基于深度强化学习的能源互联网虚拟同步发电机控制研究

（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： 丁 晓 可

指 导 教 师： 曹 军 威　研究员

二〇二四年五月

基于深度强化学习的能源互联网虚拟同步发电机控制研究

丁 晓 可

Research on Deep Reinforcement Learning Based Virtual Synchronous Generator Control in Energy Internet

Thesis submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Science

in

Control Science and Engineering

by

Ding Xiaoke

Thesis Supervisor： Professor Cao Junwei

May, 2024

学位论文公开评阅人和答辩委员会名单

公开评阅人名单

董　炜	副研究员	清华大学
熊智华	副教授	清华大学

答辩委员会名单

主席	叶　昊	教授	清华大学
委员	梁　斌	教授	清华大学
	张和明	研究员	清华大学
	曹　丽	副教授	清华大学
	熊智华	副教授	清华大学
秘书	吕文祥	工程师	清华大学

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；（3）按照上级教育主管部门督导、抽查等要求，报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

作者签名：_____　　导师签名：_____

日　　期：_____　　日　　期：_____

摘　要

随着新能源发电装机容量及占比的不断提升，传统电力系统难以支持分布式发电的灵活性需求，能源互联网（Energy Internet）的发展，为新能源发电的大规模接入提供了支撑。新能源通过电力电子设备接入电力系统，缺乏惯性和阻尼。虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）控制模拟传统同步发电机的暂态过程，使变流器展现出与同步发电机相似的惯性特点。

然而，相比于其他控制方式，VSG 原理更加复杂，单台 VSG 参数整定更加困难；由于控制环路中引入了下垂机制，在线路阻抗分布不理想的情况下，并联 VSG 的输出功率可能无法按比例分配；同时，由于新能源分布式系统可以脱离电力系统工作于孤岛模式（Islanded Mode），交流侧的电压不再受大电网钳制，功率变化会使变流器交流侧输出的电压频率出现偏差，需要进行频率的二次恢复。

深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）的发展为上述问题带来了新的解决方案。深度确定性策略梯度（Deep Determinist Policy Gradient, DDPG）能够处理连续状态空间和连续动作空间的任务，通过与环境交互输出最优的动作，适合处理 VSG 系统参数优化的问题。

通过将 VSG 控制与 DDPG 算法相结合，本文的主要贡献如下：

（1）针对单台 VSG 参数整定困难问题，分析 VSG 有功功率及频率的响应过程，得出其动态过程与虚拟转动惯量和阻尼系数的关系，并设计参数协同自适应策略对参数进行实时调整，实现了有功功率及频率更优的调节过程；然后使用 DDPG 算法，将虚拟转动惯量和阻尼系数作为智能体输出，仿真结果表明，该 DDPG 算法使得 VSG 的动态过程进一步优化。

（2）针对并联 VSG 线路阻抗不一致的问题，分析线路阻抗对 VSG 控制过程的影响，验证了虚拟阻抗对并联 VSG 功率按比例分配的有效性；随后，引入 DDPG 算法对虚拟阻抗进行自适应调节，实现了更加精准的功率分配，并降低了虚拟阻抗对输出电压的不利影响。

（3）针对孤岛 VSG 在功率变化时引起的频率偏差问题，首先引入频率偏差的积分环节来实现二次调频功能；进一步地，采用 DDPG 算法直接对功率参考值进行补偿从而实现频率的恢复，仿真结果显示，基于 DDPG 算法的二次调频方式能够更加快速地实现频率恢复。

关键词：虚拟同步发电机；深度强化学习；自适应控制；虚拟阻抗；二次调频

Abstract

With the increasing installed capacity and proportion of new energy power generation, the traditional power system is difficult to support the flexible demand of distributed power generation. The development of Energy Internet provides support for large-scale access of new energy power generation. New energy sources are connected to the power system through the power electronic equipment, which lacks inertia and damping. Virtual Synchronous Generator (VSG) control simulates the transient process of traditional synchronous generators, making the dynamic process of the converter show similar inertial characteristics with the synchronous generator.

However, VSG is more complicated than other converter control methods, and it is more difficult to adjust the parameters of a single VSG. Due to the droop mechanism introduced in the control loop, the output power of parallel VSG may not be proportional when the line impedance distribution is not ideal. Meanwhile, because the new energy distributed system can be separated from the power system and work in the Islanded Mode, the voltage on the AC side is no longer constrained by the large power grid. In this case, the change of power demand will cause the frequency to deviate on the AC side of the converter, which needs a further control to restore.

The development of Deep Reinforcement Learning (DRL) has brought new solutions to the above problems. Deep Determinist Policy Gradient (DDPG) can handle tasks in continuous state space and continuous action space, and output optimal actions through interaction with the environment, which is suitable for dealing with the parameter optimization of VSG system.

By combining VSG control with DDPG algorithm, the main contributions of this paper are as follows:

(1) In view of the difficulty of parameter setting of a single VSG, the response process of VSG's active power and frequency is analyzed, and the relationship between its dynamic process and virtual moment of inertia and damping coefficient is obtained, and the parameter collaborative adaptive strategy is designed to adjust the parameters in real time, achieving a better adjustment process of active power and frequency. Then DDPG algorithm is used to take the virtual moment of inertia and damping coefficient as the output of the agent. The simulation result shows that the DDPG algorithm is further

improved.

(2) Aiming at the problem of inconsistency of parallel VSG line impedance, the influence of line impedance on VSG control process is analyzed, and the effectiveness of virtual impedance on proportional power distribution of parallel VSG is verified. Then, DDPG algorithm is introduced to adjust the virtual impedance to achieve more accurate power distribution and reduce the adverse effect of virtual impedance on the output voltage.

(3) In view of the frequency deviation caused by the power change of island VSG, the integration of frequency deviation is first introduced to achieve the function of secondary frequency modulation. Further, DDPG algorithm is used to directly compensate the power reference value to realize the frequency recovery. The simulation result shows that the secondary frequency modulation method based on DDPG algorithm can realize the frequency recovery more quickly.

Keywords: Virtual synchronous generator; deep reinforcement learning; adaptive control; virtual impedance; secondary frequency modulation

目 录

摘 要 I
Abstract II
目 录 IV
插图清单 VII
附表清单 X
第 1 章 引言 1
1.1 研究背景和意义 1
1.2 研究现状 2
1.2.1 AC/DC 变流器控制策略 2
1.2.2 强化学习的发展和 DDPG 原理 7
1.2.3 强化学习在虚拟同步发电机中的应用 13
1.3 本文主要内容 14
第 2 章 虚拟同步发电机控制 16
2.1 VSG 基本原理 16
2.1.1 转子运动方程 17
2.1.2 有功-频率控制 17
2.1.3 无功-电压控制 19
2.1.4 电压电流双闭环控制 20
2.2 关键参数对 VSG 输出特性的影响 21
2.2.1 对有功功率响应的影响 21
2.2.2 对频率响应的影响 23
2.3 仿真验证 23
2.3.1 虚拟转动惯量对 VSG 的影响 24
2.3.2 虚拟阻尼系数对 VSG 的影响 25
2.4 本章小结 27
第 3 章 VSG 参数自适应控制策略 29
3.1 VSG 虚拟转动惯量及阻尼的传统协同自适应控制 29
3.1.1 VSG 动态过程分析 29
3.1.2 仿真对比 31
3.2 基于 DDPG 算法的参数自适应控制 35

3.2.2 环境与智能体设计 36
3.2.3 训练过程 38
3.3 结果对比 40
3.4 本章小结 42
第 4 章 VSG 虚拟阻抗自适应控制 43
4.1 多 VSG 并联的线路阻抗问题 43
4.1.1 功率耦合问题 43
4.1.2 无功分配问题 45
4.2 基于虚拟阻抗的 VSG 控制 45
4.2.1 虚拟阻抗原理 45
4.2.2 虚拟阻抗环路设计 47
4.2.3 基于虚拟阻抗的 VSG 并联系统 48
4.3 基于 DDPG 算法的自适应虚拟阻抗技术 56
4.3.1 环境与智能体设计 56
4.3.2 训练过程 58
4.4 结果对比 59
4.5 本章小结 62
第 5 章 VSG 二次调频策略 63
5.1 调频过程概述 63
5.2 VSG 的二次调频策略 64
5.2.1 VSG 二次调频设计 64
5.2.2 VSG 二次调频仿真 67
5.3 基于 DDPG 算法的 VSG 二次调频 69
5.3.1 环境与智能体设计 69
5.3.2 训练过程 71
5.4 结果对比 72
5.5 本章小结 75
第 6 章 总结与展望 76
6.1 论文总结 76
6.2 研究展望 77
参考文献 78
致 谢 82
声 明 83

个人简历、在学期间完成的相关学术成果.....84
指导教师评语.....85
答辩委员会决议书 86

插图清单

图 1.1 P/Q 控制工作曲线 3
图 1.2 V/f 控制工作曲线 4
图 1.3 Droop 控制工作曲线 5
图 1.4 MDP 智能体与环境交互过程 8
图 1.5 DDPG 算法架构 13
图 2.1 VSG 控制系统基本框图 16
图 2.2 VSG 虚拟转子运动模块 17
图 2.3 调速器环节原理 18
图 2.4 虚拟调速器环节 18
图 2.5 有功-频率控制环路 18
图 2.6 简化后的有功-频率控制环路 19
图 2.7 励磁器环节原理 19
图 2.8 无功-电压控制环路 20
图 2.9 电压电流双环控制框图 20
图 2.10 VSG 功率小信号模型 22
图 2.11 D固定、J不同时的有功功率响应 24
图 2.12 D固定、J不同时的频率响应 24
图 2.13 J固定、D不同时的有功功率响应 25
图 2.14 J固定、D不同时的频率响应 25
图 2.15 过阻尼系统的有功功率响应 26
图 2.16 过阻尼系统的频率响应 26
图 2.17 负阻尼系统的有功功率响应 27
图 2.18 负阻尼系统的频率响应 27
图 3.1 同步发电机功角及角频率振荡曲线 29
图 3.2 自适应J与恒定参数的频率响应对比 32
图 3.3 自适应J与恒定参数的有功功率对比 32
图 3.4 自适应D与恒定参数的频率响应对比 33
图 3.5 自适应D与恒定参数的有功功率对比 33
图 3.6 不同控制方式下的频率响应对比 34

图 3.7　不同控制方式下的有功功率对比 34
图 3.8　J/D 协同自适应下转动惯量取值变化 35
图 3.9　J/D 协同自适应下转动惯量取值变化 35
图 3.10　Critic 网络结构示意图 38
图 3.11　智能体与单机 VSG 系统交互过程 38
图 3.12　DDPG 与协同自适应方法的频率响应对比 40
图 3.13　DDPG 与协同自适应方法的有功功率响应对比 40
图 3.14　DDPG 算法下虚拟转动惯量取值变化 41
图 3.15　DDPG 算法下阻尼系数取值变化 41
图 4.1　双机并联 VSG 系统模型 43
图 4.2　加入虚拟阻抗的双机并联 VSG 系统模型 45
图 4.3　主导法虚拟阻抗矢量图 46
图 4.4　补偿法虚拟阻抗矢量图 46
图 4.5　加入虚拟阻抗的电压电流双环控制框图 47
图 4.6　虚拟阻抗示意图 48
图 4.7　无虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的无功功率 49
图 4.8　无虚拟阻抗时并联 VSG 的输出电压 49
图 4.9　无虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的总功率 50
图 4.10　固定虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的无功功率 51
图 4.11　固定虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的总功率 51
图 4.12　固定虚拟阻抗时 VSG1 的输出电压 51
图 4.13　增大虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的无功功率 52
图 4.14　增大虚拟阻抗后 2 个 VSG 输出无功功率比值 53
图 4.15　增大虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的总功率 53
图 4.16　增大虚拟阻抗后 VSG1 的输出电压 53
图 4.17　减小虚拟阻抗后初始阶段的无功功率 54
图 4.18　减小虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的无功功率 54
图 4.19　减小虚拟阻抗后初始阶段的总功率 54
图 4.20　减小虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的总功率 55
图 4.21　减小虚拟阻抗后初始阶段 VSG1 的输出电压 55
图 4.22　减小虚拟阻抗后 VSG1 输出电压 55
图 4.23　不同虚拟阻抗取值时的有功功率 56
图 4.24　不同虚拟阻抗取值时的无功功率 56

图 4.25 Critic 网络结构示意图 58
图 4.26 智能体与单机 VSG 系统交互过程 59
图 4.27 DDPG 算法中 VSG 双机并联输出的总功率 60
图 4.28 DDPG 算法中 VSG 双机并联输出的无功功率 61
图 4.29 不同虚拟阻抗下 2 个 VSG 输出无功功率之比 61
图 5.1 一次调频曲线 63
图 5.2 二次调频曲线 64
图 5.3 孤岛模式区域电力系统 64
图 5.4 VSG 二次调频过程曲线 65
图 5.5 加入二次调频环节的有功-频率控制环路 66
图 5.6 无二次调频环节时 VSG 输出频率 67
图 5.7 加入二次调频后 VSG 输出频率 68
图 5.8 有功功率补偿量 68
图 5.9 不同积分系数下 VSG 输出频率 69
图 5.10 Critic 网络结构示意图 71
图 5.11 智能体与孤岛 VSG 系统交互过程 72
图 5.12 DDPG 与 5.2 节中二次调频方法对比 73
图 5.13 智能体输出功率补偿量 73
图 5.14 新参数下 DDPG 与 5.2 节中二次调频方法对比 74
图 5.15 新参数下智能体输出功率补偿量 75

附表清单

表 2.1 J、D与 VSG 有功功率响应的关系 23
表 2.2 J、D对 VSG 影响测试仿真参数 23
表 3.1 不同阶段 J 和 D 取值原则 30
表 3.2 J、D自适应 VSG 控制仿真参数 31
表 3.3 DDPG 算法智能体训练过程 39
表 3.4 基于 DDPG 的J、D自适应控制中智能体相关参数 39
表 3.5 不同J、D调节策略 VSG 动态过程对比 41
表 4.1 VSG 双机并联系统主要参数 48
表 4.2 VSG 双机并联系统不同虚拟阻抗取值 52
表 4.3 基于 DDPG 的虚拟阻抗自适应控制中智能体相关参数 59
表 4.4 不同虚拟阻抗下 VSG 双机并联系统表现 62
表 5.1 孤岛 VSG 仿真参数 67
表 5.2 基于 DDPG 的二次调频中智能体相关参数 72
表 5.3 新的孤岛 VSG 系统参数 74

第1章　引言

1.1　研究背景和意义

在近代经济社会的长足发展过程中，工业始终占据着举足轻重的地位，这也使得能源需求的不断增加。激增的能源需求，导致了煤炭、石油、天然气等化石能源的日益枯竭以及随之而来的环境污染问题。因此，为了更好地实现可持续发展，世界各国纷纷寻求能源结构升级和能源消费转型[1, 2]。2014 年，习总书记提出“四个革命，一个合作”能源安全战略，为我国在新时代的能源发展指明了方向[3, 4]。2020 年 9 月，我国明确提出了 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”的“双碳目标”[5]。为了实现这一目标，我国大力发展新能源发电技术，推动能源清洁转型，积极构建新型电力系统，实现了新能源发电技术的飞跃式发展。截至 2022 年，我国可再生能源发电装机突破 12 亿千瓦，占全国发电总装机的 47.3%，其中风电装机 3.65 亿千瓦，太阳能发电 3.93 亿千瓦，装机规模均列世界第一[6]。

由于新能源发电方式受地理、气候等条件影响大，间歇性与随机性强，直接接入传统电网将使得系统的稳定运行受到巨大的挑战，且新能源发电单机接入成本高。为解决新能源并网的诸多问题，各国纷纷在微电网及主动配电网领域展开研究。

能源互联网（Energy Internet）的概念，最早由美国学者杰里米·里夫金（Jeremy Rifkin）于 2011 年在其著作《第三次工业革命》中正式提出[7]。对于能源互联网及其相关概念的研究，在此之前便已经开始。

2008 年，美国“未来可再生电能传输与管理系统”项目启动[8]，该项目参考传统“互联网+路由器”的架构，构建了新型的能源网络[9]。该能源网络以分布式可再生能源和储能系统为核心，通过分层控制方式建立高效的配电系统，能够实现故障检测、处理以及智能化管理。

德国于 2018 年发起了 E-Energy 项目[10, 11]，该项目以信息通信技术和智能电网为基础，构建了发电、用电、储电一体化的智能能源互联网系统。

日本在传统电力系统的基础上，推出“数字电网计划”，其目标是将当前集中管理的同步大电网逐步细分为异步、自主且彼此间相互连接的区域电网，各个区域电网之间通过数字电网路由器（Digital Grid Router， DGR）相互连接，DGR 能够根据系统当前的运行状态和管理指令对能量进行分配和管理[12]。一方面，DGR 能够协调本区域电网内部的电能分配；另一方面，DGR 能够为不同的区域电网提

供接口，并实现不同区域电网之间的能量调度。

在国内，中国电力科学研究院于 2010 年提出了第三代智能电网“灵活配电系统”的相似理念[13]。国家电网公司于 2014 年提出了“全球能源互联网关键技术与设备研究框架”[14]。中国科学院、南方电网公司以及众多高等院校针对能源互联网背景下相关领域的不同方向开展了各自的研究[15-17]。

综上所述，能源互联网的主要特点和优势有[18]：

（1） 集成了能量分配技术、智能计量技术、实时监控技术和自动调节控制技术；

（2） 与强调集中式管理和调度的智能电网不同，能源互联网关注不同类型的分布式能源(Distributed Energy Resources, DERs)，特别是可再生能源和环境友好型能源，如太阳能、风能、核能、海洋能源，并支持大规模分布式发电和分布式储能系统的接入；

（3） 提供先进的即插即用接口，实现多种方式的能量共享和信息交换。

在新能源分布式发电大量接入的背景下，能源互联网的稳定运行也面临着诸多新挑战：

（1） 新能源发电具有间歇性和波动性特点，电力电子设备缺乏传统同步发电机的惯性和阻尼，其大规模接入会使系统的波动性增加；

（2） 新能源电力系统通常是低压网络，其线路阻抗与传统高压不同，当系统中含有多个分布式电源和储能，线路阻抗的不一致会对并联运行产生影响；

（3） 当以新能源分布式发电为主导的区域能源互联网脱离大电网工作时，分布式电源需要对电压起支撑作用，系统中功率的变化会使电压产生稳态偏差，需要进行二次调频，同时由于缺少传统调频发电机组，二次调频难度增加。

AC/DC 变流器作为分布式电源、储能系统、负荷与电力系统连接的重要接口，对其控制策略进行研究和分析，对能源互联网的发展具有重要意义。

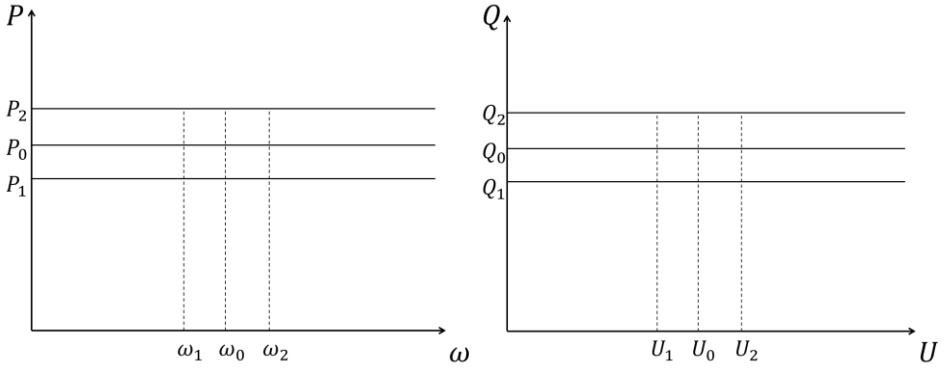
1.2　研究现状

1.2.1　AC/DC 变流器控制策略

AC/DC变流器作为能源互联网中重要的接口设备和能量转换设备，其稳定控制对能源互联网的稳定运行意义重大。当前，AC/DC变流器的控制策略主要有以下几种：

1）P/Q控制

P/Q控制，也称恒定功率控制，是指能量路由器在并网模式（Grid-connected Mode）运行时，当AC/DC模块所连接系统的频率和电压在允许范围内变化时，根据下发的功率指令，能量路由器与电网之间按照指定的有功功率和无功功率进行能量交换[19]。P/Q控制的工作曲线如图1.1所示，当给定功率不变时，工作曲线为水平线，当系统的电压频率和幅值发生变化时，变流器输出的有功和无功功率不变，工作点在曲线上水平移动；改变有功和无功给定值可以使工作曲线上下移动。



（a）有功-频率关系曲线　　（b）无功-电压关系曲线

图 1.1　P/Q 控制工作曲线

在P/Q控制模式下，采样模块采集变流器交流侧经滤波后的电压和电感电流，并进行帕克变换（Park Transformation）得到在dq0坐标系下的电压和电流值，根据功率指令值P_{ref}和Q_{ref}，由式(1-1)计算出当前电压条件下的网侧电流参考值I_{dref}和I_{qref}。

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2}\left(U_d I_d + U_q I_q\right) \\ Q = \dfrac{3}{2}\left(U_q I_d - U_d I_q\right) \end{cases} \tag{1-1}$$

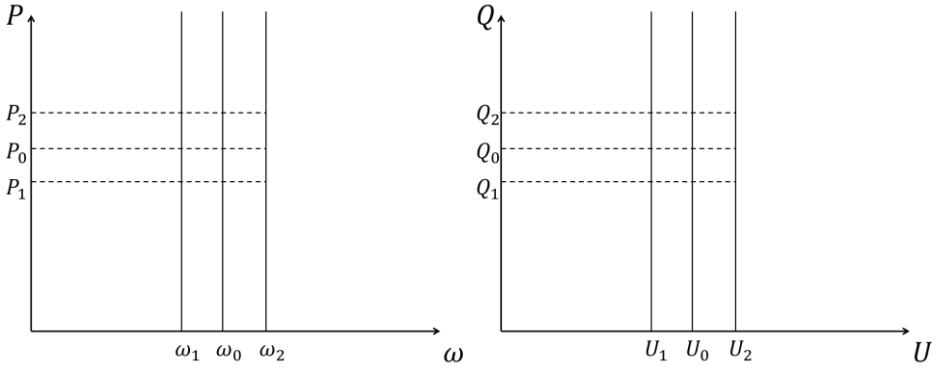
随后将参考值与采样值作差后送入PI控制器，经电流内环后进行帕克反变换得到三相调制信号。

由于P/Q控制方式无法对电压幅值和频率进行控制，因此通常只能工作在并网模式下，此时，交流侧电压的相位和幅值被电网钳住，直流母线电压由能量路由器中其他端口进行支撑，AC/DC模块仅控制功率的方向和大小。

2）V/f控制

V/f控制，也叫恒压恒频控制，是指能量路由器在离网模式（Off-grid Mode）

或孤岛运行（Islanded Mode）时，交流侧按照指定频率和幅值，为交流负荷提供所需的三相交流电压[20]。V/f控制的工作曲线如图1.2所示，当电压的频率和幅值给定时，工作曲线为一条平行于功率轴的直线，当系统的功率发生变化时，变流器输出的电压幅值和频率不发生变化，工作点在平面上垂直移动；改变频率和幅值的额定值可以使工作曲线水平移动。V/f控制方法通常采用电压电流双环控制方式，采样电路采集滤波后的电压和电感电流，外环为电压控制环路，将dq0坐标系下的电压参考值和采样值作差后送入PI控制器，输出作为内环电流环的电流参考值，与dq0坐标系下的电流采样值作差后，经帕克反变换生成调制信号。



（a）有功-频率关系曲线　　（b）无功-电压关系曲线

图 1.2　V/f 控制工作曲线

由于V/f控制的目标是输出恒定幅值和频率的电压，对功率没有直接调节能力，因此受V/f控制的AC/DC变流端口的直流侧通常是容量较大且稳定的直流源，该端口功率的方向和大小由交流侧决定。

3）Droop控制

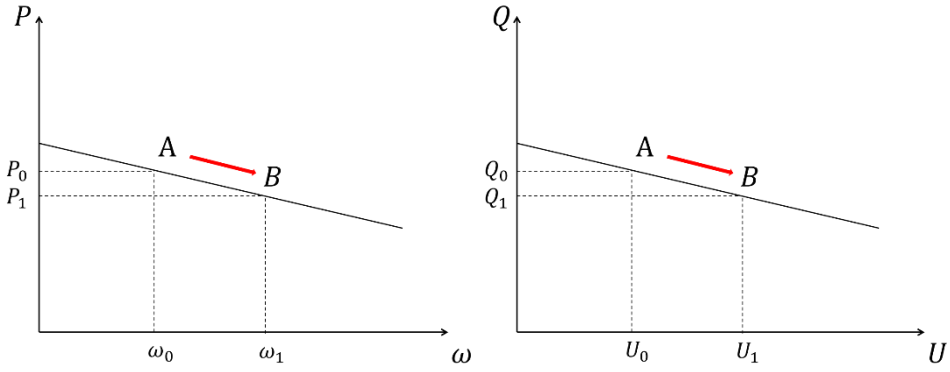
上述 2 种控制方式中，PQ 控制需要工作于并网状态，V/f 控制通常工作于离网模式，均适用于工作场景较为固定的 AD/DC 端口。在能量路由器中，AC/DC 端口工作模式更加灵活，且通常需要具备切换能力，因此 Droop 控制（也称下垂控制）方式更加受到青睐。

同步发电机中有功-频率之间及无功-电压之间具有下垂关系，该关系可以表述为：

$$\begin{cases} f - f_0 = k_f(P - P_0) \\ U - U_0 = k_u(Q - Q_0) \end{cases} \tag{1-2}$$

其中，P_0、Q_0、f_0、U_0为系统的额定值，P、Q、f、U为系统的实际输出值，Droop 控制的设计模拟了这一下垂关系，该下垂关系如图 1.3 所示。

在 Droop 控制中，功率与电压的变化相互关联。以图 1.3（a）为例，当系统工作在 A 点时，AC 侧输出电压为额定角频率ω_0，当有功功率输出下降至P_1时，工作点沿有功频率下垂曲线移动至 B 点，输出角频率上升至ω_1；同理可以得到 Q-U 的调节过程。



（a）有功-频率关系曲线　　（b）无功-电压关系曲线

图 1.3　Droop 控制工作曲线

当模块工作在并网模式时，电压的幅值和相位固定，AC/DC 端口按照设定的下垂曲线进行能量传输；当模块工作在离网模式时，在距离额定工作点偏差不大的范围内，AC/DC 模块按照设定的下垂曲线调整输出的电压和功率。

基于下垂特性，当多个模块并联时，可以通过合理设计下垂系数，在功率发生变化的情况下，使得功率差额能够按照各个模块的容量按比例分配至各个模块承担，从而提高并联系统的稳定性。

然而，下垂曲线的线性关系使得模块输出的电压对功率变化较为敏感，新能源发电的间歇性和波动性以及负荷的随机性会影响系统的动态性能，对系统的稳定性产生威胁。

4）虚拟同步发电机控制

为了解决上述方法各自存在的弊端，研究者们提出了虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）控制。VSG 控制与 Droop 控制类似，在设计思路上都借鉴了同步发电机的下垂特点，此外，VSG 还进一步引入了同步发电机的机械暂态和电磁暂态过程，使得 AC/DC 变流器拥有了与同步发电机类似的惯性和阻尼特性，有效降低了其对于功率变化的敏感性。

虚拟同步发电机的概念是将同步发电机暂态过程满足的数学关系引入控制过程，由于这一过程非常复杂，不同研究者出于不同的考虑及设计思路，提出了诸多不同的 VSG 模型，这些模型根据控制方法的不同，可以分为电流型和电压型两

类。

2007 年，德国的 Hans-Peter Beck 教授等人提出了 Virtual Synchronous Machine（VISYM）方案[21]，该方案模拟了传统同步发电机的七阶模型，对并网系统的总电流进行控制，使输出具备了惯性和阻尼特性。2008 年，比利时的 K. VISSCHER 教授在欧洲 VSYNC 联合项目中首次提出虚拟同步发电机的概念[22]，该方案根据电网频率的变化率向系统提供瞬时惯量支撑，根据频率的稳态偏差量提供一次调频功能。上述方案通过控制电流来实现模拟过程，无法在孤岛模式下提供电压和频率支撑。

针对电流型 VSG 的弊端，更多的电压型 VSG 控制方案被提出。Beck 教授在其电流型 VISYM 的基础上，修改了定子电气方程的实现方式，实现了电压控制。钟庆昌教授团队于年提出了同步变流器（Synchronverter）方案[23]，该方案充分考虑了同步发电机的机械特性、电磁特性及其耦合关系，对转子运动方程和电磁暂态过程同时进行了较为精确的模拟。由于电压型 VSG 在孤岛模式下的自治能力，越来越多的电压型 VSG 方案被提出，电压型 VSG 也成为当前相关研究的重点。

此外，除了上述利用分布式能源模拟发电机的虚拟同步发电机模型，还有将分布式负荷模拟同步电动机暂态特性的虚拟同步电动机（Virtual Synchronous Motor, VSM）模型，本文不再介绍。

VSG 技术的提出，有效应对了电力电子设备低惯性低阻尼问题，为新能源发电方式大规模并网提供了切实可行的解决方案，使得新能源分布式发电也能为电力系统的电压和频率提供有效支撑。文献[24-26]中均采用风力作为直流侧电源，其中，文献[24]指出风力发电具有较强的随机性和波动性，通过引入 VSG 控制方式，在阻尼特性的作用下，风力发电的稳定性得到了提升。文献[25]针对低压电力系统的线路阻抗特性，对风力发电机组的并联运行进行了优化设计。文献[26]针对虚拟转动惯量提出了自适应控制方法，在文献[24]的基础上使 VSG 的动态性能进一步提升。文献[27]中设计了光伏虚拟同步机（Photovoltaic VSG, PV-VSG），结合光伏出力曲线分析得到其稳定运行区域，防止因光伏最大可用功率不足而出现电压跌落。文献[28]针对电动汽车快速充电的多级电路引入了虚拟同步电动机控制策略，降低了电动汽车快速充电接口对电力系统的影响，有利于充电桩的大规模接入。

与此同时，VSG 控制也存在着一些控制设计上的难点。

VSG 的控制过程更加复杂，需要整定的参数更多，相比于传统控制方式，设计难度相对更高。同时，由分布式发电及分布式负荷构成的区域能源互联网，波动性与随机性更大，对系统的动态性能要求更高。且系统工作点变化范围更大，

变化速度更快，一套控制参数可能难以在全范围内实现快速稳定控制，需要使用多套控制参数或引入自适应控制方法，使得控制系统整体设计更加复杂。

其次，对于多变流器并联的场景，每个变流器端口到公共并网点（Point of Common Coupling, PCC）的线路阻抗不一致将会引起变流器间的电流环流以及功率的不合理分配，影响并联稳定性，而低压系统线路阻抗呈现阻性也会使得有功-频率、无功-电压的控制出现耦合。

1.2.2　强化学习的发展和 DDPG 原理

随着人工智能（Artificial Intelligence, AI）技术的迅速发展，其应用领域不断扩展，为传统工业领域注入了新的活力。这其中，强化学习（Reinforcement Learning, RL）是重要的研究热点之一。

强化学习的发展源于20世纪60年代，其创始工作可以追溯到Richard Bellman提出的动态规划（Dynamic Programming, DP）理论，他针对最优控制问题提出了贝尔曼方程（Bellman Equation），为强化学习的发展奠定了基础[29]。Ronald Howard 等人将蒙特卡洛方法引入了最优控制问题，并与 Andrey Kolmogorov 等人正式描述了马尔可夫决策过程[30]（Markov Decision Process, MDP），该过程所描述的智能体（Agent）与环境（Environment）相互作用的框架，也成为强化学习中的重要数学模型。1989年，Christopher Watkins提出了Q学习[31]（Q-learning），被认为是现代强化学习方法的重要里程碑。

根据 MDP，智能体通过接收当前环境的状态信息来决定当前的行动，环境受到该行动的影响给予智能体反馈，智能体根据反馈调整决策方案。该过程可以用元组$\langle S, A, P, R\rangle$来表示，其中：

$S = \{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$表示系统的状态空间（State Space），表示智能体所能观察到的全部状态的集合，可以是离散或连续的；

$A = \{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$表示智能体的动作空间（Action Space），表示智能体所能采取的所有动作的集合，可以是离散或连续的；

P表示状态转移概率（Transition Probability），表示系统在当前状态采取某一动作后转移到下一状态的概率，该转移概率仅与当前状态有关，与此前的状态无关；

R表示奖励函数（Reward Function），是当前状态下智能体采取行动后环境所给予的反馈，每次行动后，智能体都会得到反馈。MDP 中智能体与环境的交互过程如图 1.4 所示。

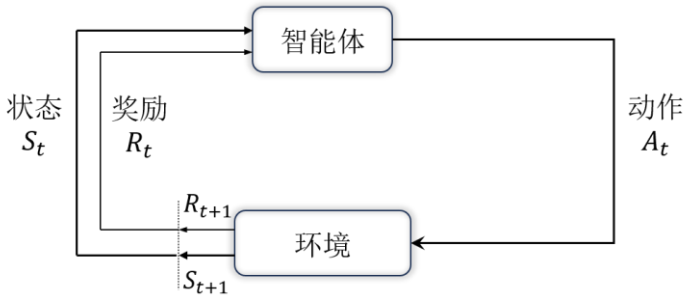


图 1.4　MDP 智能体与环境交互过程

强化学习的目标是找到最优策略来最大化累计奖励的期望[32]。为了找到最优策略，衍生出 2 种不同的强化学习方案：一种是准确估计每个状态下所有动作的收益期望，每次均采取最优动作，该方案被称为基于价值的强化学习（Value-based Reinforcement Learning）；另一种是根据当前环节给予的反馈实时调整策略，成为基于策略的强化学习（Policy-based Reinforcement Learning）。而随着深度学习（Deep Learning, DL）方法的引入，基于上述两种方案的深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）发展迅速。

在基于价值的强化学习方面，深度 Q 网络（Deep Q-network, DQN）标志着 DRL 蓬勃发展的开始，DeepMind 开发的 DQN 在 Atari 游戏中表现优于人类玩家[33]，展现了 DL 与 RL 结合的巨大潜力。在 DQN 中，深度神经网络（Deep Neural Network）代替了传统 Q-learning 中的 Q 值表。此后，针对 DQN 中的动作-价值函数估计问题，Double DQN[34]、Dueling DQN[35]、Prioritized DQN[36]等被陆续提出，提高了 DQN 的学习效率。

基于价值的强化学习方法中，智能体在每一步都会选择具有最高价值的动作，在相同的状态下所采取的行动是确定的，且难以处理诸如机械控制这样的连续动作空间问题。而基于策略的方法直接将策略函数参数化，通过价值函数来更新策略，从而调整输出各种动作的概率。为了寻找最优的策略，信赖域策略优化（Trust Region Policy Optimization, TRPO）对策略更新的大小和方向进行了限制，通过引入 KL 散度（Kullback-Leibler Divergence）来表示新旧策略之间的差距，选定合适的步长，保证策略不会向更坏的方向更新[37]。另一种寻找最优策略的方法被称为策略梯度（Policy Gradient, PG），该方法将策略参数化，计算出其关于动作的策略梯度，沿着梯度的方向调整动作，逐步得到最优策略。若策略具有随机性，即在状态s时，动作a符合参数为θ的概率分布，相同状态下可能输出不同的动作，则被称为随机性策略梯度（Stochastic Policy Gradient, SPG）方法[38]；反之，若每一个状态下输出的动作是确定的，则被称为确定性策略梯度（Deterministic

Policy Gradient, DPG）方法[39]。Actor-Critic 是另一种基于策略梯度理论的常用框架，对于状态 s，Actor 网络输出动作，Critic 网络对该动作的好坏进行评价，并对策略进行更新。基于这一框架，诸如深度确定性策略梯度（Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG）算法[40]、优势动作价值（Advantage Actor-Critic, A2C）算法[41]、异步优势动作价值（Asynchronous Advantage Actor-Critic, A3C）算法[41]、柔性动作-评价（Soft Actor-Critic, SAC）算法[42]以及双延迟深度确定性策略梯度（Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient, TD3）算法[43]等被提出。

在电力系统中，对电气量的状态观察以及对相关参数的调节，通常在连续范围内进行取值，即需要连续的动作空间和状态空间，因此本文的研究工作中均采用能够处理连续状态和连续动作的 DDPG 算法对 VSG 控制进行优化。接下来，对 DDPG 算法的原理进行介绍。

由前述可知，一个强化学习问题通常被描述为马尔可夫决策过程，智能体在学习过程中不断与环境进行交互，获得奖励，并找到能够获得最大累计奖励的方法。

奖励的多少取决于策略（Policy），策略$\pi(s)$是在当前状态s选择动作的依据，即$\pi: S \to A$，含义是从状态到每个动作选择概率之间的映射。记t时刻的奖励为r_t，考虑未来每一时刻的奖励所构成的序列为$r_{t+1}, r_{t+2}, \ldots$，则从t时刻起到最终状态的奖励之和成为回报（Gain），可表示为：

$$G_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \tag{1-3}$$

其中，$\gamma \in [0,1]$表示折扣率，即距离现在越远的奖励对当前的影响越低。

将策略π下状态s所对应的状态价值函数记为$v_\pi(s)$，表示从状态s起，智能体根据策略π选择动作所能获得的期望回报，即：

$$\begin{aligned} v_\pi(s) &= \mathbb{E}_\pi(G_t | S_t = s) \\ &= \mathbb{E}_\pi\left(\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | S_t = s\right) \end{aligned} \tag{1-4}$$

类似地，将策略π下状态s时所选择的动作a的动作价值函数记为$q_\pi(s,a)$，表示从状态s起，根据策略π，选择动作a后，所有可能的决策序列的期望回报，即：

$$\begin{aligned} q_\pi(s,a) &= \mathbb{E}_\pi(G_t | S_t = s, A_t = a) \\ &= \mathbb{E}_\pi\left(\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a\right) \end{aligned} \tag{1-5}$$

由式（1-4）和式（1-5），状态价值与动作价值的关系可以表示为：

$$v_\pi(s)=\sum_{a\in A}\pi(a|s)q_\pi(s,a) \tag{1-6}$$

智能体通过学习所要寻找的最优策略是能够使得状态价值函数最大的策略，即：

$$\pi^*=\arg\max_\pi v_\pi(s) \tag{1-7}$$

如前文所述，DQN 算法是一种基于价值的强化学习算法，通过与深度神经网络结合，将 Q-learning 中的 Q 值表用神经网络 Q-Network 替代以获得连续的状态空间，通过 Q-Network 对每个离散动作的 Q 值进行估计，并选择 Q 值最大的动作，因此 DQN 能够解决复杂环境下的离散动作问题。对于连续动作空间问题，使用 DQN 需要对连续动作进行离散化处理，但对于实际问题，离散化的方式和程度都会影响算法最终的效果。

策略梯度算法能够在连续的动作空间中，按照学习到的策略对动作进行筛选，该算法让神经网络输出策略函数$\pi(s)$。对于随机策略梯度算法，其输出是状态s下各种动作的概率，即：

$$\begin{cases}\pi_\theta(a|s)=p(a|s)\\ \sum\pi_\theta(a|s)=1\end{cases} \tag{1-8}$$

这种方法能够使得智能体对环境进行充分的探索，但在每一步动作时，都需要对当前得到的最优策略概率分布进行采样，当动作维数较高时，计算量将变得巨大。

与随机策略梯度相对于，确定性策略梯度使用确定性的函数来表示策略，其输出就是选择的动作本身，即：

$$a=\mu(s) \tag{1-9}$$

该算法中智能体的训练过程更加高效，但在每个状态s下，所采取的动作a都是确定的，使智能体无法对环境进行探索。

DDPG 算法本质上是一种基于 Actor-Critic 框架的强化学习方法，结合了上述 DQN 和确定性策略梯度算法的优势，由确定性策略梯度算法发展而来， 借鉴了 DQN 的设计思路，将值函数$q(s,a)$和策略函数$\mu(a|s)$表示为神经网络；同时加入了目标网络（Target Network）来让训练过程更加稳定，引入了经验回放（Experience Replay）机制来打破样本之间的相关性，从而使训练更容易收敛；

另外，还加入了随机噪声使智能体保持探索能力。

（1） 经验回放机制

经验回放机制是指在训练过程中设置一个经验池$\mathcal{B}$，也称回放缓冲区（Replay Buffer）。在状态s时，智能体根据策略选择动作s，与环境进行交互后得到奖励r，并进入下一状态s'，将该数据(s,a,r,s')保存到经验池中，供智能体进行采样。

（2） 目标网络

在 DDPG 的 Actor-Critic 网络结构中，包含 2 对 Actor-Critic 网络，包括当前 Actor 网络（Actor Online Network）和当前 Critic 网络（Critic Online Network）,以及目标 Actor 网络（Actor Target Network）和目标 Critic 网络（Critic Target Network）。设置当前 Actor 网络和当前 Critic 网络的结构并分别随机初始化网络参数为θ^{π}和θ^{Q}，并将参数赋值到目标 Actor 网络与目标 Critic 网络，即：

$$\begin{cases}\theta^{\mu'} \leftarrow \theta^{\mu} \\ \theta^{Q'} \leftarrow \theta^{Q}\end{cases} \tag{1-10}$$

对于当前 Critic 网络，从经验池中选择一个样本(s,a,r,s')，将s和a送入当前 Critic 网络，计算得到对动作(s,a)的评估为：

$$q = Q(s,a|\theta^{Q}) \tag{1-11}$$

将s'送入目标 Actor 网络，得到该状态下的动作为：

$$a' = \mu'\left(s'|\theta^{\mu'}\right) \tag{1-12}$$

将s'和a'目标 Critic 网络得到，计算得到$Q'\left(s',a'|\theta^{Q'}\right)$，对动作$(s,a)$的目标评估值为：

$$q' = r + \gamma Q'\left(s',a'|\theta^{Q'}\right) \tag{1-13}$$

将评估值与目标值之间的平方误差记为：

$$L_c = (q' - q)^2 \tag{1-14}$$

当在经验池中的采样容量（Batch Size）为N时，上述误差改为均方误差：

$$\begin{aligned} L_c &= \frac{1}{N}\sum_i (q_i' - q_i)^2 \\ &= \frac{1}{N}\sum_i \left(q_i' - Q(s_i,a_i|\theta^{Q})\right)^2 \end{aligned} \tag{1-15}$$

通过梯度下降法来最小化该均方误差，从而实现对当前 Critic 网络的更新。

对于当前 Actor 网络，输入状态s，计算得到当前网络参数下的动作a_{new}，即：

$$a_{new} = \mu(s|\theta^{\mu}) \tag{1-16}$$

当前 Critic 网络对动作(s, a_{new})的评估值为：

$$q_{new} = Q(s, a_{new}|\theta^{Q}) \tag{1-17}$$

当前 Actor 网络的目标是找到最大的累计期望回报，根据文献[39]和[43]，定义回报函数为：

$$J(\theta) = \sum_{s\in S} d^{\mu}(s)\, v_{\mu}(s) = \sum_{s\in S} d^{\mu}(s) \sum_{a\in A} \mu(a|s) q_{\mu}(s,a) \tag{1-18}$$

使用策略梯度方法对 Actor 网络的参数进行更新，更新过程为：

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J = \frac{1}{N} \sum \nabla_{a} Q^{\mu}(s, \mathrm{a}|\theta^{Q})|_{a=\mu(s_i)} \times \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s|\theta^{\mu})\,|_{s=s_i} \tag{1-19}$$

对于两个目标网络，则采用软更新（Soft Update）的方式，每隔一段时间将新的网络参数与旧参数进行加权平均，更新过程为：

$$\begin{cases} \theta^{\mu'} \leftarrow \tau\theta^{\mu} + (1-\tau)\theta^{\mu'} \\ \theta^{Q'} \leftarrow \tau\theta^{Q} + (1-\tau)\theta^{Q'} \end{cases} \tag{1-20}$$

其中，参数τ为学习率。

（3） 随机噪声

在 DDPG 算法中，若按照上述流程进行训练，则当前 Actor 网络每次输出仍然为确定性动作。为了提高智能体的探索能力，在策略中加入随机噪声，以使每次的动作选择存在一定的随机性，如式（1-21）：

$$a_t = \mu(s_t|\theta^{\mu}) + \mathcal{N}_t \tag{1-21}$$

其中，$\mathcal{N}_t$表示 t时刻时符合某种特定分布的随机噪声。随机噪声只添加在智能体训练过程中，且随着迭代次数的增加，噪声逐渐衰减为 0。

基于上述原理，DDPG 算法的架构如图 1.5 所示。

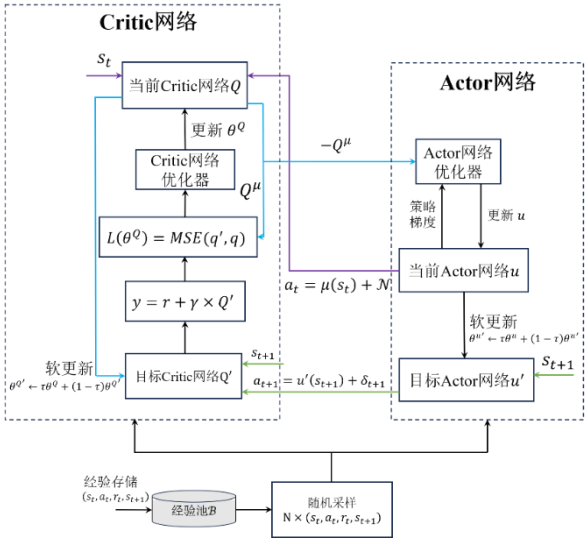


图 1.5　DDPG 算法架构

1.2.3　强化学习在虚拟同步发电机中的应用

当前已有学者将强化学习方法引入 VSG 控制系统，使智能体在 VSG 运行过程中，根据当前系统的状态，自动地调节相关参数，实现相应的控制目标。针对单机 VSG 参数整定问题，文献[44]中首次将 Q-learning 算法引入 VSG 控制，尽管只对虚拟转动惯量进行在线调整，且奖励函数仅考虑了频率偏差（Frequency Deviation），该方案依然有效改善了 VSG 的频率和有功功率响应。文献[45]中使用了 DQN 算法，用神经网络取代了 Q-learning 中的 Q 值表，从而将状态空间拓展为连续空间；另外，智能体的输出包括虚拟转动惯量和阻尼系数 2 个参数，奖励函数中加入了功率偏差。文献[46]中使用了 DPG 算法，该算法的动作空间为连续空间，同时，将频率的变化率（Rate of Change of Frequency, RoCoF）引入奖励函数，以得到更加平滑的响应曲线。

另外，在多变流器并联的场景下，多机并联系统的暂态稳定性以及功率合理分配也是重要的研究课题。针对这一问题，有学者提出通过改变下垂系数来改变功率分配情况[47, 48]。在文献[47]中，作者通过调节无功-电压下垂系数来减小功率分配误差，进而抑制环流。文献[48]的作者则创新性地使用指数下垂系数代替传统的下垂系数应用于无功-电压控制环路，该方法实现了无功功率的按比例分配，但有功功率分配受到影响。文献[49]中，作者认为通过修改下垂系数来实现功率均分将会对控制系统稳定性带来负面影响。鉴于此，有学者提出了虚拟阻抗（Virtual Impedance, VI）方法[50-52]，通过在控制环路中加入虚拟阻抗，补偿分布式电源与公共并网点之间的线路阻抗，使等效线路阻抗符合控制系统的设计需要。文献[50]对虚拟阻抗法进行了综述，介绍了其基本原理和实现方式，对虚拟阻抗的研究现

状和未来发展进行了分析。文献[51]提出了一个虚拟阻抗的自适应控制策略，实现了功率解耦和无功分配。文献[52]提出了一种基于功率的虚拟阻抗自适应控制方法，该方法通过实时计算各个变流器输出的功率，反推其参考值，根据参考值计算出虚拟阻抗需要补偿的线路压降。

此外，在多 VSG 系统中，强化学习还被应用于其他功能。文献[53]分析了虚拟转动惯量、下垂系数与扰动的关系，通过实时调整每一个 VSG 的参数，抑制了频率振荡。文献[54]中，通过对多 VSG 系统的状态进行实时跟踪，作者设计的 DDPG 算法能够调整阻尼系数来提高系统在不同工况下的稳定性和可靠性。

1.3　本文主要内容

本文的研究内容主要集中在通过强化学习方法，对 VSG 参数进行实时动态调整，实现 VSG 单机及并联系统的动态性能优化。针对 1.1 节中，新能源大规模接入背景下的 3 个挑战，本文的研究思路和主要创新点如下：

（1） 针对单机 VSG 系统，分析关键参数对其动态过程的影响，引入 DDPG 算法对关键参数进行实时调整，为系统提供惯性和阻尼的同时，实现更好的动态性能；

（2） 针对并联 VSG 系统，使用虚拟阻抗实现无功功率按比例分配，引入 DDPG 算法对虚拟阻抗取值进行实时调整，实现无功功率更加精准分配，同时降低虚拟阻抗对电压带来的影响；

（3） 针对孤岛 VSG 系统，引入 DDPG 算法对 VSG 控制环路中的有功功率参考值进行实时补偿，使频率恢复更加快速。

基于上述研究思路，本文的文章结构如下：

第一章首先介绍了本课题的研究背景和意义，在新能源大规模接入的场景下，通过对变流器进行合理的控制设计能够使新能源更加平稳友好地接入电力系统，减少新能源波动性对电力系统的影响；随后介绍了 AC/DC 变流器主要控制策略，通过与传统控制策略进行对比，展现了虚拟同步发电机控制方法的优势；接下来介绍了强化学习的基本概念，并详细介绍了 DDPG 算法的原理，为下文中虚拟同步发电机控制与 DDPG 算法的结合作了铺垫；最后，介绍了强化学习方法在 VSG 控制中的应用。

第二章的主要内容为虚拟同步发电机控制策略原理介绍。首先，由同步发电机转子运动方程建立 VSG 基本数学模型，设计 VSG 的有功-频率以及无功-电压控制模块，给出电压电流双环控制模型，得到完整的 VSG 控制流程；其次，推导 VSG 功率小信号模型，得出有功功率响应和频率响应随虚拟转动惯量和阻尼系数

变化的关系；最后，搭建并网单机 VSG 仿真模型，通过改变虚拟转动惯量和阻尼系数的取值，对前述分析结果进行了验证。

第三章的主要内容为 VSG 虚拟转动惯量与阻尼系数自适应调节方法。首先，根据第二章的分析结论，设计了虚拟转动惯量与阻尼系数协同自适应控制，并通过仿真结果验证了该策略的有效性；随后，设计了基于 DDPG 算法的 VSG 参数自动调节方法，在仿真平台中对该方法的有效性进行验证，展现出比前文中参数协同自适应控制更优的动态性能。

第四章研究了 VSG 多机并联系统中的虚拟阻抗及其自适应控制。首先，分析了 VSG 并联系统线路阻抗不一致时存在的功率解耦以及无功功率分配问题；其次，介绍了虚拟阻抗的原理，通过仿真验证了虚拟阻抗对无功分配的改善作用；最后，设计了基于 DDPG 的自适应虚拟阻抗方案，该方案在控制过程中实时调整虚拟阻抗取值，并在仿真中将该方法与恒定虚拟阻抗方法进行对比，验证了该方法的有效性。

第五章中对孤岛模式下的频率二次恢复问题进行了研究。首先介绍了在孤岛模式下，VSG 系统所具有的下垂特性使频率会由于功率的变化而产生稳态偏差，为了实现二次调频功能，首先使用频率偏差的积分环节来对功率参考值进行补偿，实现了频率的恢复；随后，设计了基于 DDPG 算法的补偿方案，将智能体的输出作为功率参考值的补偿，从而实现了二次调频功能。

第六章是本文的总结和展望，对本文所涉及的研究内容进行了总结，并对研究过程中存在的问题及本领域的未来研究方向进行了展望。

第2章　虚拟同步发电机控制

VSG 作为一种先进的变流器控制方法，其设计思路区别于传统的 P/Q 控制、V/f 控制、Droop 控制等，VSG 通过模拟同步发电机的暂态过程，为系统提供惯性和阻尼。本节将对 VSG 控制的基本原理进行详细介绍，并结合 VSG 功率小信号模型和仿真结果，得到系统的有功功率和频率随虚拟转动惯量和阻尼系数的变化规律。

2.1　VSG 基本原理

由前述讨论可知，VSG 的设计思路是通过模拟传统同步发电机的暂态过程，使其控制过程中展现出相似的阻尼和惯性特点，这使得电力电子器件对电力系统更加友好，使得新能源分布式发电及储能也能够为电力系统提供稳定性支撑。

典型的 VSG 控制系统框图如图 2.1 所示。

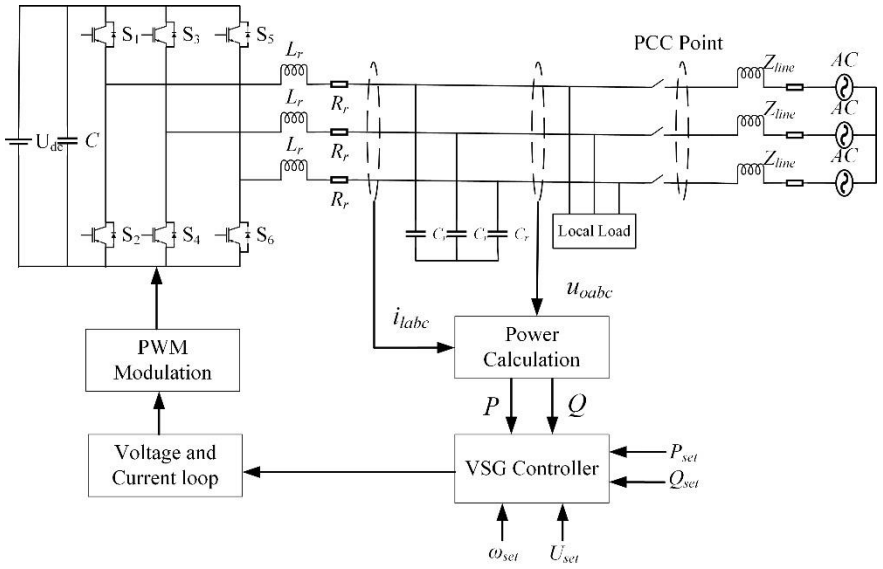


图 2.1　VSG 控制系统基本框图

其中，L_r和C_r表示滤波电感和滤波电容，Z_{line}表示 VSG 输出端口到并网点的线路阻抗，P和Q分别表示 VSG 输出的有功功率和无功功率。VSG 的输入端可以接入光伏、储能系统等分布式直流源。输出端可以与电力系统连接，使其工作在并网模式，为系统提供惯性支撑；也可以工作在孤岛模式，为本地交流负载供电。

VSG 的基本原理是对同步发电机的暂态过程进行模拟，对暂态过程进行数学

描述，然后将数学方程引入控制过程。由于同步发电机的电磁和机电暂态过程非常复杂，不同的研究人员根据控制算法设计的需要，对同步发电机进行了不同程度的模拟，提出了不同的 VSG 控制模型，主要模型已在第一章中进行了简单介绍。

本文中的相关研究以二阶 VSG 模型为基础，研究转子运动方程中虚拟转动惯量和阻尼系数对 VSG 输出的影响，下面将对该模型进行简单介绍。

2.1.1　转子运动方程

电力系统中的惯性主要来源于发电机中的转子，发电机将能量以动能的形式存储在高速运转的转子中，当负荷发生变化时，机械功率与电磁功率产生偏差，同步发电机的转速随之发生变化，并与额定转速产生偏差。

根据电机学理论，同步发电机在考虑不同影响因素的情况下具有多种不同模型，为了简化控制，大多采用其二阶模型进行计算。根据该二阶模型所建立的虚拟同步发电机数学模型如下：

$$\begin{cases} P_m - P_e = J\omega\dfrac{d(\omega-\omega_0)}{dt} + D\omega(\omega-\omega_0) \\ \omega = \dfrac{d\theta}{dt} \end{cases} \tag{2-1}$$

其中，J是虚拟同步发电机的虚拟转动惯量，单位为$kg\cdot m^2$；ω是虚拟同步发电机输出电压角频率，ω_0为额定角频率，二者的单位为rad/s；D为虚拟阻尼系数，单位为$N\cdot m\cdot s/rad$；P_m和P_e分别为虚拟机械功率和电磁功率，单位为W；θ为 VSG 的电角度。根据转子运动方程可以得到模块如图 2.2 所示。

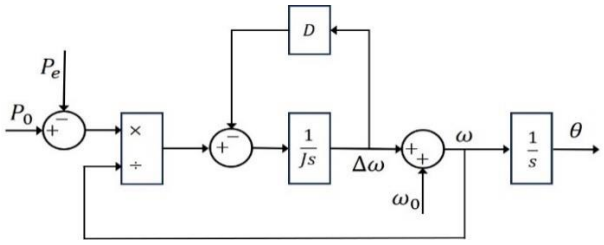


图 2.2　VSG 虚拟转子运动模块

该模块输出为 VSG 角频率，经过积分得到 VSG 虚拟转子的电角度，该电角度用于后续 VSG 虚拟电势的生成。

2.1.2　有功-频率控制

传统同步机的重要功能之一是参与电力系统的一次调频，使系统在发生扰动时维持频率的相对稳定，这一功能由调速器实现，其基本原理如图 2.3 所示。当

同步发电机的机械功率与电磁功率不相等时，会使发电机转子产生角加速度，从而角速度发生变化而偏离额定值，调速器接收这一偏差值，输出动作使得原动机输出的机械功率发生改变，并达到新的功率平衡。这一新的功率平衡点所对应的频率与额定频率不同，因此一次调频是有差的。

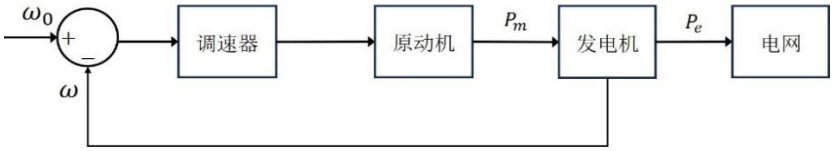


图 2.3　调速器环节原理

参考同步发电机调速器原理，在 VSG 中引入虚拟调速器模块，其控制框图如图 2.4 所示。

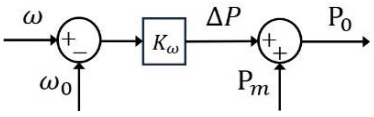


图 2.4　虚拟调速器环节

因此 VSG 的有功-频率调节模块的数学表达式可以写为：

$$K_\omega(\omega-\omega_0)=P_0-P_m \tag{2-2}$$

其中，ω_0是额定角速度，P_0为 VSG 功率额定值，K_ω是频率调节系数。可以看出，该模块本质上是一个有功-频率下垂控制模块，因此K_ω也可被称作有功-频率下垂系数，这使得 VSG 能够参与系统的一次调频。同时，在多 VSG 并联系统中，通过合理地设计不同 VSG 的频率调节系数，能够使得多 VSG 并联运行时能够进行合理的功率分配。

将该模块与 VSG 虚拟转子运动模块相结合，得到 VSG 的有功-频率控制环如图 2.5 所示。

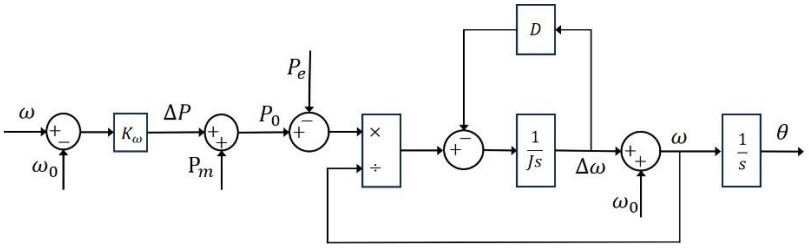


图 2.5　有功-频率控制环路

进一步地，认为虚拟同步发电机的输出角频率与系统额定角频率接近，即：

$$\omega\approx\omega_0 \tag{2-3}$$

将式（2-1）（2-2）（2-3）合并整理可得：

$$\begin{aligned} J\omega\frac{d\omega}{dt} &= P_m - P_e - D\omega(\omega-\omega_0) \\ &\approx P_0 - P_e - (K_\omega + D\omega_0)(\omega-\omega_0) \\ &= P_0 - P_e - D_p(\omega-\omega_0) \end{aligned} \tag{2-4}$$

其中，D_p为具有下垂作用的等效虚拟阻尼系数，其包含了转子运动方程中的阻尼系数以及有功-频率下垂系数。整理后的有功-频率控制环路如图 2.6 所示。

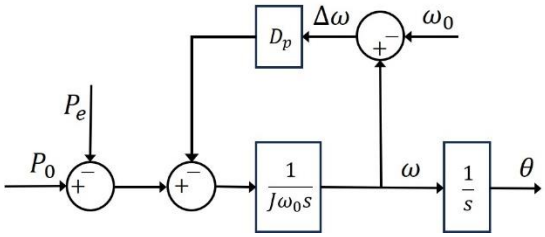


图 2.6　简化后的有功-频率控制环路

有功-频率控制环路的输出为电压电流双环控制的参考电压相角。

2.1.3　无功-电压控制

在电力系统中，无功功率会影响系统电压，同步发电机中的励磁调节系统能够根据电压偏差来调节励磁电流以调节同步发电机的内部电动势，进而使端电压稳定在额定值附近，其基本工作原理如图 2.7 所示。

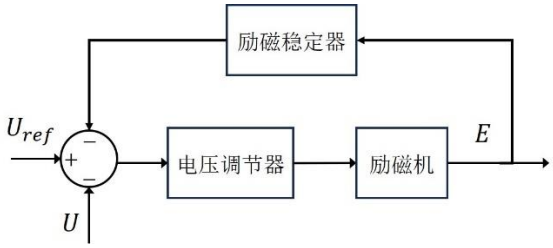


图 2.7　励磁器环节原理

借鉴同步发电机中的励磁调节器思想，模拟励磁调节作用，在 VSG 控制环路中加入了电压调节单元以及无功调节单元，分别为：

$$\Delta E_U = K_u\left(U_{ref} - U\right) \tag{2-5}$$

$$\Delta E_Q = K_q\left(Q_{ref} - Q\right) \tag{2-6}$$

式中，K_u和K_q分别为电压及无功功率调节系数，U_{ref}和Q_{ref}分别代表输出电压有效值的参考值和输出无功功率的参考值，U和Q分别代表 VSG 输出电压有效

值和输出无功功率。将电压调节单元和无功调节单元送入积分环节以实现对励磁电动势的调节，因此 VSG 无功-电压控制方程可写作：

$$\begin{aligned} E &= E_0 + \frac{1}{K}\int \left(\Delta E_U + \Delta E_Q\right)dt \\ &= E_0 + \frac{1}{K}\int \left[K_u\left(U_{ref} - U\right) + K_q\left(Q_{ref} - Q\right)\right]dt \end{aligned} \tag{2-7}$$

根据式（2-7）可以得到 VSG 的无功-电压控制模块如图 2.8 所示。

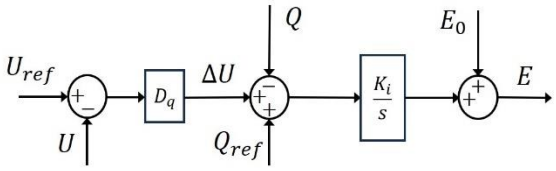


图 2.8　无功-电压控制环路

其中, $K_i = K_q/K$为积分环节的系数，$D_q = K_u/K$可以视为无功-电压下垂系数。无功-电压环路的输出为电压电流双环控制的参考电压幅值。

2.1.4　电压电流双闭环控制

为实现更加精准的跟踪及更快的响应速度，同时对三相交流电进行解耦控制，可以利用电压电流结合的双闭环控制结构，其基本控制框图如图 2.9 所示。

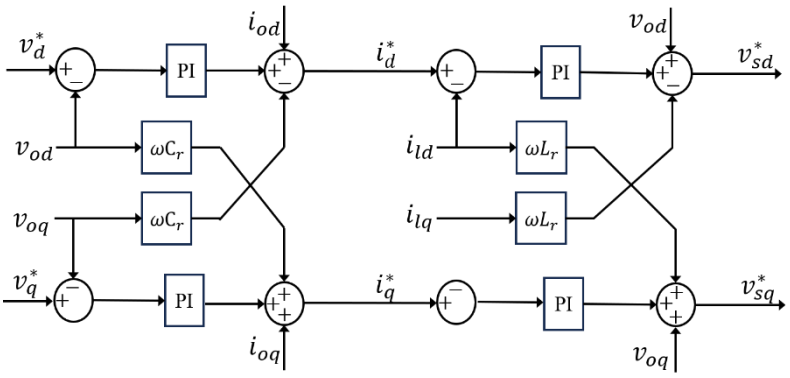


图 2.9　电压电流双环控制框图

在控制过程中，首先通过帕克变换，将 abc 坐标系中的电气量转换到 dq0 坐标系。外环为电压控制环，取电容电压为 VSG 输出电压，与参考电压作差后送入 PI 控制器，电压解耦项运算后得到电流内环参考值，其表达式如式（2-8）和式（2-9）所示：

$$\begin{cases} i_d^* = \left(K_{pv} + \dfrac{K_{iv}}{s}\right)(v_d^* - v_{od}) - \omega C_r v_{oq} + i_{od} \\ i_q^* = \left(K_{pv} + \dfrac{K_{iv}}{s}\right)(v_q^* - v_{oq}) + \omega C_r v_{od} + i_{oq} \end{cases} \tag{2-8}$$

$$\begin{cases} v_{sd}^* = \left(K_{pc} + \dfrac{K_{ic}}{s}\right)(i_d^* - i_{ld}) - \omega L_r i_{lq} + v_{od} \\ v_{sq}^* = \left(K_{pc} + \dfrac{K_{ic}}{s}\right)(i_q^* - i_{lq}) + \omega L_r i_{ld} + v_{oq} \end{cases} \tag{2-9}$$

其中，K_{pv}和K_{iv}分别为电压环 PI 控制器的比例系数和积分系数；K_{pc}和K_{ic}为电流环 PI 控制器的比例系数和积分系数；v_d^*和v_q^*为 VSG 有功和无功环路输出参考电压值在 dq0 坐标系下的 d 轴和 q 轴分量；i_d^*和i_q^*为电压环的输出；i_{ld}和i_{lq}为电感电流的 d 轴和 q 轴分量；i_{od}、i_{oq}、v_{od}、v_{oq}分别为经过滤波后的电流和电压 d 轴和 q 轴分量；C_r和L_r分别为滤波电容和电感，将滤波器参数加入环路运算后，得到滤波后的电压参考值；v_{sd}^*和v_{sq}^*为电流环输出，随后经过帕克反变换（Inverse Park Transformation）得到三相 SPWM 参考信号，控制开关器件的开通与关断。

2.2　关键参数对 VSG 输出特性的影响

根据上一节中 VSG 的数学模型可以看出，虚拟转动惯量J和虚拟阻尼系数D对 VSG 的运行过程有着重要的影响。本节将结合 VSG 的小信号模型对系统响应进行分析。

2.2.1　对有功功率响应的影响

首先，根据参考文献[55]，VSG 的输出功率可表示为：

$$\begin{cases} P = \dfrac{EU\cos(\varphi - \sigma)}{Z} - \dfrac{U^2\cos\varphi}{Z} \\ Q = \dfrac{EU\sin(\varphi - \sigma)}{Z} - \dfrac{U^2\sin\varphi}{Z} \end{cases} \tag{2-10}$$

其中，E为 VSG 电势，U为 VSG 输出端口电压，σ为 VSG 的功角，Z和φ分别为滤波电路的阻抗和阻抗角。由于滤波电路中，滤波电感L_r通常远大于其串联等效电阻R_r，因此$\varphi \approx \pi/2$。

借鉴传统同步发电机的二阶模型分析方法，可以得到 VSG 的小信号模型如图 2.10 所示。

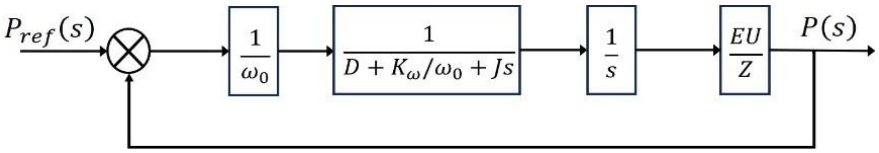


图 2.10　VSG 功率小信号模型

根据图 2.10，VSG 输出有功功率对有功功率指令的闭环传递函数为：

$$G(s)=\frac{P(s)}{P_{ref}(s)}=\frac{\frac{1}{J\omega_0}\frac{EU}{Z}}{s^2+\frac{1}{J\omega_0}(D\omega_0+K_\omega)s+\frac{1}{J\omega_0}\frac{EU}{Z}} \tag{2-11}$$

由式（2-11）可以得到 VSG 二阶系统所对应自然振荡角频率ω_n和阻尼系数ξ分别为：

$$\begin{cases}\omega_n=\sqrt{\dfrac{EU}{J\omega_0 Z}}\\ \xi=\dfrac{1}{2}(D\omega_0+K_\omega)\sqrt{\dfrac{Z}{J\omega_0 EU}}\end{cases} \tag{2-12}$$

设计VSG工作在欠阻尼的状态，分析欠阻尼系统的动态过程可知，此时VSG系统的调节时间t_s为：

$$t_s\approx\frac{3.5}{\xi\omega_n}=\frac{7J\omega_0}{D\omega_0+K_\omega} \tag{2-13}$$

VSG 系统的超调量$\sigma\%$为：

$$\begin{aligned}\sigma\%&=e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}\times100\%\\&=e^{-\pi(D\omega_0+K_\omega)\sqrt{\frac{Z}{4J\omega_0EU-(D\omega_0+K_\omega)^2Z}}}\times100\%\end{aligned} \tag{2-14}$$

由式（2-13）和式（2-14）可以看出，在欠阻尼的条件下，VSG 功率响应的超调量与调节时间与虚拟转动惯量J、虚拟阻尼系数D和有功-频率下垂系数K_ω均相关。假定K_ω保持恒定，D不变时，随着J的增大，调节时间t_s越长，超调量$\sigma\%$越大；当J恒定时，随着D的增大，调节时间t_s越短，超调量$\sigma\%$越小。

其相关关系如表 2.1 所示。

表 2.1　J、D与 VSG 有功功率响应的关系

虚拟参数J、D	ω_n	ξ	t_s	$\sigma\%$
固定D，增大J	减小	减小	增大	增大
固定J，增大D	不变	增大	减小	减小

2.2.2　对频率响应的影响

由式（2-1）的转子运动方程可知：

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \frac{P_m - P_e - J\omega\dfrac{d\omega}{dt}}{D\omega} \\ &= \frac{T_m - T_e - J\dfrac{d\omega}{dt}}{D}\end{aligned} \tag{2-15}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e - T_d}{J} \tag{2-16}$$

可以看出，虚拟转动惯量J对角速度变化率$d\omega/dt$具有抑制作用，从而使得角频率偏差量$\Delta\omega$减小；而阻尼系数D则对角频率的偏差量$\Delta\omega$具有抑制作用，在振荡周期不变的情况下，角频率变化率$d\omega/dt$相应减小。

2.3　仿真验证

为了验证上一节中对 VSG 关键参数分析的正确性，结合 2.1 节中所设计的 VSG 控制方法，在 MATLAB/Simulink 中搭建了单机 VSG 系统，分别对比不同参数取值对于 VSG 功率和频率动态过程的影响。相关仿真参数如表 2.2 所示。

表 2.2　J、D对 VSG 影响测试仿真参数

参数	取值	参数	取值
直流电压	800V	滤波电感	2mH
交流电压幅值	311V	滤波电容	50μF
额定频率	50Hz	线路电感	1.2mH
有功功率额定值P_1	1kW	线路电阻	0.05Ω
有功功率额定值P_2	10kW	负载功率P_{load}	1kW

在仿真过程中采用控制变量的方法，每次仅改变J、D中一个参数的取值，探究 VSG 动态性能的变化。

2.3.1　虚拟转动惯量对 VSG 的影响

如图 2.11 和 2.12 所示为固定阻尼系数D，改变虚拟转动惯量J时系统的有功功率响应和频率响应。其中，$D = 10N \cdot m \cdot s/rad$。

由图 2.11 可知，随着转动惯量J的取值从 0.05 增大至 1.5（单位$kg \cdot m^2$），有功率阶跃响应的最大超调量$\sigma\%$和调节时间t_s均逐渐增大，振荡周期逐渐变长，即自然振荡角频率ω_n减小，振荡过程收敛趋势变缓，即阻尼比ξ逐渐变小。上述趋势符合表 2.1 结论。

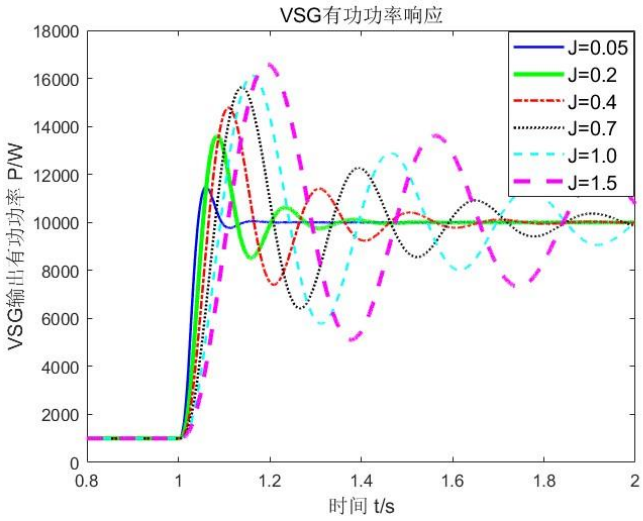


图 2.11　D固定、J不同时的有功功率响应

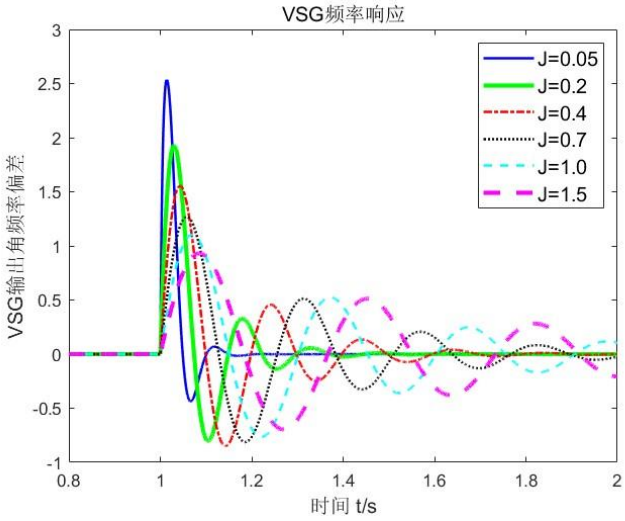


图 2.12　D固定、J不同时的频率响应

由图 2.12 可知，随着转动惯量不断增大，角频率的变化速率变慢，最大偏差量减小，符合 2.2.2 节的分析结论。

2.3.2　虚拟阻尼系数对 VSG 的影响

虚拟转动惯量J，逐步改变阻尼系数D时，VSG 系统的有功功率和频率响应过程分别如图 2.13 和图 2.14 所示。其中，$J = 0.4kg \cdot m^2$。

由图 2.13 可以看出，当阻尼系数D从 5 逐渐增大至 20 时（单位$N \cdot m \cdot s/rad$），VSG 功率响应的最大超调量$\sigma\%$和调节时间t_s均逐渐减小，振荡周期未发生变化，即自然振荡角频率ω_n不变，振荡过程收敛速度加快，即阻尼比ξ逐渐增大。仿真结果验证了表 2.1 结论的正确性。

由图 2.14 可知，随着阻尼系数D的增大，角频率偏差量的最大值减小，符合 2.2.2 节的结论。

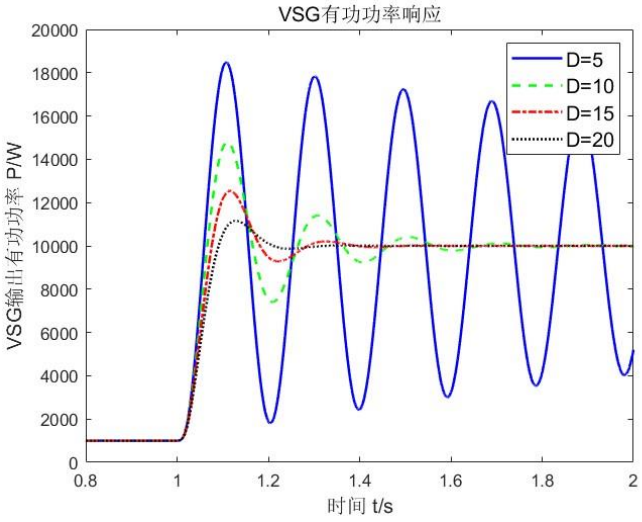


图 2.13　J固定、D不同时的有功功率响应

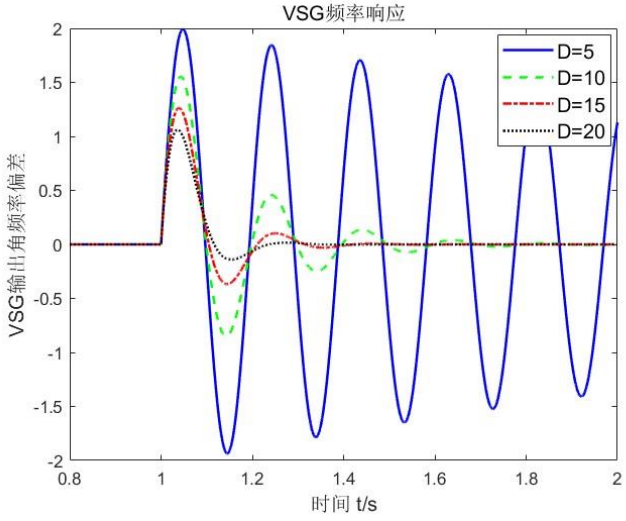


图 2.14　J固定、D不同时的频率响应

在上述阻尼系数的选取范围内，阻尼系数的增大对 VSG 的动态过程具有明显的改善。然而，随着阻尼系数的进一步增大，式（2-11）所对应的 VSG 的二阶模型会工作在过阻尼状态，此时的功率和频率动态过程如图 2.15 和 2.16 所示。虚拟转动惯量仍为$J = 0.4kg \cdot m^2$。

可以看出，过阻尼系统的功率阶跃响应不再产生超调量，但随着D的进一步增加，动态响应速度会减慢，调节时间变长。

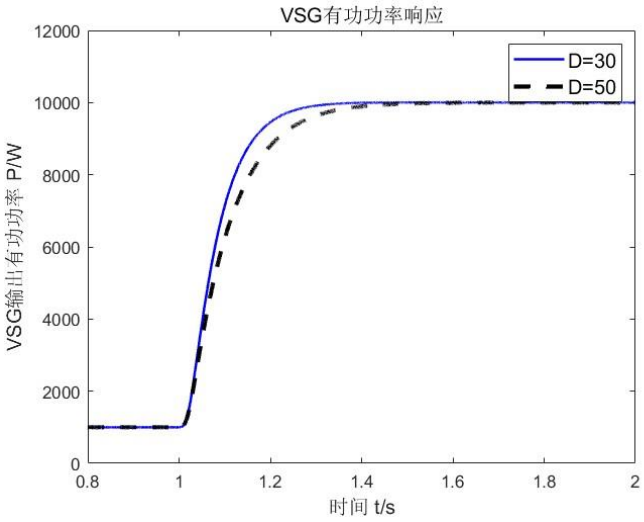


图 2.15　过阻尼系统的有功功率响应

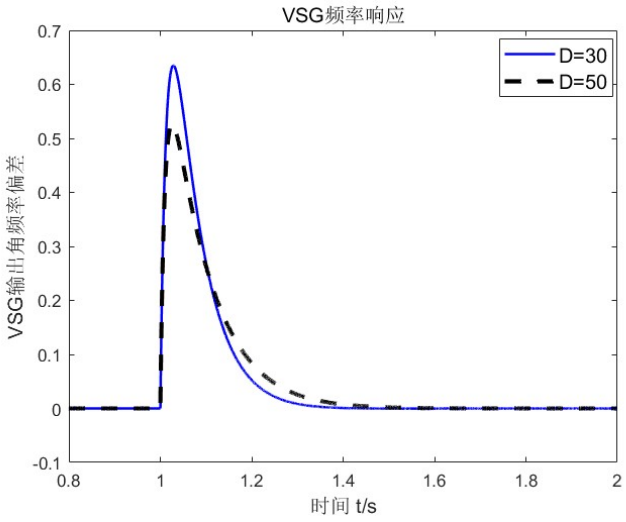


图 2.16　过阻尼系统的频率响应

类似地，过小的阻尼系数会使得 VSG 变为负阻尼系统，此时有功指令的阶跃变化会使得 VSG 的输出失稳，其动态过程如图 2.17 和图 2.18 所示，虚拟转动惯量仍取$J = 0.4kg \cdot m^2$。

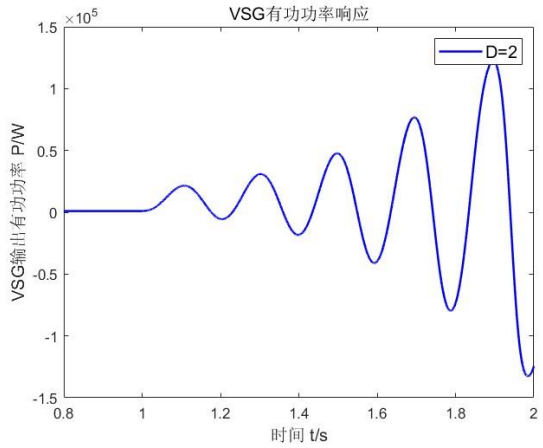


图 2.17　负阻尼系统的有功功率响应

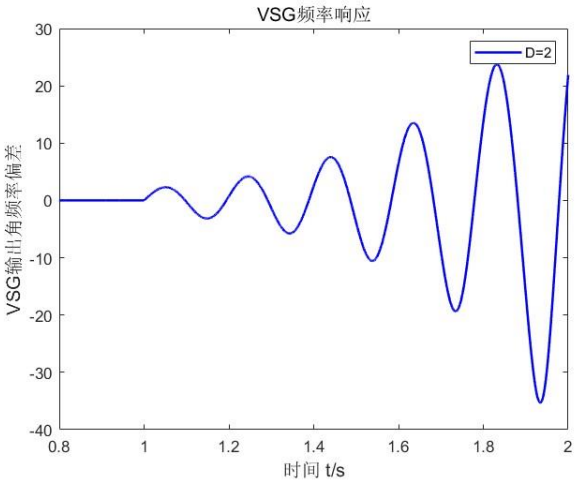


图 2.18　负阻尼系统的频率响应

综合上述分析可知，虚拟转动惯量和阻尼系数对 VSG 的动态性能有直接影响，实现 VSG 系统的稳定性以及良好的动态性能需要合理设置虚拟转动惯量J和阻尼系数D。

2.4　本章小结

本章主要对虚拟同步发电机技术的原理进行了介绍和分析。

首先，介绍了 VSG 的基本工作原理和数学模型，并对 VSG 的各个控制模块进行了分析。对于转子运动方程，该方程引入了虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数，是 VSG 模拟同步发电机运行的核心；有功-频率控制环和无功-电压控制环则分别模拟了同步发电机的调速系统和励磁系统；而电压电流双环控制则用来实现稳定快速响应。

其次，根据 VSG 系统的二阶小信号模型，分别分析了虚拟转动惯量J和虚拟阻尼系数D对 VSG 动态特性的影响，得到了J、D参数与调节时间和超调量的相关关系。最后，在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了 VSG 单机系统，探究了不同参数取值情况下 VSG 的动态响应变化趋势，验证了前文分析的正确性，为下一章 VSG 参数自适应控制设计奠定了理论基础。

第3章　VSG 参数自适应控制策略

3.1　VSG 虚拟转动惯量及阻尼的传统协同自适应控制

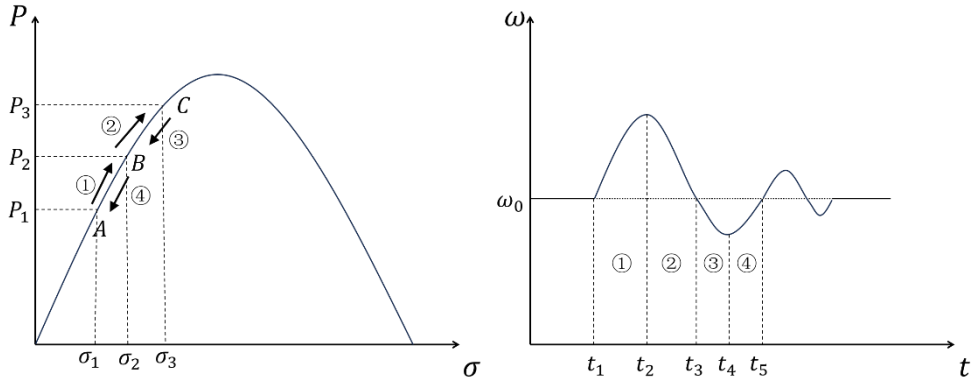
传统同步发电机受到材料、结构等物理条件约束，其转动惯量等参数通常保持恒定，因此在设计时需要考虑系统的运行状况，选择最合适的参数设计。

而 VSG 控制方式作为一种控制算法，不存在定子、转子、励磁绕组等物理结构，仅仅是对同步发电机运行过程的数学模拟，虚拟转动惯量、虚拟阻尼系数等参数不依赖于实际物理器件，因此取值具有较高的灵活性，能够根据需求进行调整甚至实时变化，相对于传统同步发电机具有更强的灵活性和适应性。因此，探究 VSG 的参数选择及变参数控制，对于提高 VSG 的动态性能，充分发挥 VSG 控制算法的灵活性和适应性具有重要意义。

由前一章节的分析可知，VSG 为系统提供了虚拟转动惯量和阻尼，能够提高系统的稳定性和抗干扰能力，但同时也会对调节时间、超调量等动态性能带来影响。本章将对 VSG 参数自适应算法进行研究，以实现 VSG 性能的提升。

3.1.1　VSG 动态过程分析

当有功功率指令值发生变化时，同步发电机的动态过程曲线如图 3.1 所示。



（a）功角振荡曲线　　（b）角频率振荡曲线

图 3.1　同步发电机功角及角频率振荡曲线

在图 3.1（a）中，当同步发电机的功率指令由P_1变为P_2时，系统会从工作点 A 开始经过一段暂态过程，并最终稳定在新的工作点 B，在此过程中频率和功率都会出现衰减振荡的暂态过程。按照图 3.1（b）中的时间节点，可以将一个振荡

周期分为 4 个阶段。在同步发电机的暂态过程中，角速度的偏差$\Delta\omega$通常比较小，转子运动方程中的阻尼转矩远小于机械转矩和电磁转矩，可近似为 0。下面将对一个振荡周期的 4 个阶段分别进行分析。

A）阶段 1：t_1到t_2时刻

这一阶段，机械转矩大于电磁转矩，过剩的转矩产生正向的角加速度，该角加速度逐渐减小为 0，角速度逐渐增大至最大值。根据式（2-15），这一阶段可以适当增大J和D，来限制角加速度$d\omega/dt$和角速度偏差量$\Delta\omega$。

B）阶段 2：t_2到t_3时刻

由于欠阻尼系统暂态过程会产生振荡，当 VSG 输出功率到达P_2后并未停止变化，而是继续上升，在这一过程中，由于功率参考指令不变，因此产生了负向的角加速度，使得角速度开始减小。当输出功率达到振荡的最大值时，对应绝对值最大的负向角加速度。这一阶段可以适当减小J来增大角加速度的绝对值，从而加快频率恢复过程。

C）阶段 3：t_3到t_4时刻

这一阶段，VSG 的输出功率开始下降但始终大于功率指令，角加速度绝对值开始变小并最终减小为 0，角速度继续减小并达到最小值。这一阶段可以适当增大J和D，来限制角加速度$d\omega/dt$和角速度偏差量$\Delta\omega$。

D）阶段 4：t_4到t_5时刻

这一阶段，VSG 输出功率低于指令值，产生正向的角加速度，角速度逐渐增加并接近额定角速度。可以通过适当减小J来增大角加速度，加快角速度的恢复过程。

综上所述，不同情况下J和D的取值原则如表 3.1 所示。

表 3.1　不同阶段 J 和 D 取值原则

阶段	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega(d\omega/dt)$	J	D
1	>0	>0	>0	增大	适当增大
2	>0	<0	<0	减小	适当增大
3	<0	<0	>0	增大	适当增大
4	<0	>0	<0	减小	适当增大

根据前述分析，设计 VSG 的J、D自适应控制策略如下：

$$J=\begin{cases} J_0, & \left|\dfrac{d\omega}{dt}\right|<M \\ J_0+K_j\Delta\omega\dfrac{d\omega}{dt}, & \left|\dfrac{d\omega}{dt}\right|>M \end{cases} \tag{3-1}$$

$$D=\begin{cases} D_0, & |\Delta\omega|<N \\ J_0+K_d|\Delta\omega|, & |\Delta\omega|>N \end{cases} \tag{3-2}$$

其中，J_0和D_0分别为 VSG 在系统频率稳定时的转动惯量和阻尼系数取值，为恒定正值；K_j和K_d分别为J和D的调节系数，均为恒定正值；M和N分别为设定的角频率变化率阈值和角频率偏差阈值，为恒定正值。

由式（3-1）可知，当角频率变化率的绝对值小于M时，转动惯量保持在J_0不变；当变化率的绝对值超过阈值M时，转动惯量开始进行自适应调节，其增大或减小取决于角频率变化率的符号和大小。同样，当角频率偏差值的绝对值小于N时，阻尼系数保持D_0不变；当偏差绝对值大于N时，阻尼系数进行自适应控制，由当前偏差大小决定其大小。

3.1.2　仿真对比

使用在 MATLAB/Simulink 平台中搭建的单机 VSG 系统进行仿真测试，对比恒定J、D以及自适应J、D的 VSG 控制策略的动态性能，其主要仿真参数如表 3.2 所示。其中，将虚拟转动惯量和阻尼系数的调节系数K_j和K_d分别取为 0 时即为恒定虚拟转动惯量控制策略和恒定阻尼系数控制策略，当K_j和K_d均取为 0 时即为恒定J、D控制策略。

表 3.2　J、D自适应 VSG 控制仿真参数

参数	取值	参数	取值
直流电压	800V	初始转动惯量J_0	0.4
交流电压幅值	311V	初始阻尼系数D_0	10
额定频率	50Hz	转动惯量调节系数K_j	0.1
有功功率额定值P_1	1kW	阻尼系数调节系数K_d	20
有功功率额定值P_2	10kW	变化率阈值M	1
负载功率P_{load}	1kW	偏差阈值N	0.1

仿真过程为：初始阶段，有功功率指令为$P_1=1kW$，待系统输出稳定后，在 1s 时，有功功率指令值阶跃至$P_1=10kW$，至仿真结束。

A) 转动惯量自适应方法

对比J自适应与恒定参数的 VSG 控制策略，图 3.2 和图 3.3 分别为两种不同方式下的频率响应和有功功率响应。

由图 3.2 可以看出，在功率变化引起的频率振荡过程中，所使用的J自适应方法，能够在频率偏差增大时增大转动惯量来减小频率变化率，而在频率偏差减小

的过程中减小转动惯量来增大频率变化率，使得频率偏差快速恢复至 0 值附近。在频率偏离额定值和频率向额定值恢复的两个反向过程中，曲线的斜率具有明显的区别，该结果与前文分析结果及设计自适应策略的目标一致，验证了该J自适应方法的有效性，在该方法的调节下，经过约 1 个振荡周期，VSG 输出角频率已趋于稳定。

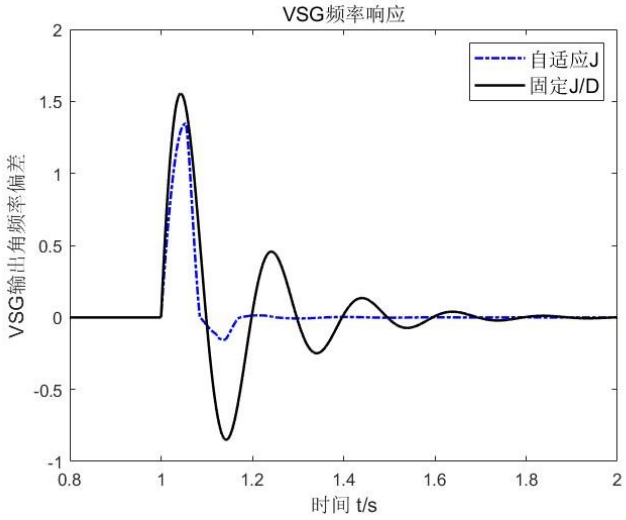


图 3.2　自适应J与恒定参数的频率响应对比

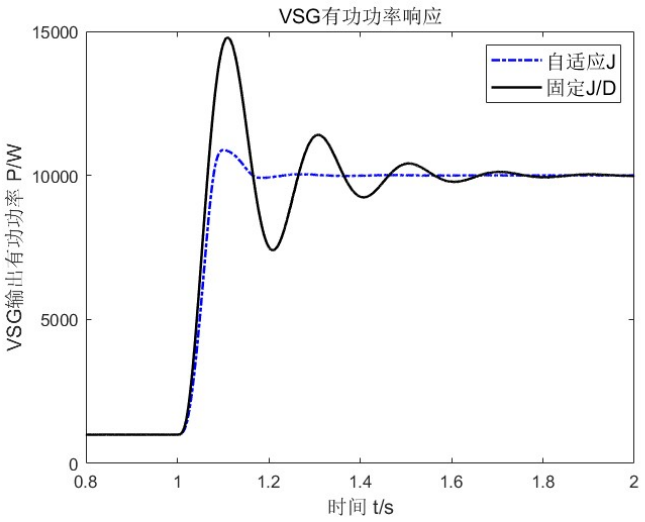


图 3.3　自适应J与恒定参数的有功功率对比

由图 3.3 可以看出，采用自适应转动惯量方法时，有功功率的动态响应也得到明显改善，最大超调量约为$1000W$，相比于固定参数VSG控制降低了约80%；调节时间显著缩短，经过 1 个振荡周期便基本趋于稳定。

B) 阻尼系数自适应方法

图 3.4 和图 3.5 分别显示了D自适应方法与恒定参数方法下的频率响应和有功功率响应。

由图 3.4，功率指令变化使得频率发生振荡，相比于恒定参数方法，D自适应方法在频率偏差大于设定值时增大虚拟阻尼D以降低最大超调量，使得最大频率偏差降低了约$0.5rad/s$。该仿真结果与前文分析结果一致。

由图 3.5，阻尼系数自适应方法对 VSG 的有功功率响应也有明显的改善，功率指令变化时，阻尼系数自适应方法使得 VSG 的最大超调量约为$2000W$，相比恒定参数方法下降约 60%，过渡过程更加平滑。

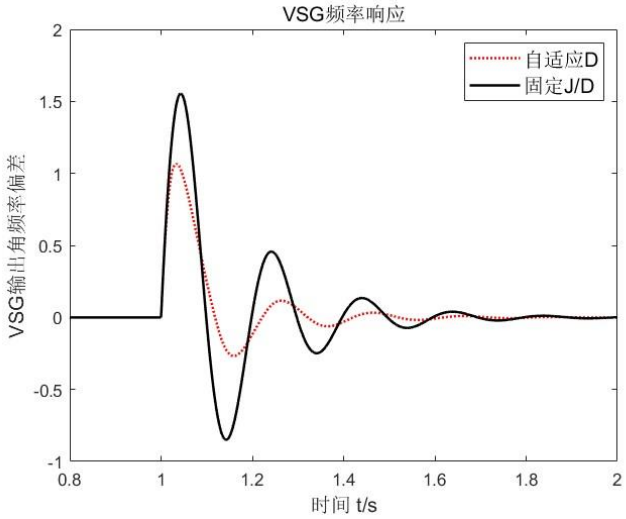


图 3.4　自适应D与恒定参数的频率响应对比

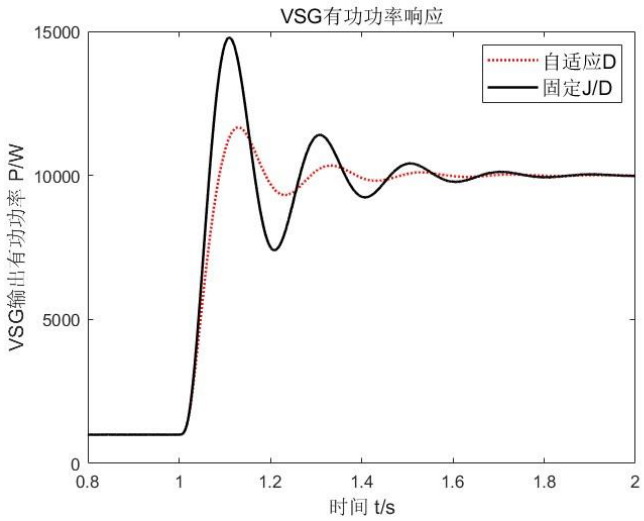


图 3.5　自适应D与恒定参数的有功功率对比

C) 转动惯量与阻尼系数协同自适应方法

采用式（3-1）和式（3-2）所表示的J、D协同自适应控制方法时，VSG 的频率和有功功率响应分别如图 3.6 和图 3.7 中的黑色实线所示。

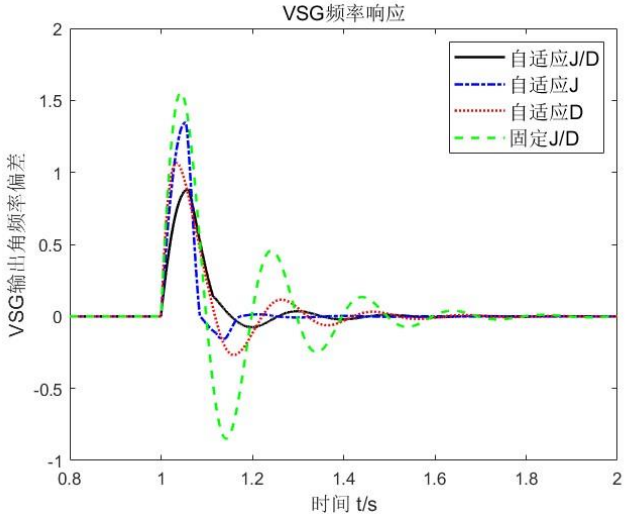


图 3.6　不同控制方式下的频率响应对比

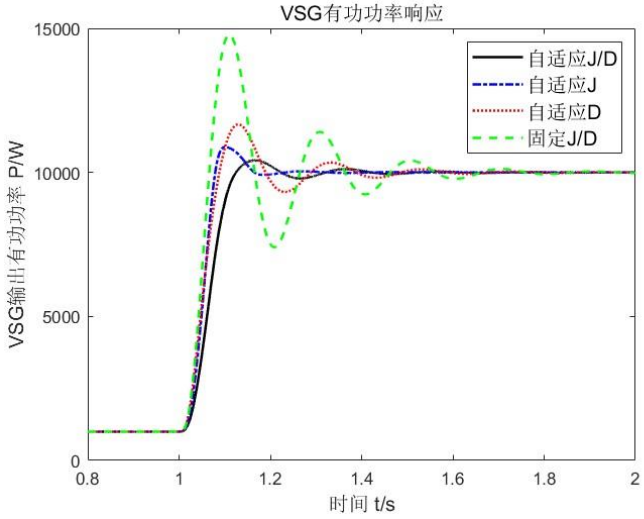


图 3.7　不同控制方式下的有功功率对比

同前述 2 种单参数自适应方法及固定参数方法对比可见，在频率振荡中，该方法既降低了频率的最大偏差，同时也改变了振荡过程中角频率的变化率，缩短了过渡过程；在功率振荡过程中，J、D协同自适应方法使 VSG 的输出功率的最大超调量进一步降低，动态性能进一步改善。

采用J、D协同自适应方法时，VSG 的虚拟转动惯量和阻尼系数的取值分别如图 3.8 和图 3.9 所示。

由图 3.8 可以看出，参考信号发生阶跃变化时，VSG 系统在震荡过程中，虚

拟转动惯量根据当前状态进行动态调整，其取值大小取决于角频率偏差和角频率变化率，当 VSG 系统逐渐稳定后，虚拟转动惯量为恒定值。

由图 3.9，VSG 输出角频率偏差增大时，阻尼系数迅速增大；角频率偏差减小时，阻尼系数逐渐减小；随着角频率偏差低于阈值，阻尼系数回到基准值后不再变化。

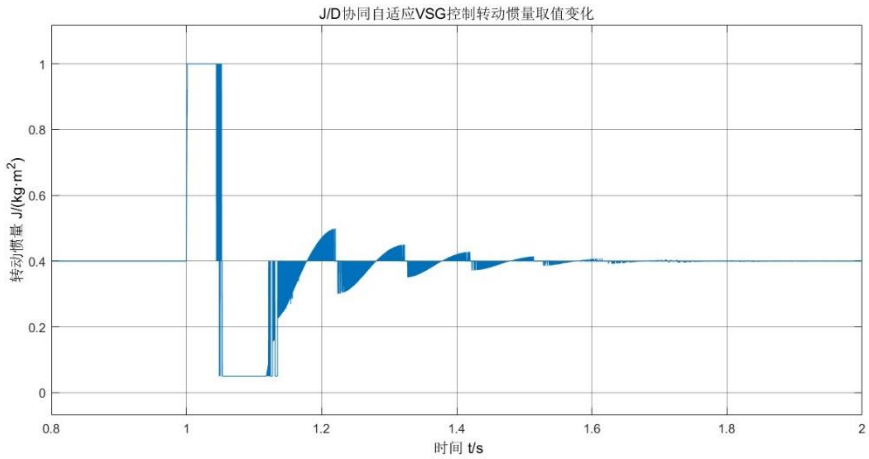


图 3.8　J/D 协同自适应下转动惯量取值变化

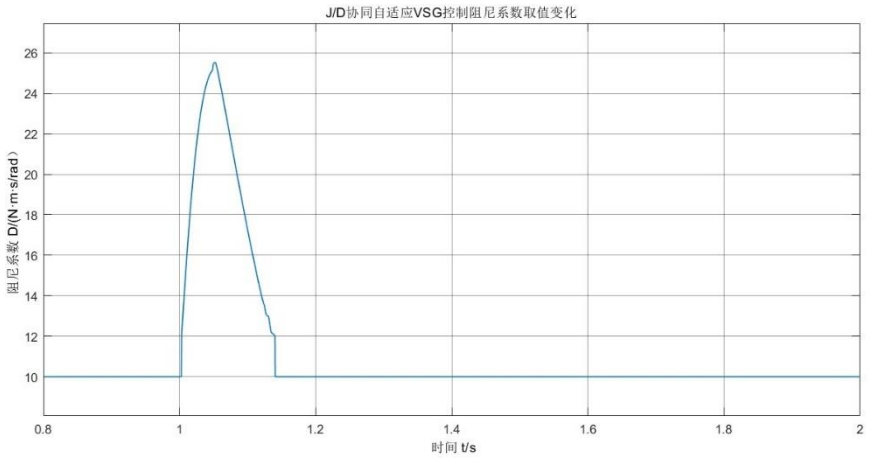


图 3.9　J/D 协同自适应下转动惯量取值变化

综上所述，VSG 作为一种控制方法，相比于同步发电机，其参数配置的灵活性使其能够兼顾动态过程的速度和稳定性。通过设计自适应控制率，根据当前角频率的变化率和角频率的偏差量对J和D进行实时调整，有效减小了频率和功率动态过程的超调量和调节时间，提升了 VSG 的动态性能。

3.2　基于 DDPG 算法的参数自适应控制

如第 1 章中 1.2.3 节所述，强化学习方法在变流器控制中已经有了一定程度的

研究，本节将探究通过强化学习方法实现虚拟转动惯量J和阻尼系数D自适应控制，来进一步提升 VSG 暂态过程的表现。

由于单机 VSG 系统中频率、功率等状态量以及虚拟转动惯量J和阻尼系数D的取值均为连续值，因此采用 DDPG 算法进行设。

3.2.2　环境与智能体设计

将 VSG 虚拟转动惯量与阻尼系数自适应控制建立为一个马尔可夫决策过程，智能体与单机 VSG 系统进行交互得到当前状态的反馈，并实时调整 VSG 的参数。

（1） 动作和状态

在该系统中，需要自适应调节的参数是 VSG 的虚拟转动惯量J和阻尼系数D，因此定义该智能体在t时刻的动作为：

$$a_t = \{J_t, D_t\} \tag{3-3}$$

根据第 2 章中对 VSG 原理的分析，考虑虚拟转动惯量和阻尼系数对系统稳定性的影响，同时为了减少智能体的错误探索，缩短学习时间，限制J_t最小值为 0.001，限制D_t最小值为 0.1，由此得到智能体的连续动作空间为：

$$\begin{cases} a_t = \{J_t, D_t\} \\ J_t \in [0.001, +\infty) \\ D_t \in [0.1, +\infty) \end{cases} \tag{3-4}$$

智能体的目标是使 VSG 实现更好的动态表现，选择 VSG 输出的角频率、角频率变化率以及有功功率作为环境的观测值，因此环境在t时刻的状态定义为：

$$s_t = \left\{\Delta\omega_t, \frac{d\omega_t}{dt}, \Delta P_t\right\} \tag{3-5}$$

其中，$\Delta\omega_t = \omega_t - \omega_{ref_t}$表示$t$时刻角频率相对于额定值的偏差，$\Delta P_t = P_{out_t} - P_{ref_t}$表示$t$时刻有功功率相对于额定值的偏差。

（2） 奖励函数设计

在国标 GB/T15945-2008《电能质量-电力系统频率偏差》中的规定：电力系统正常运行条件下频率偏差限值为±0.2Hz，当系统容量较小时，偏差限值可以放宽到±0.5Hz。基于此，将频率偏差绝对值的阈值设为$\Delta f_m = 0.5Hz$，对应角频率$\Delta\omega_m = 3.14rad/s$，当角频率偏差大于阈值时，将受到更大的惩罚。针对角频率部分的特征函数设置为：

$$C_1 = \begin{cases} \rho_\omega(\Delta\omega_t)^2, & |\Delta\omega_t| \le \Delta\omega_m \\ \rho_{\omega m}(\Delta\omega_t)^2, & |\Delta\omega_t| > \Delta\omega_m \end{cases} \tag{3-6}$$

其中，ρ_ω和$\rho_{\omega m}$分别为角频率偏差未超过阈值和超过阈值之后的惩罚系数。

考虑到 VSG 的重要功能之一是模拟同发电机的动态性能，实现相对平缓的暂态过程，在扰动发生后，频率的变化过程应尽量避免较为陡峭的上升及下降过程，因此，将角频率的变化率也作为惩罚项之一引入奖励函数。针对角频率变化率部分的特征函数设置为：

$$C_2 = \rho_{d\omega} \left| \frac{d\omega_t}{dt} \right| \tag{3-7}$$

其中，$\rho_{d\omega}$为角频率变化率的惩罚系数。

对于有功功率的调节过程，引入功率偏差的绝对值作为衡量标准，以获得相对较小的超调量和较快的有阻尼衰减振荡过程。同时，在以光伏、储能等作为直流侧电源的 VSG 系统中，有功功率的参考值可能以阶跃信号的形式在较大范围内变化，因此不设置功率偏差阈值。有功功率部分的特征函数函数设置为：

$$C_3 = \rho_P (\Delta P_t)^2 \tag{3-8}$$

其中，ρ_P为有功功率偏差的惩罚系数。

综上所述，在t时刻的奖励函数r_t可以表示为：

$$r_t = -(\beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3) \tag{3-9}$$

其中，β_1、β_2、β_3分别为前述三项的权重系数，用来确定不同的状态变量对动作的影响程度。

（3） 神经网络结构

由 3.1.1 节，DDPG 算法中共有 4 个网络，且 2 个 Actor 网络和 2 个 Critic 网络各自具有相同的网络结构。在本章的研究中，Actor 网络的输入层接收式（3-5）包含的 VSG 系统 3 个状态作为输入，中间经过 2 层全连接层，每层使用线性整流函数（Rectified Linear Unit, ReLU）作为激活函数，其表达式为：

$$ReLU(x) = \max(0, x) \tag{3-10}$$

最后，Actor 网络的输出层输出 2 维动作a_t。

Critic 网络分为状态路径（State Path）、动作路径（Action Path）和公共路径（Common Path）三个部分，其基本结构如图 3.10 所示。

其中，状态路径接收 VSG 系统的状态，经过 2 个全连接层后到达公共路径的输入层；同时，动作路径以智能体采取的动作为输入，经过 1 个全连接层后到达公共路径的输入层；动作路径和状态路径的输出在公共路径的输入层相加，并使用 ReLU 函数进行激活，后又经过 2 层全连接层，输出为动作的值函数估计值。

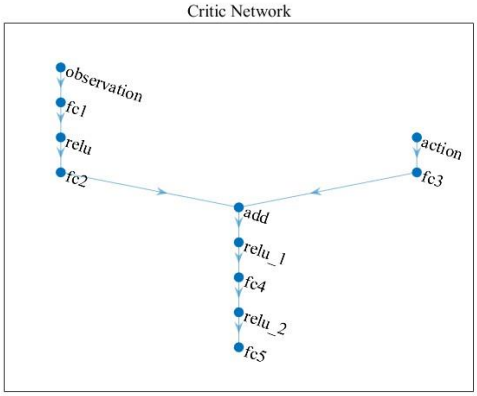


图 3.10　Critic 网络结构示意图

3.2.3　训练过程

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建单机 VSG 系统，对虚拟转动惯量和阻尼系数采用基于 DDPG 的强化学习算法进行自动调节，智能体与 VSG 系统构成的环境交互进行训练，智能体与 VSG 系统交互的过程如图 3.11 所示。

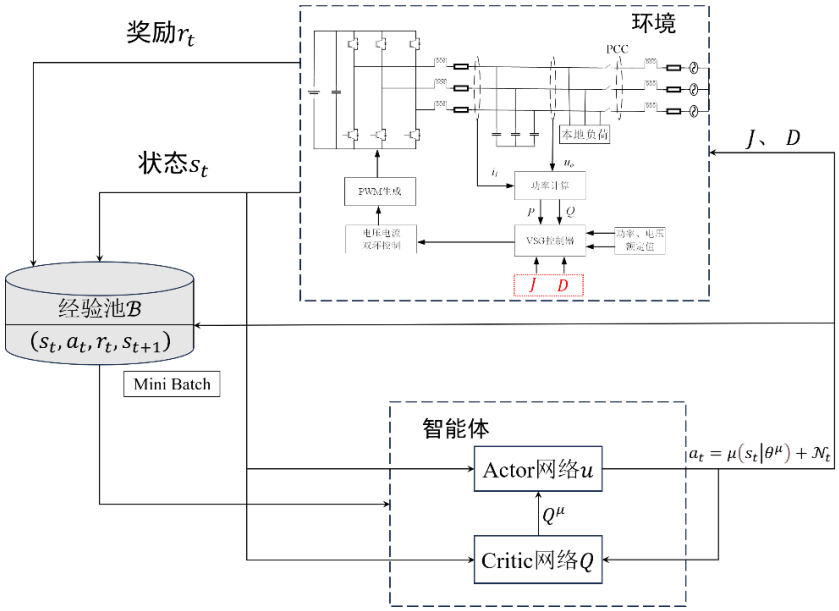


图 3.11　智能体与单机 VSG 系统交互过程

智能体接收 VSG 系统当前的角频率偏差、角频率变化率以及功率偏差信息作为当前状态输入，经过当前 Actor 网络将虚拟转动惯量和阻尼系数作为动作输出，并对各个网络的参数进行更新，该过程如表 3.3 所示。VSG 系统接收智能体下发的参数来对控制过程进行调节。

为了防止智能体仅学会特定场景下的最优策略，每轮训练开始时，有功功率参考值的初始值及阶跃值均具有随机性，同时在每轮训练结束后对环境进行复位。

表 3.3　DDPG 算法智能体训练过程

算法 1：深度确定性策略梯度（DDPG）

随机初始化当前 Actor 网络$\mu(s|\theta^{\mu})$的参数θ^{μ}和当前 Critic 网络$Q(s,a|\theta^{Q})$的参数θ^{Q}

初始化目标 Actor 网络$\mu'(s'|\theta^{\mu'})$的参数$\theta^{\mu'} \leftarrow \theta^{\mu}$和目标 Critic 网络$Q'(s',a'|\theta^{Q'})$的参数$\theta^{Q'} \leftarrow \theta^{Q}$

初始化经验池$\mathcal{B}$

for $e = 1$ to M **do**

将环境复位，随机初始化状态和阶跃信号

接收初始观测状态s_1

for t= 1 to T_s **do**

根据当前策略和噪声随机选择动作$a_t = \mu(s_t|\theta^{\mu}) + \mathcal{N}_t$

执行动作a_t，得到奖励r_t，系统进入新的状态s_{t+1}

将元组(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})存储至$\mathcal{B}$

从$\mathcal{B}$中随机选取N个样本

令$q' = r + \gamma Q'(s',a'|\theta^{Q'})$

通过最小化损失函数更新当前 Critic 网络：

$$L_c = \frac{1}{N}\sum_i \left(q_i' - Q(s_i,a_i|\theta^{Q})\right)^2$$

通过策略梯度更新当前 Actor 网络：

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J = \frac{1}{N}\sum \nabla_a Q^{\mu}(s,\mathrm{a}|\theta^{Q})|_{a=\mu(s_i)} \times \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s|\theta^{\mu})|_{s=s_i}$$

软更新目标 Actor 网络和目标 Critic 网络：

$$\begin{cases} \theta^{\mu'} \leftarrow \tau\theta^{\mu} + (1-\tau)\theta^{\mu'} \\ \theta^{Q'} \leftarrow \tau\theta^{Q} + (1-\tau)\theta^{Q'} \end{cases}$$

end for

end for

训练过程对智能体的部分参数设置如下表所示：

表 3.4　基于 DDPG 的J、D自适应控制中智能体相关参数

参数	数值
最大回合数	300
经验池大小	100,000
采样批次	128
当前 Actor 网络学习率	0.001
当前 Critic 网络学习率	0.0001
目标网络软更新学习率	0.002
奖励折扣率	0.99

3.3　结果对比

经过 3.2 节的训练后，对基于 DDPG 的 VSG 虚拟转动惯量和阻尼系数自适应方法进行仿真测试，系统的主要参数和仿真过程与 3.1.2 节一致，将角频率与有功功率输出波动情况与 3.1 节中虚拟转动惯量与阻尼系数协同自适应方法进行对比，所得结果分别如图 3.12 和图 3.13 所示。

由仿真结果可以看出，使用 DDPG 算法的参数自适应控制后，VSG 输出的角频率和有功功率在阶跃信号下的动态过程进一步改善。由图 3.12 可见，功率指令变化后，角频率的最大偏差约为$0.8rad/s$，小于 3.1 节中的协同自适应控制方法，半个振荡周期后，角频率迅速恢复至额定值附近。

由图 3.13，DDPG 算法的输出使得有功功率在阶跃信号下几乎不存在超调，最大瞬时功率为$10218W$，最大超调量为 2.18%。

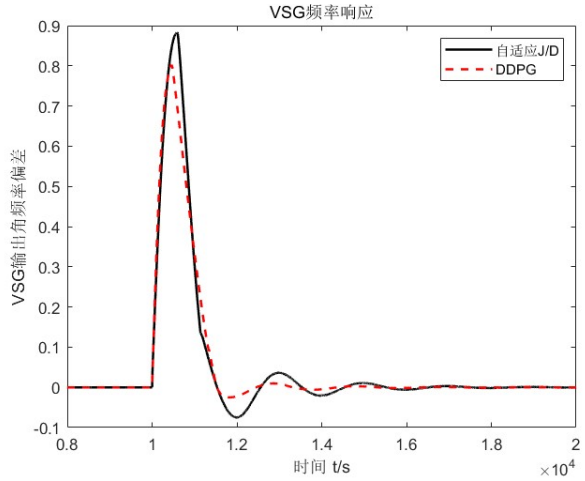


图 3.12　DDPG 与协同自适应方法的频率响应对比

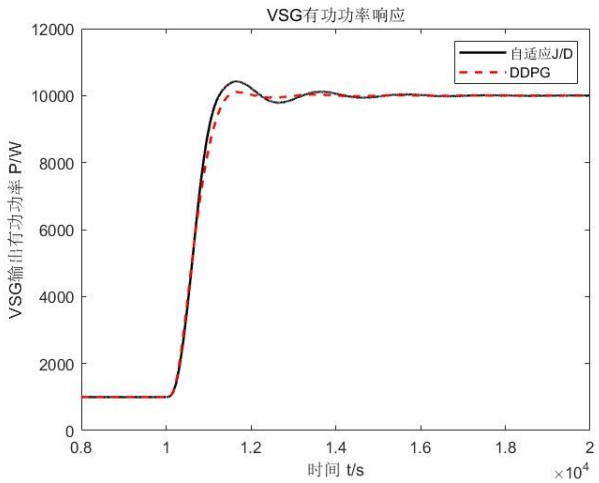


图 3.13　DDPG 与协同自适应方法的有功功率响应对比

本章中所采用的几种不同 VSG 虚拟转动惯量和阻尼系数调节方式，在相同的仿真过程中，对应的动态过程数据如下表所示。可以看出，基于 DDPG 的虚拟转动惯量和阻尼系数自适应控制方式对 VSG 的角频率及有功功率的动态调节过程有显著的改善。

表 3.5　不同J、D调节策略 VSG 动态过程对比

方法	功率最大偏差 $\Delta P/W$	功率超调 $\sigma\%$	角频率最大偏差 $\Delta\omega/rad\cdot s^{-1}$	调节时间 t_s/s
固定参数	4971	49.71%	1.59	0.471
J自适应	1283	12.83%	1.42	0.164
D自适应	1987	19.87%	1.13	0.281
J、D自适应	586	5.86%	0.89	0.193
DDPG	218	2.18%	0.81	0.128

如图 3.14 和图 3.15 所示 DDPG 算法下，虚拟转动惯量J和阻尼系数D的取值变化，可以看出，与图 3.8 和图 3.9 中基于协同自适应方法的有明显不同。

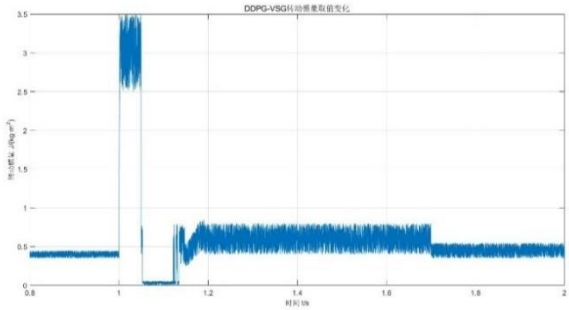


图 3.14　DDPG 算法下虚拟转动惯量取值变化

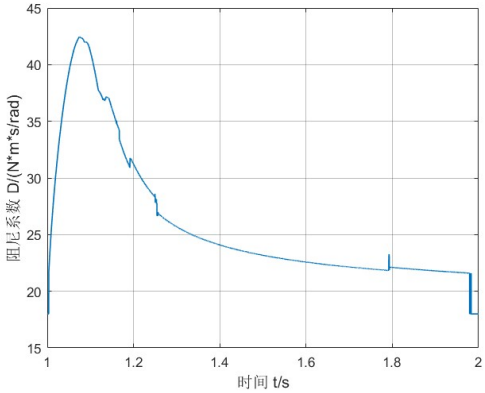


图 3.15　DDPG 算法下阻尼系数取值变化

3.4　本章小结

VSG 控制模拟了同步发电机的暂态过程，为系统提供了惯性和阻尼。根据第 2 章的分析，虚拟转动惯量和阻尼的设置与 VSG 控制的暂态过程息息相关。

为了实现更好的动态性能，本章首先对二阶欠阻尼 VSG 系统的有功功率阶跃响应进行了分析，得出在有功-频率暂态过程的不同阶段，虚拟转动惯量J和阻尼系数D的取值倾向；基于该结论，设计了J、D协同自适应方法，并将该方法同恒定参数方法以及单参数自适应方法进行对比，仿真结果表明，所使用的J、D协同自适应方法有效改善了 VSG 的暂态过程，VSG 输出的有功功率及角频率的超调量更小，调节时间更短。

接下来，引入了深度强化学习算法对虚拟转动惯量和阻尼系数进行优化。首先介绍了能够处理连续状态空间和连续动作空间的 DDPG 算法原理，将算法的状态输入设置为 VSG 输出的角频率、当前角频率变化率以及有功功率，基于此设计了奖励函数；算法的动作输出为虚拟转动惯量J和阻尼系数D的取值。在 MATLAB/Simulink 平台中搭建单机 VSG 系统，作为环境对智能体进行训练和测试。根据测试结果，DDPG 算法对J、D进行在线调节，进一步提升了 VSG 的暂态表现，相比于J、D协同自适应方法，其频率和有功功率暂态过程的超调量更小、调节时间更短，证明了算法的有效性。

第4章　VSG 虚拟阻抗自适应控制

上一章中研究了单台 VSG 运行过程中，VSG 转子运动方程中的关键参数J和D对有功功率和频率动态性能的影响。本章中，将研究 VSG 多机并联时，线路参数不一致对系统的影响。

4.1　多 VSG 并联的线路阻抗问题

4.1.1　功率耦合问题

一个双机并联的 VSG 系统模型如图 4.1 所示，多个 VSG 并联的情况可依此类推。

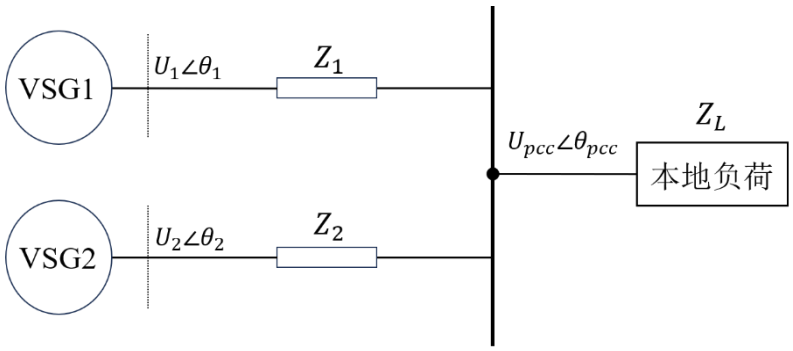


图 4.1　双机并联 VSG 系统模型

图中，2 个分布式直流电源经 VSG 控制的变流器逆变后，输出电压分别为U_1和U_2，对应的相角分别为θ_1和θ_2，两个电源到 PCC 点处的线路阻抗分别为$Z_1\angle\varphi_1$和$Z_2\angle\varphi_2$，PCC 点处接有公共负载$Z_L\angle\varphi_L$，公共点处的电压为$U_{PCC}\angle\theta_{PCC}$。根据参考文献[55]，2 个电源传输的功率分别为：

$$\begin{cases} P_i = \dfrac{U_i U_{PCC}\cos(\varphi_i - \sigma_{iP})}{Z_i} - \dfrac{U_{PCC}^2\cos\varphi_i}{Z_i} \\ Q_i = \dfrac{U_i U_{PCC}\sin(\varphi_i - \sigma_{iP})}{Z_i} - \dfrac{U_{PCC}^2\sin\varphi_i}{Z_i} \end{cases} \tag{4-1}$$

其中，$i = 1,2$表示分布式电源的编号，$\sigma_{iP} = \theta_i - \theta_{PCC}$为第$i$个电源与 PCC 点之间的电压相位差；$P_i$和$Q_i$分别为第$i$个电源传输的有功功率和无功功率。

在高压系统中，通常线路的感抗远大于电阻，线路阻抗角$\varphi_i \approx \pi/2$，且电源

输出电压相位与公共连接点处的相位差距较小，即$\sin\sigma_{iP}\approx\sigma_{iP}$，此时，电源输出有功功率的表达式可写为：

$$\begin{aligned}P_i &\approx \frac{U_iU_{PCC}\cos\left(\frac{\pi}{2}-\sigma_{iP}\right)}{Z_i}-\frac{U_{PCC}^2\cos\frac{\pi}{2}}{Z_i}\\&=\frac{U_iU_{PCC}\sin\sigma_{iP}}{Z_i}\\&\approx\frac{U_iU_{PCC}}{Z_i}\sigma_{iP}\end{aligned}\tag{4-2}$$

输出无功功率的表达式可写为：

$$\begin{aligned}Q_i &\approx \frac{U_iU_{PCC}\sin\left(\frac{\pi}{2}-\sigma_{iP}\right)}{Z_i}-\frac{U_{PCC}^2\sin\frac{\pi}{2}}{Z_i}\\&=\frac{U_iU_{PCC}\cos\sigma_{iP}}{Z_i}-\frac{U_{PCC}^2}{Z_i}\\&\approx\frac{U_{PCC}}{Z_i}(U_i-U_{PCC})\end{aligned}\tag{4-3}$$

在 VSG 系统稳定工作时，其输出电压U_i和公共连接点电压U_{PCC}通常不会产生较大波动，由式（4-2）可以看出，当线路接近纯感性时，输出的有功功率主要取决于电压的相位差；由式（4-3）可以看出，输出的无功功率主要取决于U_i和U_{PCC}的差值，有功功率与无功功率可以近似认为实现了解耦控制。此时，可以设计有功和无功的下垂控制如下：

$$\begin{cases}\omega_i-\omega_{ref}=\dfrac{1}{K_{\omega i}}\left(P_{iref}-P_i\right)\\U_i-U_{ref}=\dfrac{1}{K_{ui}}\left(Q_{iref}-Q_i\right)\end{cases}\tag{4-4}$$

而在低压电力系统中，线路阻抗呈阻感性，上述对阻抗角的假设条件不成立。此时，根据式（4-1）得到的有功功率和无功功率的表达式可写为：

$$\begin{cases}P_i\approx\dfrac{U_{PCC}(U_i-U_{PCC})}{Z_i}\cos\varphi_i+\dfrac{U_{PCC}U_i}{Z_i}\sigma_{iP}\sin\varphi_i\\Q_i\approx\dfrac{U_{PCC}(U_i-U_{PCC})}{Z_i}\sin\varphi_i-\dfrac{U_{PCC}U_i}{Z_i}\sigma_{iP}\cos\varphi_i\end{cases}\tag{4-5}$$

由式（4-5）可以看出，此时有功功率和无功功率均与电压的相位差和幅值差有关，功率无法解耦。

4.1.2　无功分配问题

在并联系统中，当功率出现偏差时，通常希望能够按照每个分布式电源的容量将功率差额按比例进行分配。

假设 2 个分布式电源的容量相同且下垂控制参数一致，仅有线路阻抗不同，不妨设$|Z_1| > |Z_2|$。此时公共连接点处电压为U_{PCC}，由于线路阻抗所造成的压降不一致，压降更大的线路对应的电源 1 需要输出更高的端口电压，即$U_1 > U_2$，根据式（4-4）的电压下垂方程，此时电源 1 输出的无功功率Q_1将会下降，相应地，Q_2将会升高，无功功率未按照容量进行分配。

更一般地，不妨设 2 个分布式电源的容量比为k，即$Q_{1ref}:Q_{2ref} = k$，根据下垂控制设计原理，令$K_{u1}:K_{u2} = k$。假设公共连接点电压为U_{PCC}，若$U_1 = U_2$，则有$Q_1:Q_2 = k$，无功实现按比例分配，此时对应$Z_1:Z_2 = 1:k$；当线路阻抗不满足该比例时，不妨设$Z_1:Z_2 > 1:k$，则$Q_1:Q_2 < k$，无功功率无法按比例分配。

综上所述，线路阻抗的不确定性对 VSG 功率控制以及多 VSG 并联情况下的功率分配均有影响。

4.2　基于虚拟阻抗的 VSG 控制

4.2.1　虚拟阻抗原理

虚拟阻抗方法是指在控制环路中加入一个虚拟的阻抗环节来模拟线路阻抗，以实现功率解耦和无功均分[56-58]，其基本原理如图 4.2 所示，其中Z_{v1}和Z_{v2}即为虚拟阻抗，A 处为 2 个变流器交流侧的实际出口，B 点是变流器交流侧的虚拟出口。

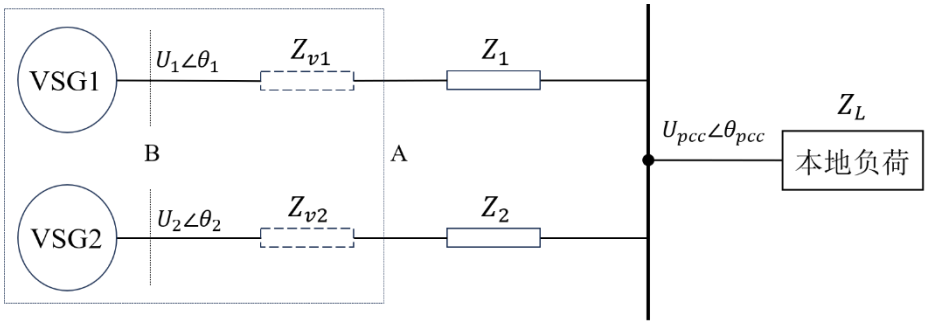


图 4.2　加入虚拟阻抗的双机并联 VSG 系统模型

基于上一节的分析，低压并联系统中，线路阻抗存在的主要问题是无法直接近似为感性以及线路阻抗不成比例。因此，实现虚拟阻抗的设计思路一般有两种[59]：一种是加入较大的虚拟阻抗，使其成为阻抗特性的主要部分，从而忽略线路阻抗；另一种是以虚拟阻抗作为线路阻抗的补偿，与线路阻抗一起调节阻抗特性。

两种方式具体原理如下：

（1） 主导法

主导法设计虚拟阻抗如图 4.3 所示。

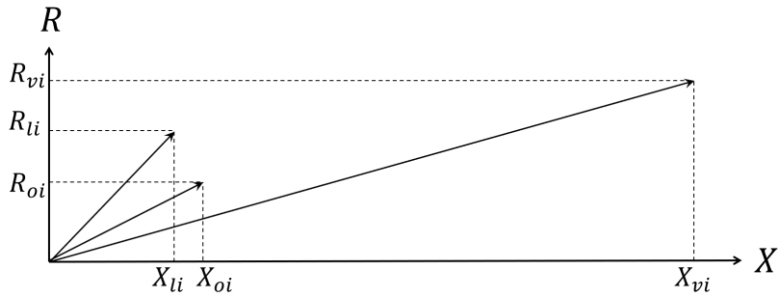


图 4.3　主导法虚拟阻抗矢量图

该方法设计的虚拟阻抗值远大于系统的线路阻抗和变流器输出阻抗，同时，控制虚拟阻抗呈接近感性使功率实现解耦，并联系统的阻抗之比可近似为：

$$\begin{aligned}\frac{Z_1}{Z_2}&=\frac{(R_{o1}+R_{l1}+R_{v1})+j(X_{o1}+X_{l1}+X_{v1})}{(R_{o2}+R_{l2}+R_{v2})+j(X_{o2}+X_{l2}+X_{v2})}\\&\approx\frac{R_{v1}+jX_{v1}}{R_{v2}+jX_{v2}}\\&\approx\frac{X_{v1}}{X_{v2}}\end{aligned}\tag{4-6}$$

通常可直接令$R_{v1}=0$，进一步减小虚拟阻抗环路的计算量。此时，可直接设计虚拟电感值成比例即可。

（2） 补偿法

由上述分析可知，主导法的设计思路是将系统阻抗用虚拟阻抗取代，而补偿法则是利用虚拟阻抗对系统阻抗进行调节，如图 4.4 所示，补偿后的等效阻抗为$Z_{\mathrm{eqi}}=R_{\mathrm{eqi}}+X_{eqi}$。

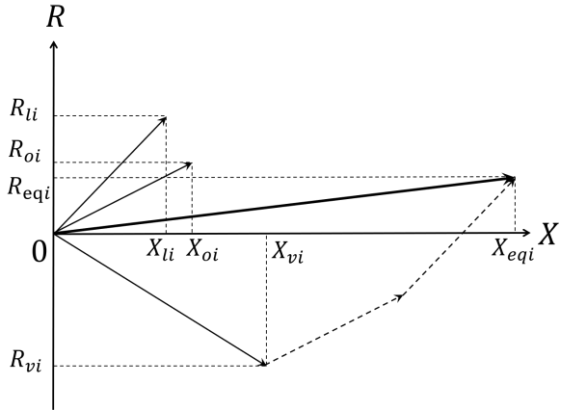


图 4.4　补偿法虚拟阻抗矢量图

补偿法需要通过测量和计算得到线路阻抗和输出阻抗，并依此设计合适的虚拟阻抗值，系统阻抗等于三个阻抗之和。在补偿法中，由于系统原本的阻抗值均不可忽略，可以通过设计负的虚拟电阻值来使等效阻抗呈感性。

上述方法中，补偿法由于需要求得线路阻抗和 VSG 输出阻抗，会加大计算量和控制系统复杂度，且在实际应用中，线路阻抗可能会外界环境和工作点的变化而改变，导致补偿效果发生变化。因此，本文选择主导法对虚拟阻抗进行设计。

4.2.2　虚拟阻抗环路设计

设加入控制环路的虚拟阻抗为$Z_v = jX_v = j\omega L_v$，在虚拟阻抗上产生的虚拟压降为：

$$\begin{aligned}\Delta u_v &= i_o Z_v \\ &= \left(i_{od} + ji_{oq}\right)\cdot j\omega L_v \\ &= -i_{oq}\omega L_v + ji_{od}\omega L_v\end{aligned} \tag{4-7}$$

则：

$$\begin{cases}\Delta u_{vd} = -i_{oq}\omega L_v \\ \Delta u_{vq} = i_{od}\omega L_v\end{cases} \tag{4-8}$$

因此，根据第 2 章 VSG 控制系统设计，其加入虚拟阻抗后的电压电流双环控制框图如图 4.5 所示，

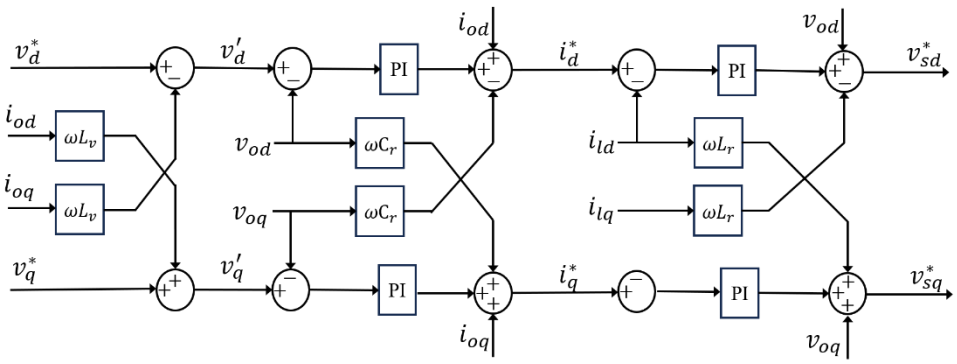


图 4.5　加入虚拟阻抗的电压电流双环控制框图

VSG 输出电流经过虚拟阻抗，得到虚拟阻抗上的虚拟压降，由 VSG 有功-频率及无功-电压控制环路生成的电压参考值减去虚拟阻抗上的虚拟压降Δu_v，得到调节后的电压参考值，经电压电流双环控制后得到 VSG 输出电压，即图 4.6 中 A 点的电压值，从而实现控制目标。

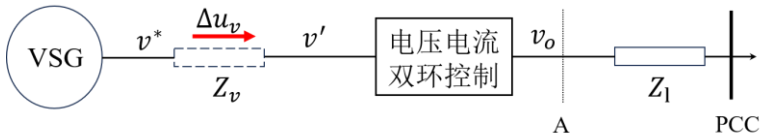


图 4.6　虚拟阻抗示意图

4.2.3　基于虚拟阻抗的 VSG 并联系统

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建 VSG 双机并联系统，两个分布式电源逆变后经滤波及线路阻抗后，共同带本地负载运行，系统工作在离网模式，对比是否添加虚拟阻抗以及其取值大小对并联效果的影响，相关参数如表 4.1 所示。

表 4.1　VSG 双机并联系统主要参数

VSG1 参数	取值	VSG2 参数	取值
额定有功功率P_1^*	4kW	额定有功功率P_2^*	2kW
额定无功功率Q_1^*	2kVar	额定无功功率Q_2^*	1kVar
滤波电感L_{r1}	20mH	滤波电感L_{r2}	20mH
寄生电阻R_{r1}	0.003Ω	寄生电阻R_{r2}	0.003Ω
线路电阻R_{l1}	0.15Ω	线路电阻R_{l2}	0.2Ω
线路电感L_{l1}	1mH	线路电感L_{l2}	1.5mH
无功下垂系数$1/K_{u1}$	0.001	无功下垂系数$1/K_{u2}$	0.002

仿真过程为：初始阶段负载未接入；0.05s 时，系统接入有功功率$P_1 = 6kW$、无功功率$Q_1 = 3kVar$的负载L_1；0.3s 时，接入有功功率$P_2 = 3kW$的负载L_2；0.7s 时，接入无功功率为$Q_2 = -1kVar$的负载L_2。

A) 无虚拟阻抗

由表 4.1 可以看出，两台 VSG 的额定容量之比为2:1，电压-无功下垂系数也对应成比例；2 个电源到公共连接点的线路阻抗均呈阻感性，电阻值不可忽略，且没有对应成比例。

在不加入虚拟阻抗的情况下，按照上述仿真过程进行测试，VSG 双机并联系统输出的无功功率如图4.7所示。可以看出，2个VSG输出的无功功率存在环流，每个 VSG 输出的无功功率处于变化状态，未能按照设定的容量进行分配，且 2 个 VSG 之间的无功功率差值逐渐增大，具有发散趋势，系统未能进入稳定状态。

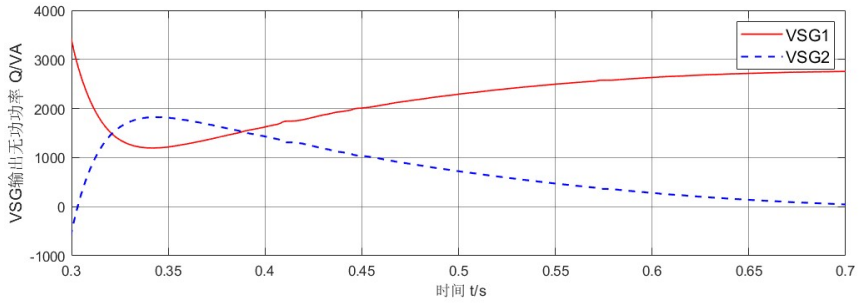
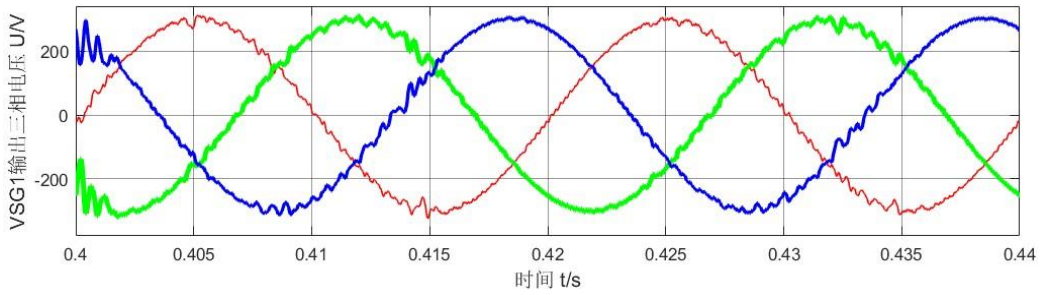
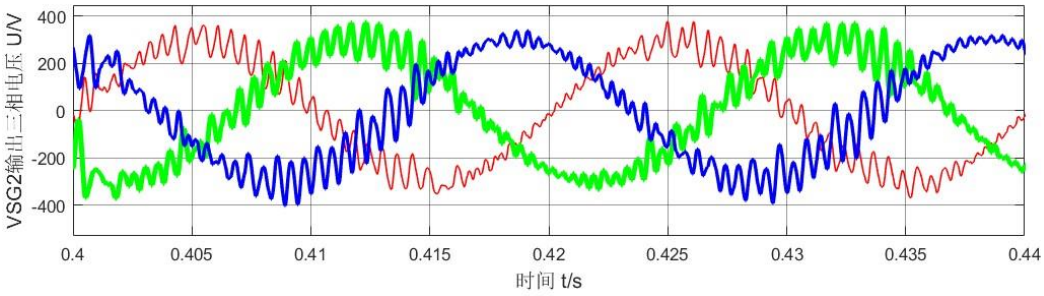


图 4.7　无虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的无功功率

进一步地，受到无功振荡的影响，2 个 VSG 的输出电压产生较大波动并偏离额定值，使得有功功率也无法按额定值输出，最终导致系统失稳。2 个 VSG 的输出电压如图 4.8 所示。



（a）VSG1 输出电压



（b）VSG2 输出电压

图 4.8　无虚拟阻抗时并联 VSG 的输出电压

当并联系统中出现无功环流时，2 个 VSG 的输出电压也受到较大影响。由图 4.8 可以看出，VSG1 和 VSG2 输出的电压波形出现畸变，且 VSG2 电压中的高次谐波占比更高。尽管 2 个 VSG 输出电压的幅值波动不大，电能质量显著下降。

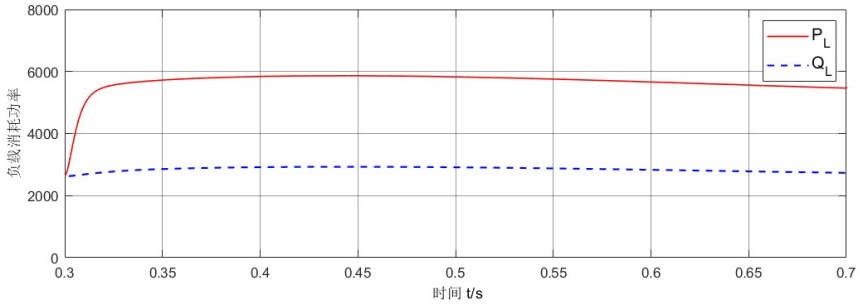


图 4.9　无虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的总功率

当并联系统发生无功环流时，并联VSG系统向负荷输出的功率相比单个VSG的功率波动更小，但输出功率与负荷的功率需求之间的偏差呈增大的趋势。

B) 加入虚拟阻抗

在不改变其他系统参数的前提下，按照 4.2.2 节的设计在控制环路中加入虚拟阻抗环节，其中，VSG1 的虚拟阻抗取值为$L_{v1}=5mH$，VSG1 的虚拟阻抗值为$L_{v2}=10mH$。此时有：

$$\begin{cases} L_{v1} \gg L_{l1} \\ L_{v2} \gg L_{l2} \end{cases} \tag{4-9}$$

可得线路阻抗角为：

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_{v1}}{R_{l1}}\right) \\ &= \tan^{-1} 15.7 \\ &\approx \frac{\pi}{2} \end{aligned} \tag{4-10}$$

同理可得$\varphi_2 \approx \pi/2$。

可见，虚拟阻抗在总阻抗中起到主导作用，取值满足线路阻抗呈感性的设计需要。另外，该取值能够使虚拟阻抗符合无功分配的需要，即：

$$\begin{aligned} \frac{Z_1}{Z_2} &\approx \frac{X_{v1}}{X_{v2}} \\ &= \frac{\omega L_{v1}}{\omega L_{v1}} \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned} \tag{4-11}$$

再次进行前述仿真过程，得到 2 个 VSG 的无功功率响应以及并联系统输出的总功率分别如图 4.10 和图 4.11 所示。

由图 4.10 可以看出，无功功率没有出现大幅度振荡和环流的现象，无功功率

能够通过解耦得到有效控制。整个过程 2 个电源基本能够按照$2:1$的比例进行无功功率均分，在 0.7s 时系统无功功率降低了$1kVar$，这部分无功偏差由 2 个电源共同承担，输出无功功率依旧基本保持$2:1$的关系。

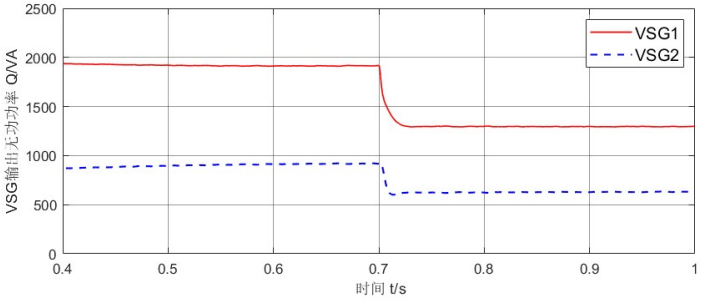


图 4.10　固定虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的无功功率

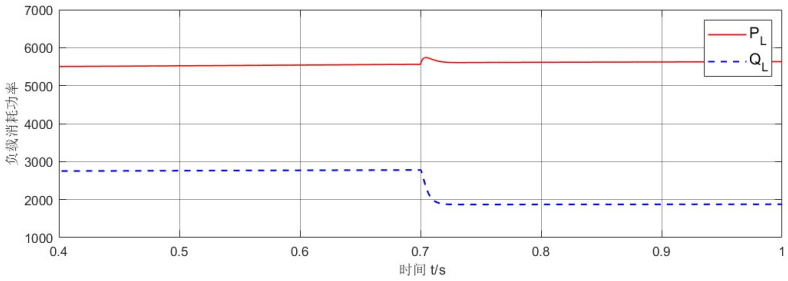


图 4.11　固定虚拟阻抗时 VSG 双机并联输出的总功率

由图 4.11 可以看出，系统总的有功及无功输出略低于负载功率的额定值，这是由于虚拟阻抗的存在产生了虚拟压降，使电压电流双环控制输出的参考电压低于 VSG 有功-频率和无功-电压控制环路生成的参考电动势，导致 VSG 经滤波后的输出电压低于额定值。因此，负载消耗的功率低于其额定值。

VSG1 经滤波后的输出电压波形如图 4.12 所示。

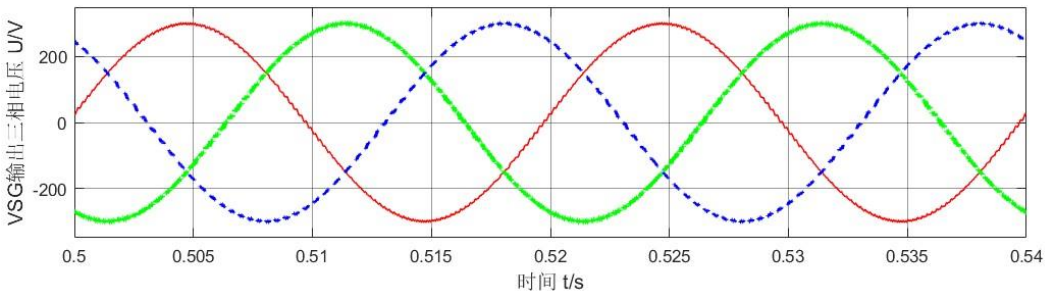


图 4.12　固定虚拟阻抗时 VSG1 的输出电压

可以看出，交流电压幅值低于额定值$311V$，约为$300V$，为额定值的96.46%。由功率与电压的平方关系可以推出，此时有功和无功功率均约为额定值的 93%，

即：

$$\begin{cases} P_l \approx 0.93 \times 6kW = 5.58kW \\ Q_l \approx 0.93 \times 3kVar = 2.79kVar \end{cases} \tag{4-12}$$

计算结果符合图 4.11 中的负荷功率。

综上所述，虚拟阻抗能够有效的改善 VSG 并联运行的性能，使其能够实现功率解耦，并让无功功率按比例分配。同时，虚拟阻抗的存在也会使 VSG 输出电压降低，从而降低输出功率。接下来将对不同虚拟阻抗的情况进行仿真分析。

C) 调节虚拟阻抗取值

由于虚拟阻抗对无功功率分配的精确性以及输出端口电压的幅值均有影响，本小节中将在其他条件不变的情况下，调整虚拟阻抗的取值，观察并联系统的输出变化。其中，系统主要参数仍如表 4.1 所示，分别适当增大和减小虚拟阻抗，具体取值如表 4.2 所示。

表 4.2　VSG 双机并联系统不同虚拟阻抗取值

工况	虚拟阻抗取值
原始工况	$L_{v1}=5mH$、$L_{v2}=10mH$
增大虚拟阻抗	$L_{v1}=10mH$、$L_{v2}=20mH$
减小虚拟阻抗	$L_{v1}=2mH$、$L_{v2}=4mH$

当虚拟阻抗增大为原始取值的 2 倍时，并联 VSG 输出的无功功率如图 4.13 所示。

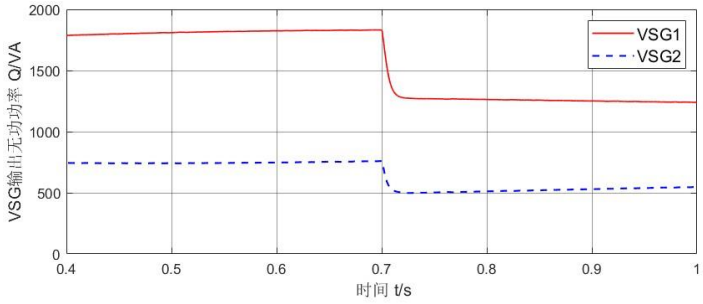


图 4.13　增大虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的无功功率

可以看出，2 个 VSG 输出的无功功率均未达到功率需求，且无功分配没有立刻按照 2:1 的比例进行分配，随后功率分配出现调节过程。继续观察仿真过程，2 个 VSG 输出无功功率的比值变化如图 4.14 所示，系统发生无功功率波动后，无功分配比例与额定功率比例之间存在一定偏差，随后无功功率在 2 个 VSG 直接重新分配，其比值逐渐接近 2:1。

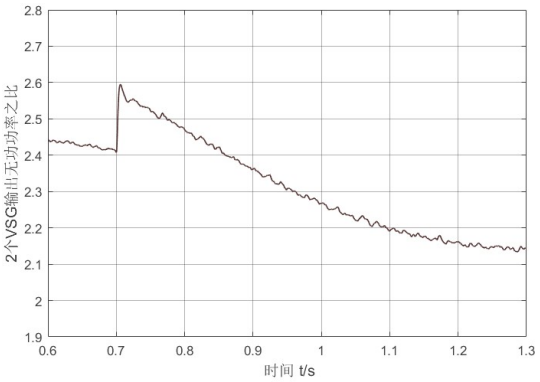


图 4.14　增大虚拟阻抗后 2 个 VSG 输出无功功率比值

并联系统向负载输出的总功率如图 4.15 所示。

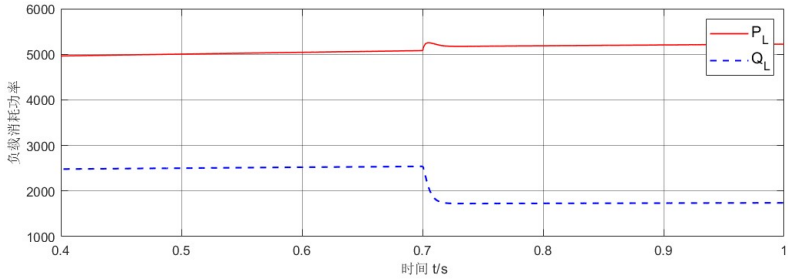


图 4.15　增大虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的总功率

由Q_L对应的无功功率曲线可以看出，2 个 VSG 输出的总无功功率已经稳定，图 4.和 4.中展现出的无功功率分配调节过程仅在 2 个 VSG 之间进行。同时，由于虚拟阻抗的进一步增大，总有功功率和总无功功率相对于额定值的偏差进一步增大，VSG 的输出电压进一步降低，幅值已低于 300V，VSG1 输出的三相电压波形如图 4.16 所示。

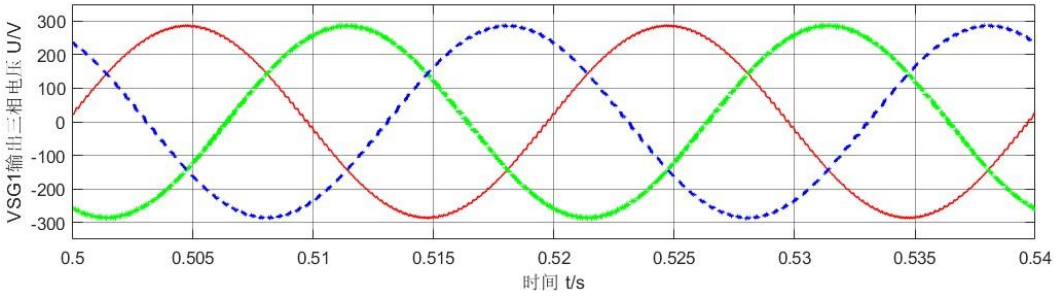


图 4.16　增大虚拟阻抗后 VSG1 的输出电压

减小虚拟阻抗取值后，并联系统的无功输出出现了大幅度振荡，如图 4.17 所示。振荡的幅度先增后减，振荡消失后，无功功率在 2 个 VSG 之间进行相对舒缓

地重新分配。

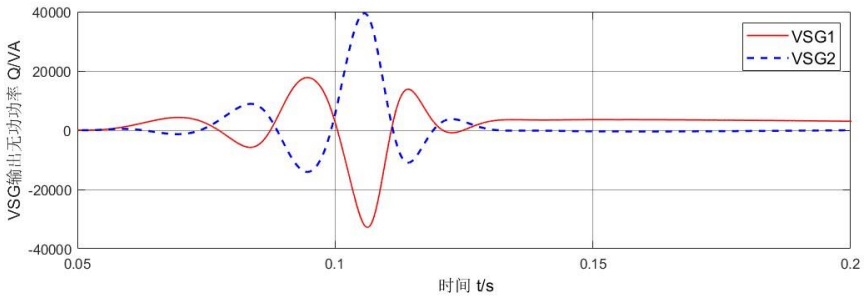


图 4.17　减小虚拟阻抗后初始阶段的无功功率

系统逐渐稳定后，并联 VSG 输出的无功功率如图 4.18 所示。

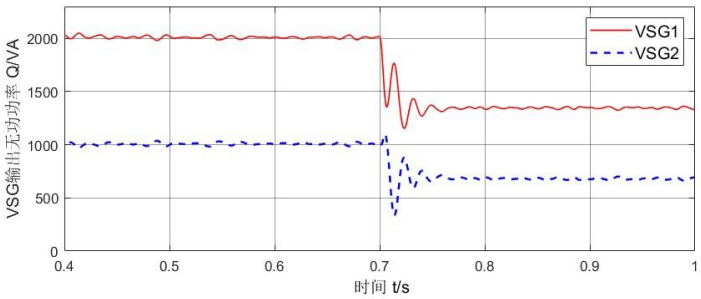


图 4.18　减小虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的无功功率

此时 2 个 VSG 输出的无功功率与期望值接近，同时，相比于前面 2 种虚拟阻抗的情况，功率出现了一定程度的波动，当负载侧无功需求发生变化时，输出功率下降过程出现了衰减震荡。

观察并联系统总输出功率，与图 4.17 过程相对应的总功率输出如图 4.19 所示，当 2 个 VSG 之间出现无功功率的大幅度振荡时，总有功和无功功率出现一定的波动，但远小于单个 VSG 无功功率的振荡幅度，说明无功功率主要在 2 个 VSG 之间进行交换。

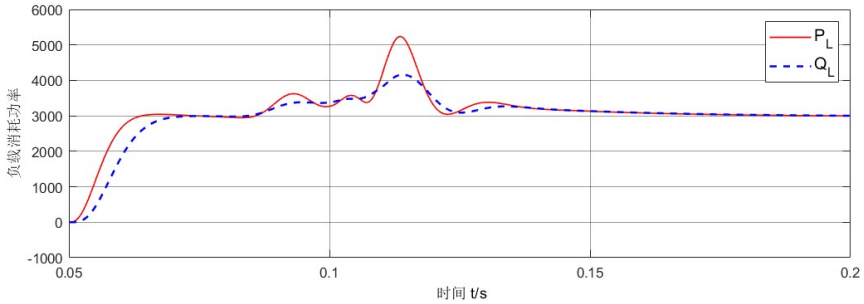


图 4.19　减小虚拟阻抗后初始阶段的总功率

系统稳定后，输出的总功率与期望值之间的偏差更小，如图 4.20 所示。

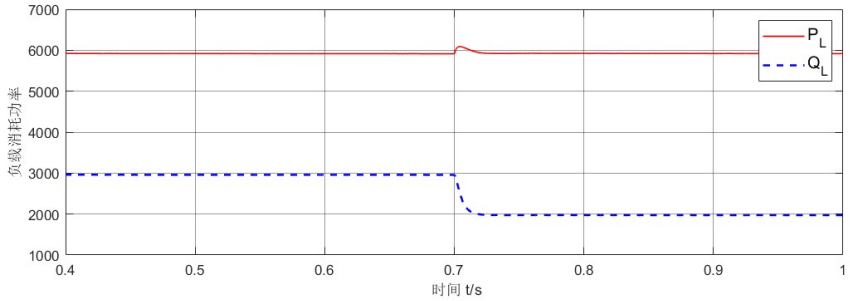


图 4.20　减小虚拟阻抗后 VSG 双机并联输出的总功率

VSG1 输出的端口电压在初始振荡阶段如图 4.21 所示，在约 2 个工频周期内，出现电压三相不平衡以及电压大幅度波动的状况，导致了图 4.19 中总输出功率的波动现象。

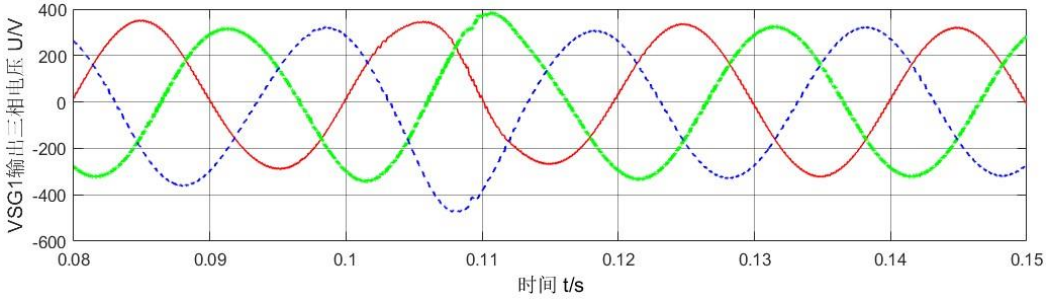


图 4.21　减小虚拟阻抗后初始阶段 VSG1 的输出电压

当并联系统逐渐稳定并实现无功功率按比例分配后，VSG1 输出的端口电压波形如图 4.22 所示，此时电压幅值约为$310V$，虚拟阻抗引起的虚拟压降较小。

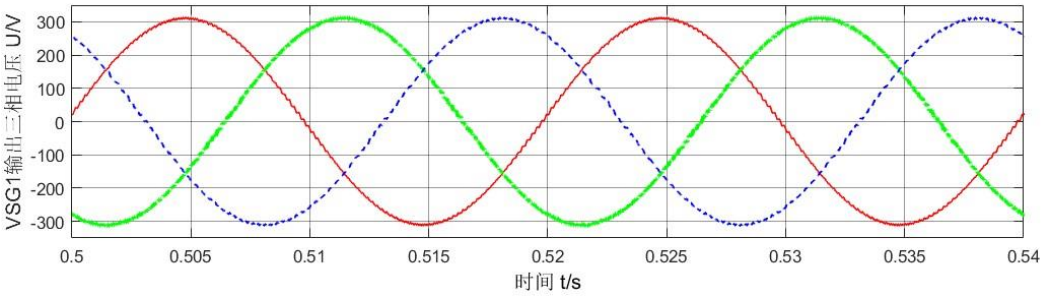


图 4.22　减小虚拟阻抗后 VSG1 输出电压

当虚拟阻抗取值不同时，VSG 并联系统输出的有功功率和无功功率分别如图 4.23 和图 4.24 所示。

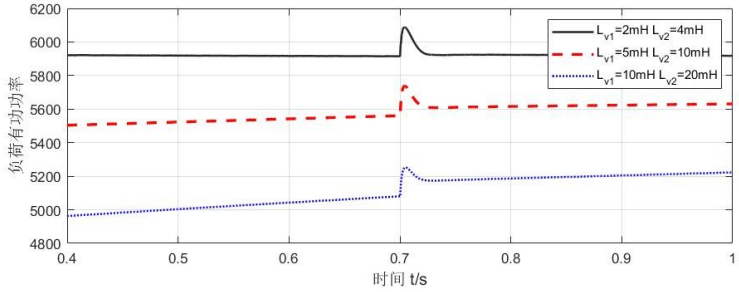


图 4.23　不同虚拟阻抗取值时的有功功率

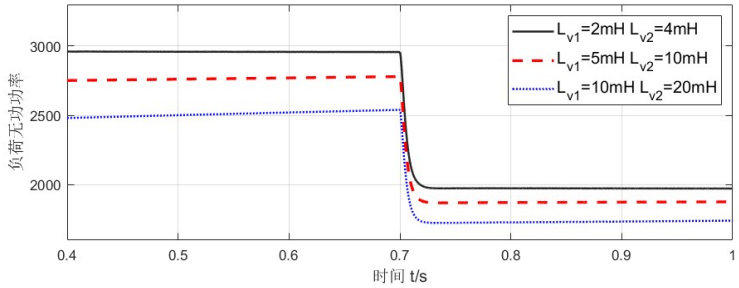


图 4.24　不同虚拟阻抗取值时的无功功率

综合以上仿真结果可以看出，虚拟阻抗的存在有利于有功和无功功率解耦控制，有利于无功功率按电源容量进行分配。然而，过大的虚拟阻抗会产生较大的压降，使 VSG 输出电压显著降低，从而使电源输出的功率低于参考值，且无功功率需要经过较长时间才能实现较为准确的分配；过小的虚拟阻抗虽然会加快无功分配过程，并减小输出电压及总功率的偏差，但容易出现功率振荡，对并联系统的稳定性产生威胁。

4.3　基于 DDPG 算法的自适应虚拟阻抗技术

由 4.2 节中的仿真结果可以看出，虚拟阻抗的存在有利于功率解耦和无功分配，但虚拟阻抗的取值需要根据电源容量及负荷功率进行设置，不合理的取值会对并联系统产生负面影响。

由于虚拟阻抗的取值可以是连续的，本节中依然选择采用基于 DDPG 的强化学习方法来自动调整虚拟阻抗的取值，DDPG 的基本原理在 1.2.2 节中已进行详细介绍，本节将介绍 DDPG 智能体的设计及其训练过程。

4.3.1　环境与智能体设计

VSG 双机并联系统自适应虚拟阻抗控制可以建立为一个马尔可夫决策过程，

运行过程中，智能体与环境进行交互，基于得到的反馈对并联系统的虚拟阻抗进行调节。

（1） 动作与状态

智能体的输出为 2 个 VSG 的虚拟阻抗值，即：

$$a_{qt} = \{X_{1t}, X_{2t}\} \tag{4-13}$$

智能体的目标是输出合适的虚拟阻抗值，实现无功功率按比例分配。

根据本章前文对线路阻抗的分析，考虑虚拟阻抗对功率分配及输出电压的影响，状态观测量选择 2 个 VSG 输出的无功功率与各自期望值的偏差、输出电压有效值与设定值的偏差，以及总有功功率与有功功率设定值之间的偏差，因此环境在t时刻的状态定义为：

$$s_{qt} = \{\Delta Q_{it}, \Delta U_{it}, \Delta P_t\} \tag{4-14}$$

其中，$\Delta Q_{it} = Q_{it} - Q_{exp_it}$表示$t$时刻第$i$个 VSG 输出的无功功率相对于其期望值的偏差，期望值通过当前的无功功率需求以及各个 VSG 的额定容量计算得到，以实现无功按比例分配，即：

$$Q_{\exp_it} = \frac{Q_{i0}}{\sum Q_{i0}} \times Q_l \tag{4-15}$$

其中，Q_l为负荷所需无功功率，Q_{i0}表示每台 VSG 的能提供的最大无功功率。由式(4-4)以及 4.1.1 节中的分析可知，每个分布式电源的无功-下垂系数通常与该电源能够提供的最大无功功率成正比，因此式(4-15)可改写为：

$$Q_{\exp_it} = \frac{K_{ui}}{\sum K_{ui}} \times Q_l \tag{4-16}$$

$\Delta U_{it} = U_{it} - U_{ref}$表示$t$时刻第$i$个 VSG 输出电压有效值与额定值的偏差，$\Delta P_t = P_{Lt} - P_{ref}$表示$t$时刻并联系统输出的总有功功率与设定值之间的偏差。

（2） 奖励函数设计

对于无功功率按比例分配，应当使得每一个 VSG 输出的无功功率与其期望值的差值都尽可能小，因此针对无功偏差部分，设计的特征函数为：

$$C_{q1} = \rho_q \sum \Delta Q_{it}{}^2 \tag{4-17}$$

其中，ρ_q表示无功功率偏差的惩罚系数。

由第 4.2.3 节中的仿真结果可知，虚拟阻抗的存在会使 VSG 输出电压降低，进而影响总输出功率，因此将电压偏差引入奖励函数以减小虚拟阻抗上的虚拟压降，使 VSG 输出端电压更加接近额定值，针对电压偏差部分设计的特征函数为：

$$C_{q2} = \rho_u |\Delta U_{it}| \tag{4-18}$$

其中，ρ_u为电压有效值偏差的惩罚系数。

另外，由第 4.2.3 节的仿真过程可知，输出电压的偏差以及无功功率按比例分配的调节过程均会对总有功功率输出产生影响，因此引入有功功率的偏差项，以加强对无功功率分配及输出电压有效值的约束，该部分的特征函数设计为：

$$C_{q3} = \rho_{PL} (\Delta P_t)^2 \tag{4-19}$$

其中，ρ_P为有功功率偏差的惩罚系数。

综上所述，在t时刻的奖励函数r_{qt}可以表示为：

$$r_{qt} = -\left(\beta_{q1} C_{q1} + \beta_{q2} C_{q2} + \beta_{q3} C_{q3}\right) \tag{4-20}$$

其中，β_{q1}、β_{q2}、β_{q3}分别为前述三项特征函数的权重系数。

（3） 神经网络结构

本章中所设计的 DDPG 算法中，Actor 网络包含了 2 个全连接层，每层依然使用 ReLU 函数进行激活。Critic 网络包含状态路径、动作路径和公共路径三部分，其结构如图 4.25 所示，状态路径接收并联系统中 2 个 VSG 输出的无功功率、电压有效值、无功设定值、电压设定值以及总的有功功率输出及有功功率设定值，动作路径接收智能体输出的 2 个虚拟阻抗取值，状态路径和动作路径均包含了 2 个全连接层，其输出送至公共路径相加，再经过 2 个全连接层得到价值函数。

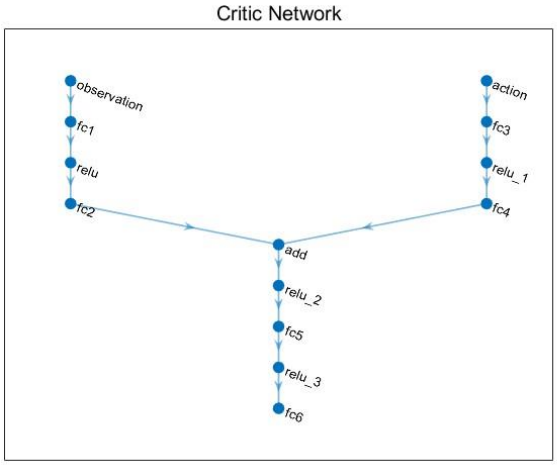


图 4.25　Critic 网络结构示意图

4.3.2　训练过程

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建单机 VSG 系统，对虚拟转动惯量和阻尼系数采用基于 DDPG 的强化学习算法进行自动调节，智能体与 VSG 系统构成的环境

交互进行训练，智能体与 VSG 系统交互的过程如图 4.26 所示。

智能体接收 VSG 系统当前的无功功率偏差、电压幅值偏差以及总有功功率偏差作为当前状态输入，经过当前 Actor 网络将各个 VSG 的虚拟阻抗作为动作输出，并对各个网络的参数进行更新。智能体的训练过程与第 3 章中表 3.3 所示的过程一致。

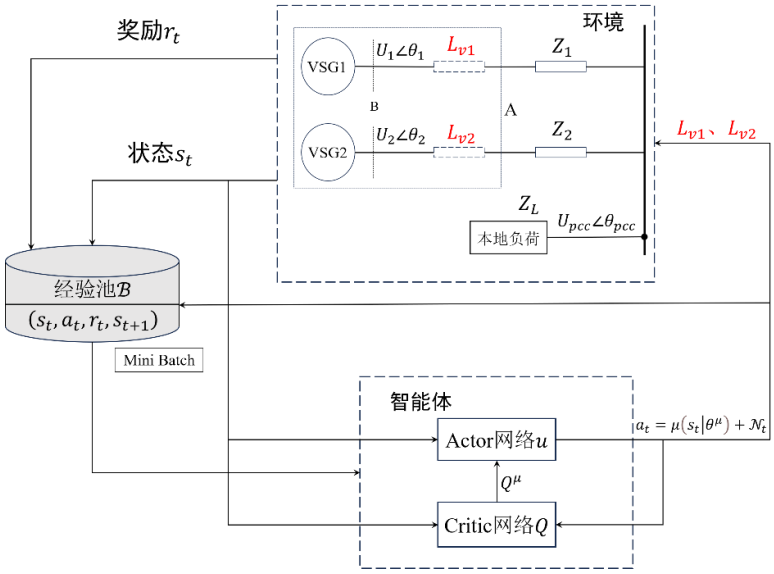


图 4.26　智能体与单机 VSG 系统交互过程

每轮训练过程开始时，随机初始化负载的功率需求，在过程中，无功功率需求发生一次随机变化。训练过程中的相关参数如表 4.3 所示。

表 4.3　基于 DDPG 的虚拟阻抗自适应控制中智能体相关参数

参数	数值
最大回合数	600
经验池大小	100,000
采样批次	128
当前 Actor 网络学习率	0.0005
当前 Critic 网络学习率	0.0001
目标网络软更新学习率	0.001
奖励折扣率	0.95

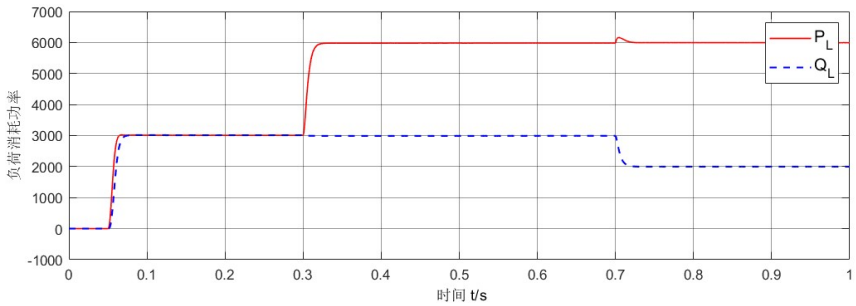
4.4　结果对比

经过 4.3.2 节的训练后，对基于 DDPG 的并联 VSG 虚拟阻抗自适应方法进行

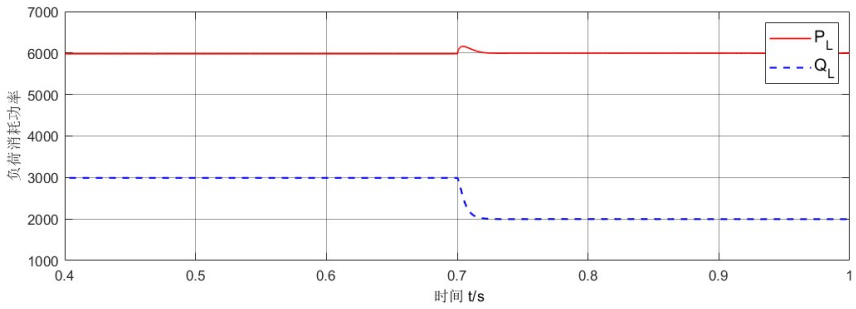
仿真测试，系统的主要参数和仿真过程与第 4.2.3 节中一致，在智能体对虚拟阻抗进行在线调节的情况下，观察并联系统的输出，并与固定虚拟阻抗方式对比。

图 4.27 所示为并联系统在整个仿真过程中的总输出功率，可以看出，输出功率并未出现图 4.19 中的大幅度波动情况，输出波形平稳且响应迅速，相比于 4.2.3 节中恒定虚拟阻抗且取值较小的情况，并联系统的稳定性提升。

由图 4.27（b）可以看出，并联系统输出的有功功率和无功功率很快达到稳定，没有出现总功率缓慢变化的调节过程，且输出功率与设定值相比几乎没有偏差。相比于恒定虚拟阻抗且取值较大的情形，该并联系统响应速度更快，功率偏差更低。



（a）全过程



（b）局部

图 4.27　DDPG 算法中 VSG 双机并联输出的总功率

仿真过程中，2 个 VSG 各自输出的无功功率如图 4.28 所示。在整个过程中，2 个 VSG 的输出功率按照容量以 2:1 的比例进行分配，当功率需求发生变化时，能按比例平滑过渡，未出现图 4.18 中的振荡过程。

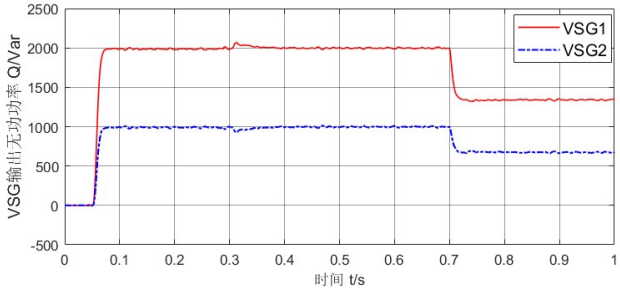
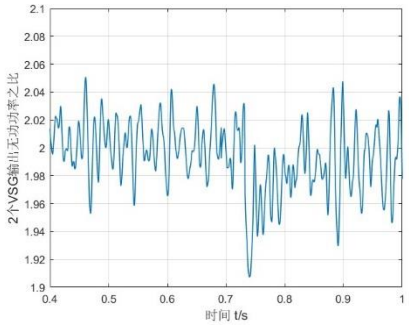
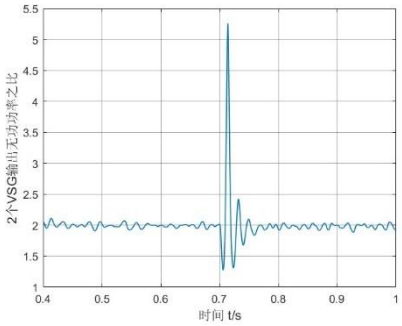


图 4.28　DDPG 算法中 VSG 双机并联输出的无功功率

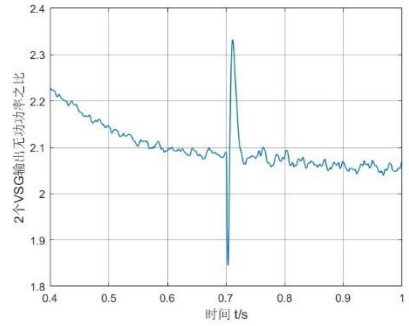
2 个 VSG 在基于 DDPG 的虚拟阻抗自适应控制方法以及 4.2.3 节中 3 个固定虚拟阻抗方法下，无功功率分配情况分别如图 4.29 所示，由图可以看出，在自适应虚拟阻抗方式下，无功功率分配比例的偏差始终保持在± 0.1以内，具有最好的无功分配精度以及最小的波动。



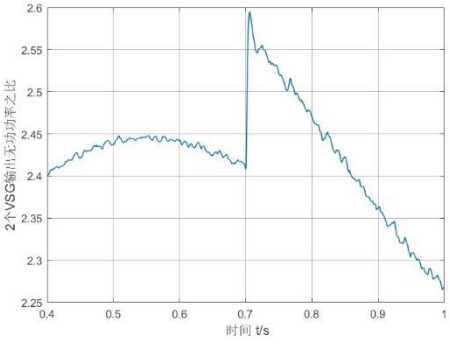
（a）基于 DDPG 的自适应虚拟阻抗



（b）$L_{v1}=2mH$，$L_{v2}=4mH$



（c）$L_{v1}=5mH$，$L_{v2}=10mH$



（d）$L_{v1}=10mH$，$L_{v2}=20mH$

图 4.29　不同虚拟阻抗下 2 个 VSG 输出无功功率之比

当虚拟阻抗取值固定时，较小的虚拟阻抗有利于快速实现功率无功分配，但在总无功功率发生变化时，2 个 VSG 之间会存在较大的无功振荡；较大的虚拟阻

抗则需要较长的调整时间来实现无功分配。

根据本节以及 4.2.3 节的仿真结果，不同虚拟阻抗条件下 VSG 双机并联系统的表现对比如表 4.4 所示。

表 4.4　不同虚拟阻抗下 VSG 双机并联系统表现

	无虚拟阻抗	$L_{v1}=2mH$ $L_{v2}=4mH$	$L_{v1}=5mH$ $L_{v2}=10mH$	$L_{v1}=10mH$ $L_{v2}=20mH$	DDPG 自适应
稳定性	不稳定	较稳定	稳定	稳定	稳定
波动性	剧烈波动	波动	不波动	不波动	不波动
无功分配	无法分配	精准	精准	较精准	精准
调节过程	无	迅速	较迅速	较慢	迅速

4.5　本章小结

VSG 控制受到线路阻抗的影响，在并联运行时会存在无功功率分配不均衡的问题。本章首先分析了无虚拟阻抗并联系统可能存在的问题，详细介绍了虚拟阻抗的概念和原理，并在 MATLAB/Simulink 搭建了 VSG 双机并联系统，通过对无虚拟阻抗情况以及虚拟阻抗的不同取值情况下的并联系统进行仿真，验证了主导法虚拟阻抗技术对 VSG 并联系统的改善，得到不同虚拟阻抗取值对系统的影响。

随后，引入了基于 DDPG 的深度强化学习方法对虚拟阻抗的取值进行自适应控制。该部分首先介绍了输出动作与输入状态的选择，将算法的状态输入设置为每台 VSG 输出无功与其无功功率期望值的偏差以及每台 VSG 输出电压与其额定值的偏差，并基于此设计了奖励函数；算法的动作输出为每个 VSG 的虚拟阻抗取值。在 MATLAB/Simulink 平台中搭建双机并联 VSG 系统，作为环境对智能体进行训练和测试。根据测试结果，DDPG 算法对虚拟阻抗进行在线调节，进一步提升了 VSG 的并联表现，相比于固定虚拟阻抗方法，其无功功率分配偏差以及总功率偏差都有所减小，证明了算法的有效性。

第5章　VSG 二次调频策略

5.1　调频过程概述

电力系统中的频率受到有功功率变化的影响而发生波动，在发电机调速器的作用下进行一次调频，其基本工作原理如图 5.1 所示。

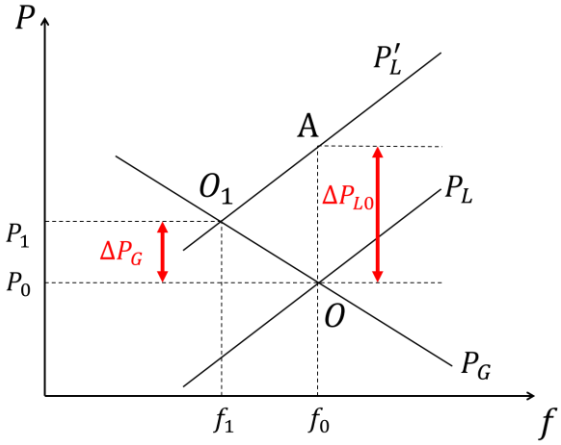


图 5.1　一次调频曲线

图中，P_L和P_G分别为负荷和发电机的有功-频率特性曲线，两条曲线的交点A为系统的初始工作点，假设O点对应的角频率为系统的额定频率f_0。假设系统的负荷需求突然增大ΔP_{L0}，即负荷的有功-频率特性曲线变为P_L'，由于发电机来不及动作，有功-频率特性曲线不变，发电机组有功出力小于负荷需求，频率下降Δf，有功出力在调速器的作用下增加ΔP_G，最终稳定在新的工作点O_1，即P_L'与P_G的交点，对应频率为f_1，负荷上消耗的功率为P_1。此时，发电机输出的频率及负荷消耗的功率均低于额定值。因此，一次调频是有差调节，当功率变化较大时会使系统产生较大的频率偏差，影响系统稳定。

为了使频率恢复额定值，需要进行二次调频，对发电机的工作曲线进行调整，其基本工作原理如图 5.2 所示。在前述一次调频过程的基础上，增大发电机的有功出力使得有功-频率特性曲线向上移动变为P_G''，由于负荷的特性曲线不变，新的工作点将运行至P_G''与P_L'的交点O_2处。此时，系统频率恢复至额定频率f_0，负荷上消耗的功率等于其需求功率。由此可见，二次调频是无差的。

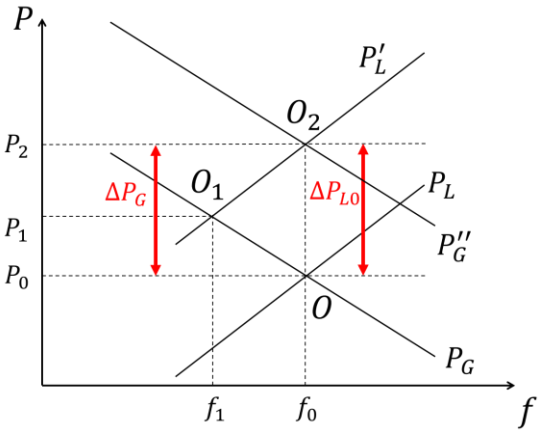


图 5.2　二次调频曲线

通常情况下，新能源分布式电源通常工作在最大功率发电状态，不保留热备用，不主动参与电力系统的有功功率平衡和频率调节。当前，新能源占比的不断提高，具有二次调频功能的调频机组所占比例降低，若新能源电源不参与二次调频， 则调频机组的压力增大，系统稳定性受到更大威胁。随着 VSG 等构网型控制策略的不断发展，配有储能的新能源分布式电源也具备了二次调频的能力[60, 61]。

本章将对 VSG 的二次调频技术进行分析和研究。

5.2　VSG 的二次调频策略

5.2.1　VSG 二次调频设计

当分布式电源和负荷构成的区域电力系统并网运行时，由于其容量远小于大电网，其输出电压的频率和幅值被大电网钳制，区域负荷功率的改变对系统电压的影响可以忽略。

而当分布式电力系统与大电网断开连接进行孤岛运行时，区域内的分布式电源需要对电压的频率和幅值进行支撑，区域内负荷功率的变化将会对分布式电源输出的交流电压产生影响。一个运行在孤岛模式的区域电力系统如图 5.3 所示。

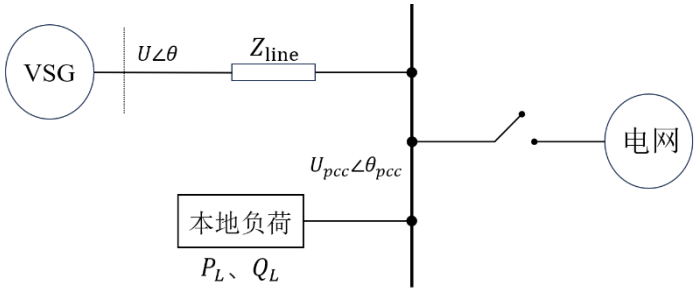


图 5.3　孤岛模式区域电力系统

VSG 模拟了同步电动机的动态过程，且引入了有功-频率下垂控制，孤岛运行时与同步发电机具有相似的一次调频过程。因此可以根据 5.1 节，结合图 5.4，对 VSG 的二次调频过程进行进一步分析。

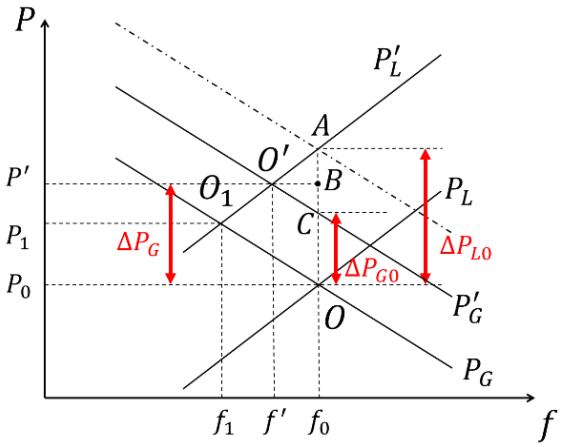


图 5.4　VSG 二次调频过程曲线

启动 VSG 二次调频将其有功-频率特性曲线进行移动，假设此时系统并未恢复至额定频率。设上移量为ΔP_{G0}，即在额定频率下当前的有功功率额定值变为$P_0+\Delta P_{G0}$，则 VSG 的工作曲线变为P'_G，此时的工作点为P'_G与P'_L的交点O'，对应 VSG 的输出频率为f'，负荷消耗的有功功率为P'。

此时，频率偏差为

$$\Delta f' = f' - f_0 < 0 \tag{5-1}$$

VSG 调节效应为：

$$|BC| = \Delta P'_G = \Delta P_G - \Delta P_{G0} = -K_G \Delta f' \tag{5-2}$$

负荷侧的调节效应为：

$$|AB| = \Delta P'_L = \Delta P_{L0} - \Delta P_G = -K_L \Delta f' \tag{5-3}$$

其中，K_G和K_L分别为 VSG 和负荷的单位调节系数。即在工作点O'处，VSG 输出功率比当前的额定有功功率高$\Delta P'_G$，负荷消耗的有功功率比需求的有功功率低$\Delta P'_L$，即：

$$\begin{aligned} |AC| &= \Delta P'_G + \Delta P'_L \\ &= \Delta P_{L0} - \Delta P_{G0} \\ &= -(K_G + K_L)\Delta f' \end{aligned} \tag{5-4}$$

若实现频率的无差调节，则应满足$\Delta P_{G0} = \Delta P_{L0}$。因此，只需要在控制环节中加入频率偏差的补偿量$\Delta P$，加入式（2-4）所对应有功-频率控制环路，即可实现孤岛 VSG 的二次调频。

补偿后的转子运动控制环路可写为：

$$J\omega\frac{d\omega}{dt}=P_0-P_e-D_p(\omega-\omega_0)+\Delta P_c \tag{5-5}$$

其中，功率补偿量ΔP_c可通过采集 VSG 的输出频率与额定频率的偏差，经积分控制器后得到，即：

$$\Delta P=k_p\int\Delta\omega dt \tag{5-6}$$

其中，k_p为积分系数。加入角频率偏差的积分环节后，基于第 2 章的控制环路分析以及图 2.6 的控制原理，VSG 的有功-频率控制环路如图 5.5 所示。

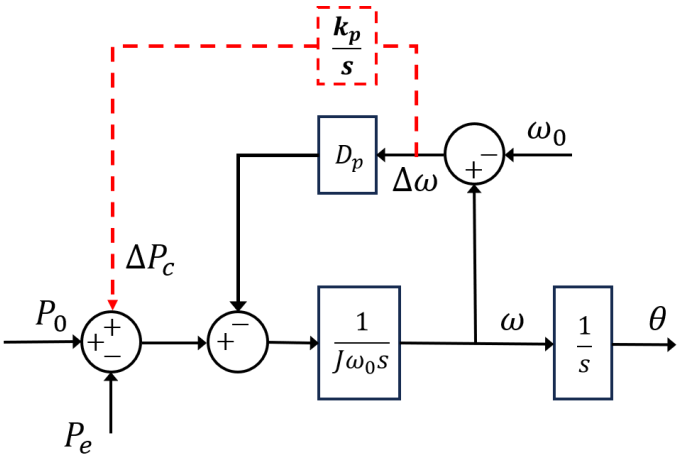


图 5.5　加入二次调频环节的有功-频率控制环路

基于当前的有功-频率控制环路建立小信号模型，角频率偏差$\Delta\omega$对功率偏差ΔP_c的传递函数为：

$$G_{\omega p}=\frac{\Delta\omega}{\Delta P_c}=\frac{s}{J\omega_0 s^2+D_p s+k_p\omega_0} \tag{5-7}$$

即：

$$\Delta\omega=\frac{s}{J\omega_0 s^2+D_p s+k_p\omega_0}\Delta P_c \tag{5-8}$$

因此有：

$$\lim_{t\to\infty}\Delta\omega(t)=\lim_{s\to 0}s\Delta\omega(s)=0 \tag{5-9}$$

即加入积分环节后，当系统中出现有限的有功功率偏差时，经过足够长的时间后，角频率偏差将收敛为 0，角频率恢复至额定值。

5.2.2　VSG 二次调频仿真

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建孤岛 VSG 系统，相关的系统参数如表 5.1 所示。

表 5.1　孤岛 VSG 仿真参数

参数	取值
直流电压	800V
交流电压幅值	311V
额定频率	50Hz
有功功率设定值P_1	4kW
无功功率设定值Q_1	3kVar

仿真过程为：初始阶段，有功功率指令为$P_1 = 4kW$，无功功率指令为$Q_1 = 3kVar$，此时本地负荷上消耗的功率与 VSG 的指令值相等；待系统输出稳定后，在 0.3s 时，本地负荷增加$2kW$，有功功率指令值不变；0.7s 时，本地负载降低$2kW$，有功功率指令依然不变，至仿真结束。

A) 不加入二次调频环节

此时，VSG 输出频率如图 5.6 所示。初始阶段，由于负荷功率与 VSG 功率指令一致，VSG 在额定工作点运行，此时 VSG 输出电压频率为 50Hz。当负荷功率在 0.3s 突增时，有功-频率下垂关系使 VSG 的输出电压频率产生稳态偏差，此时负荷功率比有功功率设定值高 2kW，输出频率降至 49.96Hz；负荷功率在 0.7s 突然降低，比有功功率设定值低 1kW，VSG 输出的电压频率升高至 50.02Hz 并保持稳定。

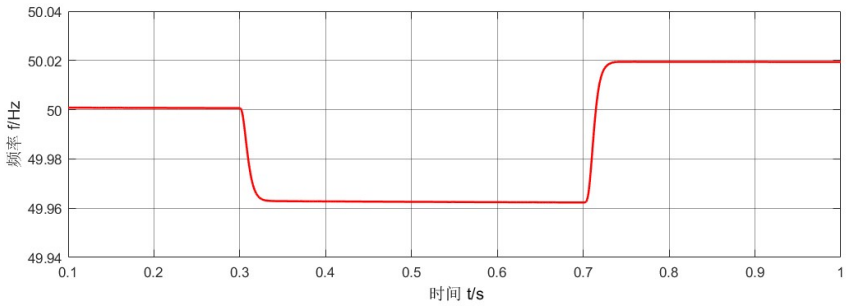


图 5.6　无二次调频环节时 VSG 输出频率

在 VSG 有功-频率控制环路中加入二次调频环节，该环节在 0.5s 时投入，并保持接入状态至仿真结束。加入二次调频环节后 VSG 输出电压频率如图 5.7 所示。

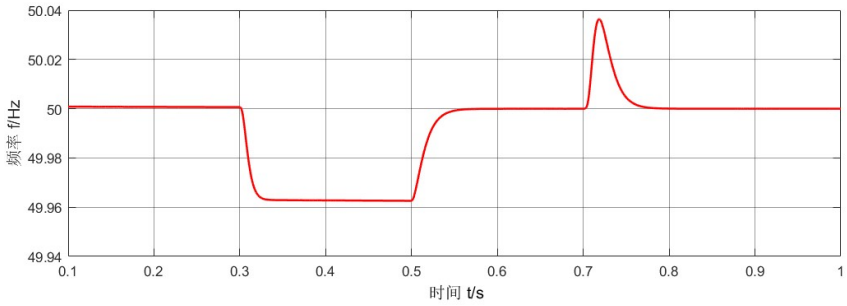


图 5.7　加入二次调频后 VSG 输出频率

在 0.5s 二次调频环节投入后，频率迅速恢复至 50Hz。0.7s 时负荷功率降低使得频率升高，在二次调频环节的作用下迅速恢复至额定频率。

在投入二次调频环节后，角频率偏差的积分作为功率补偿量对工作点进行调整，该补偿量的变化如图 5.8 所示。

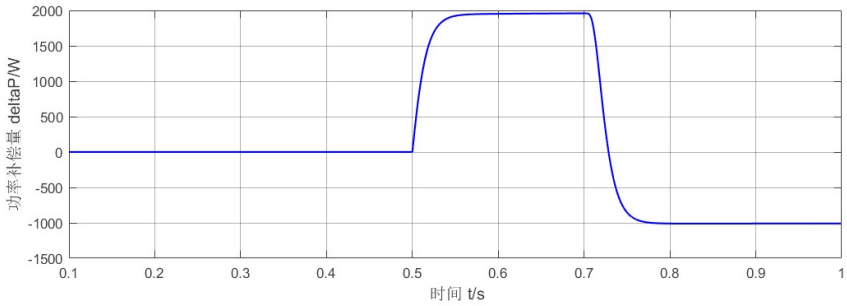
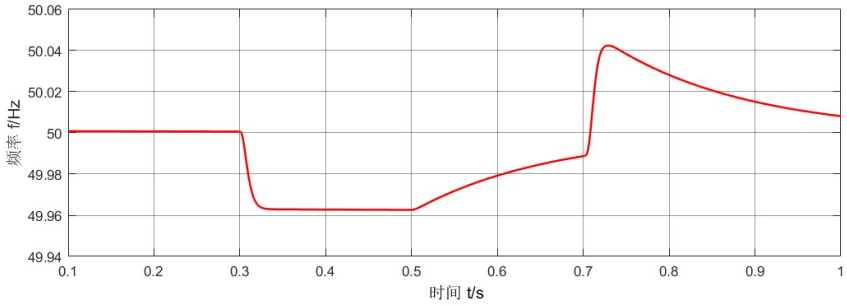


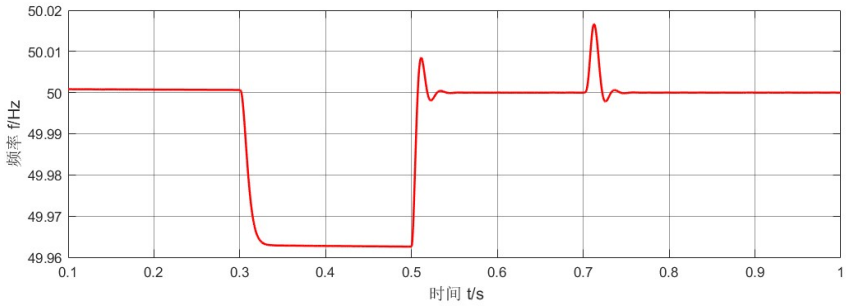
图 5.8　有功功率补偿量

积分环节对有功功率的设定值迅速进行补充，使频率恢复额定值。在$0.5\sim0.7s$的时间段内，负荷功率高于 VSG 有功设定值，积分环节输出正值对功率进行补偿；当$0.7s$负荷功率突然降低时，积分环节的输出无法突变，仍然对有功功率进行正向补偿，在功率波动瞬间，补偿后的有功功率参考值高于负荷功率 3kW，大于无二次调频环节时的功率偏差。在更大的功率偏差影响下，频率迅速升高，如图 5.7 中$0.7s$后的频率变化过程，最大值约为 50.036Hz，最大瞬时偏差为$\Delta f_m = 0.036\text{Hz}$，而图 5.6 中无虚拟阻抗时的稳态偏差仅为$0.02\text{Hz}$。由此可知，当二次调频环节持续工作时，若负荷功率持续上下波动，VSG 输出频率的最大偏差可能会高于无二次调频环节时的稳态偏差，这将对区域电力系统带来不利影响。

另一方面，尽管对频率偏差进行积分能够有效实现二次调频，然而，与 PID 控制器一样，积分系数的设置会影响二次调频过程，积分系数取值不同时，调频效果会受到显著影响，如图 5.9 所示。



（a）积分系数较小



（b）积分系数较大

图 5.9　不同积分系数下 VSG 输出频率

当积分系数设置过小时，频率恢复缓慢，最大频率偏差也相对更大，当负荷功率持续变化时，VSG 输出频率会持续偏离额定值；当积分系数设置过大时，频率恢复过程则会产生振荡。

另外，积分系数的设置依赖于 VSG 的下垂控制参数以及电源的容量，灵活性较差，在新的 VSG 系统中需要重新进行设置。

5.3　基于 DDPG 算法的 VSG 二次调频

为了更加灵活有效地实现 VSG 的二次调频，引入强化学习算法，用智能体取代角频率偏差的积分环节，在负荷功率未知的情况下，根据当前的状态直接对有功功率设定值进行补偿，从而实现 VSG 的二次调频。

由于功率补偿量的取值是连续的，本节中使用基于 DDPG 的强化学习方法来对功率设定值进行直接补偿。

5.3.1　环境与智能体设计

将孤岛运行 VSG 的二次调频过程建立为马尔可夫决策过程，智能体根据系统

当前的状态输出有功功率设定值的补偿量，将有功-频率下垂曲线上移，从而实现既定目标。

（1） 动作与状态

本节中，设计智能体的动作输出为有功功率设定值的补偿量ΔP_c，因此定义该智能体在t时刻的动作为：

$$a_{ft} = \{\Delta P_{ct}\} \tag{5-10}$$

首先，智能体的控制目标是使频率恢复至额定值，选择 VSG 输出的电压频率、频率变化率以及输出的有功功率作为环境的观测量，因此环境在t时刻的状态定义为：

$$s_{ft} = \left\{\Delta f_t, \frac{df_t}{dt}, P_t\right\} \tag{5-11}$$

其中，$\Delta f_t = f_t - f_{ref}$表示$t$时刻频率相对于额定值的偏差，$P_t$为$t$时刻 VSG 输出的有功功率。

（2） 奖励函数设计

参考第 3 章中设计智能体时对频率偏差的约束，本节中针对输出频率偏差部分的特征函数设置为分段函数：

$$C_{f1} = \begin{cases} \rho_f(\Delta f_t)^2, & |\Delta f_t| \le \Delta f_m \\ \rho_{fm}(\Delta f_t)^2, & |\Delta f_t| > \Delta f_m \end{cases} \tag{5-12}$$

其中，Δf_m为频率偏差绝对值的上限，根据国标 GB/T15945-2008《电能质量-电力系统频率偏差》中的规定，取$\Delta f_m = 0.5Hz$；ρ_f和ρ_{fm}为惩罚系数，当偏差超过阈值时会受到更大的惩罚。

对于调频过程，希望实现频率迅速恢复的同时，避免过快的调节速度带来的振荡和过冲。因此，将频率变化率部分的特征函数设置为：

$$C_{f2} = \rho_{df}\left(\frac{df_t}{dt}\right)^2 \tag{5-13}$$

ρ_{df}为频率变化率的惩罚系数。

另外，考虑实际场景中，配有储能的分布式新能源通常要实现功率优先消纳，因此限制 VSG 的输出功率为正，以防止新能源的浪费。因此，将输出功率部分设置为：

$$C_{f3} = \begin{cases} 0, & P_t > 0 \\ \rho_p, & P_t < 0 \end{cases} \tag{5-14}$$

即当输出功率为负值时，会受到较大惩罚。

综上所述，在t时刻的奖励函数r_t可以表示为：

$$r_{ft} = -\left(\beta_{f1}C_{f1} + \beta_{f2}C_{f2} + \beta_{f3}C_{f3}\right) \tag{5-15}$$

其中，β_{f1}、β_{f2}、β_{f3}分别为频率偏差、频率变化率以及输出功率的权重系数。

（3） 神经网络结构

在本节所使用的 DDPG 算法中，Actor 网络包含 3 个全连接层，前 2 层使用双曲正切函数（Hyperbolic Tangent Function）进行激活，表达式为：

$$\tanh x = \frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}} \tag{5-16}$$

最后一个全连接层不适用激活函数，直接将计算结果进行输出。

Critic 网络由状态路径、动作路径和公共路径 3 部分构成，其结构如图 5.10 所示。状态路径接收孤岛 VSG 输出的功率、频率以及频率变化率，经过 2 个全连接层送至公共路径输入端，动作路径接收智能体输出的有功功率补偿量，经 1 个全连接层送至公共路径，再经过 2 个全连接层得到输出。

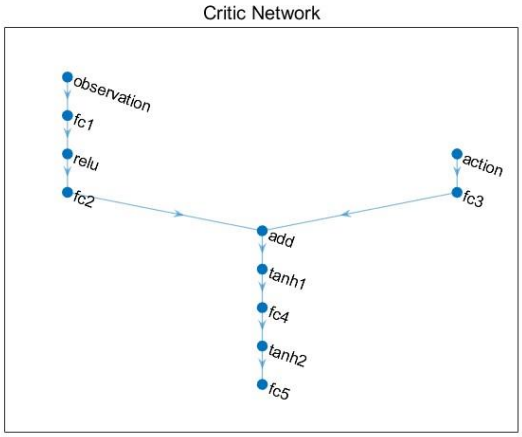


图 5.10　Critic 网络结构示意图

5.3.2　训练过程

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建孤岛 VSG 系统，采用 DDPG 算法对有功功率设定值进行补偿，智能体与孤岛 VSG 系统构成的环境进行交互，该过程如图 5.11 所示。

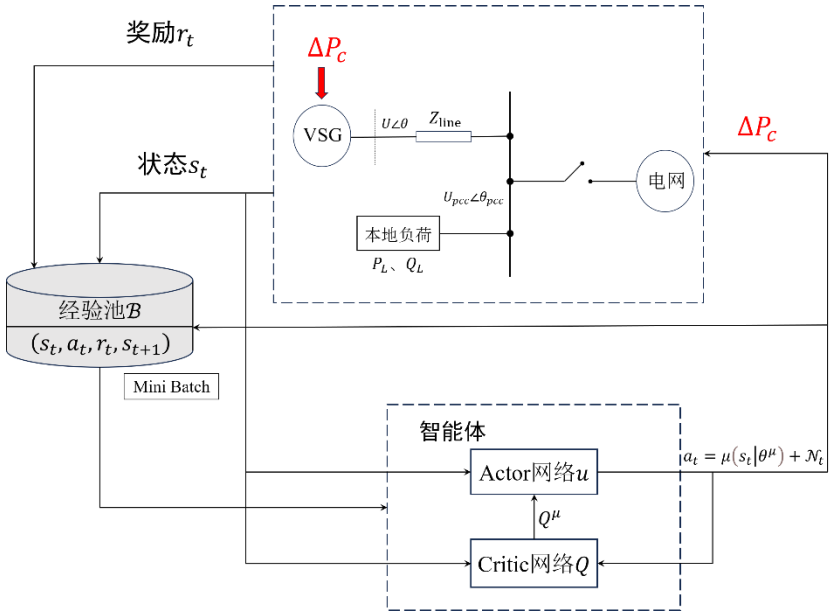


图 5.11　智能体与孤岛 VSG 系统交互过程

智能体接收 VSG 系统当前的频率偏差、频率变化率以及有功功率作为当前状态输入，经过当前 Actor 网络将 VSG 有功-频率控制环路中的有功功率补偿量作为动作输出，并对各个网络的参数进行更新。智能体的训练过程与第 3 章中表 3.3 所示过程一致。

每轮训练开始时，随机初始化负荷的有功功率需求，在过程中负荷功率发生一次阶跃变化。训练过程的相关参数如表 4.所示。

表 5.2　基于 DDPG 的二次调频中智能体相关参数

参数	数值
最大回合数	1000
经验池大小	100,000
采样批次	128
当前 Actor 网络学习率	0.0005
当前 Critic 网络学习率	0.0002
目标网络软更新学习率	0.001
奖励折扣率	0.9

5.4　结果对比

结果 5.3 节中对智能体的训练后，首先，使用与 5.2.2 节中相同的过程和参数

对智能体进行测试，智能体在$0.5s$时被投入，开始进行二次调频。对 VSG 输出的频率进行观测，结果如图 5.12 所示。

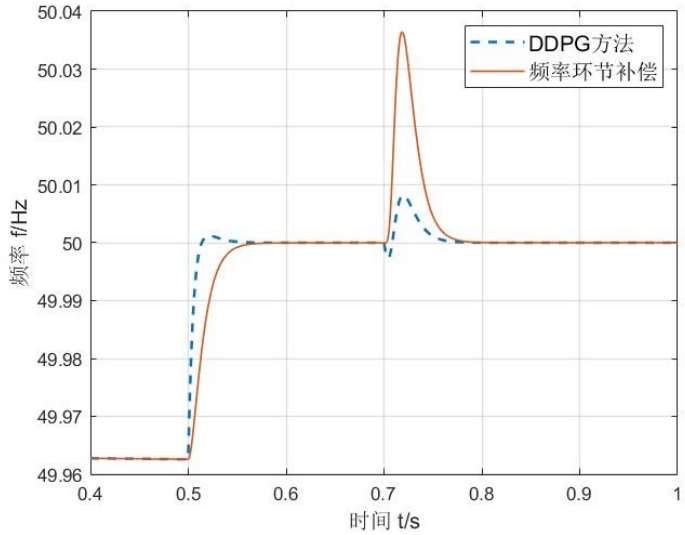


图 5.12　DDPG 与 5.2 节中二次调频方法对比

可以看出，在智能体开始动作后，频率迅速恢复至额定值附近；负荷功率突然降低时，频率上升幅度约为$\Delta f_m = 0.008\text{Hz}$，与 5.2 节中的积分环节补偿方法所引起的频率偏差相比，下降约 77.78%。

智能体在二次调频过程中输出的功率补偿信号如图 5.13 所示。与 5.2 节中的方法对比，智能体在投入二次调频的一瞬间对功率补偿量的调整更加剧烈，产生了更快的频率恢复速度。在 0.7s 时，基于积分环节的功率补偿无法瞬间将补偿量变为负值，因此在变化初期引起了更大的频率偏差，而基于 DDPG 算法的智能体在功率变化瞬间立刻产生了反向的功率补偿以应对负载功率的跌落，使得最大频率偏差降低。

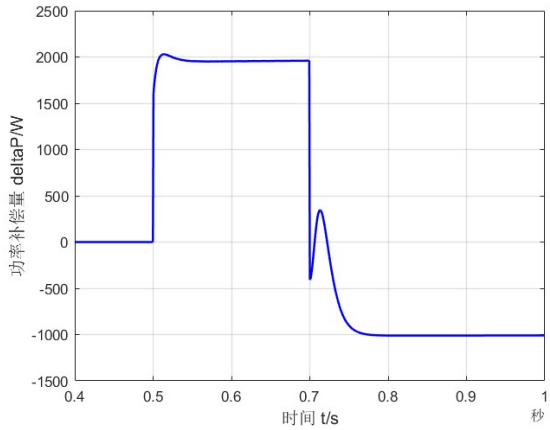


图 5.13　智能体输出功率补偿量

进一步地，改变系统参数及仿真过程，新的系统参数如表 5.3 所示。

表 5.3　新的孤岛 VSG 系统参数

参数	取值
有功功率设定值P_1	30kW
初始负载有功功率P_{l1}	40kW
变化后负载有功功率P_{l2}	25kW

新的仿真过程为：初始时刻，负荷有功功率为$P_{l1}=40\text{kW}$；$t=0.3s$时，投入二次调频环节，直至仿真结束；$t=0.5s$时，系统中切除负荷$\Delta P_l=25\text{kW}$，负载有功功率变为$P_{l2}=15\text{kW}$。

在新系统参数下，对比基于频率偏差积分的二次调频和基于 DDPG 的二次调频方法，积分系数仍然使用前文仿真中的取值，DDPG 仍然使用同一个已训练完成的智能体。所得 VSG 输出电压频率如图 5.14 所示。

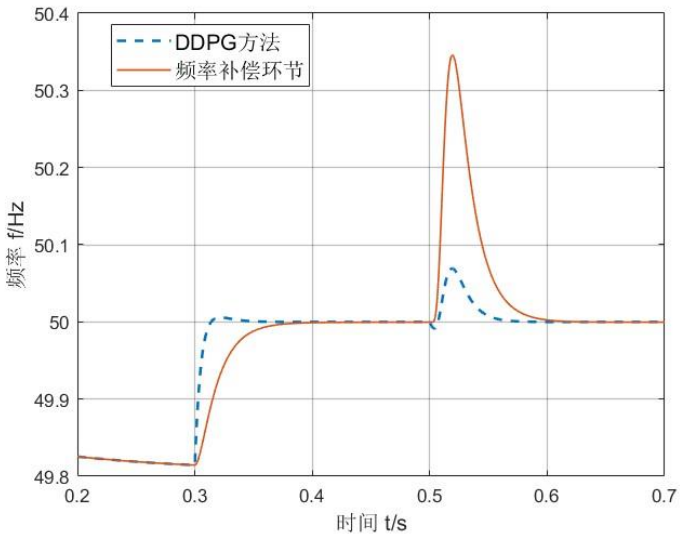


图 5.14　新参数下 DDPG 与 5.2 节中二次调频方法对比

可见，在 0.3s 二次调频开启后，使用原有的积分系数进行二次调频时，最大瞬时功率偏差约为0.35Hz，已接近国标 GB/T15945-2008《电能质量-电力系统频率偏差》中的规定最大允许频率偏差；而基于 DDPG 的二次调频方法中，最大频率偏差约为0.07Hz，最大频率偏差降低了约 80%，且频率恢复更加迅速。

DDPG 算法中智能体输出的功率补偿量如图 5.15 所示。

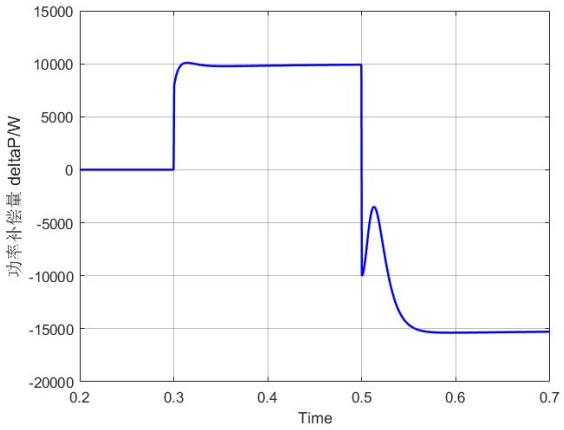


图 5.15　　新参数下智能体输出功率补偿量

5.5　本章小结

本章围绕孤岛 VSG 的二次调频进行了探索和研究。

首先，介绍了一次调频和二次调频的概念，分析了孤岛 VSG 的有功功率设定值与其输出功率不一致时，会使其输出电压的频率存在稳态偏差；随后，在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了孤岛 VSG 系统，将频率偏差进行积分得到有功功率设定值的补偿量，实现 VSG 二次调频，仿真结果显示，二次调频能够实现频率的无差调节，但其动态表现受积分系数的影响，且由于积分环节的存在，与不加入二次调频环节相比，功率波动可能会带来更大瞬时频率偏差。

接下来，引入 DDPG 算法对有功功率设定值进行补偿以实现二次调频，根据本问题的需求设计了智能体的动作和奖励函数，并与孤岛 VSG 系统构成的环境交互来进行训练。在相同的仿真参数和过程中进行测试，基于 DDPG 的功率补偿方法进行二次调频，相比于前述积分控制方法，速度更快，波动更小。

最后，改变仿真的系统参数，在新的环境中进行测试。在不改变积分系数的情况下，基于积分环节的二次调频策略性能下降，而基于 DDPG 的 VSG 二次调频策略依然能够快速有效地实现频率恢复。

第6章　总结与展望

6.1　论文总结

本文将虚拟同步发电机控制方式与深度强化学习方法相结合，利用深度强化学习方法的学习能力和探索能力，对 VSG 控制中的部分参数和环节进行自适应调节，从而使 VSG 获得更好的性能。总结而言，本文的研究工作主要集中在以下的几个方面：

（1）全面分析了 VSG 控制的原理和基本的环路设计，针对转子摇摆方程中的虚拟转动惯量和阻尼系数进行了定性分析，推导出在 VSG 二阶模型在欠阻尼状态下的系统参数，并通过仿真验证了虚拟转动惯量和阻尼系数变化对于 VSG 有功功率和频率动态过程的影响。

（2）根据虚拟转动惯量和阻尼系数对 VSG 动态过程的影响，推导出 VSG 在有功和频率动态响应的不同阶段，虚拟转动惯量和阻尼系数的期望变化方向，基于此设计了协同自适应控制方式，在 VSG 运行过程中根据控制律实时调整转动惯量和阻尼系数，在仿真中，分别使用固定参数 VSG、虚拟转动惯量自适应 VSG、阻尼系数自适应 VSG、虚拟转动惯量和阻尼系数协同自适应控制等 4 种方法进行测试，通过控制变量进行对比，验证了虚拟转动惯量和阻尼系数在 VSG 动态过程中的功能，而协同自适应方式使得 VSG 系统表现出了最好的动态性能。

（3）引入了 DDPG 算法对虚拟转动惯量和阻尼系数进行自动调节，智能体接受当前单机 VSG 系统输出的角频率偏差、角频率变化率以及有功功率偏差作为观测量，将 VSG 的虚拟转动惯量和阻尼系数作为动作进行输出，仿真结果显示，在相同的仿真过程中，该 DDPG 参数自适应方法展现出了最好的动态性能。

（4）分析了低压电力系统中，线路阻抗对于变流器控制过程的影响。分析表明，低压系统中呈现阻感性的线路阻抗会影响有功功率和无功功率的解耦控制；而并联系统中，线路阻抗不对应成比例会导致无功功率无法按比例在分布式电源之间均分。针对线路阻抗问题，详细介绍了变流器控制中的虚拟阻抗原理，搭建双机 VSG 并联系统进行仿真，验证了虚拟阻抗对并联 VSG 功率分配的改善作用；进一步地，探讨了虚拟阻抗的不同取值对并联系统电压偏差及无功功率分配的影响，仿真结果表明，较小的虚拟阻抗能够实现快速的无功均分和较小的电压偏差，但会使并联系统稳定性降低，而较大的虚拟阻抗则会产生较大的电压偏差和较慢的无功功率分配调节过程。随后，引入 DDPG 算法，设计智能体使其可以根据当

前的输出功率情况自动调整虚拟阻抗取值，智能体接受单机无功功率偏差、输出电压有效值偏差以及总有功功率偏差作为观测量，将 2 个 VSG 的虚拟阻抗作为动作进行输出，仿真结果显示，基于 DDPG 的虚拟阻抗方法能够使无功功率在并联系统中按电源容量进行均分，同时减小虚拟阻抗对输出电压带来的影响。

（5）最后，针对孤岛 VSG 在功率变化情况下的功率偏差问题，首先介绍了频率偏差存在的原因；随后，设计将频率偏差的积分项作为补偿项加入到控制环路进行二次调频，并搭建了孤岛 VSG 系统进行仿真验证；接下来，引入 DDPG 算法，使智能体根据当前 VSG 输出电压的频率偏差、频率变化率以及有功功率等情况对 VSG 功率设定值进行补偿，实现了更快的频率恢复过程。

6.2　研究展望

本文主要研究了 DDPG 算法对 VSG 控制过程的优化，在未来的研究中还有一些问题需要进一步探索和解决。

首先，在基于 DDPG 的虚拟转动惯量和阻尼系数的自适应控制研究中，将角频率偏差、角频率变化率以及有功功率偏差作为状态进行观测，并设计了奖励函数，但在实际训练过程中，奖励函数的权重取值主要通过试错法进行，试错过程中曾出现不收敛或者收敛后在测试过程中效果不好的情况；此外，该部分研究在设计时仅考虑到提升 VSG 的动态表现，而未探究对 3 个状态使用不同的奖励权重时对智能体行为决策的影响，从而验证智能体对奖励函数的“理解”。

其次，在基于 DDPG 的自适应虚拟阻抗设计中，虚拟阻抗的设计选择了主导法，使智能体的输出仅为每条线路的虚拟电抗，以实现功率均分。进一步地，可以摆脱主导法的束缚，使智能体输出每条线路的虚拟电阻和虚拟电抗，让智能体在更大的动作维度和取值范围内进行探索。

另外，在实际的研究探索过程中，对 DDPG 算法的训练过程遇到了无法收敛以及收敛速度过慢的问题，可以进一步探究奖励函数的设计，或是使用改进的 DDPG 算法进行训练。

参考文献

[1] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-32.

[2] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(01): 1-18+369.

[3] 国家能源局. 能源发展“十三五”规划 [M]. 2016.

[4] 杨晶. 新理念引领能源高质量发展 [J]. 中国能源, 2020, 42(01): 15-8.

[5] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(08): 2806-19.

[6] 刘园园. 我国可再生能源装机突破 12 亿千瓦 [N]. 2023-02-14.

[7] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. Macmillan, 2011.

[8] Huang A Q, Baliga J. FREEDM System: Role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet; proceedings of the 2009 21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, F, 2009 [C]. IEEE.

[9] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 133-48.

[10] 王喜文, 王叶子. 德国信息化能源(E-Energy)促进计划 [J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(04): 75-6+80.

[11] Vermesan O, Blystad L-C, Zafalon R, et al. Internet of energy–connecting energy anywhere anytime; proceedings of the Advanced Microsystems for Automotive Applications 2011: Smart Systems for Electric, Safe and Networked Mobility, F, 2011 [C]. Springer.

[12] 邓雪梅. 日本数字电网计划 [J]. 世界科学, 2013, (07): 19+9.

[13] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望 [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-35.

[14] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-10+391.

[15] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.

[16] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器 [J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(06): 714-27.

[17] Wang D, Mao C, Lu J, et al. Theory and application of distribution electronic power transformer [J]. Electric power systems research, 2007, 77(3-4): 219-26.

[18] Wang K, Yu J, Yu Y, et al. A survey on energy internet: Architecture, approach, and emerging technologies [J]. IEEE systems journal, 2017, 12(3): 2403-16.

[19] 王成山, 周越. 微电网示范工程综述 [J]. 供用电, 2015, (01): 16-21.

[20] Juan L, Shiju W, Jing X, et al. Research on micro-grid distribution network and its operation efficiency in the energy internet; proceedings of the 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), F, 2017 [C]. IEEE.

[21] Beck H-P, Hesse R. Virtual synchronous machine; proceedings of the 2007 9th international conference on electrical power quality and utilisation, F, 2007 [C]. IEEE.

[22] Visscher K, De Haan S W H. Virtual synchronous machines (VSG's) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation; proceedings of the CIRED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution, F, 2008 [C]. IET.

[23] Zhong Q-C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, 58(4): 1259-67.

[24] 贺家发, 宋美艳, 兰洲, 等. 适应于弱电网的永磁直驱风电机组虚拟惯量协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(09): 83-90.

[25] 谢震, 孟浩, 张兴, 等. 基于定子虚拟阻抗的双馈风电机组虚拟同步控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(09): 157-63+87.

[26] 金铭鑫, 王彤, 黄世楼, 等. 含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 170-7+91.

[27] 郑天文, 陈来军, 刘炜, 等. 考虑源端动态特性的光伏虚拟同步机多模式运行控制 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(02): 454-64.

[28] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-94.

[29] Bellman R. Dynamic programming [J]. science, 1966, 153(3731): 34-7.

[30] Howard R A. Dynamic programming and markov processes [J]. 1960.

[31] Watkins C J C H. Learning from delayed rewards [J]. 1989.

[32] Wang X, Wang S, Liang X, et al. Deep Reinforcement Learning: A Survey [J]. IEEE Trans Neural Netw Learn Syst, 2022, PP.

[33] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Playing atari with deep reinforcement learning [J]. arXiv preprint arXiv:13125602, 2013.

[34] Van Hasselt H, Guez A, Silver D. Deep reinforcement learning with double q-learning; proceedings of the Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence, F, 2016 [C].

[35] Wang Z, Schaul T, Hessel M, et al. Dueling network architectures for deep reinforcement learning; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2016 [C]. PMLR.

[36] Schaul T, Quan J, Antonoglou I, et al. Prioritized experience replay [J]. arXiv preprint arXiv:151105952, 2015.

[37] Schulman J, Levine S, Abbeel P, et al. Trust region policy optimization; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2015 [C]. PMLR.

[38] Sutton R S, McAllester D, Singh S, et al. Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation [J]. Adv Neur In, 2000, 12: 1057-63.

[39] Silver D, Lever G, Heess N, et al. Deterministic policy gradient algorithms; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2014 [C]. Pmlr.

[40] Lillicrap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [J]. arXiv preprint arXiv:150902971, 2015.

[41] Mnih V, Badia A P, Mirza M, et al. Asynchronous methods for deep reinforcement learning; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2016 [C]. PMLR.

[42] Haarnoja T, Zhou A, Abbeel P, et al. Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2018 [C]. PMLR.

[43] Fujimoto S, Hoof H, Meger D. Addressing function approximation error in actor-critic methods; proceedings of the International conference on machine learning, F, 2018 [C]. PMLR.

[44] Zhang K, Zhang C, Xu Z, et al. A Virtual Synchronous Generator Control Strategy with Q-Learning to Damp Low Frequency Oscillation; proceedings of the 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), F 29-31 May 2020, 2020 [C].

[45] Wu W, Guo F, Ni Q, et al. Deep Q-Network based Adaptive Robustness Parameters for Virtual Synchronous Generator [Z]. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). 2022: 1-4.10.1109/ITECAsia-Pacific56316.2022.9941893

[46] Li Y, Gao W, Yan W, et al. Data-driven Optimal Control Strategy for Virtual Synchronous Generator via Deep Reinforcement Learning Approach [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 919-29.

[47] Majumder R, Chaudhuri B, Ghosh A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop [J]. IEEE transactions on power systems, 2009, 25(2): 796-808.

[48] 孙秋野, 王睿, 马大中, 等. 能源互联网中自能源的孤岛控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3087-98+364.

[49] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid [J]. IEEE Transactions on power electronics, 2007, 22(2): 613-25.

[50] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(09): 144-54.

[51] 刘尧, 林超, 陈滔, 等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率—电压控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(05): 16-21+133.

[52] Han H, Liu Y, Sun Y, et al. An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(6): 3133-41.

[53] Yang Q, Yan L, Chen X, et al. A Distributed Dynamic Inertia-Droop Control Strategy Based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multiple Paralleled VSGs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5598-612.

[54] Gupta P, Pal A, Vittal V. Coordinated Wide-Area Damping Control Using Deep Neural Networks and Reinforcement Learning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 365-76.

[55] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-603.

[56] Guerrero J M, De Vicuna L G, Matas J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2005, 52(4): 1126-35.

[57] He J, Li Y W. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation [J]. IEEE Transactions on industry Applications, 2011, 47(6): 2525-38.

[58] Mahmood H, Michaelson D, Jiang J. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(3): 1605-17.

[59] Wang Y. Research of droop control strategy based on virtual impedance; proceedings of the 2015 5th International Conference on Computer Sciences and Automation Engineering (ICCSAE 2015), F, 2016 [C]. Atlantis Press.

[60] 张圣祺, 袁蓓, 徐青山, 等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05): 82-8+95.

[61] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 26-34.

致　谢

三年时光转瞬即逝，初入清华园时的激动仿佛仍在昨天，回首这段旅程，心中充满感激。

感谢导师曹军威研究员对我提供的帮助和指导，让我对科研和工作有了更加清晰和完整的认知，曹老师对科研的敏锐直觉、深入理解以及对问题一针见血的剖析，令我由衷敬佩且获益匪浅。

感谢课题组的学长秦兆铭、李宇童以及学弟陈文磊在科研和生活中为我提供的支持和帮助，感谢每一位工程师和博士后师兄师姐们给我带来的指导和建议。

感谢女朋友李凌杰对我的支持和陪伴，在数不清的或喜悦或艰难的时刻，她的分享与分担让我的求学之路更加多姿多彩，让我的脚步更加坚定。

最后，衷心感谢父母这二十余年对我的无私付出和全力支持，让我能够全力追逐梦想而无所顾虑，他们永远是我最坚实的依靠。

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、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

1996 年 9 月 12 日出生于山东省淄博市临淄区。

2015 年 9 月考入武汉大学电气与自动化学院电气工程及其自动化专业，2019 年 6 月本科毕业并获得工学学士学位。

2021 年 9 月通过考研进入清华大学自动化系攻读工学硕士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

[1] Xiaoke D, Junwei C, Xiawei W. Deep Reinforcement Learning based Adaptive Control Strategy for Virtual Synchronous Generator. The Second International Conference on Cyber-energy Systems and Intelligent Energies (ICCSIE2024). Shenyang, Liaoning, China, 29-31 May 2020[C]. (已录用)

指导教师评语

答辩委员会决议书