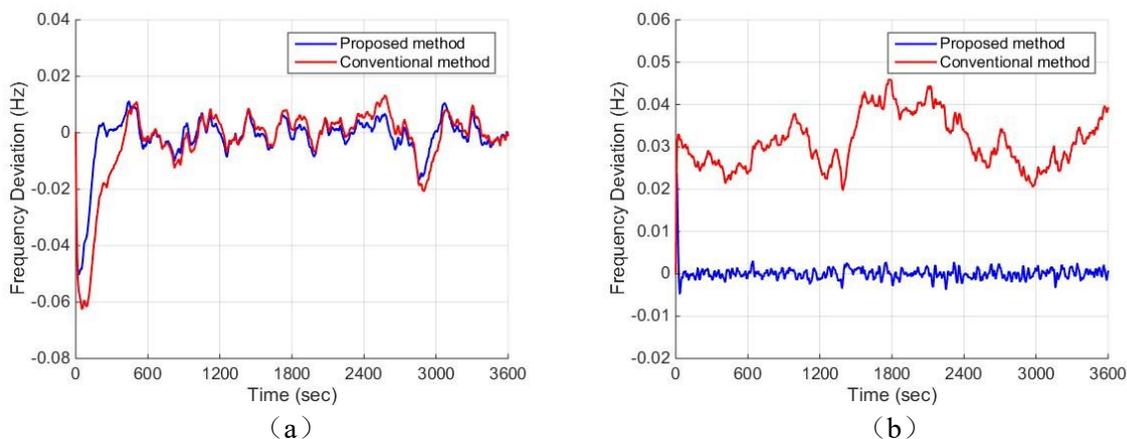


图 3.19 有扰动且有不确定性时的频率波动 (a)  $MG_2$  (b)  $MG_3$

## 3.4.2.2 与鲁棒控制器的比较

图 3.20 显示了本节设计的控制器和传统鲁棒控制器下两个相邻微网之间的功率传输情况。大电网和MG<sub>1</sub>之间的功率传输如图 3.21 所示。结果表明，提出的方法可以有效地降低相邻两个微网之间以及电网和MG<sub>1</sub>之间的传输功率。

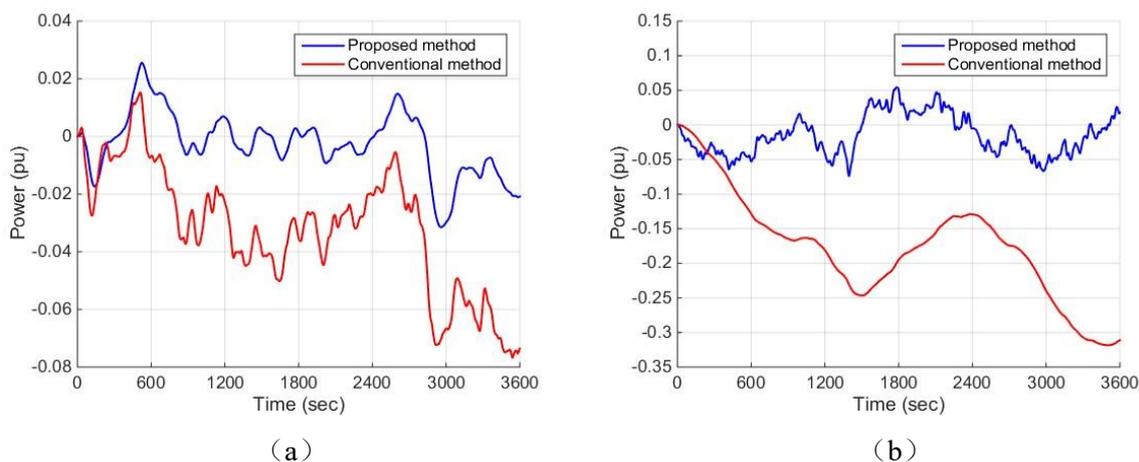


图 3.20 两个相连微网间的功率传输 (a) MG<sub>1</sub>与MG<sub>2</sub>之间 (b) MG<sub>2</sub>与MG<sub>3</sub>之间

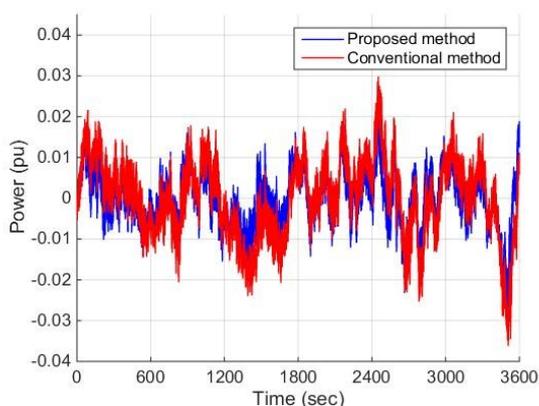


图 3.21 大电网与MG<sub>1</sub>间的功率传输

## 3.4.2.3 其他案例研究

为了说明不同权重对目标函数的影响，此处又研究了两个案例。某一目标函数的权重可以反映决策者的倾向。在案例 1 中，假设互连的微网之间的物理距离很长，导致微网之间的电力传输成本相对较高。因此，决策者会更倾向于在大电网和微网之间实现能量交换。在案例 2 中，决策者更倾向于减少与大电网的能量交换，通过微网之间的功率流控制整个能源互联网系统。

本节通过加权和法和秩次形心法<sup>[40]</sup>相结合的方法来确定权重。三个目标的相对重要性通过权重值反映出来，具体如下：

$$\omega_i = \frac{1}{N} \sum_{k=i}^N \frac{1}{k}, \quad i = 1, 2 \dots N.$$

在考虑的系统，总共有三个微网。因此， $N = 3$ 。两个案例研究的权重如下。在案例 1 中，选择 $\omega_1=0.6110$ ， $\omega_2=0.2778$ ， $\omega_3=0.1112$ ，而在案例 2 中，选择 $\omega_1=0.2778$ ， $\omega_2=0.6110$ ， $\omega_3=0.1112$ 。利用本文提出的方法，模拟仿真结果如图 16 所示。

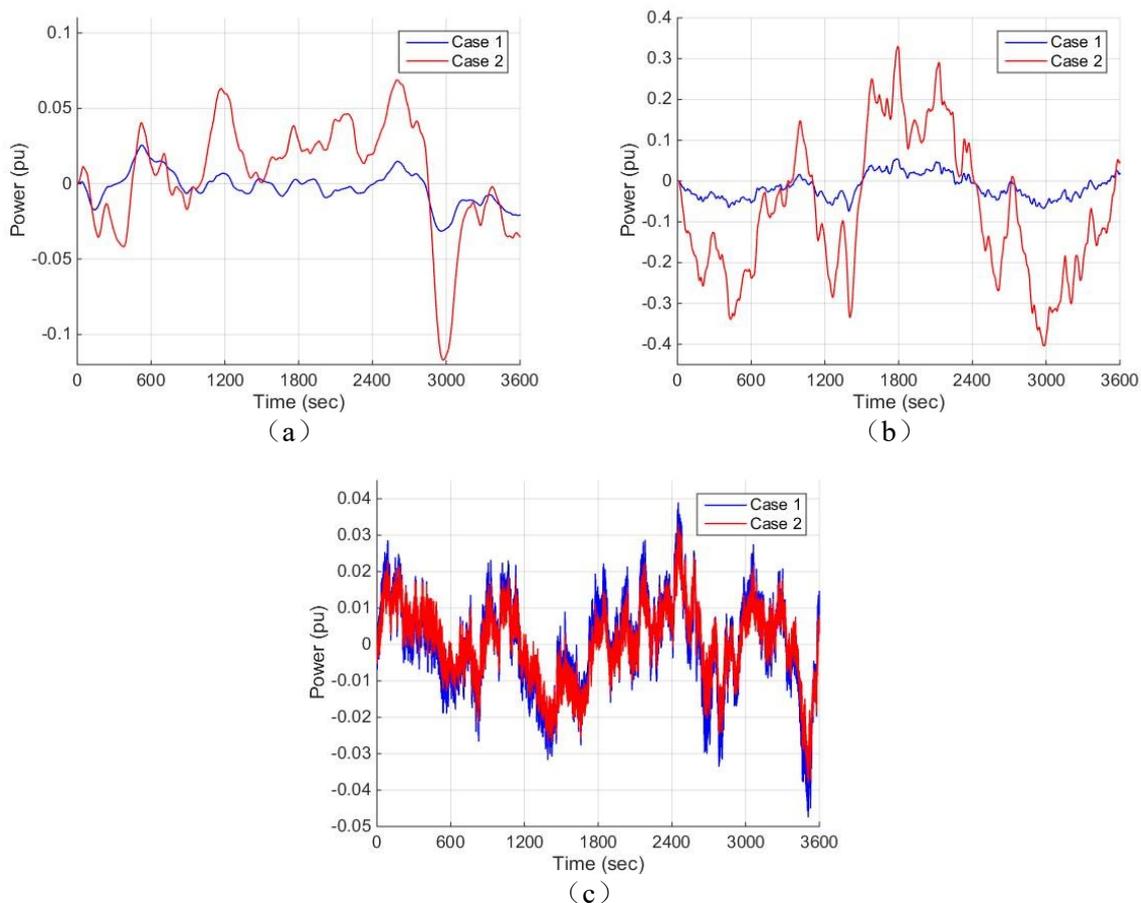


图 3.22 案例 1 与案例 2 中的传输功率 (a) MG<sub>1</sub>与MG<sub>2</sub>之间 (b) MG<sub>2</sub>与MG<sub>3</sub>之间 (c) 大电网与MG<sub>1</sub>之间

从图 3.22 (a) 和图 3.22 (b) 可以明显看出，在案例 1 中，通过 MGS 传输的电力比在案例 1 中传输的要少。从图 3.22 (c) 可以看出，案例 1 下大电网和微网之间的功率传输大于案例 2 下的功率传输。上述结果表明不同权重对目标函数影响的可行性。

### 3.5 本章小结

本章从频域角度对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统进行建模，同时考虑了多种分布式能源的接入、母线频率或电压的管理以及成本优化运行等问题。本章中，综合控制问题被转化为混合 $H_2/H_\infty$ 控制问题，通过粒子群算法得到最优解，获得最佳的PI控制器参数。在Simulink中的仿真结果证明了该方法的有效性，在工程实践中有较大意义。

## 第4章 交直流通用模块设计方案与实验验证

### 4.1 本章引言

信息物理融合是能源互联网的重要理念之一。常见的能量路由器往往都是针对特定的工况研发特定的设备，可移植性非常弱。例如，并网逆变器只能实现电能的交直流变换，当需要直流斩波变换时，只能更换新的变流器。不同接口需通过不同变流器接入网络的架构与能量路由器即插即用、可扩展性的理念有很大出入，我们寻求设计一种电力电子结构，不改变主体架构即可实现交直流变换和直流斩波的功能。二极管钳位型三电平变流器特殊的结构为标准化的通用模块设计提供了可能。

计算机技术的发展给了其他领域研究者很大的启示，服务器、数据中心等的集群思想可以借鉴到标准化模块能量路由器的研发中，无需改变主体结构，改变标准模块的连接方式和数量，实现集群控制，能大大提升设备的可扩展性。随着电子技术的发展，电力电子开关管的成本势必大大降低，也为通用模块的发展提供了便利条件。

为了提高能源互联网中设备的可扩展性，本章设计了交直流通用模块。通用功率模块是一种交直流通用的变流器结构，支持多种分布式能源或负荷的接入，可以实现即插即用。同时本章也设计了一种通用通信模块，整合 RS485、RS232、以太网、CAN 和光纤等通信单元，与通用功率模块协调工作。本章给出了标准化功率模块与标准化通信模块组成能量路由器的实施方案，实现端口能量交换、协调优化控制等路由器基本功能，也针对电网电能质量治理，电压等级提升等应用给出了方案。仿真和硬件实验验证了本章所设计模块的交直流通用性。

### 4.2 通用模块设计

#### 4.2.1 通用功率模块设计

通用功率模块（SPM）拓扑为二极管钳位型三电平变流器<sup>[45]</sup>，如图 所示，直流侧串联两个相同的分压电容，每相由四个串联的开关管组成，两个快恢复二极管与中间两个开关管并联，钳位二极管中点与分压电容中点相连接，实现钳位功能。每个开关管关断时承受的电压仅为直流电压的一半，系统的耐压值得到了提升，可以应用于高压大功率场合。通过适当的策略控制十二个开关管的通断，可以实现

ACDC 变换和 DCAC 变换。此时模块工作在整流逆变模式，系统有直流侧和交流侧。

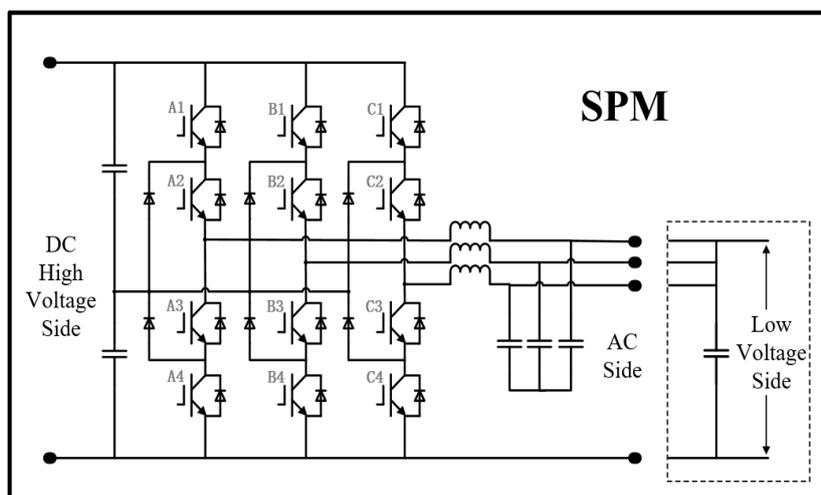


图 4.1 通用功率模块结构

电力系统中也需要接入各种直流的源和负载，标准化功率模块需具备双向 DCDC 变换的功能，能工作于直流斩波模式。目前应用最广泛的双向 DCDC 变换器是 Buck-Boost 变流器，控制开关管的通断可以实现升压或降压功能。但是经 Buck-Boost 变流器变换得到的直流电流纹波过大，而且开关管耐压耐流值的限制使的 Buck-Boost 变流器在高压大功率应用场合中的应用有很大局限性。

SPM 工作于整流逆变模式时，通过电力开关将交流侧三相电路连接在一起，同时接入稳压电容，模块即转化为直流斩波工作模式。三相输出经过电感滤波后并联到一起，形成三重化结构。在直流斩波模式中，每个桥臂上串联的两个开关管同时开通或关断，这样单相电路的输出特性与 buck-boost 变流器相同。控制三相开关管的的驱动信号错开 1/3 周期，输出信号相加得到直流变换后的波形。此时系统输入输出均为直流电，具有高压侧和低压侧。

SPM 工作在直流斩波模式时，相比基本 buck-boost 结构有诸多优点：（1）流经单相的电流为基本变流器的 1/3，提高了系统的容量；（2）减小电感电流的纹波及谐波；（3）提高了系统的容错性，某一桥臂故障后系统仍然可以正常运行；（4）提高了 IGBT 的开关频率，改善了动态特性。

#### 4.2.2 通用通信模块设计

标准化通信模块 (SCM) 用于将不同通信单元的数据转化为统一的通信形式，这里的标准化包括协议标准化与接口标准化。考虑到电力系统中可能接入的源或负载的多样性，本文设计了如图 2 所示的 SCM。

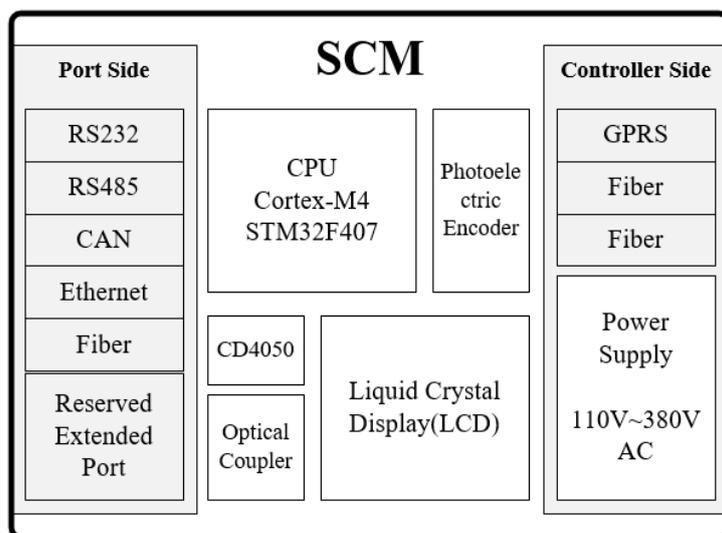


图 4.2 通用通信模块

SCM 的接口主要有外接端口侧接口和上层控制器或上位机侧接口。端口侧接口与变流器及外接设备通信，包含 RS485、RS232、以太网、CAN 和光纤通信单元，预留扩展接口以备其他类型通信接入。RS485 通信单元使用标准 5V 接口，选用波特率不低于 512Kbps 的 RS485 通信芯片，采用 MODBUS-RTU 通信协议，采用通信隔离方案；RS232 通信单元选用波特率不低于 1Mbps 的 RS232 通信芯片，其他配置与 RS385 单元相同；CAN 单元采用标准 CAN2.0 通讯接口，通信速率可达 1Mbps，可实现数据帧，远程帧和错误帧，并将 MODBUS 协议移植到 CAN 协议上；以太网单元采用标准 RJ45 隔离网口，网口芯片支持 10M/100M 通讯，基于 Modbus-RTU 协议通讯；接口侧光纤通信单元与变流器控制器进行通信，采用 HFBR2521 和 HFBR1521 芯片，控制器通过输入光纤口发送电流、电压、功率等参数给 ARM 芯片，用于 LCD 屏的显示。上层控制器侧接口与上层控制器及上位机通信，包含标准化光纤单元与 GPRS 单元。光纤单元与 ARM 芯片之间复用了一个 UART 接口，GPRS 预留 SIM 卡槽。为了给整个系统供电，SCM 还设有电源模块，有交流电力输入接口。

除外接接口外 SCM 上也集成了多个模块。为满足风电的接入，SCM 上集成了光电编码器，用于拾取变桨控制系统以及双馈发电机转子转速或位置的数据，有助于实现变桨系统对桨叶的精确定位和复位控制，提高风力发电接口的发电效率和电能质量；CD4050 和光耦合器模块用于缓冲和隔离信号；LCD 实时显示变流器中的电流电压等电气参数情况，方便工程人员监控。SCM 的控制器采用 ARM Cortex-M4 处理器的 STM32F407 系列，提高了系统的扩展性。SCM 与 SPM 的控制器通过物理线路直接相连。

### 4.2.3 通用模块应用场景

#### 4.2.3.1 能量路由器

考虑如图 4.3 所示的能量路由器结构,能量路由器包含光伏、风电、电池储能、电网、直流负载、交流负载六个端口,每个接口的 SCM 与 SPM 协调工作。SPM 初始状态为整流逆变状态,直流侧通过直流母线连接到一起,SCM 的 ER 侧接口与 ER 控制器通信,端口侧接口与待接入设备通信。以光伏接口为例,接入前光伏电池先与 SCM 通信,SPM 控制器接收到光伏电池信息控制 SPM 电力开关,切换到直流斩波模式,光伏电池随后接入。ER 开始工作后,ER 控制器综合处理各接口 SCM 传输的数据,并据此向每个端口的控制器发送指令,端口控制器控制对应端口的工作模式。

为使图 4.3 所示能量路由器正常工作,不同类型端口需要的通信需求差异很大。对常见类型端口给出标准化的需求参数,如表 4.1 所示。

表 4.1 标准化参数需求

端口类型	端口通信需求		
	物理参数	电气参数	状态信息
电网		电压 电流 频率 有功功率 无功功率	是否故障 工作模式
光伏	光照强度 温度 功率特性	电压 电流 实际功率	是否故障 工作模式
风电	风速 叶尖速比 桨距角	电流 电压 转速 转矩 发电机额定功率	是否故障 工作模式
储能	电池温度 电池容量	最大充放电次数 电压 最大充放电电流 电流 最大充放电电压 SOC	是否故障 工作模式
负载	温度	额定电压 额定功率 功率 最大/小功率 电压 电阻 最大/小电压 软启动时间 反时限保护参数	是否故障 工作模式

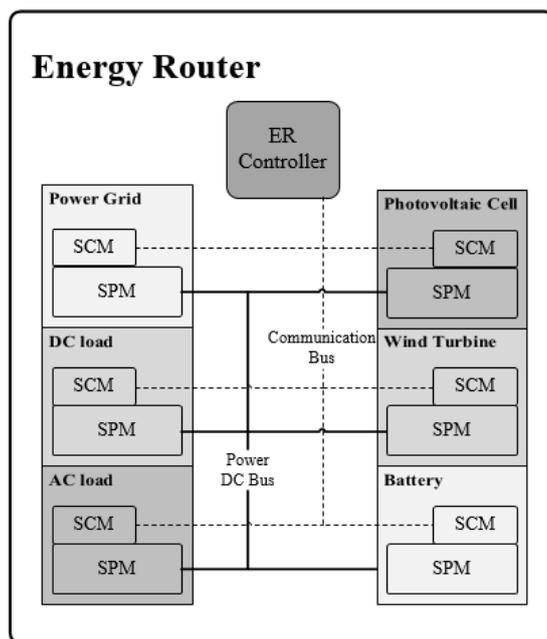


图 4.3 通用模块搭建的能量路由器

#### 4.2.3.2 电能质量治理

SPM 和 SCM 可以应用于静止无功发生器 (SVG) 和有源电力滤波器 (APF)。静止无功发生器主要用于无功补偿，目的是为了提提高电网功率因数及稳定电网电压，同时也能减少电压闪变、降低过电压，提高电力系统的稳定性。SPM 作为 SVG 使用时工作在整流逆变模式，接入形式及控制原理如图 4.4 所示。采集电网及 SPM 的交流侧和直流侧电气参数，通过 PWM 技术调节 SPM 交流侧电流幅值和相位，从而补偿无功功率。SPM 的结构具有四象限运行特性，能实现无谐波连续的动态无功补偿。

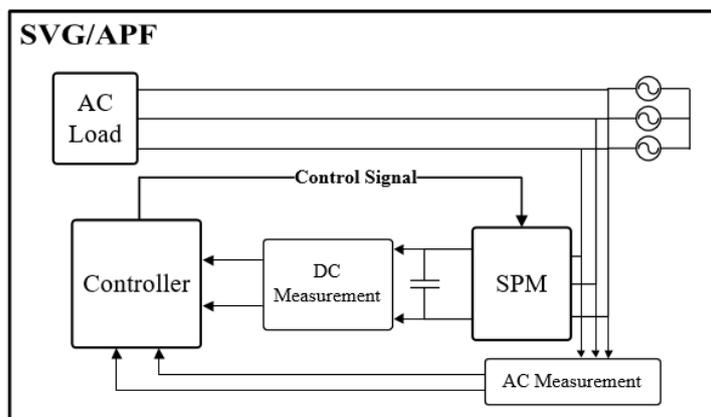


图 4.4 通用模块用于电能质量治理

SPM 应用于 APF 时的接入方式与应用于静态无功补偿器时相同，也是采用实时补偿技术改善电网的供电质量，通过定制化软件可以同时实现 APF 和 SVG 的功能。SPM 应用于 APF 需要具有电流源特性，向电网注入补偿电流，抵消谐波产生的谐波电流，使电网电流为正弦波<sup>[46]</sup>。

#### 4.2.3.3 电压等级提升

模块化多电平换流器（MMC）主要应用于高压大功率场景，结构模块化程度高，能大大减小谐波畸变和开关损耗。由 SPM 组成 MMC 的拓扑如图 4.5 所示。 $n$  个 SPM 组成一组，串联构成一个桥臂；交流电源的输出连接在上下半桥臂的中点，构成一相通路；三相通路输出连接到一起，输出高压直流电。每相的上下两个桥臂的  $2n$  个 SPM 协调控制，得到标准的正弦交流电压。

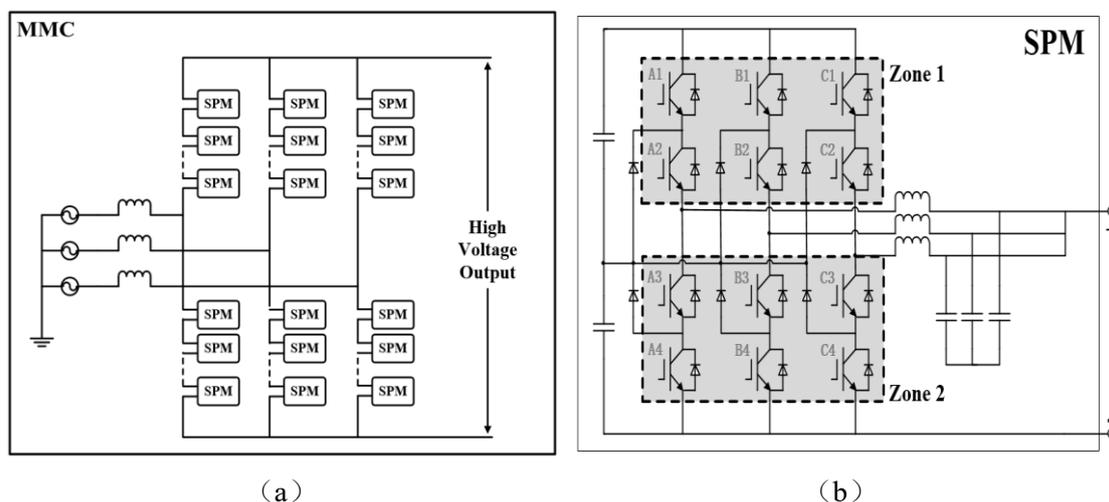


图 4.5 通用模块用于电压等级提升 (a) MMC 整体结构 (b) 单个 SPM 结构

MMC 中每个子模块的拓扑如图 4.5 (b) 所示，SPM 此时与前文所述的直流斩波模式有微小的差别，高压侧无需接输入或输出，低压侧的稳压电容通过电力开关被断路，下半桥臂的上下两端分别作为子模块的输出和输入。SPM 子模块有三种工作状态：（1）闭锁状态，此时两个区域的开关管均关断，一般出现在系统启动或故障时；（2）投入状态，此时区域 1 开关管开通，区域 2 开关管关断；（3）切出状态，此时区域 1 开关管关断，区域 2 开关管开通。控制 SPM 子模块的投入和切出可以叠加多电平阶梯信号，模拟正弦交流信号。

传统的 MMC 子模块为单相结构，而 SPM 子模块的三相结构大大提高了系统对单个开关管的容错性，也提高了单个模块可变换电压的范围。总结 SPM 作为模块化多电平换流器的子模块的优点如下：（1）所需器件耐压低，对器件的一致性

要求低；（2）电平数多，大大降低了谐波；开关频率低，开关损耗小，系统利用率高；（3）容易实现背靠背结构，使能量双向流动；（4）输出侧无需变压器，大大减小了装置的质量和体积，减小损耗，节约成本；（5）模块化结构使容量拓展和冗余设计更容易。

### 4.3 仿真验证与结果分析

使用 MATLAB/Simulink 对通用变流器部分功能进行仿真，本节给出了 ACDC 变换、DCAC 变换与 DCDC 变换的仿真结果，以验证模块交直流通用的性能。

#### 4.3.1 ACDC 变换

在 ACDC 变换时采用电压电流双闭环的控制策略，对直流侧电压进行控制。图 4.6 给出了交流侧电压与直流侧电压的仿真结果。由于直流侧平衡电容的存在，上下桥臂的电压均控制在 200V 左右。系统响应时间约为 0.05s，稳定后的直流电压波动很小。

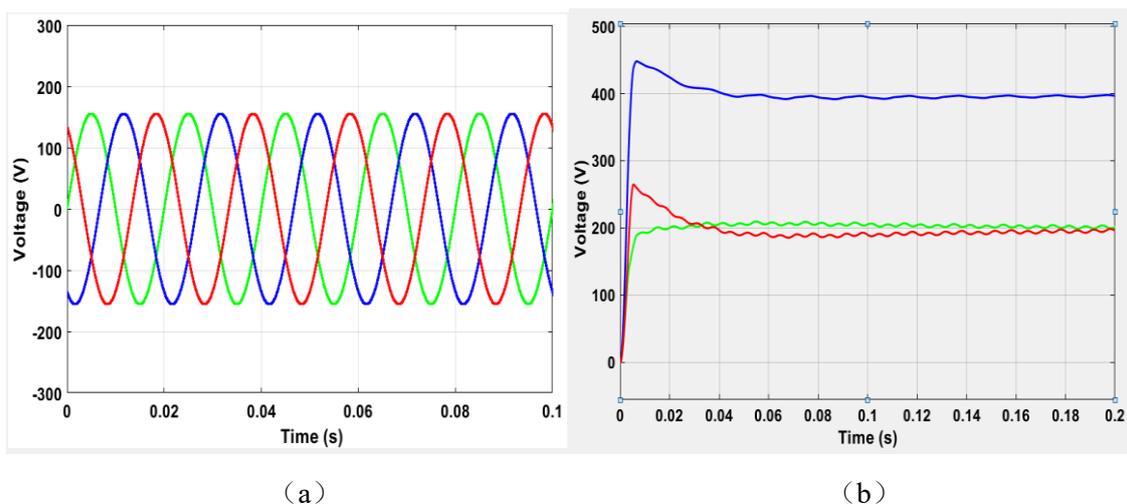


图 4.6 ACDC 变换仿真结果 (a) 交流侧电压 (b) 直流侧电压

#### 4.3.2 DCAC 变换

在 DCAC 变换时，对交流侧电压进行恒压控制。图 4.7 给出了三相交流电压的仿真结果，可以看出三相电压均为规则的正弦曲线，仅在过零点有微小的失真。

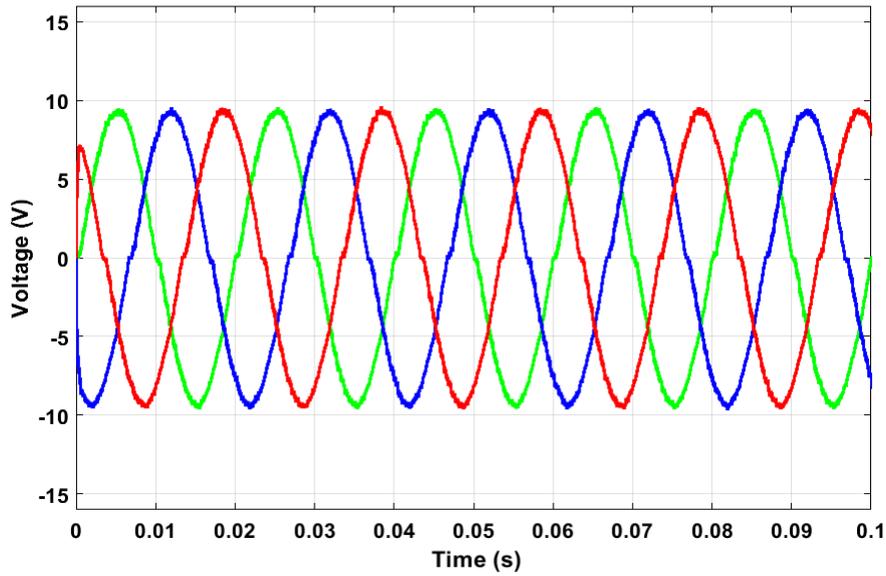


图 4.7 DCAC 变换仿真结果

### 4.3.3 DCDC 变换

在 DCDC 变换时，通用变流器的滤波部分需要切换到直流模式。在设计控制器时，为了减小直流变化后的电压波动，采用了三重化的策略，对每一相输出电压进行了移相，最后再叠加起来，形成总的系统输出电压。图 4.8 给出了电压变换后的低压侧电压输出结果。仿真开始时输出电压的超调量较大，在 1.5s 后输出稳定，电压波动很小。

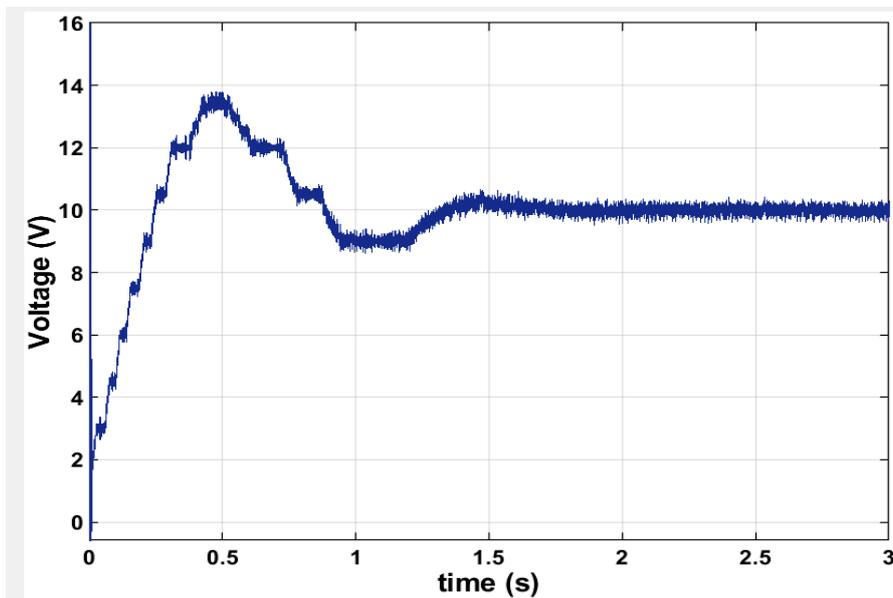


图 4.8 DCDC 变换仿真结果

## 4.4 硬件实验

### 4.4.1 通用模块电气结构设计

能源互联网中，不同级别微网的功率和电压水平不同。交流电压等级有三种典型类型，230V、400V 和 10kV，分别应用于小微级、园区级和城镇级系统。为了节省硬件成本，应针对不同情况设计不同通用模块。

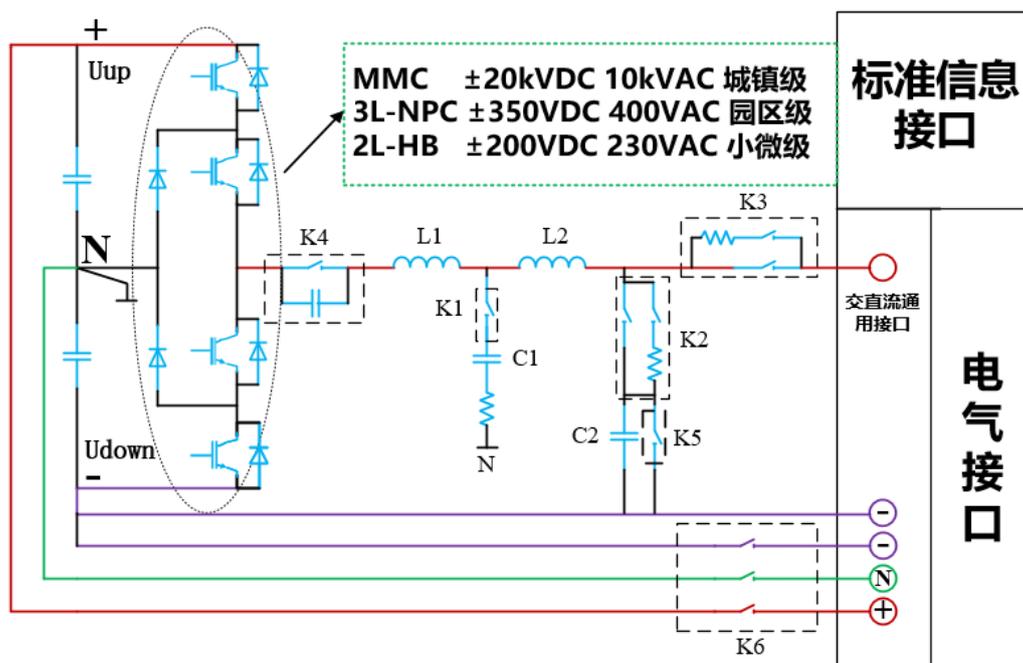


图 4.9 单相结构通用模块拓扑

单相结构通用模块的拓扑结构如图 4.9 所示，包含电力电子变换部分和滤波部分。根据直流侧的电压等级，可以从模块化多电平变流器、二极管钳位型三电平变流器和两电平半桥电路中选择变换器拓扑结构。电力电子变流器中的开关器件为带续流二极管的 IGBT，使功率双向流动。通用模块的滤波器部分可以在 LCL 滤波和 LC 滤波之间切换，其中 L1、C1、L2 构成 LCL 滤波器，L1、L2、C2 构成 LC 滤波器。在 LCL 滤波器的模式下，该模块在输出端口和中性点之间输出交流电压；而在 LC 滤波器的模式下，该模块在端口和负总线之间输出直流电压。因此，该模块可以实现交直流通用。此外，考虑到带宽和瞬时响应，通用模块可以与信息接口实现即插即用。

### 4.4.2 通用模块实验平台搭建

图 4.10 所示的实验平台用于验证所提出的通用变流器拓扑结构。样机由 TI 公司 TMS320F28335 DSP 控制板、Cyclone EP1C12Q240C8 FPGA 控制器和二极管钳

位式三电平变流器组成。除直流侧电压和负载电阻外，系统参数与仿真结果基本一致。实验中，直流侧电压为 30V，直流负载大小为  $3\Omega$ ，每相交流负载大小为  $5\Omega$ 。

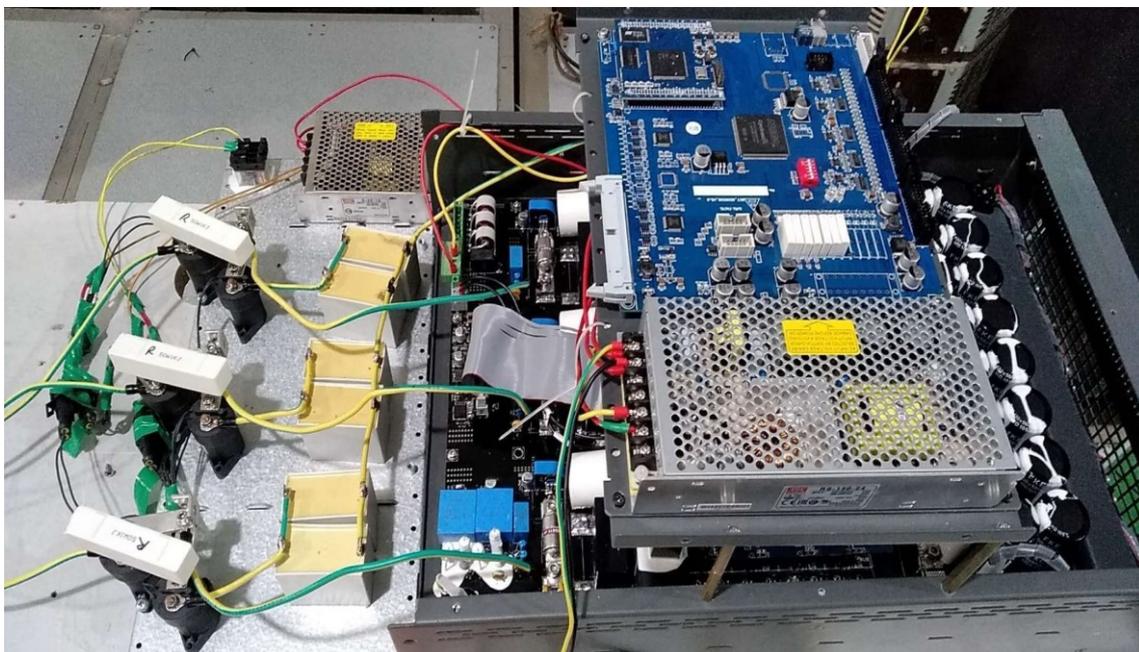


图 4.10 通用模块实验平台

#### 4.4.3 实验验证与结果分析

在实验中选择电力继电器作为开关，相比于电力电子开关响应时间较慢，需要约 25 毫秒接通或断开。

图 4.11 给出了直流负载模式下通用变流器的端口电压和负载电流。可以看出，电压纹波和电流纹波都很小。通用变流器从直流负载模式切换到交流负载模式时，电压与电流的实验结果如图 4.12 所示。两种滤波器之前的切换时间约为 55 毫秒。

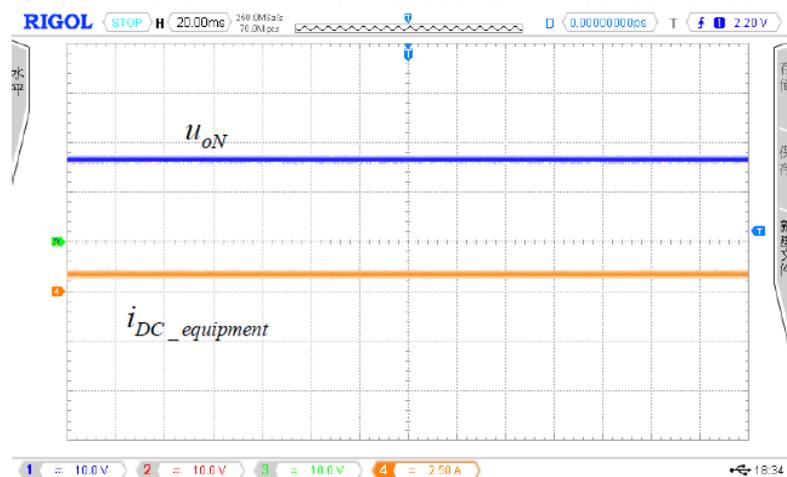


图 4.11 直流负载模式

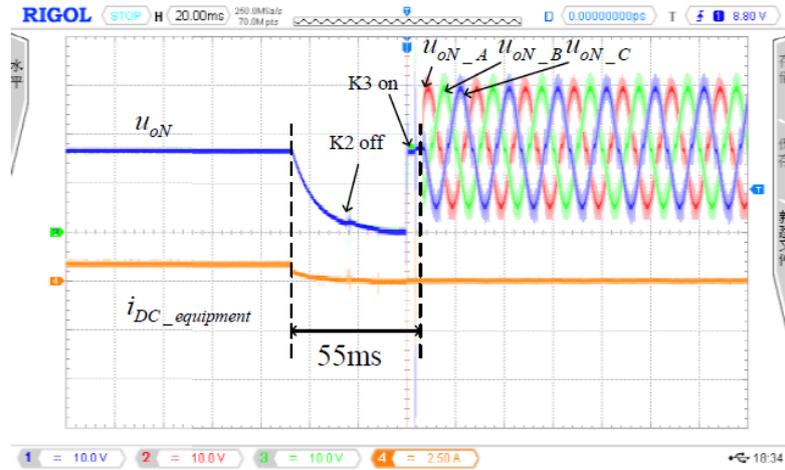


图 4.12 直流负载模式切换至交流负载模式

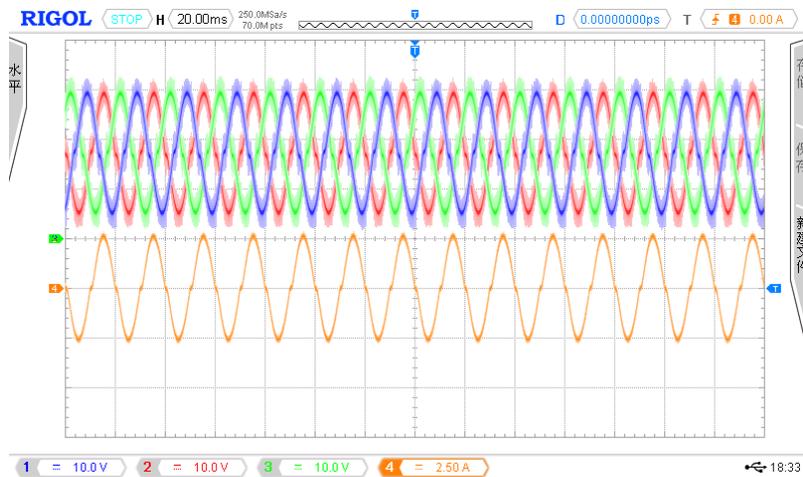


图 4.13 交流负载模式

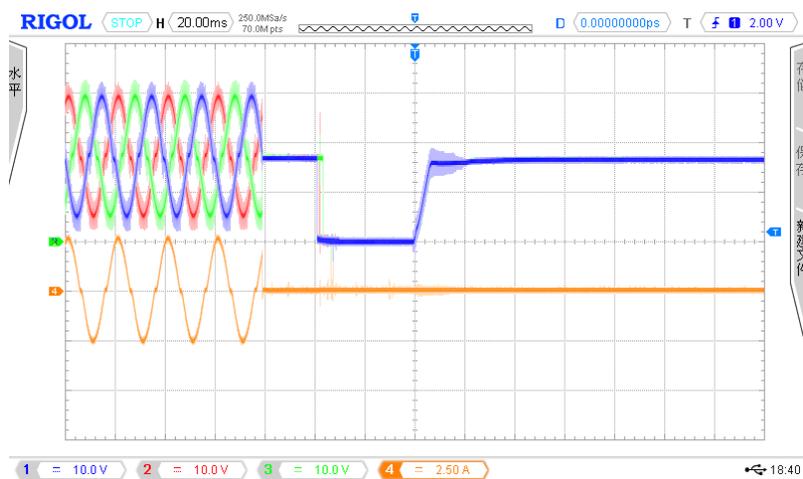


图 4.14 交流负载模式切换至直流负载模式

图 4.13 给出了在交流负载模式通用变流器端口电压和负载电流。三相电压和

电流是非常好的正弦曲线。通用变流器从交流负载模式切换到直流负载模式时，电压电流情况如图 4.14 所示。此时，滤波器从 LCL 模式切换为 LC 模式约需要 60 毫秒。实验结果表明通用变流器在不同工作模式之间快速切换的可行性。

## 4.5 本章小结

本章以二极管钳位型三电平变流器的结构为基础，设计了交直流通用的标准化功率模块，可以同时实现 ACDC、DCAC 和 DCDC。通用的通信模块整合 RS485、RS232、以太网、CAN 和光纤等通信单元，可以与通用功率模块协调工作，用于能连路由器搭建、电能质量控制和电压等级提升。本章中也设计了交直流通用模块的实验平台，通过硬件实验验证了模块的通用性。

## 第5章 自治微网能量路由器研发与实验验证

### 5.1 本章引言

为了提高能源供应的灵活性和开放性，能源互联网运行需要接入不同种类、不同规格的分布式可再生能源生产（或存储）设备，如风电、光伏、储能等。它们具有各自不同的能源生产特性，需要根据其具体运行特点采用合适的驱动程序。如风电将产生交流电，需要根据风速决定其发电功率；而光伏发电将产生直流电，需要根据光照条件决定其发电能力。目前为了适应多种不同种类、不同规格的分布式可再生能源生产设备接入能源互联网，需要针对不同的能源生产设备设置专用的接入端口，并且配置专用的驱动程序。

但是，现有的分布式能源生产设备种类众多，且同一种类的能源生产设备又具有多种规格，现有的能量路由器中往往需要配置多种接入端口，并为接入端口配备相应的驱动程序，增加了硬件接口设计的复杂程度，也限制了能量路由器的兼容性。

能量路由器具有能源接入、传输、转换、路由等多种重要功能，是能源互联网中最重要的信息和能源基础设施。为了解决在使用传统能量路由器时，接口设计复杂，通用性差的问题，能量路由器的设计要考虑可扩展性，各个功能块实现模块化，可以通过增加各个功能模块来实现灵活扩展。此外，潮流调节（增加有功、无功统一调节；功率因数达到95%以上）、电能质量调节（增加电能质量暂态、稳态指标的统一调节；暂态电压补偿能力超过30%，电流谐波含量小于5%）和灵活并离网切换等也是在设计能量路由器时必须考虑的问题。

本章综合前述需求，对自治微网能量路由器进行了设计，包括对电气结构和运行模式的研究，以及样机搭建和实验测试。通过七个方面的测试验证了所设计的能量路由器的多种功能。

### 5.2 自治微网能量路由器总体设计方案

图5.1为能量路由器总体结构，能量路由器装置采用模块化、端口化设计，所有装置通过直流母线相连接，并通过一个AC/DC模块的端口1与电网相连接。交流负载端口2通过DC/AC与直流母线相连，端口3通过DC/AC与直流母线相连，另一端连接电子负载。端口4通过DC/AC与直流母线相连，另一端模拟风力发电。端口5通过DC/DC与直流母线相连，另一端模拟光伏发电。端口6通过DC/DC

与直流母线相连,另一端连接锂电池。端口 7 通过 DC/DC 变流器与直流母线相连,另一端连接直流负荷。另外装置还连接了超级电容。装置采用 CAN 总线进行通信。该设计中,所有端口通过直流母线来进行能量的调配,所有端口连接的模块既可以向母线发送电能,也可以从母线吸收电能。

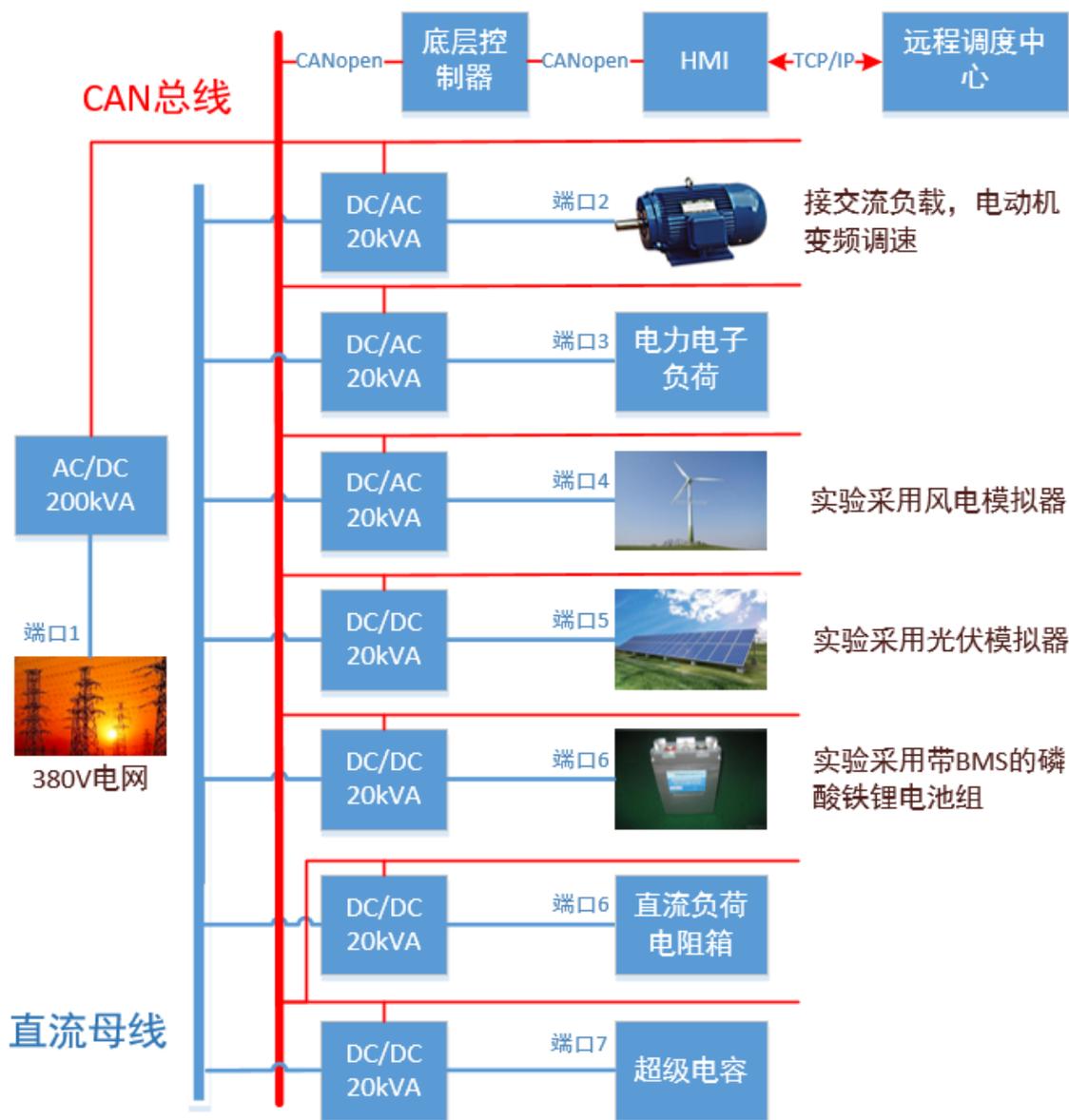


图 5.1 能量路由器总体结构

能量路由器工作模式如图 5.2 所示,主要包括并网整流模式、并网逆变模式、并网恒功率模式、离网限电模式和离网弃电模式。

并网整流模式中,能量路由器从电网吸收电能。并网整流模式开始,当超级电容电压不小于 300V 时,电网电压恒定,超级电容恒电流放电,放电功率为风光发电与负载用电之差,此时储能关断。当超级电容电压小于 300V 时,检测储能状态,

储能容量超过一半时，电网电压恒定，超级电容关断，储能恒流放电，放电功率为风光发电与负载用电之差。当储能容量不足一半时，继续判断其容量，高于 40% 时，如果此时超级电容电压大于 250V，则超级电容关断，储能关断。小于 250V 时，超级电容恒流充电，储能关断。当储能容量低于 40% 时，判断超级电容电压，大于 250V 时则超级电容关断，储能恒流充电。当超级电容电压低于 250V 时，超级电容与储能均充电。

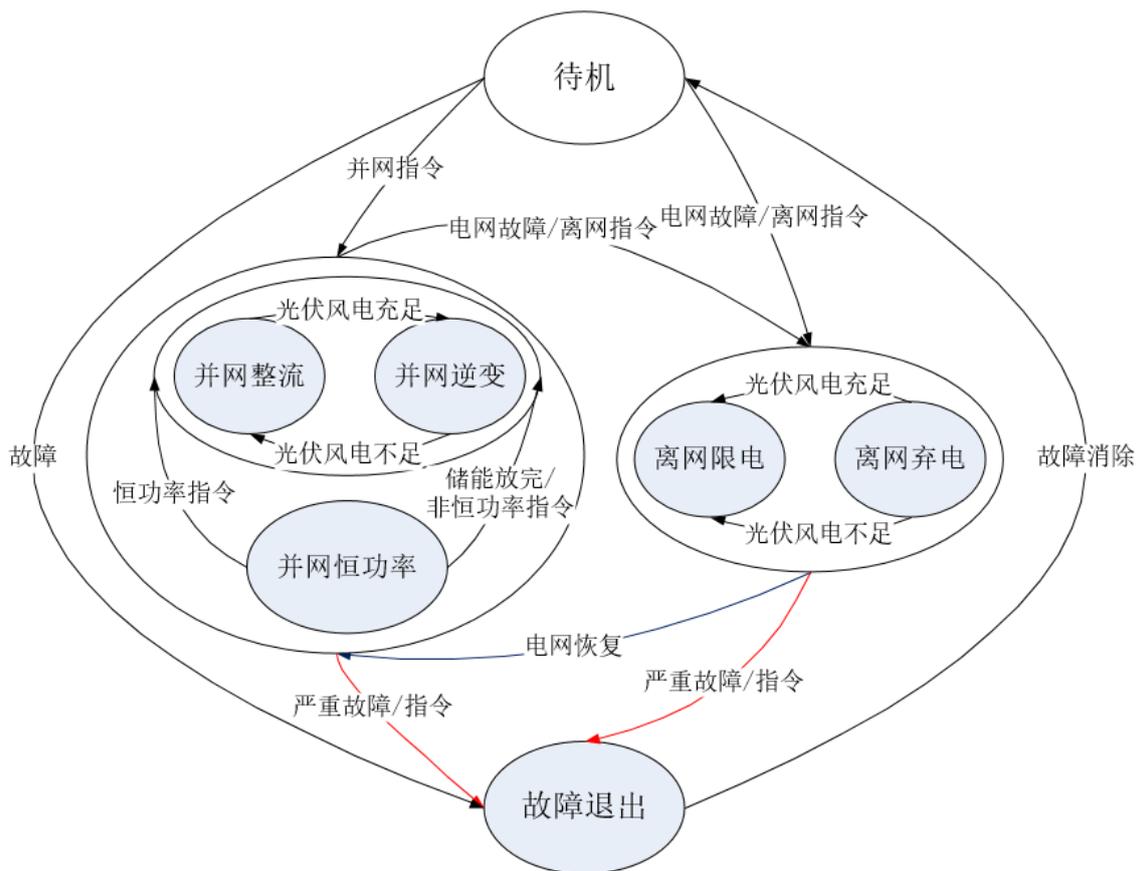


图 5.2 能量路由器工作模式

并网逆变模式中，当能量路由器中储存能量多时，不再需要向电网索取电能。判断在超级电容电压低于 400V 时，对其进行充电，高于 400V 而储能小于 90% 时，对储能进行充电，超级电容高于 400V，储能高于 90% 时，全部关断。

并网恒功率模式中，当储能电压不足时，切掉非重要负载，维持储能电压稳定。

离网限电模式中，当储能电压低于 20% 时，监测光伏与风机出力是否高于负载，如果不是，则强制关闭所有端口即强制关机，若光伏与风机出力大于总的负载消耗，则关断电网，关断超级电容，对储能充电，切断非重要负载。当储能电压高于 20% 时，检测超级电容电压是否在 100V 与 400V 之间，如果不是，则关断电网

电压，关断超级电容电压，储能保持恒压。如果超级电容电压在 100V 到 400V 之间，则断开电网，超级电容保持恒压，储能恒流放电，放电功率为风机、光伏与负载之差。

离网弃电模式中，检测储能电压高于 80% 时，光伏功率为零，关闭超级电容，储能保持恒压。储能电压低于 80% 时，若超级电容电压大于 400V，则关断超级电容，储能保持恒压，若超级电容低于 400V，则超级电容充电，充电电压为风光与负载之差，储能保持恒压。

### 5.3 自治微网能量路由器样机研制

能量路由器样机装置主体由九个实验柜组成，分别为并网柜、交流负载柜、电子负载柜、风力发电柜、光伏发电柜、直流负载柜、控制柜、锂电池储能柜、超级电容储能柜，如图 5.3 所示。



图 5.3 能量路由器样机实体图

交流负载柜内包含一台 DCAC 装置以及模拟阻性负载、感性负载、容性负载。交流负载柜内 DCAC 主接线一端连接至直流母线，另一端内连接至模拟负载；装置基本运行在稳交流电压模式。

光伏发电柜内包含两台 DC/DC 模块。光伏发电柜内一台 DC/DC 通过隔离变压器、整流桥给高压侧供电然后运行在稳低压侧运行模拟光伏产生电压源；另一台 DC/DC 一端连接至第一台 DC/DC 低压侧，另一端连接至直流母线，运行在恒流放电模式。模拟风力发电柜内包含两台 DC/DC 模块。

直流负载柜内包含一台 DC/DC 装置以及模拟电阻负载。直流负载柜内 DC/DC 高压侧一端连接至直流母线，另一端低压侧连接至模拟负载；装置基本运行在稳低压侧电压模式。

控制柜内包含两台 DC/DC 装置以及超级电容和锂电池负载。控制柜内两台 DC/DC 高压侧一端连接至直流母线，另一端低压侧分别连接至超级电容和锂电池；装置基本运行在恒流充电或者恒流放电模式。

## 5.4 实验结果

根据北京市科委的验收条件，本节给出了七个方面的实验结果。实验在第三方测试单位天津天传电控设备检测有限公司的监督下进行。

### 5.4.1 系统容量和端口接入多类源荷实验

启动并网变流器，使直流母线上升到 700V，投入各模块运行。记录测量点的容量及总容量，测量结果表 5.1、表 5.2 和表 5.3 所示。结果显示系统容量达到 320kVA 且可接入多种源荷。

表 5.1 各端口容量测试

测量项目	接入电网	接入交流电阻负载和电抗负载	接入交流电子负载	接入风电	接入光伏	接入直流负载	接入超级电容
实测容量 (KVA)	108.78	13.46	14.86	19.44	21.70	12.76	22.20
总容量 (KVA)	允许值			>100			
	实测值			213.20			

表 5.2 电源端口容量

测量点	容量 (KVA) 允许值	容量 (KVA)	接入电源种类 允许值	接入电源种类
电网	>1	108.78		
风电	>1	19.44		
光伏	>1	21.70	≥2	电网, 风机, 光伏, 储能 (放电), 共 4 类
超级电容放电	>1	22.20		

表 5.3 负荷端口容量

测量点	容量 (KVA) 允许值	容量 (KVA)	接入负荷种类 允许值	接入负荷种类
交流电阻负载 和电抗负载	>1	13.46		交流电阻, 交 流电抗, 电子 负载, 直流负 载, 储能 (充 电), 共 4 类
交流电子负载	>1	14.86	≥3	
直流负载	>1	12.76		
超级电容充电	>1	22.76		

#### 5.4.2 有功调节实验

按实验结构示意图接入电路, 启动 200kVA AC/DC 并网柜和控制柜。在控制柜上下发有功功率指令, 测量考察点的有功功率, 测量结果如表 5.4 所示, 结果显示装置具有一定的有功调节能力。

表 5.4 有功调节功率测试结果

有功期望值 (kW)	有功实际值(kW)	误差	
		允许值	实测值
-20	-20.13	<5%	0.65%
20	20.19	<5%	0.95%

#### 5.4.3 无功调节实验

启动 200kVA AC/DC 并网柜, 下发向电网发送无功功率指令, 测量考察点的功率, 测量结果测量结果如表 5.5 所示, 结果显示装置具有一定的无功调节能力。

表 5.5 无功调节功率测试结果

有功期望值 (kVar)	有功实际值(kW)	误差	
		允许值	实测值
100 (感性)	100.28	<5%	0.28%
100 (容性)	100.55	<5%	0.55%

#### 5.4.4 稳定功率因数实验

启动 200kVA AC/DC 并网柜, 直流负载柜和交流负载柜。测量考察点的功率因数。投入交流负载柜里的电阻负载和直流负载柜的五组负载, 记录此时的考察的功率因数; 再投入交流负载柜的电抗负载, 记录考察点的功率因数, 测量结果如表 5.6 所示, 稳定功率因数达到 95%以上。

表 5.6 功率因数实验结果

	允许值	无负载投入	电阻负载投入	电阻和电抗负载投入
功率因数	$\geq 0.95$	0.95	0.97	0.98

#### 5.4.5 谐波补偿实验

启动 200kVA AC/DC 并网柜，投入谐波负载，测量考察点的电流谐波，投入点的电流谐波，测量结果显示电流谐波含量小于 5%。

表 5.7 谐波补偿测量结果

测试点	谐波失真允许值	谐波失真实测值
考察点（谐波源投入前）	$< 5\%$	0.27%
考察点(谐波源投入后)	$< 5\%$	0.27%
投入点	$> 5\%$	21.18%

#### 5.4.6 系统响应时间实验

启动 200kVA AC/DC 并网柜和直流负载柜。直流母线电压为 540V，投入 3 组电阻负载。设定直流负载柜的电压为 200V，稳定后，将直流负载柜的电压突升为 400V，测量电压收敛到 400V 的 5%误差范围内的时间，测量结果如图 5.4 和表 5.8 所示，响应时间为 8.8 毫秒。

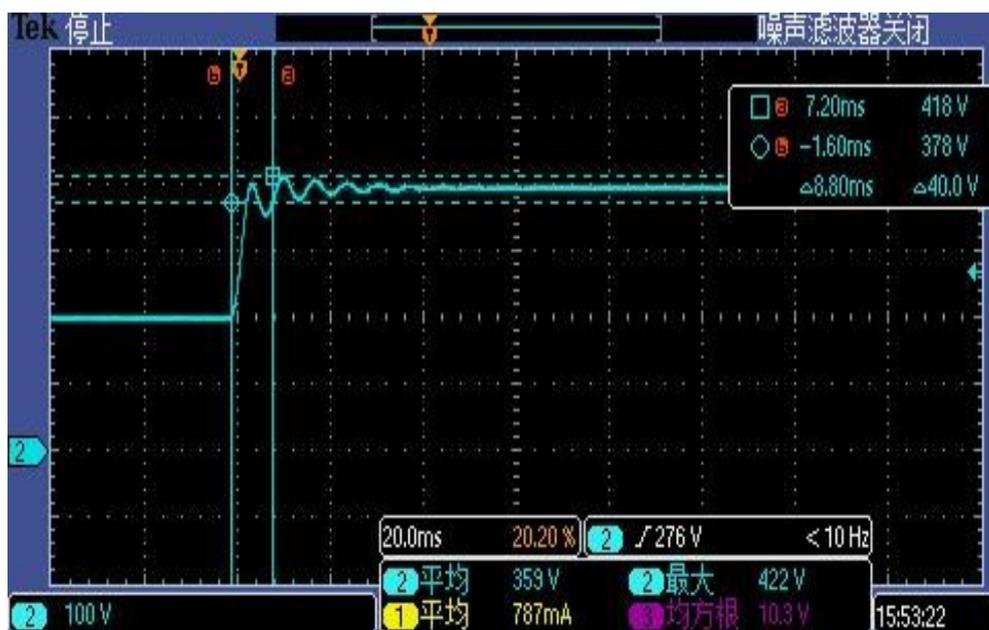


图 5.4 系统响应时间测量结果

表 5.8 系统响应时间测量结果

允许值	实测值
<10ms	8.8ms

#### 5.4.7 电压跌落补偿能力实验

按电压跌落补偿能力实验示意图接入电路，启动并网柜和直流负载柜，投入一组直流负载，直流电压设为 230V，记录电网接口和直流负载接口的电压波形。然后断开负载分压电阻开关，由于电阻分压将产生相应的电压跌落，记录此时的负载端口电压波形。电压跌落试验测量结果全过程如图 5.5 所示。其余测量结果如图 5.6、图 5.7 和表 5.9 所示。系统的暂态电压补偿能力超过 30%。

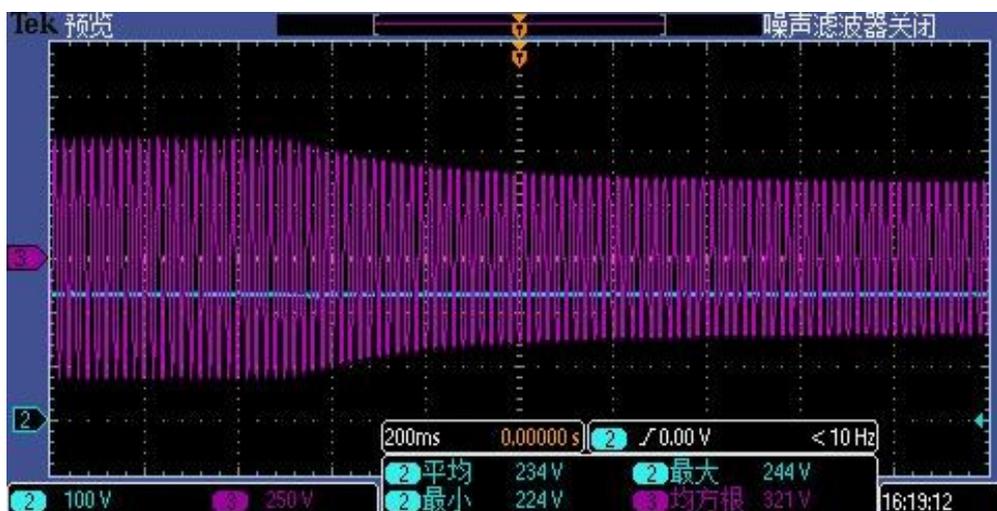


图 5.5 电压跌落试验测量结果全过程

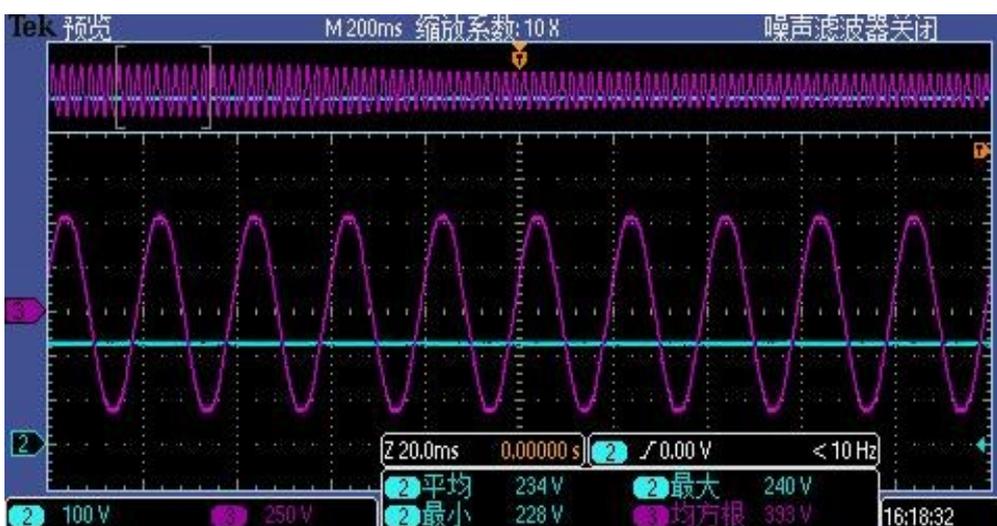


图 5.6 电网电压跌落前



图 5.7 电网电压跌落后

表 5.9 电压跌落补偿能力测量结果

测试点	允许值(电压)	跌落前电压	跌落后电压
电网端口	跌落大于 30%	393V	265V
直流负载口	维持在 218V~242V 之间	234V	235V

## 5.5 本章小结

本章对自治微网能量路由器进行了设计。首先给出了整体的结构、功能和运行模式，给出了各个模式中每个能量路由器模块的具体响应。通过七个方面的实验验证，表明已完成装置研制与调试。样机的参数为：

(1) 电压等级为 380V，系统容量达到 320KVA，响应时间为 8.8 毫秒，接入电源种类有四种：电网、风电、光伏、储能。负荷种类四类：阻性负载、电力电子负载、容性负载和电动机负荷。

(2) 能量路由器具有潮流调节模式，包含有功调节和无功调节，稳定功率因数达到 95%以上。具有电能质量调节模式，包含电能质量暂态、稳态指标的统一调节，暂态电压补偿能力超过 30%，电流谐波含量小于 5%。



## 第6章 总结与展望

### 6.1 论文工作总结

论文主要开展了四个方面的工作和研究：

(1) 研究了能量路由器和能源互联网的时域控制方法。通过常微分方程和随机微分方程对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统的动态特性进行时域建模，分别设计了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器，并通过MATLAB的线性矩阵不等式工具箱求解。仿真结果验证了时域鲁棒混合 $H_2/H_\infty$ 控制器和随机鲁棒 $H_\infty$ 控制器的有效性。

(2) 研究了能量路由器和能源互联网的频域控制方法。从频域角度对单个能量路由器系统和典型能源互联网系统进行建模，同时考虑了多种分布式能源的接入、母线频率或电压的管理以及成本优化运行等问题，通过粒子群算法得到最优解，获得最佳的PI控制器参数。在Simulink中的仿真结果证明了该方法的有效性。

(3) 设计了交直流通用变流器。以二极管钳位型三电平变流器的结构为基础，设计了交直流通用的标准化功率模块，可以同时实现ACDC、DCAC和DCDC。通用的通信模块整合RS485、RS232、以太网、CAN和光纤等通信单元，可以与通用功率模块协调工作，用于能连路由器搭建、电能质量控制和电压等级提升。设计并搭建了交直流通用模块的实验平台，通过硬件实验验证了模块的通用性。

(4) 开发了自治微网能量路由器。设计了整体的结构、功能和运行模式，详细介绍了各个模式中每个能量路由器模块的具体响应方式。通过七个方面的硬件实验验证，表明已完成装置研制与调试。

### 6.2 未来工作展望

能量路由器是能源互联网的核心器件，除本文研究的内容外，未来还需开展以下几点工作：

(1) 本文中提出的时域和频域控制方法仍需改进，使用深度学习方法对发电和耗电量进行精准预测，整套控制方案应用到交直流通用变流器或能量路由器实体装置中。

(2) 交直流通用变流器的实验平台需要再设计，改进外部结构和功率板布线等，提高变流器集成化程度和可靠性，应用于实际的电力系统中。

(3) 将自治微网能量路由器样机部署在海淀北区示范项目中。针对中高电压等级，设计城镇级的能量路由器。

## 参考文献

- [1] 曹军威, 孟坤, 王继业, et al. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(6):714-727.
- [2] Cao J, Yang M. Energy Internet - Towards Smart Grid 2.0[C]// Fourth International Conference on Networking & Distributed Computing. IEEE Computer Society, 2013.
- [3] 携手推进“一带一路”建设[J]. 理论学习, 2017(6):14-17.
- [4] Zhang J, Wang W, Bhattacharya S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic[C]// Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, 2012.
- [5] Lu S, Zhao Z, Ge J, et al. A new power circuit topology for energy router[C]//International Conference on Electrical Machines & Systems. IEEE, 2014.
- [6] Yin L, Weng X, Zhang K, et al. A new topology of energy router with multiple HVAC ports for power distribution networks[C]// International Conference on Electrical Machines & Systems. IEEE, 2017.
- [7] Wang R, Wu J, Qian Z, et al. A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network[C]// IEEE Transaction on Industrial Information, 2017: 3275-3285.
- [8] Erol-Kantarci M, Sarker J H, Mouftah H T. Energy routing in the smart grid for Delay-Tolerant Loads and Mobile Energy Buffers[C]// Computers & Communications. IEEE, 2013.
- [9] 盛万兴, 段青, 梁英, et al. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3760-3769.
- [10] Hambridge S, Huang A Q, Yu R. Solid State Transformer (SST) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2015.
- [11] Miao J, Zhang N, Kang C, et al. Steady-state Power Flow Model of Energy Router Embedded AC Network and Its Application in Optimizing Power System Operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017:1-1.
- [12] Lv T, Ai Q. Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources[J]. Applied Energy, 2016, 163:408-422.
- [13] Kou P, Liang D, Gao L. Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management[J]. APPLIED ENERGY.
- [14] Fang X, Yang Q, Wang J, et al. Coordinated dispatch in multiple cooperative autonomous islanded microgrids[J]. Applied Energy, 2016, 162:40-48.
- [15] Liu Y, Fang Y, Li J. Interconnecting Microgrids via the Energy Router with Smart Energy Management[J]. Energies, 2017, 10(9):1297-.
- [16] Yi P, Zhu T, Jiang B, et al. Deploying Energy Routers in an Energy Internet Based on Electric

- Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6):4714-4725.
- [17] Wu J, Guan X. Coordinated Multi-Microgrids Optimal Control Algorithm for Smart Distribution Management System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):2174-2181.
- [18] Niknam T, Azizipanah-Abarghooee R, Narimani M R. An efficient scenario-based stochastic programming framework for multi-objective optimal micro-grid operation[J]. Applied Energy, 2012, 99(none):455-470.
- [19] Zheng X, Li Q, Li P, et al. Cooperative Optimal Control Strategy for Microgrid under Grid-Connected and Islanded Modes[J]. International Journal of Photoenergy, 2014, 2014:1-11.
- [20] Zhao J. Distributed control and optimization in DC microgrids[M]. Pergamon Press, Inc. 2015.
- [21] Bevrani H, Feizi M R, Ataee S. Robust frequency control in an islanded microgrid:  $H_\infty$  and  $\mu$ -Synthesis approaches [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(2):706-717.
- [22] Singh V P, Mohanty S R, Kishor N, et al. Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46:294-305.
- [23] Baghaee H R, Mirsalim M, Gharehpetian G B, et al. A Decentralized Robust Mixed  $H_2/H_\infty$  Voltage Control Scheme to Improve Small/Large-Signal Stability and FRT Capability of Islanded Multi-DER Microgrid Considering Load Disturbances[J]. IEEE Systems Journal, 2017:1-12.
- [24] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust LFC in a Smart Grid With Wind Power Penetration by Coordinated V2G Control and Frequency Controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):371-380.
- [25] Shayeghi H, Jalili A, Shayanfar H A. A robust mixed  $H_2/H_\infty$  based LFC of a deregulated power system including SMES[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(10):2656-2668.
- [26] Kennedy J. Particle Swarm Optimization[J]. Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks, (Perth, Australia), Nov. 27-Dec.
- [27] Trung B, Parnichku M. Balancing Control of Bicyrobo by Particle Swarm Optimization-Based Structure-Specified Mixed  $H_2/H_\infty$  Control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(4):1.
- [28] Xu S, Chen T. Robust  $H_\infty$  control for uncertain stochastic systems with state delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(12):2089-2094.
- [29] Chen G, Yang M, Yu L. Mixed  $H_2 / H_\infty$  Optimal Guaranteed Cost Control of Uncertain Linear Systems[J]. 系统科学与信息学报: 英文版, 2004(3):409-416.
- [30] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, et al. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1):114-124.
- [31] Han X, Yang F, Bai C, et al. An Open Energy Routing Network for Low-Voltage Distribution Power Grid[C]// 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). IEEE, 2017.
- [32] Wang Y, Xie L, De Souza C E. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems[M].

- 
- Elsevier Science Publishers B. V. 1992.
- [33] Gahinet P, Nemirovskii A, Laub A J, et al. The LMI control toolbox[C]// IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, 2002.
- [34] Erol-Kantarci M, Sarker J H, Mouftah H T. Energy routing in the smart grid for Delay-Tolerant Loads and Mobile Energy Buffers[C]// Computers & Communications. IEEE, 2013.
- [35] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid system with plug-in hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1):804-811.
- [36] Kottick D, Blau M, Edelman D. Battery energy storage for frequency regulation in an island power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(3):455-459.
- [37] Singh V P, Mohanty S R, Kishor N, et al. Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46:294-305.
- [38] Gu D, Petkov P, Konstantinov M, Robust Control Design with MATLAB, Springer, New York, Feb. 2005.
- [39] Ho S J, Ho S Y, Hung M H, et al. Designing structure-specified mixed H<sub>2</sub>/H<sup>∞</sup> optimal controllers using an intelligent genetic algorithm IGA[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(6):1119-1124.
- [40] Carpinelli G, Mottola F, Proto D, et al. A Multi-Objective Approach for Microgrid Scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5):2109-2118.
- [41] Li X, Song Y J, Han S B. Study on Power Quality Control in Multiple Renewable Energy Hybrid MicroGrid System[C]// Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. IEEE, 2007.
- [42] Bevrani H, Francois B, Ise T. Robust Microgrid Control Synthesis[M]// Microgrid Dynamics and Control. John Wiley & Sons, Inc. 2017.
- [43] Ambia M N, Al-Durra A. Adaptive power smoothing control in grid-connected and islanding modes of hybrid micro-grid energy management[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, 7(3):033104.
- [44] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart micro grid based on specified-structure mixed H<sub>2</sub>/H<sup>∞</sup> control technique[J]. Applied Energy, 2011, 88(11):3860-3868.
- [45] Nabae A, Takahashi I, Akagi H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, IA-17(5):518-523.
- [46] Dai N Y, Wong M C, Han Y D. Application of a three-level NPC inverter as a three-phase four-wire power quality compensator by generalized 3DSVM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2):440-449.

## 致 谢

感谢曹军威老师三年多来在科研、学术、做人等方面对我的耐心教诲和悉心教导，帮助我从刚入组时连论文检索都不了解的“白丁”成长为立志在未来继续走学术道路的清华大学合格毕业生。曹老师以身作则，言传身教，向我呈现了一名优秀的科研工作者必备的品质。

感谢实验室赵兵兵师兄，杨刚师兄，张婉璐师姐、尤海霞同学、张泽浩同学、秦钰超师弟的陪伴与帮助。

感谢杨洁、华昊辰几位博士后在科研方法和论文撰写方面对我的指导。

感谢胡俊峰、谢挺、田学龙几位工程师的工程经验的传授和在电力实验中的指导与保护。

感谢上海交通大学姚刚老师、周荔丹老师在电力电子实验设计和仿真等方面的指导。感谢上海交通大学浦仕应同学、张弢师弟在电路分析、实验操作等方面的帮助。

感谢我的父母、好友一直以来对我的鼓励和支持。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_

## 个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历

1994年6月9日出生于天津市静海区。

2012年9月考入清华大学自动化系自动化专业，2016年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2016年9月免试进入清华大学自动化系控制科学与工程专业，攻读工学硕士学位至今。

### 发表的学术论文

- [1] 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 6th Int. Conf. on Smart Energy Grid Engineering, Oshawa, Canada, Aug. 2018, in press. (Best Paper Award)
- [2] C. Hao, and J. Cao, "Design and Application of Standardized Power and Communication Module for Energy Router," in Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Energy Internet, Beijing, China, May. 2018, pp.13-18.
- [3] C. Hao, H. Hua, Y. Qin, and J. Cao, "Robust Controller Design for Energy Router in Energy Internet via Mixed  $H_2/H_\infty$  Control Technique," in Proc. IEEE 10th PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. 2018, Sabah, Malasia, Oct. 2018, in press.

### 参加的研究项目

- [1] 自治微网能源路由器研制与示范应用（北京市科学技术委员会 grant No. Z161100000416004）
- [2] 能源互联网建模、分析与优化理论研究（国家自然科学基金 grant No. 61472200）