

分类号：TM732

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2220320103



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于VSG的光储微网逆变器并离
网平滑切换控制策略研究

论 文 作 者	李涛
校 内 导 师	张春
校 外 导 师	陈林
专业学位类别	电子信息
研究方向（领域）	控制工程

论文提交日期：2025 年 5 月 8 日

分类号: TM732

密级: 公开

单位代码: 10363

学号: 220320103

题 目 基于 VSG 的光储微网逆变器并离网平滑切换控制策略研究

题 目 RESEARCH ON SMOOTH SWITCHING CONTROL FOR
VSG-BASED PV-STORAGE MICROGRID INVERTERS
IN GRID/ISLAND MODES

学 生 姓 名: 李涛

校 内 导 师: 张春

校 外 导 师: 陈林

专业学位类别 : 电子信息

研究方向(领域): 控制工程

论文答辩日期: 2025 年 5 月 8 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：李清

日期：2025 年 5 月 8 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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

保密□，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于不保密 ☒。

学位论文作者签名：李清

日期：2025 年 5 月 8 日

指导教师签名：张春

日期：2025 年 5 月 8 日

基于 VSG 的光储微网逆变器并离网平滑切换控制策略研究

摘 要

随着可再生能源发电技术的发展,光伏发电系统和储能单元在微网中的应用越来越广泛。虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术能够仿效传统同步发电机的惯性特性,相比传统下垂控制技术,VSG 技术可以有效提升风电、光伏发电等波动性分布式电源与电网的并网稳定性,减少其对电网的影响,可以帮助维持系统的频率和电压稳定。然而,传统 VSG 控制策略难以依据系统频率的动态变化实时调节转动惯量和阻尼系数,这可能在并网与离网模式切换时引发较大的电流冲击,进而对电网的稳定运行造成不利影响。因此,本文主要对 VSG 惯量阻尼自适应控制和 VSG 逆变器并离网平滑切换控制进行分析和研究。主要内容如下:

(1) 针对传统变步长电导增量法对环境变化时最大功率追踪精度不高和适应能力不强问题,本文提出一种改进的变步长电导增量法。首先,对电压、电流差值进行实时修正避免误判。其次,引入与电流相关的系数和与功率相关的系数分别对最大功率点两侧的步长变化量进行修正,优化电导增量法步长变化量。最后,构建以光伏发电系统为核心的直流供电系统,通过引入 Boost 升压电路来优化光伏阵列的输出电压特性。

(2) 针对虚拟转动惯量和阻尼系数对 VSG 控制系统的稳定影响较大且传统自适应控制策略调节能力差等问题,提出了一种改进惯量阻尼自适应控制策略,增强系统的抗干扰能力。首先,研究了 VSG 在小扰动情况下的 $P-\delta$ 特性曲线,系统分析了虚拟转动惯量与阻尼系数这两个关键控制参数在有功功率输出调节及电力系统频率动态特性中的作用机理。其次,通过理论分析与仿真实验,揭示了参数变化对系统稳定性的作用机制,以频率的超调量和调节时间作为系统频率稳

定性的关键指标，研究了改进后的惯量阻尼自适应控制策略。最后，为避免系统正常运行时的微小振荡引起转动惯量和阻尼系数的频繁过度调整，对主要控制参数进行整定。

(3) 针对 VSG 逆变器在并网和离网模式转换过程中面临的电压波动与电流冲击问题，为实现并离网平滑切换，提出了一种基于模糊自抗扰的预同步控制策略。首先，通过引入虚拟有功功率和虚拟电流补偿并网过程中的相位与幅值偏差。其次，设计了专门的预同步控制模块，用于对微电网系统的频率和电压幅值进行动态补偿。然后，分析了 VSG 控制结构和线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)系统原理，提出一种将 LADRC 与 VSG 有功-频率相结合的模糊 LADRC 预同步控制策略。为加强 LADRC 的控制性能，采取模糊算法对线性自抗扰控制器中线性状态误差反馈的参数进行实时整定，实现预同步过程的实时优化调节和并离网平滑切换。最后，基于 MATLAB/Simulink 仿真平台构建了基于虚拟同步发电机的光储微电网仿真系统，开展了所提控制策略仿真实验。仿真结果表明，所提出的控制策略在系统频率稳定和动态响应方面均表现出良好的可行性和优越性。

关键词：光储微网系统，VSG 逆变器控制，最大功率点跟踪，惯量阻尼自适应控制，模糊算法，LADRC 预同步控制

RESEARCH ON SMOOTH SWITCHING CONTROL FOR VSG-BASED PV-STORAGE MICROGRID INVERTERS IN GRID/ISLAND MODES

ABSTRACT

With the advancement of renewable energy generation technologies, photovoltaic power generation systems and energy storage units are increasingly being utilized in microgrids. Virtual Synchronous Generator (VSG) technology mimics the inertial properties of conventional synchronous generators, offers significant advantages over conventional droop control methods. Specifically, VSG technology can enhance the grid-connected stability of fluctuating distributed energy sources such as wind and solar power, mitigate their impact on the grid, and help maintain system frequency and voltage stability. However, traditional VSG control strategies struggle to dynamically adjust the moment of inertia and damping coefficient in response to real-time frequency variations, which may lead to significant current surges during the transition between grid-connected and islanded modes, thereby adversely affecting grid stability. Therefore, this paper focuses on the analysis and research of adaptive

inertia-damping control for VSG and smooth switching control for VSG inverters during grid-connected and islanded transitions. The main contents are as follows:

(1) To address the issues of low maximum power tracking accuracy and weak adaptability of the traditional variable-step incremental conductance method under environmental changes, this paper proposes an improved variable-step incremental conductance method. Firstly, real-time correction of voltage and current differences is implemented to avoid misjudgment. Secondly, coefficients related to current and power are introduced to adjust the step size variation on both sides of the maximum power point, optimizing the step size variation of the incremental conductance method. Finally, a DC power supply system centered on a photovoltaic power generation system is constructed, and the output voltage characteristics of the photovoltaic array are optimized by incorporating a Boost step-up circuit.

(2) Given the significant impact of virtual inertia and damping coefficients on the stability of VSG control systems and the poor regulation capability of traditional adaptive control strategies, an improved inertia-damping adaptive control strategy is proposed to enhance the system's anti-interference capability. Firstly, the power angle behavior of the virtual synchronous generator under minor disturbances is examined, with a focus on analyzing the mechanisms by which virtual inertia and damping coefficients, as core parameters, influence the active power output and frequency dynamic response of the VSG. Secondly, through theoretical analysis and simulation experiments, the mechanisms by which parameter variations affect system stability are revealed. Frequency overshoot and

settling time serve as critical metrics for assessing system frequency stability, the improved inertia-damping adaptive control strategy is studied. Finally, to prevent frequent excessive adjustments of inertia and damping coefficients caused by minor oscillations during normal system operation, the main control parameters are tuned.

(3) To address the issues of voltage fluctuations and current surges during the transition between grid-connected and islanded modes of VSG inverters, a pre-synchronization control strategy based on fuzzy active disturbance rejection is proposed to achieve smooth switching. Firstly, virtual active power and virtual current are introduced to compensate for phase and amplitude deviations during the grid-connection process. Secondly, a specialized pre-synchronization control module was developed to dynamically adjust the frequency and voltage amplitude of the microgrid system. Subsequently, the VSG control framework and the fundamentals of Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC) were examined, leading to the proposal of a fuzzy LADRC pre-synchronization strategy that integrates LADRC with VSG active power-frequency regulation. To enhance the control performance of LADRC, a fuzzy algorithm is employed to dynamically adjust the parameters of the linear state error feedback in the linear active disturbance rejection controller, enabling real-time optimization of the pre-synchronization process and smooth switching between grid-connected and islanded modes. Finally, a simulation system for PV-battery microgrid based on Virtual Synchronous Generator was developed using the MATLAB/Simulink platform, and verification experiments of the proposed control strategy were conducted. Simulation results demonstrate that the developed control strategy exhibits good

feasibility and superiority in terms of system frequency stability and dynamic response.

Tao Li (Control Engineering and Automation Technology)

Supervised by_Prof.Chun Zhang

KEY WORDS: Photovoltaic-Storage Microgrid System, VSG Inverter Control, Maximum Power Point Tracking, Inertia-Damping Adaptive Control, Fuzzy Algorithm, LADRC Pre-Synchronization Control

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 微电网的结构	2
1.3 微网逆变器控制国内外研究现状	3
1.3.1 下垂控制	3
1.3.2 虚拟同步发电机技术	4
1.3.3 虚拟同步发电机自适应控制	5
1.3.4 微网逆变器并网平滑切换控制策略	6
1.4 论文主要研究工作	8
第 2 章 基于 VSG 控制的光储微网系统结构	10
2.1 光储微网系统结构	10
2.1.1 逆变器的数学模型	11
2.1.2 VSG 控制原理	12
2.1.3 电压电流双闭环控制	14
2.1.4 仿真分析	15
2.2 光伏发电系统	17
2.2.1 光伏电池等效模型	18
2.2.2 最大功率点跟踪	21
2.2.3 改进变步长电导增量法	21
2.2.4 仿真分析	25
2.3 混合储能单元	27
2.3.1 蓄电池等效电路模型	27
2.3.2 超级电容等效模型	28
2.3.2 混合储能控制策略	28
2.4 本章小结	30
第 3 章 改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略	31
3.1 VSG 的有功功率特性分析	31
3.2 惯量阻尼自适应控制策略	35
3.2.1 参数自适应原理	35
3.2.2 改进惯量阻尼自适应控制	37
3.2.3 自适应控制策略参数整定	38
3.3 仿真与分析	39
3.4 本章小结	41
第 4 章 VSG 逆变器并网平滑切换策略研究	43
4.1 逆变器并网/离网平滑切换	43
4.2 预同步并网技术	44
4.2.1 电压偏差分析	44
4.2.2 预同步控制策略	45

4.2.3 基于电网侧虚拟功率的预同步策略.....	46
4.3 模糊 LADRC 预同步控制策略.....	47
4.3.1 LADRC 的基本结构	47
4.3.2 基于 VSG 的模糊 LADRC 预同步控制策略.....	49
4.4 仿真分析.....	52
4.4.1 系统抗干扰性能研究.....	52
4.4.2 预同步控制性能仿真研究.....	53
4.4.3 并网运行性能仿真.....	56
4.4 本章小结.....	58
第 5 章 结论与展望.....	59
5.1 结论.....	59
5.2 展望.....	60
参考文献.....	61
研究成果.....	66
致 谢	67

第 1 章 绪论

本章着重探讨了当前大量分布式新型电源接入电网的现状,剖析其引发的稳定性与电能质量难题。同时,介绍了国内外微网逆变器相关控制技术及研究进展,深入阐述 VSG 控制技术在参数设计和其逆变器并网切换等方面存在的主要问题,为后续研究提供思路。

1.1 课题研究背景及意义

随着近年来电动汽车和各种电气相关产业的发展,世界各国对能源的需求日益增加,能源的短缺是目前亟待解决的问题。我国目前的能源结构主要依赖于传统的化石、煤炭、天然气等能源,这些能源的大量消耗带来了严重的环境问题,且依然不能完全满足我国的能源需求。目前,我国正处于工业化后期,经济发展对能源的依赖度较高,且能源消费结构仍以化石能源为主导。2020 年,化石能源在一次能源消费中的占比高达 84%,为了摆脱现有的能源结构不合理的困局,我国能源结构将加速向清洁低碳方向转型。随着经济社会的高质量发展和能源利用效率的持续提升,能源消费总量将在碳排放达峰后逐步下降,但电能消费总量将持续增长,预计从 2020 年的 7.5 万亿千瓦时增至 2060 年的 15-18 万亿千瓦时^[1]。在此背景下,新能源将迎来前所未有的发展机遇,逐步从“补充能源”转变为“主体能源”,成为电能增量的主要来源。预计到 2030 年,风电和光伏发电装机规模将突破 16 亿千瓦,占比将从 2020 年的 24%提升至 47%左右,新能源发电量达到约 3.5 万亿千瓦时,占比将从 2020 年的 13%上升至 30%^[2]。

随着可再生能源的广泛应用和智能电网技术的快速发展,光伏发电和储能技术在世界各国电力系统中的作用越来越重要。光伏发电具有清洁、可再生的特点,但其发电量受自然条件影响较大,具有间歇性和不稳定性^[3]。因此,在面临电力需求波动和光伏发电输出波动的情况下,如何有效地平滑切换光储微网逆变器的并网和离网状态,成为了一个亟需解决的难题。

虚拟同步发电机技术是一种新型的电力系统控制方法,有众多的优点。它能改善电能质量,通过模拟同步发电机特性实现对频率和电压的有效支撑与调节^[4];不仅可增强电网稳定性,为系统提供虚拟惯性便于分布式电源(Distributed Generation, DG)接入,同时有助于优化功率分配,提升系统兼容性与适应性,适

应不同工况且可与现有电网设施协同工作,使得光储系统能够在并网和离网模式下更加稳定运行。通过采用虚拟同步发电机技术,能够提高微网的频率和电压的稳定性,实现更高效的管理。

1.2 微电网的结构

微电网(Micro-Grid)也叫微网,是一种灵活、高效的电力系统,能够实现分布式电源的高效利用和可靠供电。其结构包括分布式电源、储能单元、负载、控制系统、电力电子设备和保护装置。微网既可以与主电网并网运行,也可以在离网模式下独立运行,是未来智能电网和能源互联网的重要组成部分。通过微电网的建设与推广,能够有效提升电力系统的可靠性、经济性和可持续性。其结构大致如图 1-1 所示。

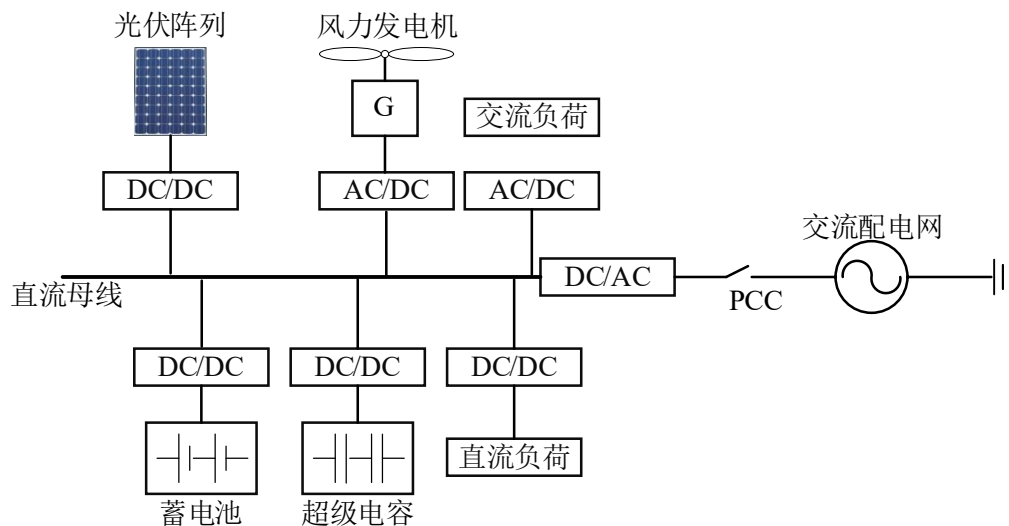


图 1-1 微电网结构示意图

微电网通常具有两种主要的运行方式:并网模式和离网模式。在并网模式下,微电网通过闭合断路器与公共电网连接,实现与主电网之间的电能交互。此时,光伏发电系统能够向电网输送电能,而储能单元则可以在并网状态下进行充电或放电操作。此外,微电网能够通过控制系统实现从并网模式到离网模式的平滑切换。

在离网模式下,微网与主电网断开连接,形成一个独立的供电系统,由分布式电源、储能单元以及负荷共同维持内部能量平衡。此时,储能变流器切换至离网运行状态,继续为微网内的负荷供电。尽管光伏发电系统可能在母线恢复供电后继续发电,但储能单元的主要功能是为负载提供电能。在离网运行期间,微网依赖其内部的分布式电源和储能单元来确保电力供应的稳定性,并优先保障关键

负荷的持续供电需求。

1.3 微网逆变器控制国内外研究现状

微网逆变器控制技术在国内外均取得了显著进展,国内研究主要集中在多样化控制策略、并网与离网切换技术以及多逆变器并联运行方面,虚拟同步发电机技术备受关注;国外则更多采用先进算法,如模型预测控制和虚拟惯性控制,并注重多逆变器协调控制及实际应用标准化。未来研究趋势包括高精度控制算法、多逆变器协同控制及 VSG 技术的深化,但仍面临复杂工况下的稳定性、通信延迟及成本优化等挑战。

1.3.1 下垂控制

下垂控制(Droop Control Strategy)通过模拟传统同步发电机的有功-频率($P-f$)和无功-电压($Q-V$)特性实现功能。对于同步发电机而言,其有功功率输出与系统频率、无功功率输出与端电压之间呈现出特定的下垂特性关系。在下垂控制中,系统根据有功功率和无功功率的变化自动调节输出电压和频率。具体表现为:

(1) $P-f$ 下垂特性:逆变器输出有功功率增加时,频率按预设斜率(下垂系数)下降。

(2) $Q-V$ 下垂特性:逆变器输出无功功率增加时,电压按设定斜率降低。

这种机制实现了功率的自动调节与分配,其原理如图 1-2 所示。

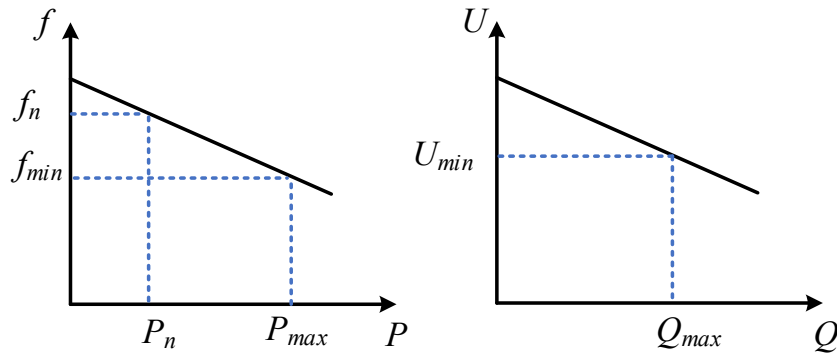


图 1-2 下垂控制原理图

由图 1-2 可知,有功下垂特性系数 m 、无功下垂特性系数 n 可由式(1.1)求得:

$$\begin{cases} m = \frac{f_n - f_{\min}}{P_{\max} - P_n} \\ n = \frac{U_0 - U_{\min}}{Q_{\max}} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中: $P_{\max}$ 代表逆变电源在频率降低时能够提供的最大有功功率; $f_{\min}$ 为输

出 P_{max} 时对应的最低运行频率； Q_{max} 为逆变电源在电压幅值下降时可输出的最大无功功率； U_{min} 为输出 Q_{max} 时对应的最小电压幅值。

由上述可得到下垂控制框图，如图 1-3 所示。图中， P_{ref} 、 Q_{ref} 、 ω_{ref} 和 E_{ref} 分别表示有功功率给定值、无功功率给定值、角频率给定值和电压矢量给定值。

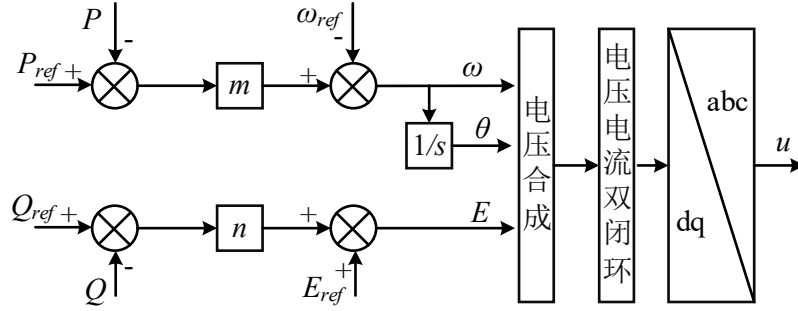


图 1-3 下垂控制框图

下垂控制通过动态监测功率波动，快速调整输出频率和电压，以实现功率的自动均衡分配。然而，与传统同步发电机相比，下垂控制缺乏足够的惯性和阻尼特性，导致其在负载突变或功率波动时频率变化较大，动态响应性能较弱，难以满足高稳定性要求的电力系统运行需求^[5-6]。

1.3.2 虚拟同步发电机技术

虚拟同步发电机控制的核心目标是使逆变器能够仿效同步发电机的运行特性。在传统电力系统中，同步发电机凭借其惯性和阻尼特性，能够为电网提供频率和电压支撑。然而，随着光伏发电、风电等分布式电源通过逆变器大规模接入电网，由于逆变器本身不具备这些特性，导致电网的稳定性和抗扰动能力受到挑战^[7]。

1997 年美国的 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)委员会首次提出了静态同步发电机(Static Synchronous Generator, SSG)概念，它可以灵活地为交流输电系统提供可控的有功功率和无功功率，被认为是最早的 VSG 雏形^[8]。2007 年，欧洲 VSYNC 项目组首次提出了虚拟同步发电技术概念，其中比利时鲁汶大学的 K.Visscher 教授研发了首个能够模拟同步发电机惯性特性和一次调频功能的控制方案。然而受限于当时的技术水平，该控制架构的内环设计仅实现了机械特性的模拟，未能复现传统同步电机的电磁暂态特性。与此同时，德国克劳斯塔尔工业大学的 Hans-Peter Beck 和 Ralf Hesse 教授提出了关于虚拟同步发电机的 VISMA(Virtual Synchronous Machine)技术，该技术是电流控制型的 VSG，外部特

性等效于电流源,可以模拟同步发电机的电磁行为,但难以对弱电网提供电压支撑。2009 年英国利物浦大学的钟庆昌教授提出了一种具有代表性的电压控制型 VSG,它模拟了同步发电机的电磁暂态行为,因此其外部特性比之前的方法更接近同步发电机。2011 年 H.Alatrash 提出了发电机模拟控制,与上述控制方法不同的是,发电机模拟控制模拟了同步发电机的阻抗特性,该方案主要包括潮流控制和阻抗模拟两大部分,相比其他 VSG 技术,其更能增强电力系统的稳定性。

VSG 技术借助控制算法,使逆变器能够模拟同步发电机的外部特性,包括输出电压幅值、频率等。其基本原理是在逆变器的控制中加入类似同步发电机的摇摆方程,以此来模拟发电机的惯性响应。例如,当电网频率突变时,采用 VSG 技术的逆变器能像同步发电机一样,根据自身的虚拟惯性,对频率变化有一定的缓冲作用,抑制频率的快速波动,从而提高电网的稳定性。文献[9]针对 VSG 控制器的建模和参数选取问题,对 VSG 功率回路进行了小信号建模,分析得知功率回路的带宽需远小于线频的 2 倍,从而避免 VSG 输出电压严重失真。文献[10]提出了一种利用模糊控制对 VSG 功角进行估算的自适应虚拟阻抗解耦策略,减小 VSG 输出的有功功率和无功功率之间存在的耦合。文献[11]分析了两种故障类型下 VSG 的惯性和阻尼对暂态稳定性和频率稳定性的影响机理,进而提出一种引入角频率偏差反馈的有功环控制,并基于小信号和大信号模型综合分析 VSG 的暂态响应,给出一种考虑最优阻尼比的 VSG 参数设计方法。文献[12]针对光伏并网发电系统导致电网总体惯量减小问题,提出了一种基于虚拟同步发电机方法的准 Z 源逆变器(Quasi-Z Source Inverter, QZSI)并网控制结构,该结构将准 Z 源逆变器与虚拟同步发电机技术相结合,使虚拟同步发电机的准 Z 源逆变器结构能够在功率波动下提供更好的动态性能。

1.3.3 虚拟同步发电机自适应控制

在微网中,由于分布式电源的间歇性和负载的不确定性,系统稳定性是一个关键问题^[13]。传统的固定参数 VSG 控制在面对复杂多变的工况时可能效果不佳。自适应控制则可以根据不同的工况自动优化控制参数,自适应控制的 VSG 能够快速响应这些变化,通过动态调整参数来维持系统的频率和电压稳定^[14]。例如,当光伏电源的输出由于光照强度变化而突然减少时,自适应控制的 VSG 可以迅速增加输出功率,补偿功率缺额,防止电网频率大幅下降;当在离网运行和并网

运行两种模式下切换时，自适应控制的 VSG 可以根据运行模式的切换，自动调整控制策略。在并网运行时，它可以更好地跟踪电网的频率和电压指令；在离网运行时，它能够根据本地负载的需求自主调节输出功率和电压，维持离网时微网的稳定运行。

自适应控制会根据系统的实时状态信息，如电网频率、电压幅值、功率因数等参数，动态地调整 VSG 的控制参数。参数自适应的虚拟同步发电机技术使系统能更好地应对功率冲击，文献[15]提出基于自适应电流补偿的 VSG 增强功率解耦策略，考虑系统运行时功角扰动和电压变化，根据所需功率补偿量大小对功率环路加以矫正，以消除系统发生扰动时 VSG 输出无功功率波动。文献[16]针对光储系统中逆变器呈现低惯性、欠阻尼，无法为系统提供频率支撑的问题，将模糊自适应控制与 VSG 技术相结合，以提高系统的稳定性。文献[17]提出一种基于改进灰狼算法 VSG 参数自适应控制策略。根据 VSG 系统受到扰动时角速度变化率对转动惯量和阻尼系数变化影响，建立了参数自适应控制函数。在系统稳定条件下，利用改进灰狼算法对虚拟同步发电机参数选择初始值，使系统的有功功率和频率输出具有更好的动态性能，提高系统的稳定性。文献[18]提出了一种基于角速度及其变化率的转动惯量参数自适应控制方式，解决了调节过程中转动惯量增幅和变化速率难以控制的问题，改善了 VSG 控制在面对系统功率突变工况时转动惯量过度调节和低偏差不调节现象。文献[19]针对小扰动可能会引起系统功率振荡等问题，为更加灵活调整虚拟惯量和阻尼系数，在详细分析 VSG 基础上，提出一种基于分段指数函数的变参数 VSG 自适应控制策略，其虚拟惯量和旋转阻尼随电网频率的变化按照指数函数轨迹变化，从而达到减小电网波动的目的，并且扰动变化率较小时参数变化较小，避免引起系统振荡问题。

1.3.4 微网逆变器并离网平滑切换控制策略

在微网系统实际应用中，可能会因为各种原因(例如电网故障维修、计划停电等)需要从并网运行模式切换到离网运行模式，或者从离网运行模式切换回并网运行模式^[20-21]。传统的控制方法主要通过下垂控制策略实现并离网切换。并网运行时，DG 以 PQ 模式运行，根据给定的有功功率和无功功率指令向电网输出电能；当电网故障切换到离网运行模式时，DG 切换到 VF 模式，通过下垂控制自动调整输出电压和频率，为本地负载提供稳定的电力供应。这种控制策略不需

要复杂的通信系统，各 DG 能够自主地根据本地信息进行调节，实现并离网的平稳过渡，但这种方法需要的控制策略较多且很复杂，对系统的稳定性不太友好。电压型 VSG 采用统一的控制模式，无论是并网运行还是离网运行，都基于虚拟同步发电机的控制策略，无需切换控制环路，实现了并离网之间的无缝过渡，有效避免了切换过程中的电压电流冲击和功率波动，保障了供电的连续性和稳定性^[22]。采用 VSG 控制策略，逆变器得以具备与同步发电机相仿的惯性和阻尼特性，在并网运行时，能够根据电网频率和电压的变化自动调整输出功率，为电网提供有效的频率和电压支撑，增强电网的稳定性和可靠性。在离网运行时，也能够维持稳定的电压和频率，保障本地负载的正常供电^[23]。

尽管 VSG 技术的相关研究进展迅速，但在并网过程中容易出现功率波动和电流冲击。此外，电网存在线路阻抗，给微网中离网和并网两种运行模式的平滑切换带来了很大的挑战。传统的预同步控制方法通常使用锁相环(Phase Locked Loop, PLL)与电网进行同步，如图 1-4 所示。

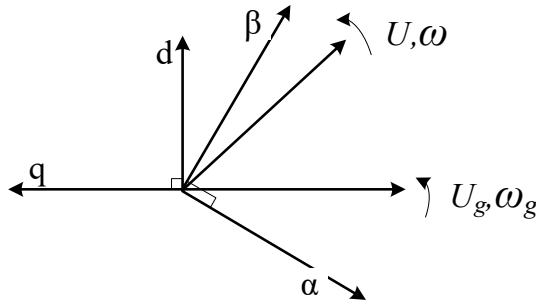


图 1-4 并网过程原理图

图中，在 d-q 坐标系中通过调整电压矢量 U 的旋转角速度 ω ，使其与电网电压矢量保持同步，从而实现电压的同步，确保从离网到并网的平滑切换。

但引入过多的锁相环会对预同步控制的精度和速度产生一定影响^[24-25]。为了解决这些问题，一些学者提出了新的方法。文献[26]采用虚拟功率模拟二次调频和调压的方式来解决平滑切换和系统阻抗问题。系统输出值经惯性环节调节，以补偿有功功率和无功功率的损失。文献[27-28]利用 VSG 自身产生的相位，对电网电压的相位和幅值进行追踪，简化了预同步并网的过程。文献[29-30]提出了动态虚拟电流前馈的预同步技术，通过动态虚拟电流来补偿功率耦合时产生的功率冲击及功率稳态偏差。文献[31]提出了一种通过采集 VSG 输出电压和电网侧电压，然后经控制单元计算出两侧相位差信息，利用公式对相位差信息进行校准

和优化。这一方法减少了对锁相环的依赖。文献[32]使用电网电压的幅值和频率作为 VSG 输出电压的参考值，然后根据本地负载功率调整其输出功率参考值，以确保 VSG 输出电压的频率和幅值与电网电压同步。最后，通过相位偏差的反馈控制实现相位同步。

1.4 论文主要研究工作

本文以基于 VSG 的光储微网逆变器为研究对象。首先，建立光储微网的系统结构和 VSG 算法，设计自适应变步长电导增量法，实现光伏发电系统的稳定运行。接着，分析 VSG 并网逆变器的稳定性问题，提出惯量阻尼自适应控制，增强系统的自我调节能力。最后，总结 VSG 逆变器并离网的机制，并阐述预同步控制的原理和存在的问题，进而提出模糊线性自抗扰预同步控制策略，实现 VSG 逆变器并离网的平滑切换。

本课题研究主要包括以下几个部分：

第 1 章：介绍了微网的大致结构、运行方式和主要控制策略。在此基础上，详细的阐述了下垂控制、虚拟同步发电机技术及其自适应控制和 VSG 逆变器的并离网平滑切换策略研究现状。

第 2 章：构建基于 VSG 控制的光储微网控制系统。深入探讨了基于 VSG 并网逆变器的数学模型，并详细解析了 VSG 在频率控制(有功)和电压控制(无功)方面的模型。构建电压与电流的双闭环数学模型，并提供了相应的控制框架。针对传统变步长电导增量法对环境变化时最大功率追踪精度不高和适应能力不强问题，提出一种改进变步长电导增量法，增加光伏发电系统在外界环境变化时最大功率点的跟踪效率。采用蓄电池和超级电容组成的混合储能单元减小光伏发电系统对微网的冲击，并对混合储能单元的结构、工作原理和控制策略进行详解。

第 3 章：基于 VSG 中有功功率的控制机理，分析其关键参数对系统稳定性的影响规律。结合 VSG 功角特性曲线，深入探讨转动惯量 J 和阻尼系数 D 与频率变化率及变化差值之间的动态关系。在此基础上，提出一种改进惯量阻尼自适应控制策略，通过动态调整 J 和 D 的取值，优化系统频率响应特性，提升系统抗扰动能力和稳定性。最后通过仿真验证改进惯量阻尼自适应控制策略的正确性。

第 4 章：针对 VSG 逆变器在并离网预同步过程中容易出现电压电流畸变和常规预同步控制策略效率低下的问题，在 VSG 模型中增加虚拟有功和虚拟电流

来补偿并网过程中存在的相位差和幅值差，实现频率和电压的调节。基于 VSG 模型分析角频率给定值 ω_n 对系统稳定性的影响，采用线性自抗扰控制器能同步 VSG 输出的反馈值 ω ，对输入到系统的频率值进行实时调节，使系统能有更好的控制效果。为加强线性自抗扰控制器的控制性能，采取模糊算法对线性自抗扰控制器中线性状态误差反馈的参数进行实时整定，最后通过仿真验证该策略的正确性。

第 5 章：全面总结本文研究工作的主要成果，针对当前技术瓶颈，提出了未来研究方向的前瞻性展望。

第 2 章 基于 VSG 控制的光储微网系统结构

随着新能源发电技术不断进步,太阳能发电系统在电力供应中的比重持续上升。如何高效地利用太阳能并将其稳定地与电网进行交换是目前新能源研究主要内容之一。传统微网中采用的三相并网逆变器属于缺乏机械特性的电力电子装置。随着微网中并网比例的提升,电力系统中的惯性和阻尼成分将逐步降低,从而使得系统在受到干扰时更容易出现电压和频率超出规定范围的问题。当前的一种解决方案是采用 VSG 控制技术,使并网逆变器能够模拟同步发电机的机械与电磁行为,通过引入虚拟惯量和虚拟阻尼来增强电力系统的稳定性^[33]。因此,本章主要针对光储系统的结构和 VSG 控制技术展开分析。

2.1 光储微网系统结构

本文所研究基于 VSG 控制的光储微网控制系统结构如图 2-1 所示,逆变器拓扑采用电压源型三相桥式逆变电路,通过 LC 滤波器消除输出中的谐波,可在独立运行时为负载提供电能,或在联网状态下向主电网传输电力。直流侧主要由光伏发电系统、蓄电池和超级电容组成,称为双级式共直流母线 PV-VSG。

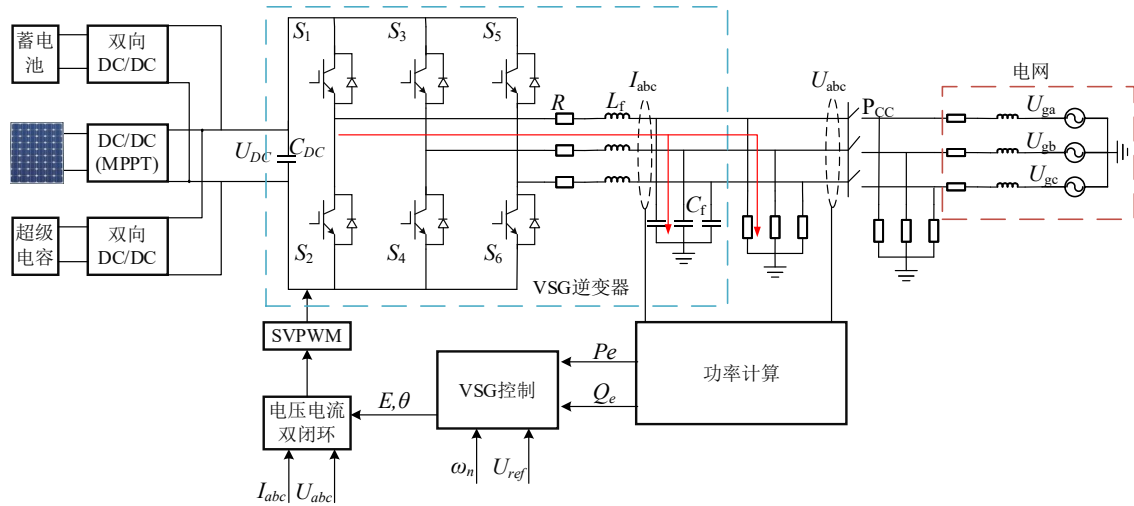


图 2-1 光储 VSG 微网系统结构图

U_{DC} 为直流母线电压; PCC 为公共耦合点,即预同步信号控制并网的开关节点; L_f 和 C_f 分别为滤波部分的定子电感和电容; I_{abc} 和 U_{abc} 分别为 VSG 逆变器三相输出电流和电压。控制电路由功率计算模块、VSG 调控模块、基于 dq 坐标系的电压电流双闭环调控模块以及空间矢量脉宽调制(SVPWM)组成。

在光储 VSG 微网系统中，虚拟同步发电机通过模拟传统同步发电机的外部特性实现功能，两者在运行机制上存在对应关系。基于 VSG 控制的并网逆变器(以下简称“VSG 逆变器”)的直流侧通过光储能量交换为系统供电，其功能等效于传统同步发电机的动力源。该逆变器的功率桥臂电压和电流分别对应同步发电机的电枢感应电动势和电枢电流，通过这种机电特性映射关系实现并网功率的动态调节，且 VSG 逆变器的输出电压模仿了同步发电机定子端的电压特征。

2.1.1 逆变器的数学模型

根据图 2-1 的红色能量流动箭头得出逆变器在三相静止坐标系下的数学方程。由 KVL 定理可得副边 abc 三相电压回路方程：

$$\begin{cases} L_f \frac{di_a}{dt} = U_a - Ri_a - E_a \\ L_f \frac{di_b}{dt} = U_b - Ri_b - E_b \\ L_f \frac{di_c}{dt} = U_c - Ri_c - E_c \end{cases} \quad (2.1)$$

式中： R 为相应回路电感的等效阻值； U_a 、 U_b 、 U_c 分别为 a 、 b 、 c 三相的电压； i_a 、 i_b 、 i_c 为流经电感的电流。

根据 KCL 定理，可得副边电流的回路方程：

$$\begin{cases} C_f \frac{dE_a}{dt} = i_a - i_{oa} \\ C_f \frac{dE_b}{dt} = i_b - i_{ob} \\ C_f \frac{dE_c}{dt} = i_c - i_{oc} \end{cases} \quad (2.2)$$

式中： i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} 为流经负荷处的电流。

由于在 abc 静止坐标系下，三相电压和电流为矢量，在进行 PI 控制时无法准确跟踪，因此还需要进一步变换。通过 Clark 变换，可以将式(2.2)变换到两相静止坐标系下的电压、电流方程，此时 α 轴与三相电压 A 相同步，变换矩阵和变换后电压、电流回路方程分别为：

$$C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$L_f \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{c\alpha} \\ U_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$C_f \begin{bmatrix} \frac{dU_{c\alpha}}{dt} \\ \frac{dU_{c\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

然后通过 Park 变换，可以将式(2.4)和式(2.5)变换到两相旋转 dq 坐标系下。此时三相电压和电流就能够在坐标系中相对于坐标轴静止。变换矩阵与两相同步旋转 dq 坐标系下的电压、电流回路方程分别为：

$$C_{22} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$L_f \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{cd} \\ U_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega L_f i_q \\ -\omega L_f i_d \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$C_f \begin{bmatrix} \frac{dU_{cd}}{dt} \\ \frac{dU_{cq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega C_f U_{cq} \\ -\omega C_f U_{cd} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

由此，可以在 dq 坐标系下构建电压源型三相桥式逆变器的数学模型。

2.1.2 VSG 控制原理

传统同步发电机作为电力系统的主要发电设备，由转子和定子构成，通过定转子方程实现频率和电压的调节。当系统受到扰动时，同步发电机依靠其强大的惯性特性维持系统稳定性^[34]。基于此，本文采用虚拟同步发电机控制技术实现微网逆变器控制，其核心控制方程包括功率外环和电压电流双闭环。功率外环控制

模拟了功角下垂方程、转子运动方程和励磁方程，而电压电流双闭环控制则模拟了定子电磁方程的动态特性。

本文 VSG 模型是模拟同步发电机的二阶经典模型，VSG 的转子运动方程和原动机调节方程共同构成有功-频率下垂控制，有功-频率控制方程为：

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \\ P_m = P_{ref} + K_\omega(\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (2.9)$$

式中： J 和 D 分别表示虚拟惯量和虚拟阻尼系数； P_m 为机械功率； ω_n 为额定角频率(离网模式下设为 100π)； P_{ref} 为有功功率参考值； K_ω 为一次调节系数； θ 为 VSG 参考电压相角。

当负载发生扰动时，暂态输入与输出有功功率不平衡，虚拟惯性的引入可有效抑制角频率突变，提升系统稳定性。通过有功-频率下垂调节方程，可得如图 2-2 所示的有功-频率下垂控制模块。

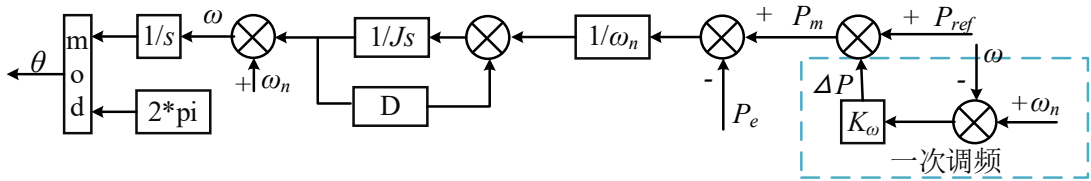


图 2-2 有功-频率下垂控制模块

有功-频率控制使光储系统在并网时能够实现有功功率的合理分配，转子运动方程为系统提供了惯性和阻尼支持。与传统同步发电机复杂的励磁系统相比，VSG 的电压幅值调节仅基于无功-电压下垂特性设计，使系统具备调压功能，其数学模型为：

$$E = E_0 + K_u(U_{ref} - U) + D_q(Q_{ref} - Q) \quad (2.10)$$

式中： E 和 E_0 分别为 VSG 机端实际输出电压和计算出的电压参考值； U_{ref} 为额定电压； U 为 VSG 输出电压； Q_{ref} 和 Q 分别为逆变器的无功功率参考值和实际输出无功功率； K_u 为无功-电压调节系数； D_q 为惯性系数。

通过无功-电压下垂控制方程，可得如图 2-3 所示的无功-电压下垂控制模块。

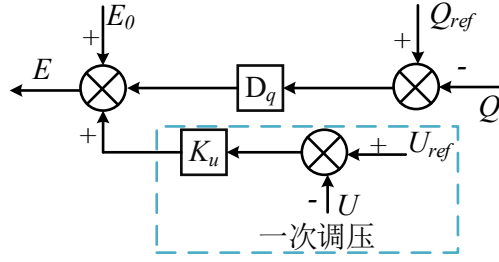


图 2-3 无功-电压下垂控制模块

2.1.3 电压电流双闭环控制

VSG 通常运用电压与电流的双闭环控制架构，以增强对逆变器输出电压的调节效能。控制模块产生的参考电压通过 dq 坐标转换后，作为电压外环的输入信号，其输出则与电流环相衔接。通过电压外环设定目标电压，电流环接收来自电压外环输出的电流参考值以及实际电流的反馈值^[35]。通过比较这两个值得到电流偏差信号，再利用电流调节器(常采用 PI 控制器等)对该偏差进行调节，进而产生控制信号去驱动功率变换器件(如 IGBT 等)，实现对电流的精准控制。双闭环控制结构使得系统具有更好的抗干扰能力。

电压外环的控制方程为：

$$\begin{cases} i_{dref} = K_1 \frac{d\lambda_d}{dt} + i_d - u_q \omega C = K_1 (u_{dref} - u_d) + i_d - u_q \omega C \\ i_{qref} = K_2 \frac{d\lambda_q}{dt} + i_q - u_d \omega C = K_2 (u_{qref} - u_q) + i_q - u_d \omega C \end{cases} \quad (2.11)$$

式中： i_{dref} 、 i_{qref} 分别为电流经 dq 坐标变换后在 d 轴和 q 轴的参考值； K_1 、 K_2 为比例积分系数； i_d 、 i_q 分别为电流经 dq 坐标变换后在 d 轴和 q 轴的实际数值； u_d 、 u_q 分别为电流经 dq 坐标变换后在 d 轴和 q 轴的分量； C 为加在电压环中的电容值。

电流内环的控制方程为：

$$\begin{cases} u_{dref} = K_3 \frac{d\alpha_d}{dt} + u_d - i_q \omega L = K_3 (i_{dref} - i_d) + u_d - i_q \omega L \\ u_{qref} = K_4 \frac{d\alpha_q}{dt} + u_q - i_d \omega L = K_4 (i_{qref} - i_q) + u_q - i_d \omega L \end{cases} \quad (2.12)$$

式中： u_{dref} 、 u_{qref} 分别为电压经 dq 坐标变换后在 d 轴和 q 轴的参考值； K_3 、 K_4 为比例积分系数； L 为加在电流环中的电感值。

由式(2.11)和式(2.12)可以得到 VSG 电压电流双闭环控制结构框图如图 2-4

所示。

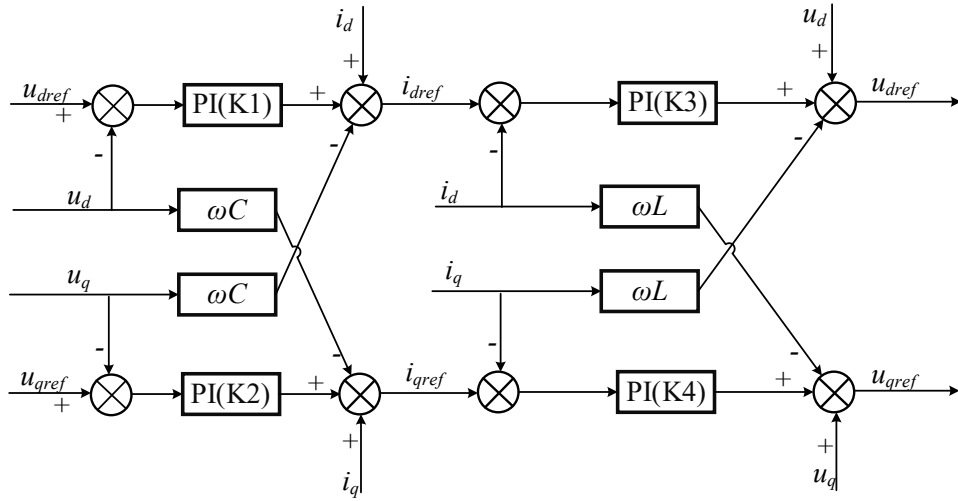


图 2-4 VSG 电压电流双闭环控制框图

结合本章前文所述，VSG 整体控制结构框图如图 2-5 所示。

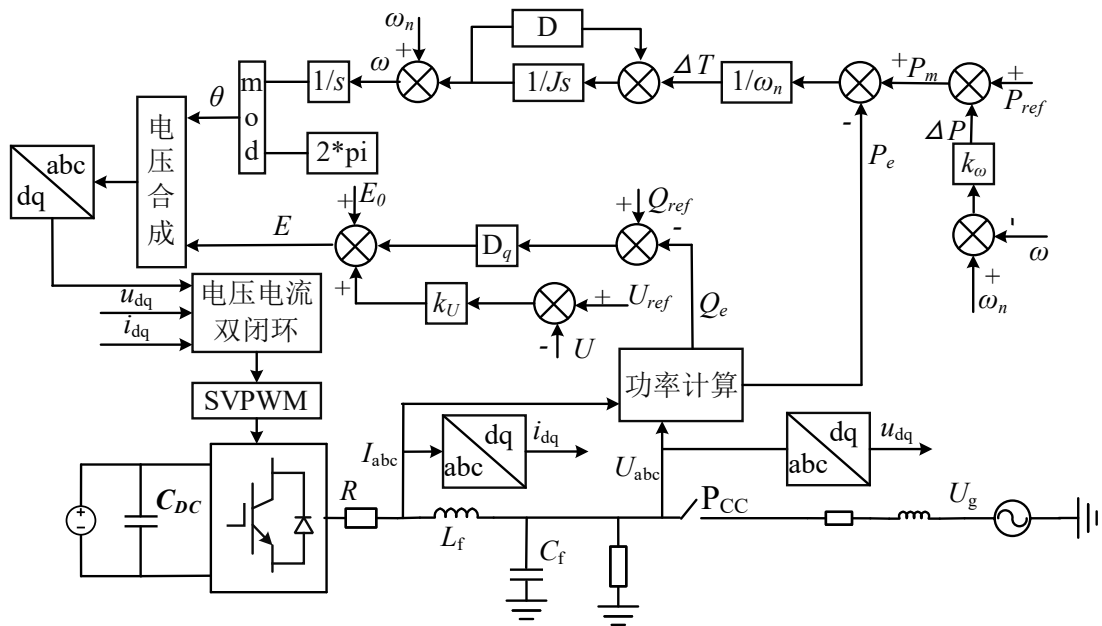


图 2-5 VSG 整体控制结构框图

2.1.4 仿真分析

VSG 逆变器运行仿真参数见表 2-1。本地负载为 10kW+5kVar，仿真时间为 1s。

表 2-1 系统运行仿真参数

参数名称	数值	参数名称	数值
直流母线电压 U_{dc}	700V	一次调频系数 K_{ω}	1000
电网相电压 U_g	220V	一次调压系数 K_u	200
惯性系数 D_q	0.1	虚拟电阻 R	0.1Ω
虚拟惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.57	滤波电感 R_f	3.2mH
虚拟阻尼/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$	20	滤波电容 R_c	$0.2\mu\text{F}$
电网频率 f_g	50Hz	开关频率	10kHz

为了验证 VSG 逆变器的调节能力,在 0.5s 时额定功率由最初的 15kW+5kVar 突变成 20kW+10kVar。图 2-6、图 2-7、图 2-8 和图 2-9 分别为 VSG 逆变器输出电压、输出电流和频率的波形以及输出有功/无功功率波形。

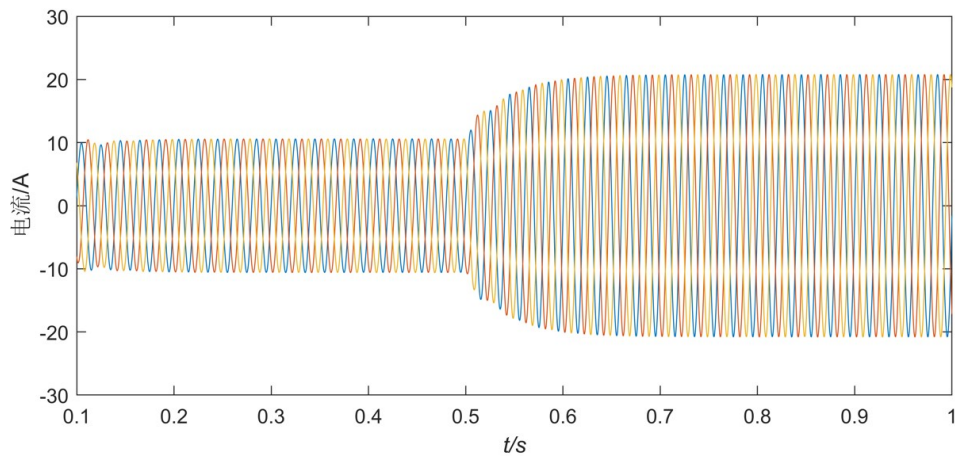


图 2-6 VSG 逆变器并网输出电流波形

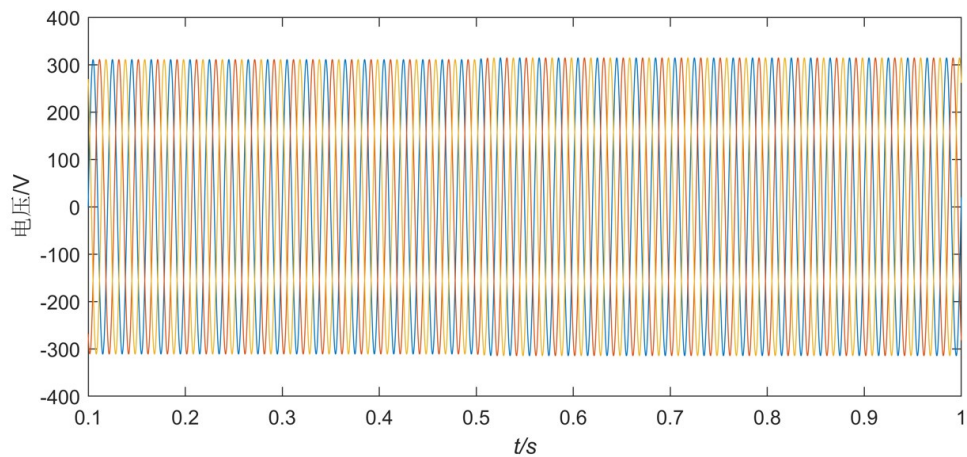


图 2-7 VSG 逆变器并网输出电压波形

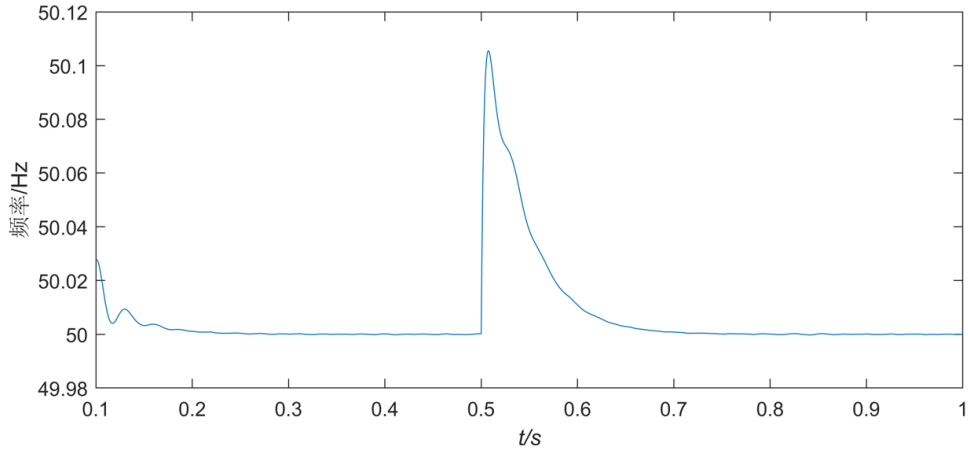


图 2-8 VSG 逆变器并网输出频率波形

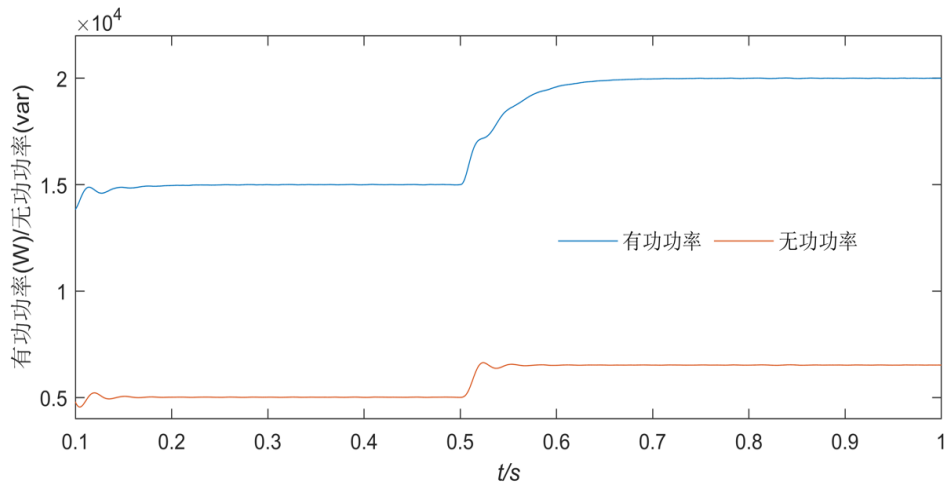


图 2-9 VSG 逆变器并网输出功率波形

由图 2-5 至图 2-9 可知，基于 VSG 控制的微网逆变器能够成功实现并网运行，其输出电压和频率与电网保持一致，面对功率的突然波动，系统能够自主跟踪调节且反应迅速，有功和无功功率输出能够准确跟踪给定值，符合本文所分析的 VSG 逆变器控制特性。

2.2 光伏发电系统

光伏发电是一种利用半导体材料的光伏效应将太阳能转换为电能的过程。其主要原理是在一个具有 P-N 结的半导体材料中，当光照到 P-N 结上时，会激发出一些自由电子和空穴，从而形成电流。这个过程称为内光电效应。光伏电池本质上相当于平面二极管，在理想光照环境下，其外特性模型可用二极管和电流源并联的等效电路表示，如图 2-10 所示。

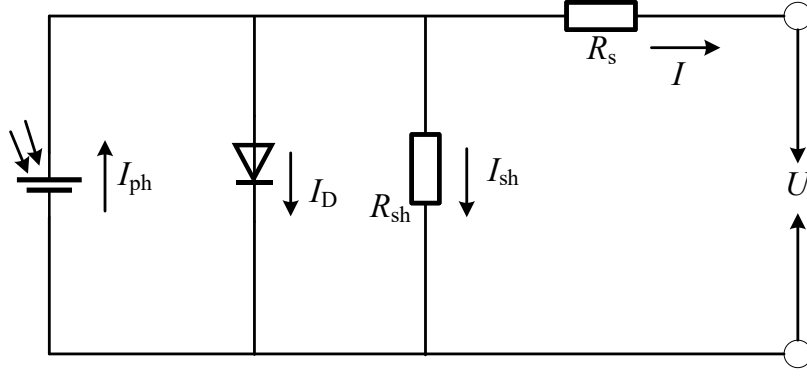


图 2-10 光伏电池等效电路

2.2.1 光伏电池等效模型

由图 2-10 可知，光伏电池输出的负载电流 I 等于光伏电池的内部光生电流 I_{ph} 减去光伏电池内部暗电流 I_D 和分流电阻电流 I_{sh} ，即：

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.13)$$

P-N 结暗电流和电压 U 的关系满足下式：

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad (2.14)$$

由 KVL 定理可得：

$$I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

将式(2.13)和式(2.14)代入式(2.15)，整理得：

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.16)$$

式中： I_0 为二极管反向饱和电流； q 为电子的电荷量， $q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； K 为玻尔兹曼常数， $K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； A 为光伏电池常数因子； R_s 为光伏电池内部等效串联电阻； R_{sh} 为光伏电池内部的等效旁路电阻； T 为实际环境温度； U 为光伏电池输出电压。

一般地，工程上在满足以下条件时将式(2.16)进行化简。

(1) 通常由于 R_{sh} 很大，则忽略 $(U+IR_s)/R_{sh}$ 。

(2) R_s 远小于二极管正向导通电阻，则光伏电池内部短路电流 I_{sc} 近似等于 I_{ph} 。

由此可得出：

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{ATK}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

令：

$$I = I_{sc} - C_1 I_{sc} [\exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}}) - 1] \quad (2.18)$$

且在最大功率点， $\exp(U_m / C_2 U_{oc})$ 的值远大于 1，则：

$$\exp(\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}) - 1 \approx \exp(\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}) \quad (2.19)$$

解得：

$$\begin{cases} C_1 = (1 - U_m / I_{sc}) \exp(-U_m / C_2 U_{oc}) \\ C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m / I_{sc})]^{-1} \end{cases} \quad (2.20)$$

式中： U_{oc} 为开路电压； I_{sc} 为短路电流； U_m 为最大功率点电压； I_m 为最大功率点电流。

但是式(2.13)-式(2.20)的数学模型是在标准条件下推算出来的，模拟出的光伏电池特性比较理想，实际上，环境是不断变化的，并且其变化会对光伏电池工作产生一定的影响。为了模拟光伏电池实际的工作情况，也为了防止功率采样速度小于外界环境变化速度，从而导致后续的 MPPT 控制产生误差，需要考虑环境影响。为此可利用迭代计算法^[36]，实时推算出实际环境下光伏电池的开路电压、短路电流、最大功率点电压、最大功率点电流。推算公式为：

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.21)$$

$$\Delta S = S / S_{ref} - 1 \quad (2.22)$$

$$I_{sc}^* = I_{sc} (S / S_{ref}) (1 + a \Delta T) \quad (2.23)$$

$$U_{oc}^* = U_{oc} (1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S) \quad (2.24)$$

$$I_m^* = I_m (S / S_{ref}) (1 + a \Delta T) \quad (2.25)$$

$$U_m^* = U_m (1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S) \quad (2.26)$$

式中： T_{ref} 、 S_{ref} 分别表示标准条件下的环境温度(25℃)和光照强度(1000W/m²)； T 、 S 分别为实际的温度和光照强度； a 、 b 、 c 为修正系数；本文分别取为 0.0025/℃、0.5、0.00288/℃； ΔT 和 ΔS 分别为 T 和 S 的差值。

由式(2.13)-式(2.26)，可基于 MATLAB/Simulink 仿真软件建立光伏电池的仿

真模型, 如图 2-11 所示。选取单个光伏电池参数为: $U_{oc}=37.6$ V、 $I_{sc}=8.55$ A、 $U_m=31$ V、 $I_m=8.06$ A。

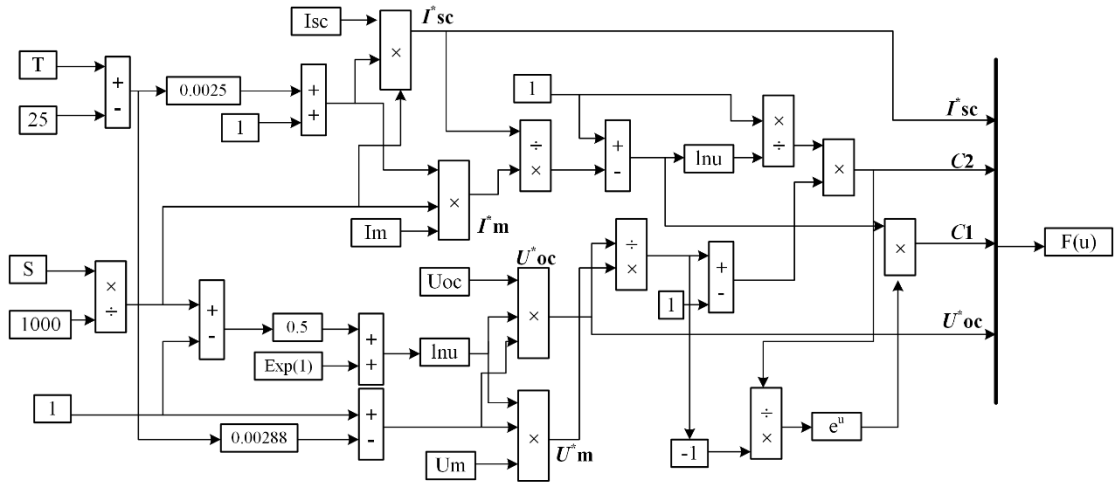
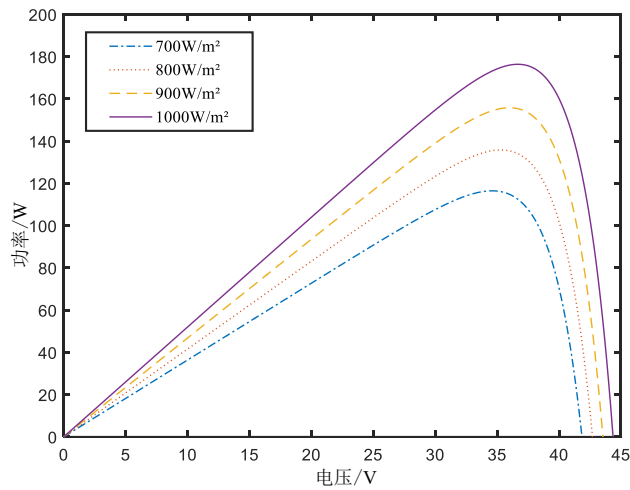
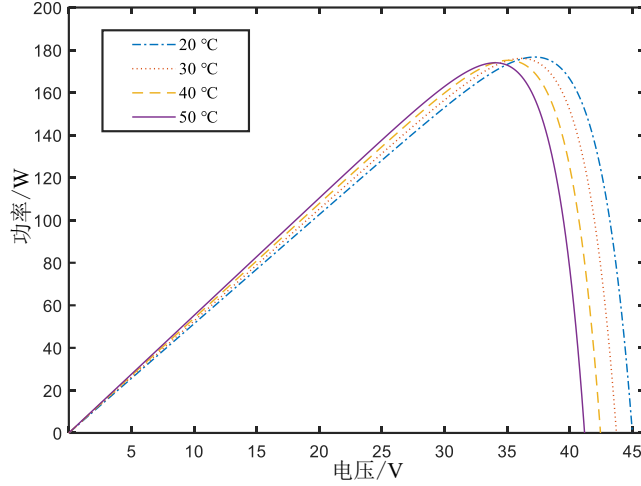


图 2-11 光伏电池仿真模型

在相同环境温度、不同光照强度时功率和输出电压($P-U$)特性曲线如图 2-12(a)所示, 在相同光照强度、不同环境温度时光伏电池 $P-U$ 特性曲线如图 2-12(b)所示。由图 2-12 知, 光伏电池既非恒压源, 也非恒流源, 而是一个非线性元件, 在光照强度和环境温度不变时, 其输出功率具有极大值。光照强度和环境温度变化时, MPP 都会有相应的改变。



(a) 相同环境温度、不同光照强度时 $P-U$ 特性曲线

(b) 相同光照强度、不同环境温度时 P - U 特性曲线图 2-12 光伏电池 P - U 特性曲线

2.2.2 最大功率点跟踪

由于环境复杂多变，光伏电池 P - U 特性曲线会随之发生改变，所以需要找到其最佳工作电压来对最大功率点进行追踪。常用的方法有扰动观察法 (Perturbation Observation Method, P&O) 和电导增量法 (Incremental Conductance Method, INC)。P&O 和 INC 扰动步长的设置均会对光伏发电系统的动态性能和稳态性能产生影响，但由于 INC 控制精度高且对于外界环境变化具有较强的适应能力，所以 INC 性能要优于 P&O^[37]，因此被广泛应用于光伏发电系统最大功率点跟踪。

INC 通过计算 dP/dU 的正负来判断当前工作点的位置，进而决定电压的扰动方向，提高了判断的准确性。将光伏电池输出功率对电压求导得：

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (2.27)$$

当 $I + U(dI/dU) > 0$ ，即 $dI/dU > -I/U$ 时，工作点位于 MPP 点左侧，需从正方向扰动输出电压；当 $I + U(dI/dU) < 0$ ，即 $dI/dU < -I/U$ 时，工作点位于 MPP 点右侧，需从负方向扰动输出电压；当 $I + U(dI/dU) = 0$ ，即 $dI/dU = -I/U$ 时，工作点刚好位于 MPP 点，此时光伏电池处于最大功率点。

2.2.3 改进变步长电导增量法

图 2-13 所示为光伏电池 $|dP/dU|$ 及 P - U 、 I - U 特性曲线。

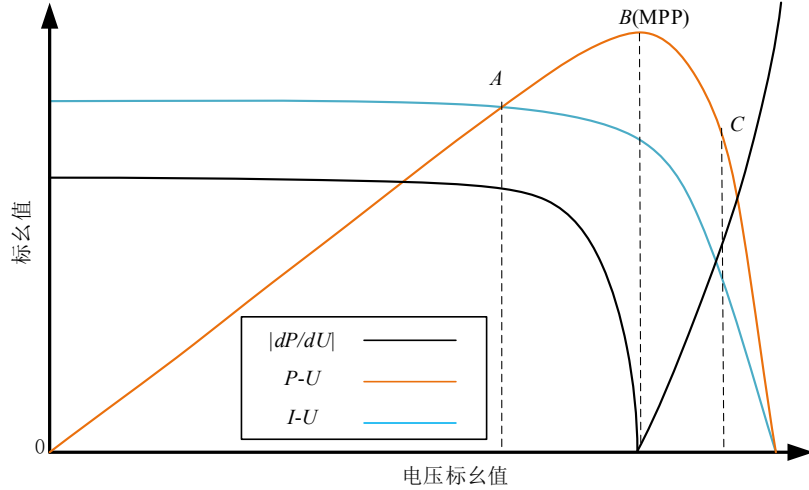


图 2-13 光伏电池 $|dP/dU|$ 及 $P-U$ 、 $I-U$ 的输出特性曲线

由图可知，光伏电池 $P-U$ 特性曲线表现为单极值的非对称性，MPP 点左侧曲线部分较为平缓，功率变化量逐渐减小；MPP 点右侧曲线部分较为陡峭，功率变化量急速增加，越接近 MPP 点功率变化量越小。因此，一些学者在传统电导增量法的基础上，提出了自适应变步长电导增量法，自适应变步长电导增量法是让光伏电池输出功率在远离最大功率点时，加大系统步长以获得更快的动态响应速度；当接近最大功率点时，减小系统步长以获得较小的稳态误差，提高电导增量法的跟踪精度。图 2-13 中， $|dP/dU|$ 的曲线特点很符合这一特性，能够做到对步长的实时调整，但是 $|dP/dU|$ 在 MPP 点两侧的变化量非常大，直接作为步长参数可能仍然存在精度问题。

结合 $|dP/dU|$ 的变化规律，传统的自适应变步长法用 $|dP/dU|$ 代替固定步长参数，并引入一个常数系数进行修正。但传统的自适应变步长法在输出功率非常大时，环境突变会使功率产生较大振荡，虽然能够更快追踪到最大功率点但不完善，因为 $|dP/dU|$ 在 MPP 两侧并不是对称的直线，传统的自适应变步长在接近 MPP 时步长仍然过大，步长的自适应能力较差。为了减小环境变化带来的功率曲线振荡，需要让步长在最大功率点附近进行小范围变化，传统的自适应变步长不能对步长进行一个动态的修正，导致最大功率点的追踪效果不理想。为此本文在传统自适应变步长中引入一个自适应系数作为步长参考因子对 $|dP/dU|$ 进行调整，让系统在远离最大功率点时进行较大步长跟踪，接近最大功率点时进行较小步长跟踪，进而达到优化变步长电导增量法的目的。

由式(2.27)可知，步长变化量与电流 I 、电压 U 和 $|dP/dU|$ 有关，由于电流 I 在

接近最大功率点时才会逐渐下降，在 MPP 左侧， I 和 dP/dU 变化的趋势相同，可见电流对 $|dP/dU|$ 起到实时调节的作用。图 2-14 所示为 $1/I$ 与电压 U 的关系曲线。

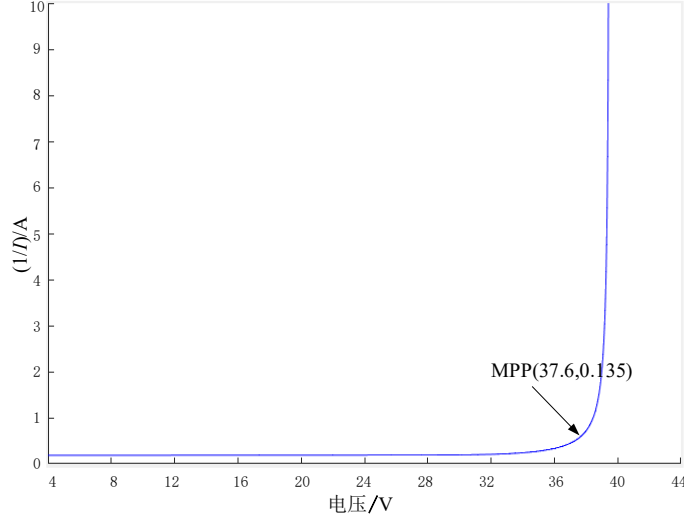


图 2-14 $1/I$ 与电压 U 关系曲线

从图 2-14 可知，在到达最大功率点之前随着电压的增加， $1/I$ 是基本恒定的，但在最大功率点附近随着电压的增加而逐渐增大。结合 $|dP/dU|$ 在 MPP 左侧的变化关系，可以看出存在一个与 $1/I$ 相关的函数可以精准并且动态同步地控制最大功率点附近的步长，本文将 MPP 左侧时步长变化表示为：

$$Step_1 = \beta_1 \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (2.28)$$

式中： β_1 表示与 $1/I$ 相关的系数。

由于在 MPP 右侧 $|dP/dU|$ 的变化极快，电流值的变化范围太小，跟踪精度不是非常高，调节能力差。相对地，功率 P 的变化则能很好地反映跟踪情况，且极易看出功率的倒数是随着电压的增大而逐渐增大的，功率 P 的倒数和 $|dP/dU|$ 变化的趋势相同。相对地，在最大功率点右侧的步长变化可表示为：

$$Step_2 = \beta_2 \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (2.29)$$

式中： β_2 表示与 $1/P$ 相关的系数。

改进变步长 INC 流程如图 2-15 所示。

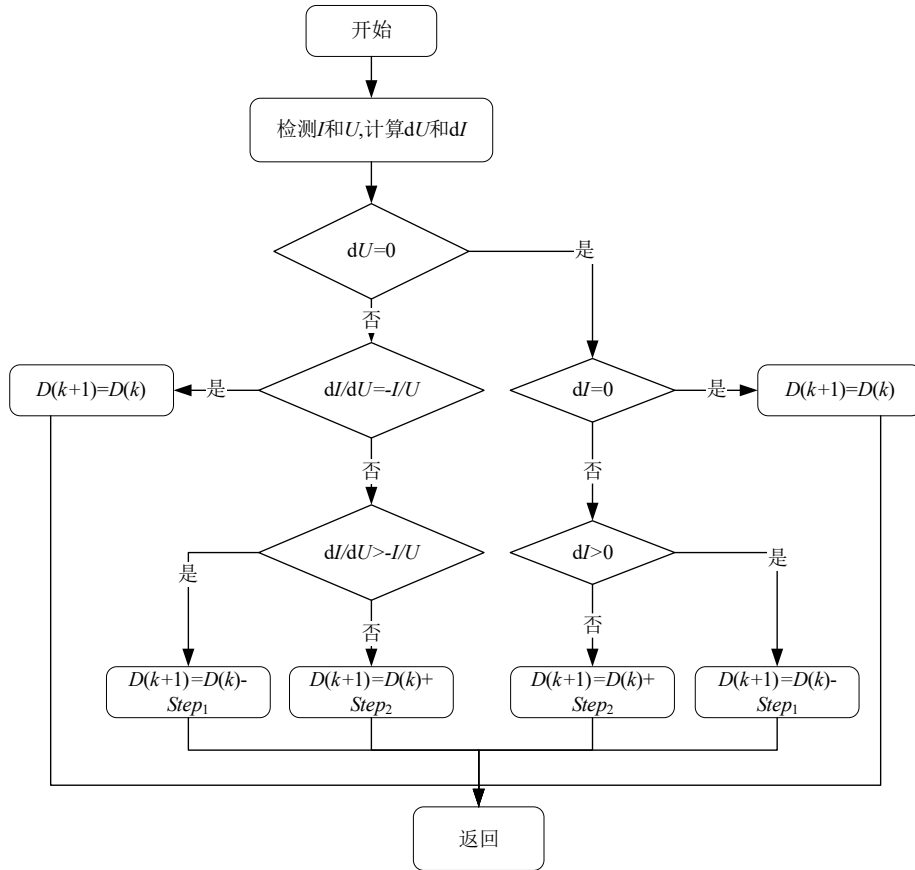


图 2-15 改进变步长 INC 流程图

在最大功率点左侧时, 系统需要增加电压, 减小步长; 在最大功率点右侧时需要减小电压, 减小步长; 越接近 MPP 点步长就应该越小^[38]。考虑函数 e^{-x} 的曲线特点和 MPP 左侧时 $1/I$ 的值都小于 1 的特点, 当 $dI/dU > -I/U$ 时, 令 $\beta_1 = e^{-1/I}$, 即 $Step_1 = e^{-1/I} |dP/dU|$, 可知 $Step_1$ 是随着电压的增加而减小。当 $dI/dU < -I/U$ 时, 结合 $\ln$ 函数缓升的特点, 在公式(2.29)中, 令 $\beta_2 = A \ln(1/P+1)$ (A 为固定系数), 即 $Step_2 = A \ln(1/P+1) |dP/dU|$, $Step_2$ 是随着电压的增加而增大的。图 2-16 所示为改进变步长 INC 的步长变化图。

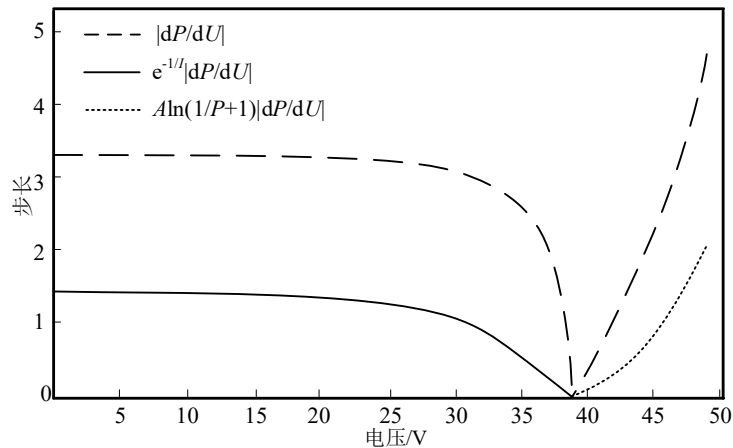


图 2-16 改进变步长 INC 的步长变化图

从图 2-16 可知,改进变步长电导增量法符合步长的变化规律, β_1 和 β_2 在不同的阶段都能够对 $|dP/dU|$ 进行同规律、同方向的调整,进而优化步长的精度,越接近最大功率点步长越小,对系统的控制更加精准。

2.2.4 仿真分析

为了验证改进变步长电导增量法的有效性,本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件进行模拟实验,系统由光伏组件、具有改进电导增量法的 MPPT 控制器、Boost 转换和负载构成。图 2-17 所示为系统仿真模型。

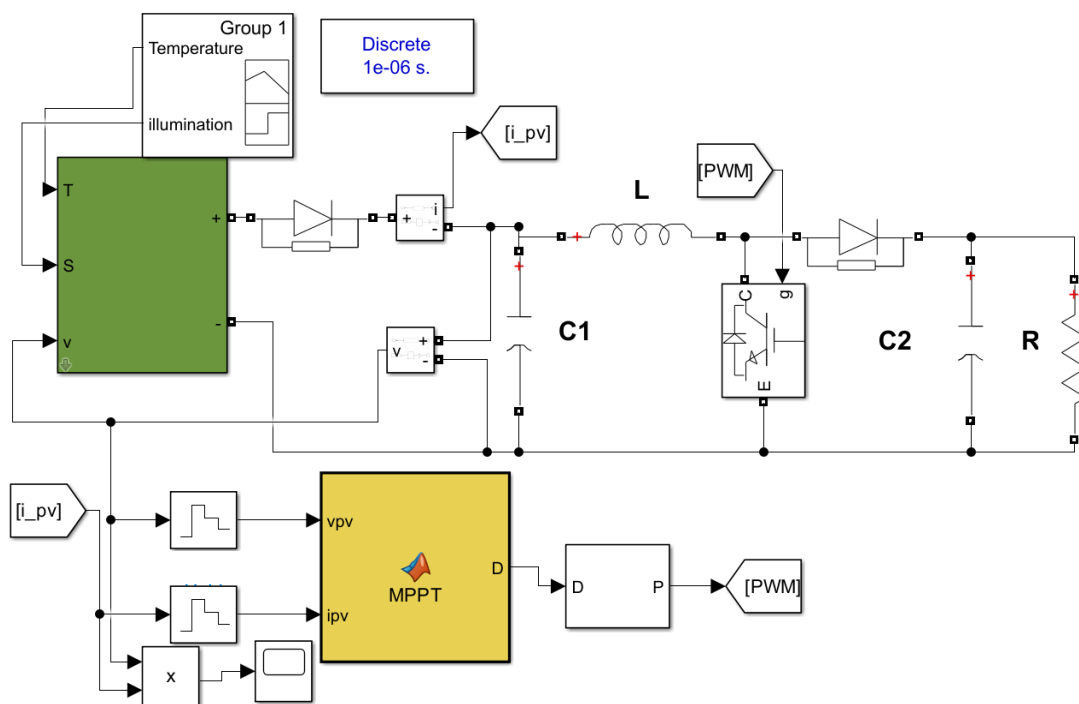


图 2-17 系统仿真模型

本文仿真环境变化的设定为:在 1.0s 时环境温度从 25℃降到 20℃,光照强度由 1000W/m² 降为 800W/m²,1.5s 时光照强度再增加 400W/m²。系统的开关频率为 10kHz,其它参数见表 2-2。

表 2-2 光伏发电系统参数

参数名称	数值	参数名称	数值
电容 C1/uF	800	电阻 R/Ω	15
电容 C2/uF	1	电感 L/mH	3

结合上述数据,将文献[39]自适应变步长 INC、文献[40]功率预测的变步长 INC 和本文改进变步长 INC 在外界环境变化下的应变能力进行了对比研究,得出的 3 种变步长 INC 输出功率跟踪性能对比如图 2-18 所示。

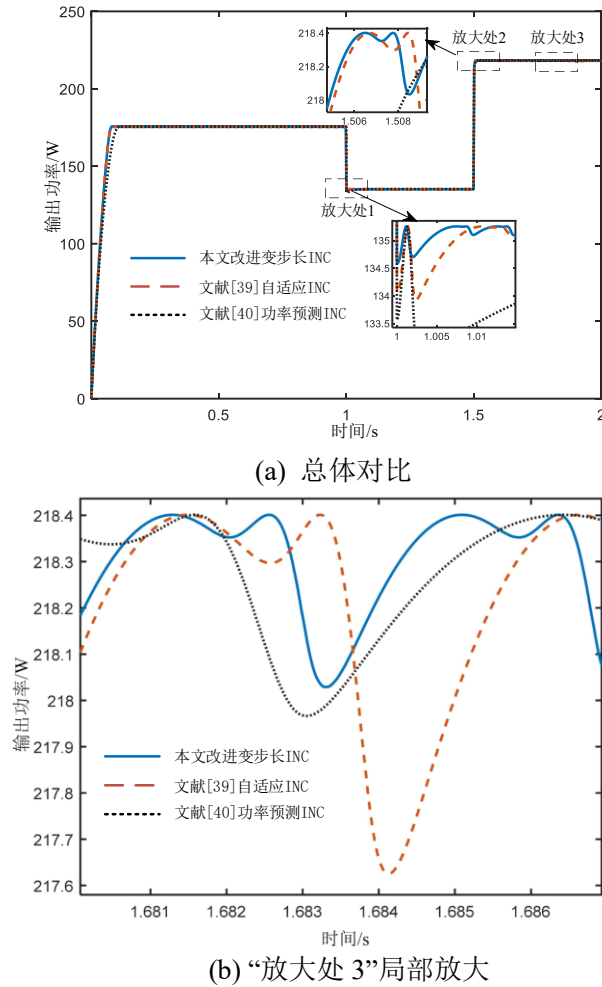


图 2-18 3 种变步长 INC 功率曲线对比

由图 2-18 可知,在开始跟踪最大功率点时,本文改进变步长 INC 和文献[39]变步长 INC 比文献[40]功率预测 INC 能更快地跟踪到最大功率。在 1.0s 时,在光照强度和环境温度都下降,系统重新寻找最大功率点的过程中,本文改进变步长 INC 反应速度更快且输出功率振荡更小,具有更优良的应变能力,可更快跟踪至最大功率点。为了更加明显地表明 3 种变步长 INC 方法输出功率的特性,本文给出 3 种方法在 1.0s 时环境变化后的功率变化数据(系统重新恢复稳定时的时间 t_p 、最小功率点 $P_{\min}$ 、最大功率点 $P_{\max}$ 、平均功率 P^*),见表 2-3。

表 2-3 3 种变步长 INC 仿真结果比较

参数名称	t_p/s	$P_{\min}/W$	$P_{\max}/W$	P^*/W
本文改进算法	1.006	134.6	135.3	134.87
文献[39]算法	1.010	133.9	135.2	134.08
文献[40]算法	1.045	132.9	135.3	133.28

由表 2-3 可知, 从 1.000s 到 1.010s, 本文改进变步长 INC 比文献[39]算法平均输出功率提高大约 0.70%; 从 1.000s 到 1.045s, 本文改进变步长 INC 比文献[40]变步长 INC 平均输出功率超出大约 1.41%, 系统重新跟踪到最大功率点需要的时间大约分别只有文献[39]的 60%和文献[40]的 13%。综上, 相比其他方法, 本文改进变步长 INC 在环境变化时具有输出功率重新恢复稳定所需时间短、最小功率点功率值高、未稳定时平均功率高的特性。

2.3 混合储能单元

储能单元是微网的关键组成部分, 能够在可再生能源发电功率超过负载需求时存储多余电能, 并在发电功率不足时释放电能, 从而平滑可再生能源的功率波动, 减少对微网电压和频率的冲击, 提升电能质量, 实现能量缓冲与功率平衡。在光伏储能直流微网系统中, 双向 DC-DC 变换器作为关键装置, 承担着储能单元与直流母线之间能量交换的重要功能。因此, 本节重点研究由蓄电池(Storage Battery, SB)和超级电容(Super-Capacitor, SC)组成的混合储能单元及其控制策略。

2.3.1 蓄电池等效电路模型

电池模型可将电池复杂的内部电化学过程用简单的电路元件组合来表示, 如电阻、电容、电压源等, 以至于能更直观地理解蓄电池内部各参数之间的相互关系, 以及这些参数如何影响电池的外特性。通过蓄电池等效电路模型, 可以方便地研究蓄电池在充放电过程中的动态特性, 如瞬态响应、极化现象等, 有助于深入了解蓄电池的工作原理和性能变化规律。本文在建模时采用内阻等效模型(R_{int}), 如图 2-19 所示。该模型简单, 参数测定较容易, 建模易于实现, 具有一定通用性^[41-42]。

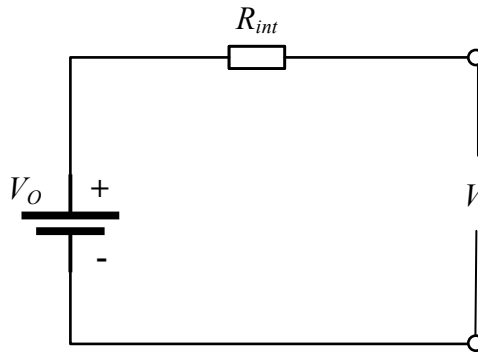


图 2-19 蓄电池内阻等效模型

由图 2-19 可知, 该模型包括一个理想化的电池, 其开路电压为 V_o , 一个恒

定的等效内阻 R_{int} ，以及随时间变化的端电压 V 。在电池完全充电状态下，通过测量开路电压可以得知端电压 $v(t)$ ，而内阻 R_{int} 则可以通过接上负载并同时监测端电压与电流来计算得出。通过戴维南定理，蓄电池的动态特性可以用以下公式描述：

$$\begin{cases} v(t) = V_o(z(t)) - i(t)R_{int} \\ \frac{dz}{dt} = -\frac{i(t)}{Q} \\ z(t) = z(t_0) - Q \int_{t_0}^t i(T)dT \end{cases} \quad (2.30)$$

式中： $V_o(z(t))$ 是开路电压，它是电池荷电状态 $z(t)$ 的函数； $i(t)$ 是 t 时刻的电流； dz/dt 是荷电状态 $z(t)$ 随时间 t 的变化率； $z(t_0)$ 是初始时间 t_0 时的荷电状态； $\int_{t_0}^t i(T)dT$ 是从时间 t_0 到时间 t 的电流积分，表示这段时间内通过电池的总电荷量。

2.3.2 超级电容等效模型

本文超级电容等效电路采用串联 RC 模型，由理想电容 C 和等效串联电阻 R_s 串联组成，与电池内阻等效模型极为相似。在充放电过程中，电容 C 两端的电压 $U_c(t)$ 随时间的变化公式为 $U_c(t) = U_0 e^{-\frac{t}{R_s C}}$ ，其中 U_0 为初始电压。当超级电容向负载电阻 R_L 放电时，放电电流 $i(t)$ 的公式为 $i(t) = \frac{U_0}{R_s + R_L} e^{-\frac{t}{(R_s + R_L)C}}$ 。该模型中超级电容存储的能量 $E = \frac{1}{2}CU^2$ ，其中 U 为超级电容两端的电压。

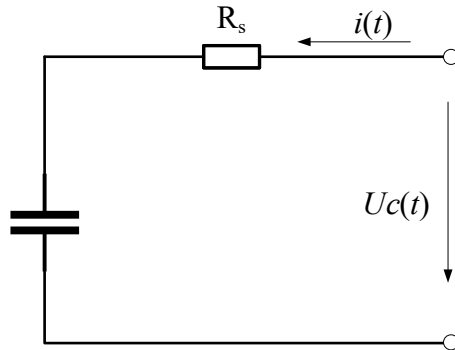


图 2-20 超级电容等效电路

2.3.2 混合储能控制策略

由上述可知本系统采用了直流微电网结构，通过 MPPT 控制方法，光伏电池

能够确保光伏发电系统始终运行在最大功率点,再经 Boost 变换器并入直流母线。蓄电池和超级电容通过双向 Buck/Boost 变换器与直流母线相连,完成能量的相互传输和储存。由于光伏发电系统在部分环境中容易产生功率波动,对母线电压有很强的干扰性,所以只能通过混合储能来平衡功率波动和稳定母线电压。结合蓄电池储能效果好、寿命短和超级电容响应速度快、寿命长的特点,本文对蓄电池采用恒功率控制策略,对超级电容采用直流电压恒定控制策略。混合储能控制策略如图 2-21 所示。

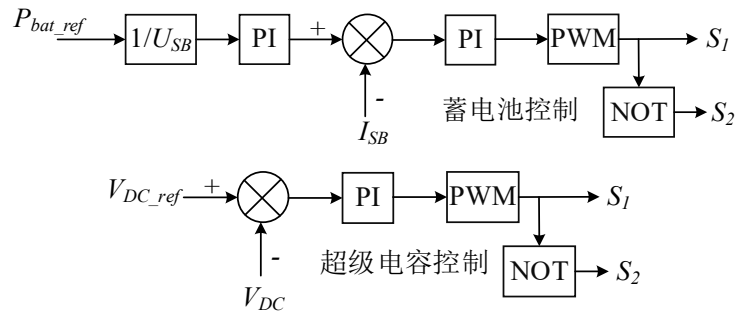


图 2-21 混合储能控制策略

该控制策略可以加强直流母线电压的稳定性,稳定的直流电压能够保证直流微网系统在离网、并网运行模式下稳定工作。因为蓄电池和超级电容的工作原理类似,所以本文就以超级电容为例分析储能系统的控制结构和工作原理,图 2-22 为超级电容双向 DC/DC 变换器电路拓扑图。

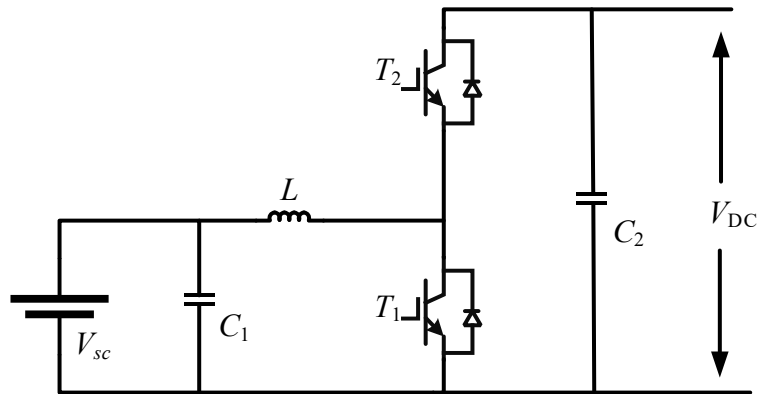


图 2-22 超级电容双向 DC/DC 变换器电路拓扑图

直流侧电容 C_1 与电感 L 协同工作,能够有效抑制直流母线电压的波动,同时 C_1 和 C_2 还兼具滤波功能。当开关管 T_1 关断时,变换器运行于 Boost 模式,能量从超级电容流向电网(放电);当开关管 T_1 关断时,变换器切换至 Buck 模式,能量从电网流向超级电容(充电),适用于超级电容储能不足的场景。超级电容在充放电期间的能量流向示意图如图 2-23 所示。



图 2-23 超级电容双向 DC/DC 变换器电量流向示意图

本章首先对本文所深入研究的光储微网系统结构展开了全面且细致的介绍。为提高电力系统的稳定性和可靠性，对 VSG 的理论、控制策略以及实现方式等进行了详细分析。然后在建立光伏电池数学模型的过程中，对模型的各个参数进行了详细的推导和说明，确保模型能够真实地反映光伏电池的工作特性。同时，对传统的 MPPT 控制方法进行了优化，提出了改进变步长电导增量法，引入新的控制参数和算法，有效地提高了系统对最大功率点的跟踪速度和精度。仿真实验结果表明，改进变步长电导增量法显著提高了系统的稳定性和快速性，能够更好地适应复杂多变的光照和温度条件，为光伏系统的高效运行提供了有力支持。最后，建立了混合储能单元的数学模型，并对混合储能单元的控制策略和运行方式进行了分析，为后文储能单元在光储微网中的合理配置和优化运行提供了理论依据。

第3章 改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略

本章主要结合第2章的VSG控制原理进行有功功率环节的参数分析，研究VSG逆变器系统的稳定性与转动惯量和阻尼系数的关系，因此，本章的核心研究内容是通过动态调节转动惯量和阻尼系数参数，实现电力系统动态稳定性的有效控制。首先，基于有功功率平衡方程，构建了含转动惯量、阻尼系数及一次调频参数的动态分析模型，揭示了各参数对系统稳定性的影响规律，并绘制了这些参数变化时的根轨迹图，以归纳它们对系统稳定性的影响规律。接着，通过研究功率和功角特性曲线、转子角频率振荡曲线的特征，分析其对应的自适应调节原理，提出了一种改进的惯量阻尼自适应控制策略。最终，通过与其他惯量阻尼自适应控制策略的比较，验证了本文所提改进策略的有效性。

3.1 VSG 的有功功率特性分析

VSG 逆变器拓扑结构一般可等效为如图 3-1 所示电路^[43]，图中： Z_g 为电网侧等效阻抗，以电网电压 U_g 为基准电压，VSG 虚拟电压为 $E\angle\delta$ ，其中， δ 为 VSG 主电路与电网基准电压的相位差。

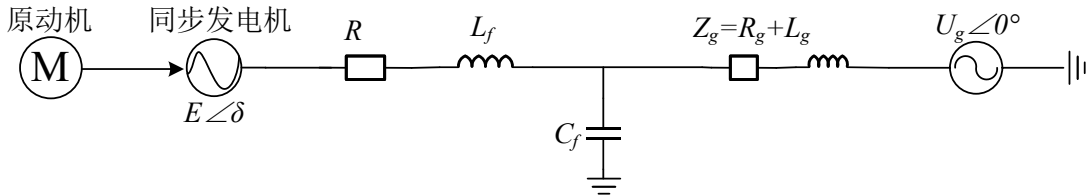


图 3-1 VSG 基本原理拓扑

根据式(2.9)和图 3-1，可得到 VSG 逆变器的输出功率为：

$$\begin{cases} P_e = \frac{EU \cos(\varphi - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \cos \varphi}{Z} \\ Q_e = \frac{EU \sin(\varphi - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \sin \varphi}{Z} \end{cases} \quad (3.1)$$

式中： φ 为滤波电路的阻抗 Z 所对应的阻抗角。

当电感阻值 X_s 远大于电阻 R 时， P_e 可近似表示为：

$$P_e = \frac{EU \sin \delta}{X_s} \approx \frac{EU}{X_s} \delta \quad (3.2)$$

且当 VSG 逆变器并网时，逆变器输出频率受到电网的钳制，结合式(2.9)和式(3.2)可计算出 VSG 有功环节的闭环传递函数为：

$$G(s) = \frac{\frac{EU}{J\omega_n X_s}}{s^2 + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_\omega}{J\omega_n}\right)s + \frac{EU}{J\omega_n X_s}} \quad (3.3)$$

可明显地看出式(3.3)为典型的二阶系统, 根据该公式可知其自然振荡角频率 ω 和阻尼比 ξ 分别为:

$$\begin{cases} \omega = \sqrt{\frac{EU}{J\omega_n X_s}} \\ \xi = D\sqrt{\frac{\omega_n X_s}{4JEU}} + K_\omega\sqrt{\frac{X_s}{4J\omega_n EU}} \end{cases} \quad (3.4)$$

当 $0 < \xi < 1$ 且误差带为 $\pm 5\%$ 时, 该二阶系统的超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s 可分别表示为:

$$\begin{cases} \sigma\% = e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} * 100\% \\ t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 3.5 / \left(\frac{D}{2J} + \frac{K_\omega}{2J\omega_n}\right) \end{cases} \quad (3.5)$$

当系统接收到特定的有功和无功指令时, 该二阶系统模型的动态响应特性主要由转动惯量 J 、阻尼系数 D 以及调差系数 K_ω 的参数配置方案协同决定。为了更直观地分析这些参数对系统稳定性的影响, 可以根据上述理论分析绘制有功环的根轨迹图。根轨迹图以 J 、 D 和 K_ω 作为变量, 通过观察根轨迹的变化趋势, 能够清晰地了解参数调整对系统极点位置的影响, 进而评估系统的动态响应特性。

图 3-2 为 $J=0.2$ 、 $K_\omega=25$ 且 D 从 0 慢慢增大到 60 的有功环根轨迹图, 从图中可知, 随着参数 D 的增大, 系统的根轨迹从虚轴开始, 逐渐向实轴靠拢, 一组共轭极点逐渐变小, 在实轴交汇后向左右两侧分离, 系统从欠阻尼状态变为过阻尼状态。这一现象表明, 为了确保系统的稳定性, 参数 D 应选取较大的数值。

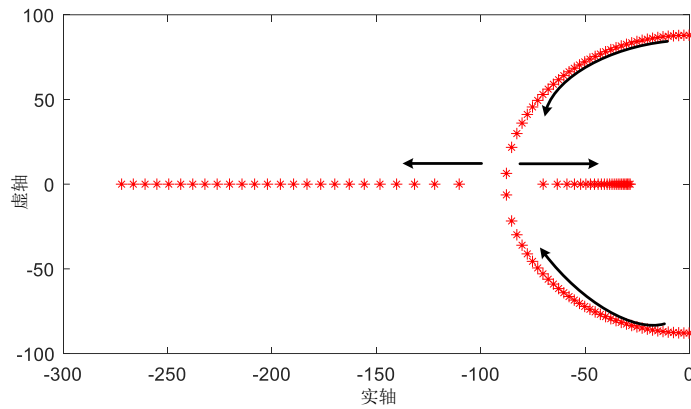
图 3-2 D 变化时有功环根轨迹

图 3-3 为 $D=10$ 、 $K_\omega=25$ 且 J 从 0.05 慢慢增大到 15 的有功环根轨迹图。由图可看出，随着 J 的不断增大，根轨迹由负实部逐渐向坐标原点移动，系统的动态性能变差，进而得知 J 的取值相对而言较小。

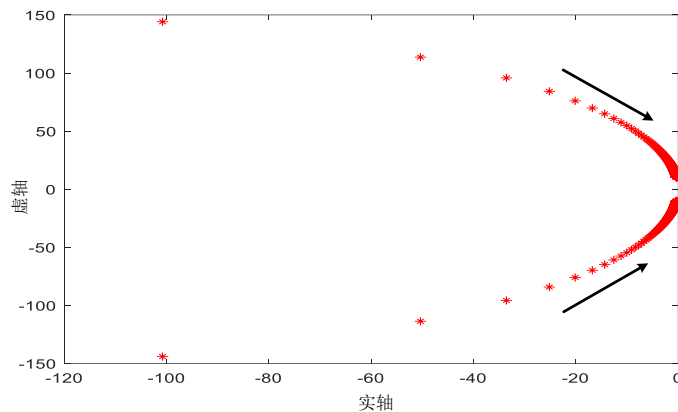
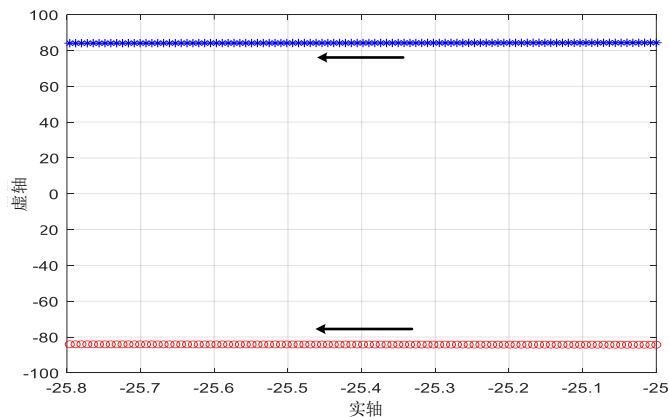
图 3-3 J 变化时有功环根轨迹

图 3-4 为 $D=10$ 、 $J=0.2$ 且 K_ω 从 0 慢慢增大到 100 的有功环根轨迹图。从图中可以看出，随着 K_ω 值的增大，系统的根轨迹从虚轴移动，沿着实轴的负方向向外延伸。这表明 K_ω 的取值应避免过小，且随着 K_ω 的增大，特征根实部的绝对值也随之增大，从而使得系统的调节时间缩短，衰减速度加快。

图 3-4 K_ω 变化时有功环根轨迹

为便于研究，通常假设调差系数 K_ω 保持不变。结合式(3.5)可知，当阻尼系数 D 恒定时，转动惯量 J 越大，阻尼比 ζ 越小，系统的超调量 $\sigma\%$ 越大，调节时间 t_s 也越长；而当转动惯量 J 恒定时，阻尼系数 D 越大，阻尼比 ζ 越大，超调量 $\sigma\%$ 越小，调节时间 t_s 越短^[44]。由此可知，虚拟同步发电机的转动惯量 J 取值直接决定了有功功率响应的振荡频率特性，而阻尼系数 D 则主导着振荡衰减过程的时间常数。

结合式(3.1)-式(3.3)可得出 VSG 小信号模型如图 3-5 所示。

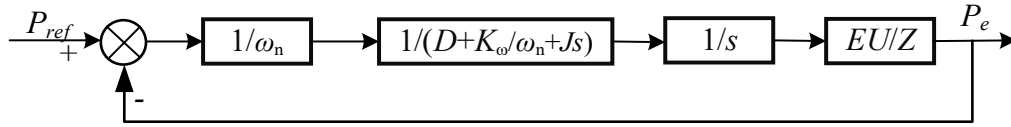
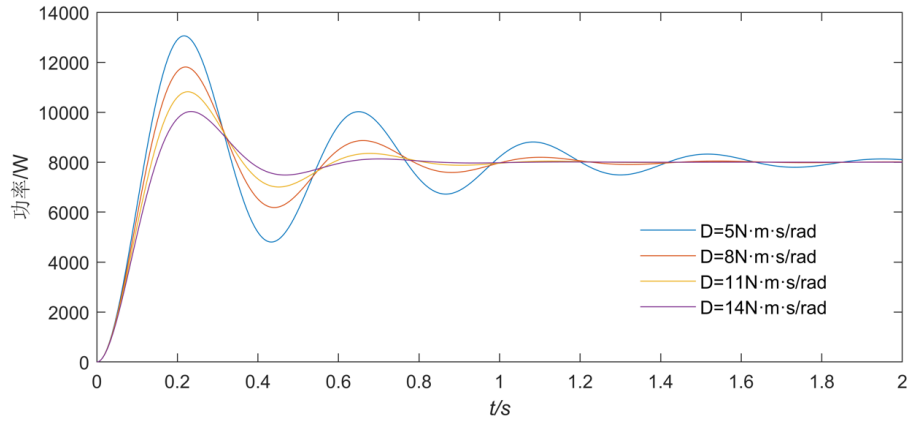
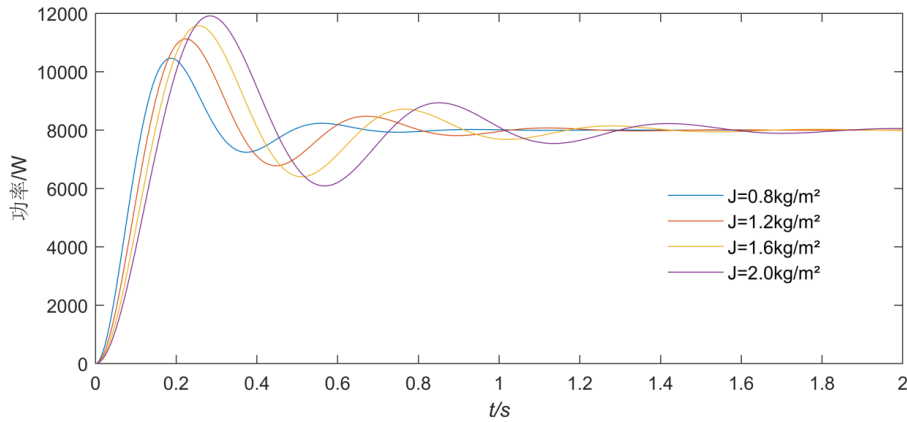


图 3-5 虚拟同步发电机的小信号模型

利用图 3-5 的 VSG 小信号模型，可得出当 VSG 功率给定值为 8kW 时，VSG 并网系统在转动惯量和阻尼系数变化时的输出功率动态响应，如图 3-6 所示。



(a) 阻尼系数变化



(b) 转动惯量变化

图 3-6 转动惯量和阻尼系数变化时系统输出功率动态响应曲线

从图 3-6 的仿真结果可以看出，当转动惯量 J 提升时，二阶系统阻尼特性会被显著削弱，从而引发超调量增加与调节时间延长的现象；反之，阻尼系数 D 的增大能够有效改善系统阻尼特性，使超调量和调节时间这两个动态响应指标同步优化。进一步分析发现，转动惯量 J 的取值直接决定系统的固有振荡频率，而阻尼系数 D 则主导着振荡衰减过程的时间常数。这种参数特性表明，固定的转动惯量与阻尼系数配置方案存在内在矛盾：提升转动惯量虽能改善频率稳定性，但会恶化动态响应速度；增强阻尼系数虽能加快暂态过程收敛，却可能引发更大的频率波动。因此，为实现系统动态调节性能与稳定性的协同优化，需建立转动惯量和阻尼系数的自适应调节机制，根据动态响应过程中的实时偏差量及变化率实施参数调整。

3.2 惯量阻尼自适应控制策略

3.2.1 参数自适应原理

日常生活中电力系统的运行状态是动态变化的，负载波动、网络拓扑变化以及故障等都会影响电力系统的稳定性。电力系统的稳定性与 VSG 参数密切相关，自适应调整能够优化转动惯量 J 和阻尼系数 D ，改善有功功率和无功功率的动态响应，降低超调量并缩短调节时间，从而提高系统稳定性。

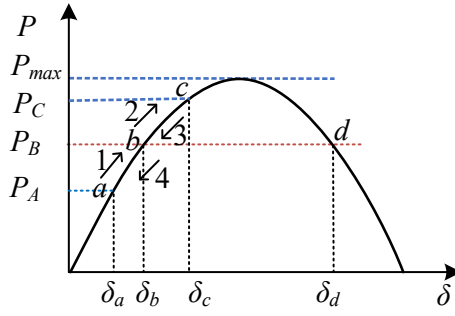
VSG 自适应控制策略旨在使参数 J 和 D 根据角频率变化率($d\omega/dt$)以及 VSG 与电网之间的角频率偏差($\Delta\omega$)进行动态调整。为了分析 J 和 D 对电力系统频率变化率和频率偏差的影响，可将式(2.9)变化为：

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n)}{J} = \frac{T_m - T_e - D\Delta\omega}{J} = \frac{\Delta T - D\Delta\omega}{J} \quad (3.6)$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta T - J \frac{d\omega}{dt}}{D} \quad (3.7)$$

$$\Delta T - D\Delta\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

根据式(3.6)，当 $\Delta T - D\Delta\omega$ 恒定时， J 越大， $|d\omega/dt|$ 越小。根据式(3.7)，当 $\Delta T - Jd\omega/dt$ 恒定时， D 越大， $|\Delta\omega|$ 则越小。根据式(3.8)， D 的变化对 $d\omega/dt$ 的影响取决于 $\Delta\omega$ 和 $d\omega/dt$ 符号。图 3-7 展示了 VSG 系统输出功率和功角($P-\delta$)特性曲线。


 图 3-7 $P-\delta$ 特性曲线

当 VSG 的有功功率设定值从 P_A 增加到 P_B 时，系统的平衡状态会从起点 a 迁移到终点 b 。在此动态过程中，系统输出功率和频率会呈现逐步衰减趋势，直至建立新的稳定运行状态。通过保持 J 和 D 不变，可构建出系统在有功功率阶跃扰动下的转子角频率振荡响应曲线，具体轨迹特征如图 3-8 所示。

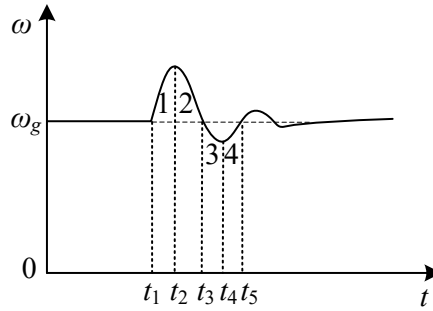


图 3-8 转子角频率振荡曲线

根据图 3-8 可将系统调节过程分为 4 个阶段(对应图 3-8 中区间 1、区间 2、区间 3、区间 4):

在区间 1, $P_A < P_B$, $d\omega/dt$ 会先急剧增加, 随后逐渐减小至零^[45], 因此可以适当增大转动惯量 J 以抑制 $d\omega/dt$ 的过快变化。然而, 文献[46]指出, 随着阻尼系数 D 的增大, 频率偏移的峰值虽然减小, 但 $d\omega/dt$ 的初始值却增大, 因此在 $d\omega/dt$ 变化的初始阶段, 应保持 D 为稳态值。在该工况区间内, $\Delta\omega$ 一直为正值, 增大 D 可显著抑制频率偏差 $\Delta\omega$ 的增长。且由于此时角速度变化率 $d\omega/dt$ 也为正, 即 $\Delta T - D\Delta\omega = Jd\omega/dt > 0$, 增大 D 将同步降低 $d\omega/dt$ 的幅值。因此在该阶段后期, 通过增大 D 的取值, 能够协同减小频率偏差 $\Delta\omega$ 与角速度变化率 $d\omega/dt$, 从而有效抑制转子角速度的过度上升, 避免系统超调量的恶化。

在区间 2, $P_C > P_B$, $|d\omega/dt|$ 呈现先上升后下降的趋势。当 $d\omega/dt$ 为负值时, ω 处于减速状态。根据 $\Delta T - D\Delta\omega = Jd\omega/dt$, 增大 D 会进一步增大 $|d\omega/dt|$ 。可通过

降低 J 削弱系统惯性，同时提升 D 增强衰减效应，从而加快 ω 向额定值 ω_n 的收敛速度。

同理可得，在区间 3, $P_C > P_B$, $d\omega/dt$ 为负, $\Delta\omega$ 为负, 且 $\Delta T - D\Delta\omega = Jd\omega/dt < 0$, 因此可以同时增大 J 和 D , 以抑制 ω 反向加速偏离额定值 ω_n 。在区间 4, $P_A < P_B$, $d\omega/dt$ 为正, $\Delta\omega$ 为负, 且 $D\Delta\omega = Jd\omega/dt > 0$, 此时可以通过减小 J 并增大 D , 加速 ω 恢复到额定值 ω_n 。

由以上分析可知，在区间 1 和区间 3, $d\omega/dt$ 与 $\Delta\omega$ 同号($\Delta\omega(d\omega/dt) > 0$), $|\Delta\omega|$ 逐渐增大, 需增大 J 和 D 以抑制频率偏移, 此时转子角频率处于加速阶段。而在区间 3 和区间 4, $d\omega/dt$ 与 $\Delta\omega$ 异号($\Delta\omega(d\omega/dt) < 0$), $|\Delta\omega|$ 逐渐减小, 需减小 J 以加速恢复角频率, 并在 $|\Delta\omega|$ 较大时增大 D , 以抑制频率偏移, 此时转子角频率处于减速阶段。通过合理调整 J 和 D , 可以有效优化系统的动态响应特性, 提升频率稳定性和抗扰能力。

根据上述分析可得出 J 和 D 的变化情况如表 3-1 所示。

表 3-1 J 和 D 的变化情况

区间 序号	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega(d\omega/dt)$	J	D	$ \Delta\omega $	$ d\omega/dt $
1	>0	>0	>0	增大	后期增大	后期减小	减小
2	>0	<0	<0	减小	增大	减小	增大
3	<0	<0	>0	增大	增大	减小	减小
4	<0	>0	<0	减小	增大	减小	增大

3.2.2 改进惯量阻尼自适应控制

传统自适应控制策略在系统受到扰动时, 动态响应速度较慢, 可能导致频率和电压的波动较大, 影响系统的稳定性。由表 3-1 可知, J 的选择需结合虚拟转子角速度的变化量及变化率, D 的选择则较为简单。如何优化 J 去优化自适应控制是一大难点, 本文重点研究 J 的选取。

因为 J 与 $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 均有关, 本文将相关量作为自变量引入传统自适应控制的公式中, 可以更清晰地反映 J 与其之间的关系。但是若 J 的幅值过大, 对正常系统运行时的系统容量要求较高。因此, 本文构建基于对数函数的转动惯量计算方法, 能够有效解决转动惯量增幅过大的问题。阻尼系数的选择则基于系统整体增大的趋势提出简单的一次函数计算方式。综上, 提出了改进的惯量阻尼自适

应控制策略，以增强 VSG 控制的自适应能力。改进的 J 和 D 自适应计算公式：

$$J = \begin{cases} J_0 + K_j \ln(1 - \Delta\omega \frac{d\omega}{dt}) & \Delta\omega(d\omega/dt) \leq 0 \cap |(d\omega/dt)| > T_j \\ J_0 & |(d\omega/dt)| \leq T_j \\ J_0 + K_j \ln(1 + \Delta\omega \frac{d\omega}{dt}) & \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \cap |(d\omega/dt)| > T_j \end{cases} \quad (3.9)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & |\Delta\omega| \leq T_d \\ D_0 + K_d |\Delta\omega| & |\Delta\omega| > T_d \end{cases} \quad (3.10)$$

式中： J 和 D 分别为转动惯量和阻尼系数； J_0 和 D_0 分别为 J 和 D 临界阻尼条件下的值； K_j 和 K_d 分别为 J 和 D 的调节系数； T_j 和 T_d 为角速度变化率和角速度变化的阈值。

由式(3.9)和式(3.10)可得，改进后的 VSG 惯量阻尼自适应控制仿真框图如图 3-9 所示。

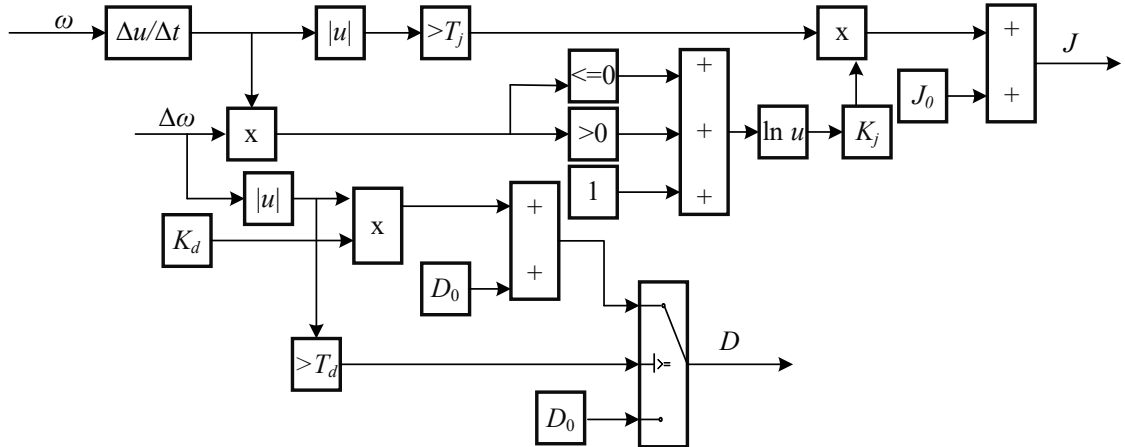


图 3-9 VSG 改进惯量阻尼自适应控制框图

3.2.3 自适应控制策略参数整定

为防止系统正常运行时细微振荡导致 J 和 D 频繁的过度反应，需要合理地设置角速度的变化阈值 T_d 和角速度变化率的阈值 T_j ，让 J 和 D 在一定阈值变化范围内反应。 T_d 和 T_j 的选值一般要大于系统正常运行的最大值，具体取值需要做大量实验进行验证。

当系统处于稳定运行状态时，角速度变化率的波动范围极小，可近似视为零，结合式(3.6)得出：

$$0 < D_0 < \Delta T / \Delta\omega \quad (3.11)$$

转动惯量 J 的参数整定参考文献[47]得出：

$$J_0 \leq \frac{P_{\max}}{\max(\omega \frac{d\omega}{dt})} \quad (3.12)$$

K_j 和 K_d 的选值参考文献[48]的鲁棒稳定区原理，结合本文提出的惯量和阻尼调节系数的范围自适应公式得出：

$$\begin{cases} K_j \leq \frac{J_{\max} - J_0}{\ln(1 + |\Delta\omega \frac{d\omega}{dt}|)_{\max}} \\ K_d \leq \frac{D_{\max} - D_0}{|\Delta\omega|_{\max}} \end{cases} \quad (3.13)$$

K_j 和 K_d 的数值若设置过低，将导致控制参数频繁波动；而若设置过高，则可能影响调节的精确度。因此，必须依据系统的实际需求来合理设定这两个参数。

3.3 仿真与分析

为验证本文提出的改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 仿真软件上构建了单台 VSG 逆变器的系统仿真模型。系统参数如表 3-2 所示。

表 3-2 系统参数

参数名称	数值	参数名称	数值
U_{dc}	750V	J_0	0.2kg/m ²
R_s	0.1Ω	D_0	10N·m·s·rad ⁻¹
L_f	5mH	T_j	2
C_f	20uF	T_d	0.1
ω_n	314rad/s	K_j	0.1
E_0	311V	K_d	10

VSG 初始的额定功率设定为 20kW，0.5s 时功率设定值下降到 10kW，在 1s 时，功率再次回升至 20kW。图 3-9 和图 3-10 展示了本文改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略与常规的 J 和 D 自适应控制策略以及固定的 J 和 D 控制策略时系统输出的有功功率和频率对比情况。

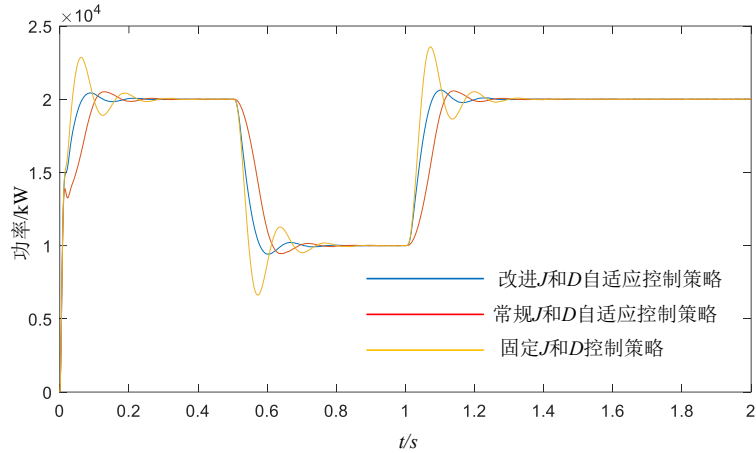


图 3-9 系统输出功率对比曲线

为了方便分析,本文只截取在 1s 时有功功率给定值从 10kW 增加到 20kW 后直到稳定这一时间段进行分析。由图 3-9 可知,当采用本文所提改进 J 和 D 自适应控制策略时,有功功率变化的峰值大约为 20.4kW,超调量为 2%,系统重新稳定需要的时间为 0.300s;采用常规 J 和 D 自适应控制策略时,有功功率变化的峰值大约为 20.5kW,超调量为 2.5%,系统重新稳定需要的时间为 0.350s;采用固定 J 和 D 控制策略时,有功功率变化的峰值大约为 23.5kW,超调量为 17.5%,系统重新稳定需要的时间为 0.377s。综上可知,采用本文所提改进 J 和 D 自适应控制策略时系统输出的有功功率超调量最小,系统调节能力最强,且波形平滑,具有很好的抗干扰能力。

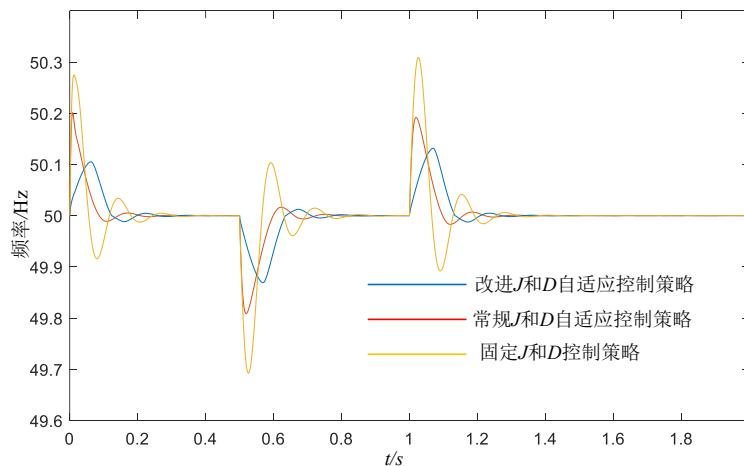


图 3-10 系统频率对比曲线

由图 3-10 可知,三种控制策略频率的变化最大幅值分别约为 50.30Hz、50.19 Hz、50.13 Hz。相较于常规 J 和 D 自适应控制策略和固定 J 和 D 控制策略,本文所提改进 J 和 D 自适应控制策略能使频率更快地达到稳态,且频率偏差量较小,抑制了频率的变化幅度。

根据表 3-1, J 的变化应遵循特定规律, 但多数自适应控制策略忽略了第二阶段, 导致有功功率突变时转动惯量仅呈现先增后减的两阶段变化。综上可知, 改进惯量阻尼自适应控制策略有效解决了这一问题, 改善了系统的控制效果。

图 3-11 和图 3-12 分别为改进 J 和 D 的自适应控制策略下转动惯量和阻尼系数的变化情况。

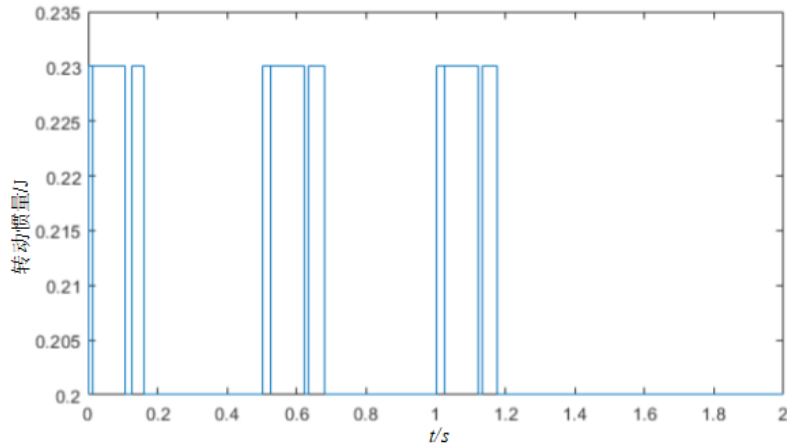


图 3-11 转动惯量自适应曲线

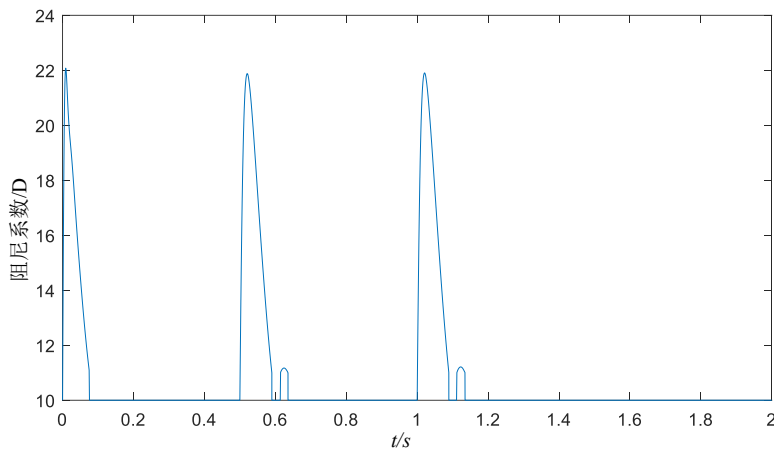


图 3-12 阻尼系数自适应曲线

根据图 3-11 和图 3-12 的观察, 当有功功率设定值突然增加时, J 和 D 也随之急剧上升, 旨在限制动态过程中有功功率和频率的超调及其变化速率, 减小振荡时的幅值变化和加快系统恢复时间。这一现象与本章对 J 和 D 自适应控制机制的分析相吻合, 证实了本文改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略的可行性。

3.4 本章小结

本章主要研究的是 VSG 并网逆变器的稳态问题, 传统的 VSG 固定参数和参数自适应控制在系统稳定性的调节能力不足, 利用有功功率控制环路进行数据分析, 结合其小信号模型, 绘制出各参数的根轨迹图和推导出各参数的对应变化原

理，进而得到转动惯量和阻尼系数与各参数取值和系统稳定性之间的关系，并得出各参数具体的变化规律，以此为由推导出改进的惯量阻尼自适应控制策略。随后，为了降低系统的稳态误差，对角速度的变化阈值、角速度变化率的阈值、转动惯量和阻尼系数临界阻尼条件下的值进行了调整和优化，增强系统的自适应能力。

第4章 VSG 逆变器并网平滑切换策略研究

分布式电源具有间歇性和波动性的特点，基于 VSG 并网平滑切换控制可以使分布式电源在不同的自然条件下，以及在电网故障、负荷变化等工况下，快速、灵活地在并网和离网模式之间切换，更好地适应复杂多变的运行环境，提高分布式电源的利用率和经济性^[49-50]。且在电网故障或计划检修等需要离网运行的情况下，传统的切换方式可能会导致供电中断，而基于 VSG 离并网平滑切换控制能够使分布式电源在离并网切换过程中持续为负载供电，避免了停电事故的发生，保障了电力供应的连续性，满足了重要负载对不间断供电的需求。

因此，为实现 VSG 逆变器离网运行模式和并网运行模式的平滑切换，本章提出了模糊 LADRC 预同步控制策略。与常规 VSG 预同步和常规 LADRC 预同步控制策略相比，本文所提策略对系统的并网转换具有良好的适应性，且能达到并网平滑切换的目的，具有明显优势。

4.1 逆变器并网/离网平滑切换

并网和离网是微网运行的两种模式，两者之间的平滑切换是确保微网稳定运行的前提。其中，并网到离网切换是指微网从与主电网连接的状态切换到独立运行状态的过程。其核心目标是确保在脱离主电网后，微电网能够自主维持频率和电压稳定，同时满足本地负载的供电需求。当发生故障检查等情况时，在脱离主电网后，VSG 通过模拟传统同步发电机的惯性和阻尼特性，能够在系统脱离主电网后为其提供频率和电压支撑，确保系统频率在脱离主电网后不会急剧下降。鉴于 VSG 可以自然实现并网到离网的平滑切换，本章主要研究离网到并网的平滑切换策略。

离网到并网的平滑切换是指微电网从独立运行状态重新连接到主电网的过程。对于容量在 500kVA 以下的系统，分布式发电系统的输出电压与电网电压的幅值偏差不得超过 10%，频率偏差不得超过 0.3Hz，相位偏差不得超过 0.3。如果在并网条件未满足的情况下强行并网，会产生较大的冲击电流，不仅会导致并网过程中频率波动加剧，还可能缩短逆变器的使用寿命^[51]。就诸多的控制方法而言，V/F 控制仅适用于离网模式，而 P/Q 控制则只能在并网模式下运行，只有 VSG 控制能同时在并/离网两种模式下自由切换。VSG 控制通过预同步控制实现

频率、相位和幅值的同步，确保并网开关两侧的电压差满足并网条件，使系统能顺利从离网模式切换到并网模式。在切换过程中，VSG 动态调整虚拟惯量和阻尼系数，抑制频率和电压波动，同时储能系统提供能量缓冲，确保功率平衡。当电压差小于设定阈值时，VSG 闭合并网开关，完成并网操作。并网后，VSG 根据主电网状态动态调节输出功率，确保系统稳定运行。这一过程通过模拟同步发电机的特性和采用先进的控制算法，能实现平滑、快速且可靠的无缝切换。

通常并离网的切换需要设计逻辑开关来动态切换对应的控制策略。如图 4-1 所示的切换控制器中，四个逻辑开关根据离网或并网的需求来切换控制策略和运行模式。若离网和并网模式均采用 VSG 控制策略，则可省略控制策略的切换步骤，即无需使用 L1 和 L2 开关，从而简化控制结构并增强系统的稳定性。因此，本文着重探讨基于 VSG 控制策略的预同步平滑切换控制策略。

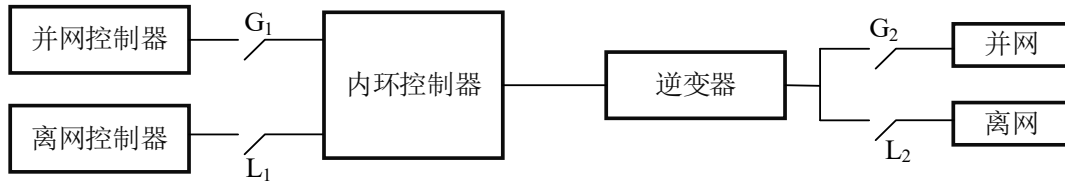


图 4-1 切换控制器结构

4.2 预同步并网技术

在虚拟同步发电机进行离并网切换过程中，应提前使 VSG 逆变器的输出电压在幅值、相位和频率等方面与电网电压相匹配，确保在并网瞬间实现平滑过渡，避免产生冲击电流和对电网的扰动，以及在离网时能快速稳定地独立运行。

4.2.1 电压偏差分析

在 VSG 逆变器连接到电网之前，其连接开关的两侧电压存在差值 Δu ，本文以三相中的 A 相进行分析。

VSG 逆变器在离网模式下的输出电压 u_a 和电网电压 u_{ga} 分别表示为：

$$\begin{cases} u_a = U_a \sin(\omega_a t + \theta_a) \\ u_{ga} = U_{ga} \sin(\omega_{ga} t + \theta_{ga}) \end{cases} \quad (4.1)$$

式中： U_a 和 U_{ga} 分别为 VSG 逆变器侧 A 相电压幅值和电网侧电压幅值； ω_a 和 ω_{ga} 分别为 VSG 逆变器角频率和电网角频率值； θ_a 和 θ_{ga} 分别为 VSG 逆变器侧 A 相电压相位和电网侧电压初始相位。

U_a 和 U_{ga} 差值 Δu 为：

$$\Delta u = u_a - u_{ga} = U_a \sin(\omega_a t + \theta_a) - U_{ga} \sin(\omega_{ga} t + \theta_{ga}) \quad (4.2)$$

由于 VSG 逆变器在离网模式下输出的电压与电网的电压幅值相差很小，大多数情况下可使 $U_a = U_{ga}$ 以方便计算。结合积化和差公式可将 Δu 化简为：

$$\Delta u = 2U_{ga} \sin\left(\frac{\omega_a - \omega_{ga}}{2}t + \frac{\theta_a - \theta_{ga}}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_a + \omega_{ga}}{2}t + \frac{\theta_a + \theta_{ga}}{2}\right) \quad (4.3)$$

由式(4.3)可知，离网模式下，VSG 逆变器的输出电压和电网电压存在的频率差与相位差可能会导致最大电压差值达到 $2U_{ga}$ ，根据欧姆定律以及电感、电容在电路中的特性，当开关闭合进行并网操作时，这个差值会驱使电流在短时间内急剧变化，从而产生幅值很大的冲击电流。

4.2.2 预同步控制策略

预同步控制策略是在并网或系统切换等操作前，提前对相关电气设备的输出电压、频率、相位等参数进行调节和控制，使其与目标电网或系统的参数相匹配，从而实现平滑、稳定过渡的一种控制方法^[52-53]。传统的方法运用锁相环或二阶广义积分器等技术获取电网电压的相关参数，同时确定 VSG 逆变器输出电压的幅值、频率、相位，将两者差作为控制信号，从而调整 VSG 逆变器的输出电压，使其与电网电压各参数进行同步以达到并网要求。下面通过如图 4-2 所示 $P-\omega$ 下垂曲线和 $Q-U$ 下垂曲线来分析频率和电压幅值预同步原理。

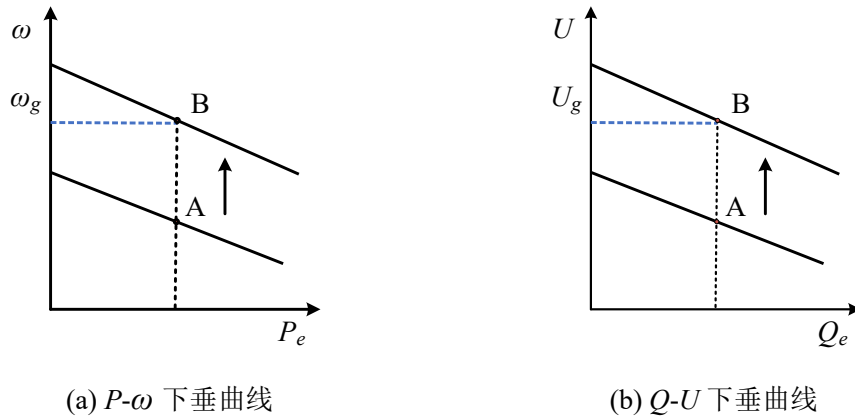


图 4-2 功率下垂曲线

图 4-2(a)为 $P-\omega$ 下垂曲线。在离网模式下，系统初始工作点为 A 点，输出功率 P_e 由负载需求决定；当从离网模式切换至并网模式时，需通过 $P-\omega$ 下垂曲线，补偿系统输出角频率 ω 与电网角频率 ω_g 之间的偏差，从而实现角频率同步。

图 4-2(b)为 $Q-U$ 下垂曲线。当运行在离网模式时，系统初始工作于 A 点，输

出无功 Q 的值由负载大小决定；当由离网模式切换至并网模式时，需要通过调节 $Q-U$ 下垂曲线，弥补系统输出电压幅值 U 和电网电压幅值 U_g 的差值，进而实现输出电压幅值的同步。

预同步控制的核心在于对电网电压 U_g 进行坐标变换。以 VSG 有功-频率输出的相位信息为基准，通过调节电网电压的 q 轴分量 U_{gq} 使其趋近于零，并利用 PI 控制器生成角频率补偿量，将该补偿量引入 VSG 功率控制环中，即可实现逆变器输出电压的相位补偿，确保其与电网电压相位同步^[54]。

4.2.3 基于电网侧虚拟功率的预同步策略

传统基于锁相环的预同步方法在电网频率或相位发生快速变化时，锁相环的跟踪速度可能达不到要求，导致同步误差增大，锁相环需要一定时间才能重新锁定，这段时间内可能会对并网设备的运行产生不利影响^[55-56]。且一般来说，系统相关线路普遍存在阻抗，使并网时出现明显的功率耦合问题，影响系统的稳态性能。为此本文提出基于电网侧虚拟功率的预同步策略，该策略只需要通过简单的公式计算与误差调节便可实现同步。图 4-3 为预同步控制策略框图，图中， U_{gabc} 为网侧三相电压， U_{abc} 为 VSG 逆变器侧三相电压。

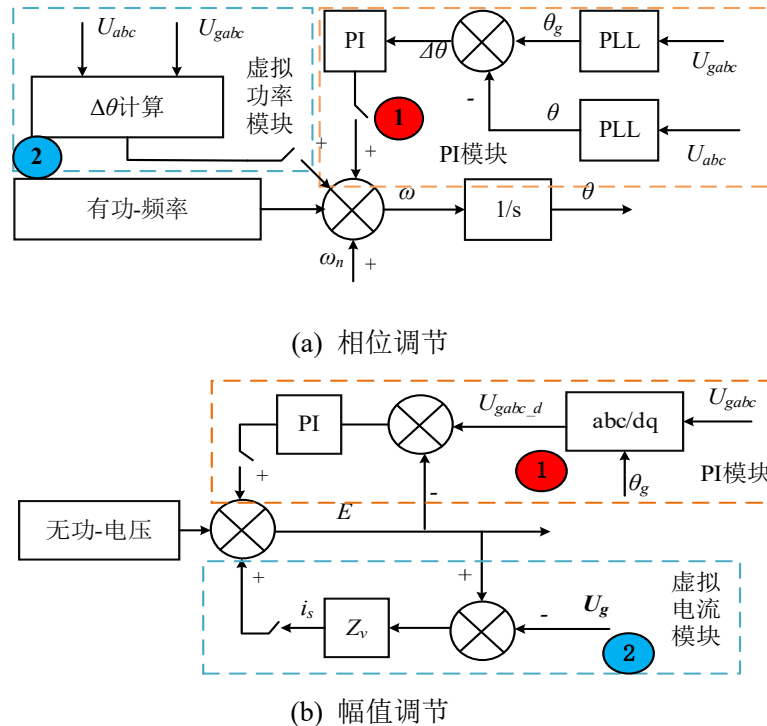


图 4-3 预同步控制策略框图

传统的预同步是在 VSG 结构上加入相位 PI 调节模块和幅值 PI 调节模块，如图 4-3 中第①部分所示。为减小并网时的不平衡阻抗，假设在 VSG 机端与电

网间存在虚拟阻抗，使线路阻抗近似呈现感性。根据文献[57]提出的 VSG 有功功率理论，可得出虚拟功率计算公式为：

$$\begin{cases} P_v = \frac{UU_g \cos(\varphi_v - \theta)}{Z_v} - \frac{U_g^2}{Z_v} \cos \varphi_v \\ Z_v = \sqrt{(\omega L_v)^2 + R_v^2} \\ \varphi_v = \arctan\left(\frac{\omega L_v}{R_v}\right) \end{cases} \quad (4.4)$$

式中： U 和 U_g 分别表示 VSG 和网侧电压的有效值； L_v 和 R_v 分别为并网虚拟电阻和虚拟电感； θ 为虚拟同步发电机的功角； Z_v 和 φ_v 分别为虚拟阻抗和虚拟阻抗角。

计算出虚拟功率后，根据文献[31]提出的新型相位补偿角的计算公式得到 $\Delta\theta$ ：

$$\Delta\theta = \arccos\left(\frac{U^2 - \frac{P_v Z_v}{3}}{UU_g}\right) \quad (4.5)$$

由式(4.4)和式(4.5)可知，当 $U = U_g$ 且 $\varphi_v = \theta = 0^\circ$ 时，虚拟功率和 $\Delta\theta$ 均为 0，此时相位达到并网条件。该方法对于阻抗的考虑更加符合实际，对实际系统的问题解决十分有意义。

虚拟电流模块通过计算 VSG 生成的感应电动势与电网电压的差值，结合虚拟阻抗生成虚拟电流 i_s ，并将其反馈至 VSG 控制单元，用于调整 VSG 逆变器的输出电压，保证其与电网电压保持同步。当并网开关两侧的电压差满足并网条件时，将差值置零并闭合 VSG 并网开关，从而实现 VSG 逆变器的平滑并网运行。

该预同步方法可以更快地调整虚拟同步发电机的输出，使其快速响应电网的变化，从而提高系统的动态响应速度。综上得出的基于电网侧虚拟功率预同步策略如图 4-3 中的第②部分所示。

4.3 模糊 LADRC 预同步控制策略

4.3.1 LADRC 的基本结构

二阶线性自抗扰控制器由线性扩展状态观测器(Linear Extended State Observe, LESO)和线性状态误差反馈(Linear Error Feedback, LSEF)组成，无需处

理过渡过程的跟踪微分器(Tracking-Differentiator, TD)环节, 且 LESO 可以把总扰动看作是被观测系统的可变状态之一^[58]。二阶 LADRC 结构如图 4-4 所示。

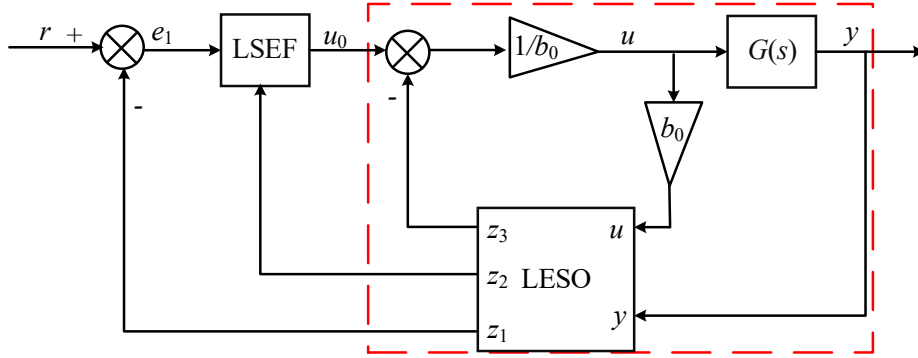


图 4-4 二阶 LADRC 结构框图

设 f 表示系统的总扰动函数, 则被控对象表示为:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + b_0 u \quad (4.6)$$

令 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f, h = \dot{f}$, 则扩展状态空间方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ h \end{bmatrix} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4.7)$$

由于 $\dot{f}$ 是系统校正项估计出来的, 在设计状态观测器时可以把其消去。假设存在一个矩阵 $L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$, 使 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2, z_3 \rightarrow x_3$, 则 LESO 模型可表示为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \\ b_0 & \beta_2 \\ 0 & \beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\ \hat{y} = z \end{cases} \quad (4.8)$$

加入估计变量 z_3 后可知:

$$u = (u_0 - z_3) / b_0 \quad (4.9)$$

系统稳态时, $z_3 = f$, 则 $\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + b_0(u_0 - z_3) / b_0 = u_0$, 系统可简化为双积分器串联型系统。

根据状态估计, LSEF 的构成原理可表示为:

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2 \quad (4.10)$$

式中： k_p 和 k_d 为系统的增益，都是未知参数。

由文献[59]可知 LSEF 的参数 k_p 、 k_d 一般设计为：

$$k_p = \omega_c^2, \quad k_d = 2\xi\omega_c \quad (4.11)$$

式中： ω_c 为固有频率； ξ 为阻尼比。

由式(4.7)和式(4.8)可知估计误差为：

$$\dot{x} - \dot{z} = (A - L)(x - z) \quad (4.12)$$

式中： A 为式(4.7)中矩阵 $[x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ 的系数矩阵。

根据现代控制理论可知，系统若稳定，则 $(A-L)$ 的特征值小于等于 0。利用线性代数的特征值计算原理可得：

$$|\lambda I - (A - L)| = \lambda^3 + \beta_1\lambda^2 + \beta_2\lambda + \beta_3 = (\lambda + \omega_0)^3 \quad (4.13)$$

式中： ω_0 为 LESO 的带宽， $\beta_1 = 3\omega_0$ ， $\beta_2 = 3\omega_0^2$ ， $\beta_3 = \omega_0^3$ 。

4.3.2 基于 VSG 的模糊 LADRC 预同步控制策略

根据二阶 LADRC 的特性，本文提出一种将 LADRC 与 VSG 有功-频率相结合的模糊 LADRC 预同步控制策略。将控制对象替换成 VSG，VSG 系统频率作为 LADRC 的输入反馈，增强整个系统的抗干扰能力和反应速率。

通常 VSG 产生的功率都存在一定的谐波分量，其值都需要经一阶滤波器处理得到 P_{e_new} ：

$$P_{e_new} = P_e \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4.14)$$

式中： P_e 代表计算模块所得到的瞬时功率； τ 为一阶滤波器的时间常数。

结合图 2-2 有功环的控制框图，将 P_e 用 P_{e_new} 替代。得出 VSG 输出角频率与有功给定值、额定功率和输出功率的闭环传递函数关系为：

$$\omega = G_{ref} \cdot P_{ref} + G_e \cdot P_e + \omega_n \quad (4.15)$$

式中，

$$\begin{cases} G_{ref} = \frac{1}{J\omega_n s + (D + k_\omega)\omega_n} \\ G_e = \frac{1}{[J\omega_n s + (D + k_\omega)\omega_n](\tau s + 1)} \end{cases} \quad (4.16)$$

对式(4.15)进行拉普拉斯逆变换^[60]，并进行整理可得：

$$\begin{aligned} \frac{d^2\omega}{dt^2} = & \frac{[J\omega_n + (D+k_\omega)\omega_n\tau]}{J\omega_n\tau} \frac{d\omega}{dt} + \\ & \frac{P_{ref} - P_e}{J\omega_n\tau} - \frac{D+k_\omega}{J\tau} \omega + \frac{D+k_\omega}{J\tau} \omega_n \end{aligned} \quad (4.17)$$

结合式(4.6)可知, $b_0 = \frac{D+k_\omega}{J\tau}$; $u = \omega_n$ 。

由式(4.17)可知, 角频率给定值 ω_n 会影响系统的稳定, LADRC 控制器能同步 VSG 输出的反馈值 ω , 对输入到系统的频率值进行实时调节, 使系统能有更好的控制效果, 减少预同步需要的时间。结合 VSG 预同步控制策略可得出有功环的 LADRC 控制结构如图 4-5 所示。

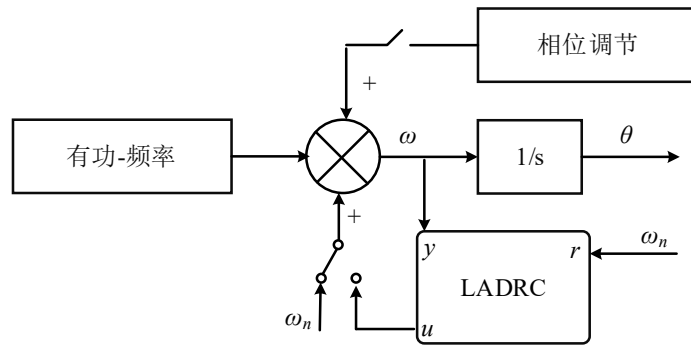


图 4-5 有功环的 LADRC 控制结构

同时, 为加强 LADRC 的控制性能, 本文采取模糊算法对 LADRC 中 LSEF 的参数进行实时整定。由前文分析可知, LSEF 误差估计性能主要受 k_p 和 k_d (以下简称“PD 控制器”) 影响, k_p 越大, 会减少误差, 但是会降低快速性; k_d 越大, 增加快速性, 但是过大会产生振荡^[61], 所以 PD 控制器的参数优化十分重要。本文将角频率偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入变量, 经过模糊控制器得到参数修正值 Δk_p 和 Δk_d , 实现在线自适应调整 PD 控制器的目的, 提高 PD 控制器控制效果和抗干扰能力。本文先选一组最优的 k_p^* 和 k_d^* 值, 分别与修正值 Δk_p 和 Δk_d 求和后得到 k_p 和 k_d 。

$$\begin{cases} k_p = k_p^* + \Delta k_p \\ k_d = k_d^* + \Delta k_d \end{cases} \quad (4.18)$$

模糊 LADRC 控制框图如图 4-6 所示。

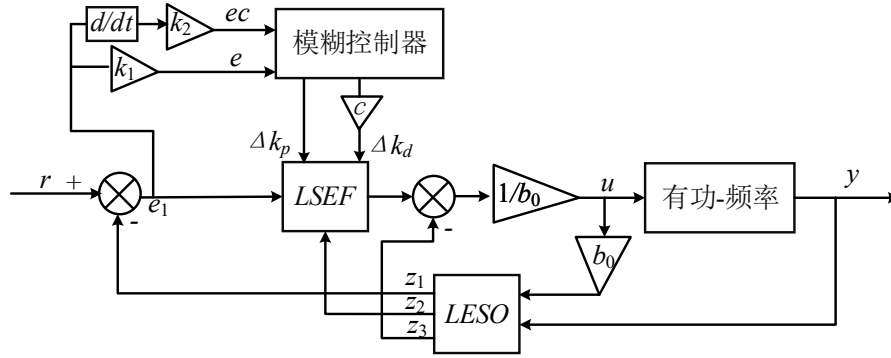


图 4-6 模糊 LADRC 控制框图

模糊控制器中 e 、 ec 、 Δk_p 、 Δk_d 均为模糊变量，其中， e 、 ec 为输入量， Δk_p 、 Δk_d 为输出量， k_1 、 k_2 为输入调节因子， c 为输出调节因子。 e 和 ec 的基本论域为 $[-1,1]$ ，若 e 和 ec 的变化范围未达到控制器的最优状态，可调节 k_1 、 k_2 的值使控制器能高效运行。 Δk_p 、 Δk_d 的模糊子集论域分别为 $[-0.3 \ 0.3]$ 和 $[-0.05 \ 0.05]$ 。在模糊论域上设定 7 个模糊子集，分别为 {负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}^[62]。模糊控制器输入变量中隶属度函数为 {负大(NB)，正大(PB)} 的用平滑的高斯型函数，其余用灵敏度高的三角形函数，输出变量隶属度函数均为三角形函数。

根据 LADRC 设计经验和反复实验， Δk_p 、 Δk_d 的模糊规则设计如表 4-1 所示 (斜线左边为 Δk_p 的模糊规则，斜线右边为 Δk_d 的模糊规则)。

表 4-1 模糊规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/PB	PB/PB	PB/PB	PB/NB	PS/NB	ZO/NM	NS/NS
NM	PB/PB	PB/PB	PM/PM	PM/NM	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM
NS	PB/PB	PM/PM	PM/PM	PS/NS	NS/PM	NM/PB	NB/PB
ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO	ZO/ZO
PS	NB/PM	NM/PB	NS/PM	PS/NS	PM/PM	PM/PM	PB/PB
PM	NM/PM	NS/PS	ZO/ZO	PM/NM	PB/PM	PB/PB	PB/PB
PB	NS/NS	ZO/NM	PS/NB	PB/NB	PB/PB	PB/PB	PB/PB

综上可得模糊 LADRC 预同步控制策略的整体框图如图 4-7 所示。

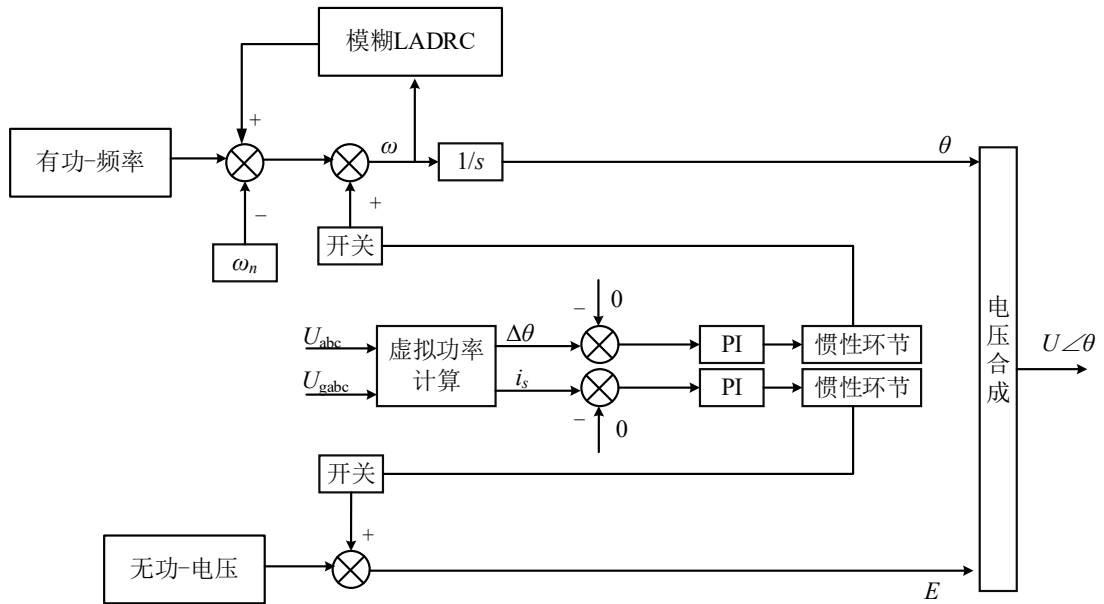


图 4-7 模糊 LADRC 预同步控制策略框图

PCC 点的合闸标准本文设置为 $|\Delta u|=6\text{V}$ 、 $|\Delta f|=0.1\text{Hz}$ 、 $|\Delta\theta|=5^\circ$ ，远低于国家的标准要求。

4.4 仿真分析

为了验证模糊 LADRC 预同步控制策略的可行性，本文采用第 2 章研究的光储 VSG 逆变器并网控制方法，在 MATLAB/Simulink 仿真软件上搭建光储 VSG 预同步仿真模型进行仿真研究。系统参数如表 4-2 所示。

表 4-2 系统参数

参数名称	数值	参数名称	数值
直流母线参考电压	1500V	逆变器负荷	40kW
蓄电池输出功率	30kW	网侧负荷	40kW
惯性系数	0.0031	有功参考值	80 kW
虚拟惯量/kg*m ²	0.5	滤波电感	5mH
虚拟阻尼/N*m*s*rad ⁻¹	20	滤波电容	0.2μF
额定频率	50Hz	开关频率	20kHz

4.4.1 系统抗干扰性能研究

设定光伏阵列的光照强度在 0.2s 时从 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 降到 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，0.8s 时再升到 $1200\text{W}/\text{m}^2$ ；0.2s 时打开预同步模块开关，1s 时下达关闭并网指令。VSG 逆变器输出功率 P_e 、PV 输出功率 P_{PV} 、蓄电池功率 P_{SB} 以及超级电容功率 P_{SC} 变化曲线和直流母线电压变化曲线分别如图 4-8、图 4-9 所示。

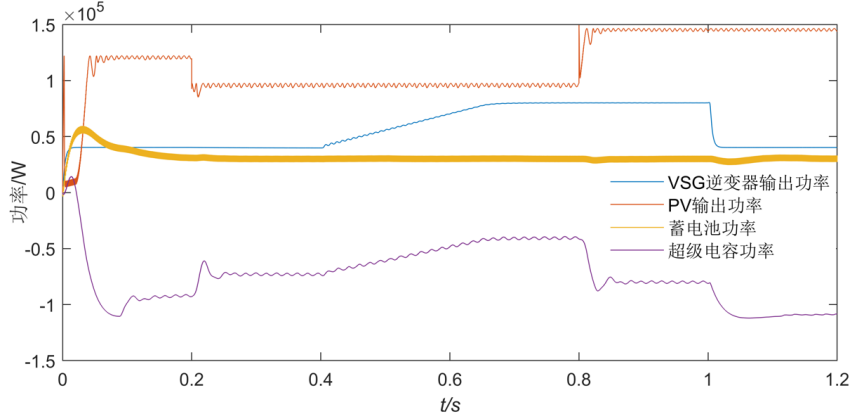


图 4-8 VSG 逆变器输出功率、PV 输出功率、蓄电池功率以及超级电容功率变化曲线

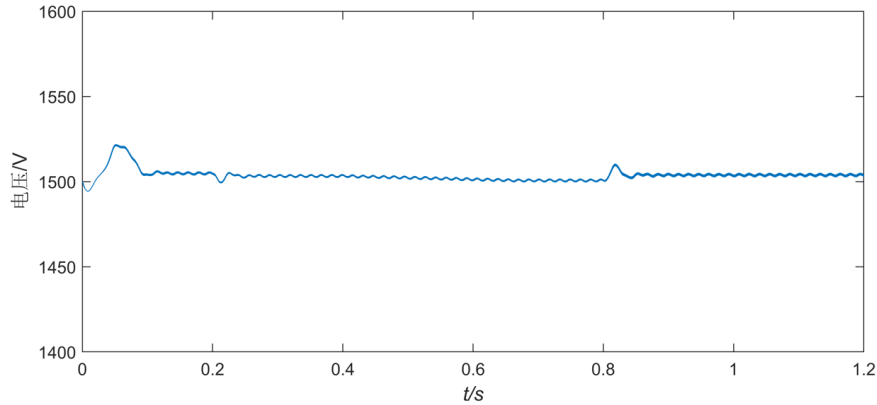


图 4-9 直流母线电压变化曲线

由图 4-8、图 4-9 可知，光伏发电系统光照强度发生波动和 VSG 逆变器输出功率发生变化时，系统能量的变化始终符合 $P_{PV} + P_{SB} + P_{SC} = P_e$ 。在系统光照强度变化时，通过混合储能系统的灵活调节，可以有效地维持电网母线电压在合适的范围内波动。这种调节使得电网在面临外部干扰时产生的波动降至最低，并且在恢复稳定状态时耗时极短。因此，本文所提策略不仅有助于提高电网的稳定性和可靠性，确保电力系统正常运行，同时也彰显了策略设计的优越性。

4.4.2 预同步控制性能仿真研究

打开预同步开关后，网侧电压和 VSG 逆变器输出电压的幅值、相位及频率误差随着时间不断减小，直至达到系统并网要求。预同步电压波形和电网两端电压差值分别如图 4-10、图 4-11 所示。

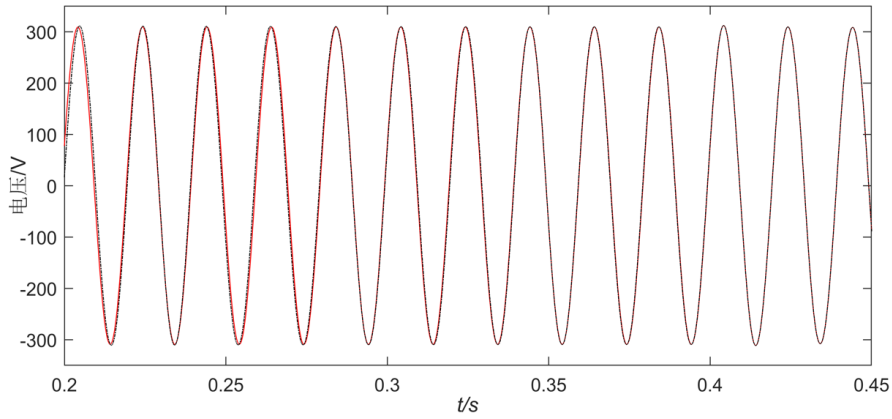


图 4-10 预同步电压波形

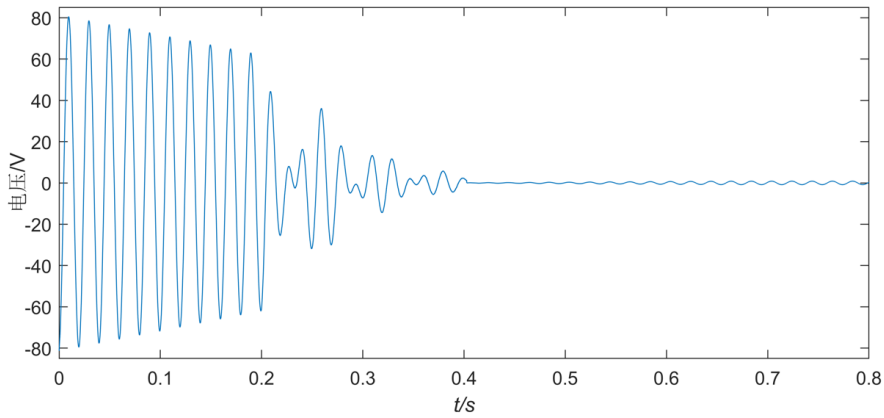
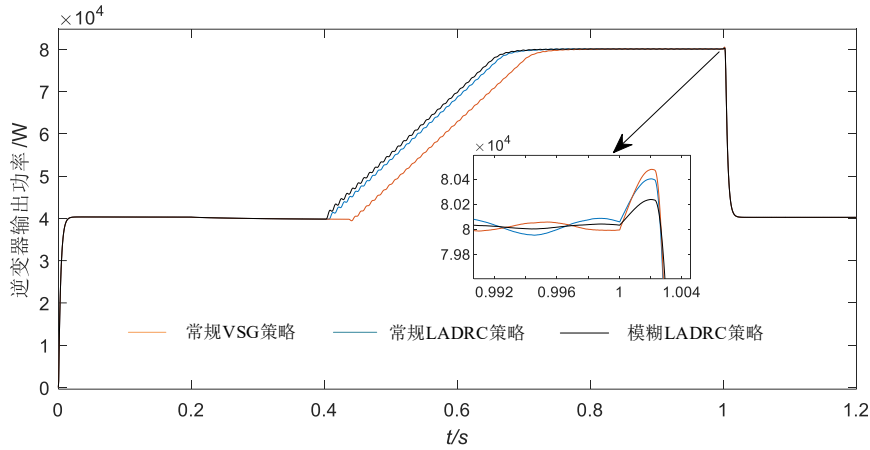


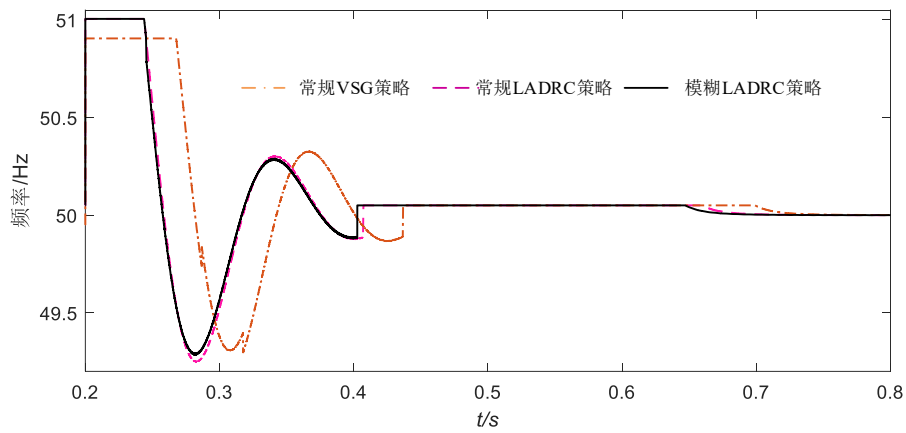
图 4-11 电网两端电压差值

由图 4-10、图 4-11 可知，在 0.2s 时采用本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略后，系统响应迅速，电网两端的电压差快速地缩小，VSG 逆变器输出的电压相位和幅值能快速跟踪上电网电压相位和幅值，0.403s 时系统达到并网条件。此时并网开关两侧电压幅值和相位基本相同，系统从离网状态成功切换到并网状态，且并网后系统并未再出现波动，具有很好的稳定性。

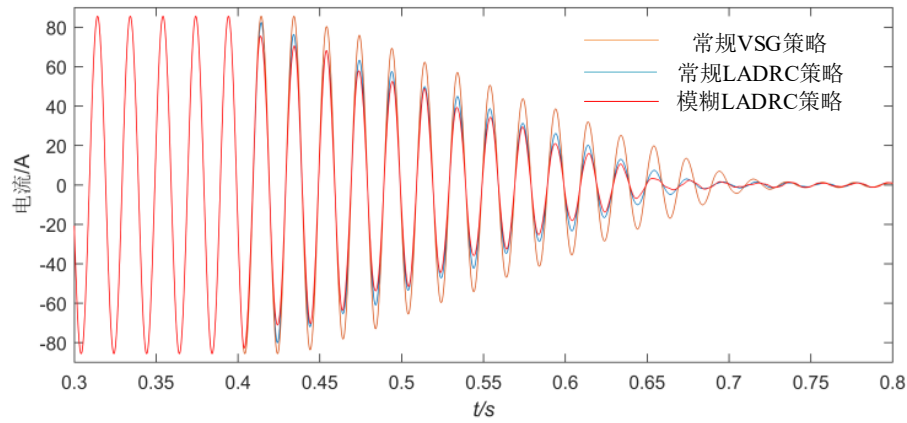
为体现本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略(简称“模糊 LADRC 策略”)的优越性，本文将其与常规 VSG 预同步控制策略(简称“常规 VSG 策略”)以及常规 LADRC 预同步控制策略(简称“常规 LADRC 策略”)进行了仿真对比，如图 4-12 所示。



(a) 逆变器输出功率波形



(b) 并网阶段频率波形



(c) 并网冲击电流波形

图 4-12 常规 VSG、常规 LADRC 和模糊 LADRC 三种预同步控制策略仿真波形对比

由图 4-12 可知本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略在输出功率和频率方面能够更快达到系统设定值,从而显著加速了预同步过程,使得并网过程更加迅速。在 0.4s 时,系统由离网转换成并网状态时,恢复速度快且频率波动小,并网电流能急速地降为 0。在 1s 时,系统从并网状态切换到离网状态,本文所提策略的功率振荡最小,对系统的并离网的平滑切换具有良好的适应性。根据表 4-2 的

系统仿真参数可以得出，VSG 逆变器在并网时能为电网侧提供负载功率，网侧电流因此会减小，图 4-12(c)的电流波形符合这一特性。此外，采用本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略控制的 VSG 输出的频率波动较小，基本保持了系统的无差调节，增强了系统的稳定性。

为了更加明显地比较三种控制策略的输出特性，本文给出了并网时采用三种控制策略时并网时间、频率振荡最大范围、并网时电流平均峰值、离网功率波动峰值对比，如表 4-3 所示。

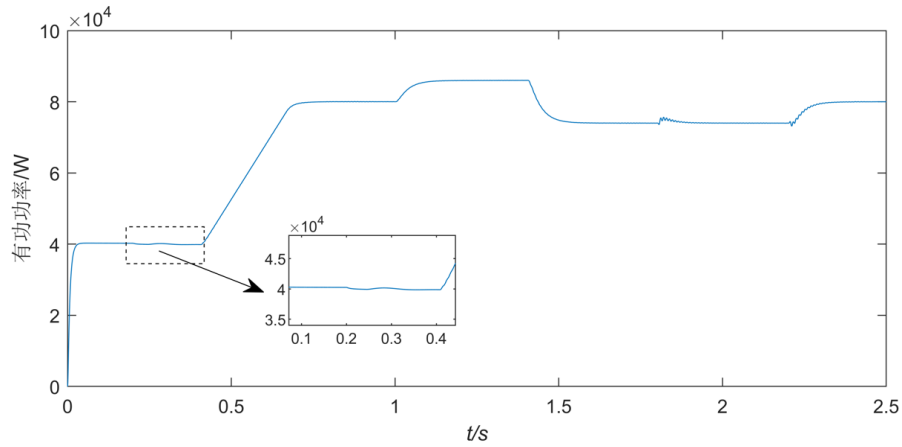
表 4-3 采用三种控制策略时相关特性对比

特性名称	常规 VSG 策略	常规 LADRC 策略	模糊 LADRC 策略
并网时间/t	0.437	0.407	0.403
频率振荡最大范围/Hz	1.029	1.0415	0.9958
并网时电流平均峰值/A	56.9425	44.9381	39.2134
离网功率波动峰值/W	80478.5	80402.7	80237.7

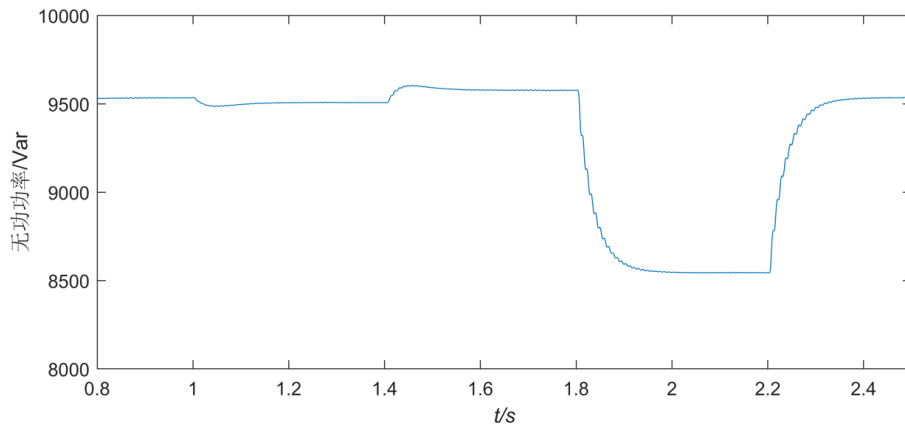
由表 4-3 可知，相较于其他两种控制策略，本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略在并网时产生的冲击电流最小，并网期间电流的平均峰值分别只有常规 VSG 预同步控制策略的 68.4%和常规 LADRC 预同步控制策略的 86.7%，有助于提高系统的稳定性并保护电力元器件。综上，可以看出模糊 LADRC 预同步控制策略相较于常规 VSG 预同步控制策略和常规 LADRC 预同步控制策略，对有功环的调节有更强的自适应能力，且具有跟踪速度快、调节能力强等特点。

4.4.3 并网运行性能仿真

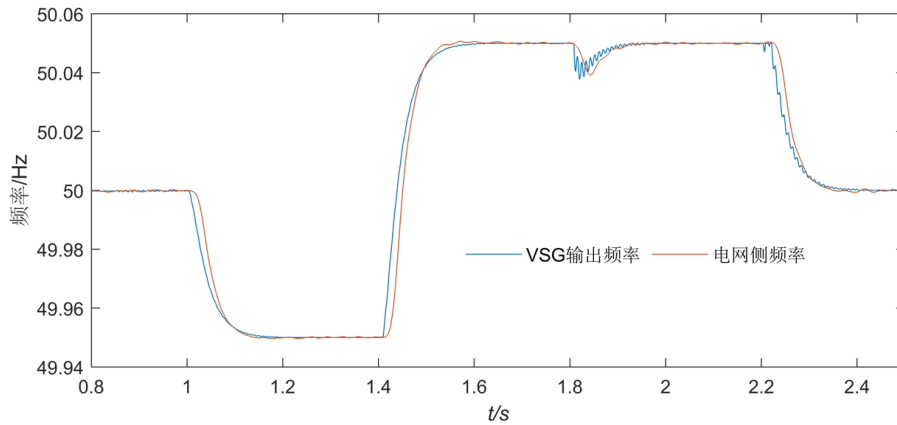
设置无功指令值为 10kVar，当系统并网运行时，让系统在 1s 时电网频率下降到 49.95Hz，1.4s 时电网频率上升到 50.05Hz，1.8s 时电网电压上升 5V，2.2s 时电网电压和频率恢复正常。系统并网运行仿真波形如图 4-13 所示。



(a) 系统有功功率波形



(b) 系统无功功率波形



(c) 系统频率波形

图 4-13 系统并网运行仿真波形

由图 4-13 可知，在并网状态下，模糊 LADRC 预同步控制策略对电网频率和电压的变化有很强的适应性。系统刚开始运行时，有功功率和无功功率能快速且精准地达到设定值，说明系统有很好的调节能力，0.2s 开始预同步，在 0.3s 时系统完成了有功功率和无功功率补偿。在 1s 和 1.4s 电网频率发生变化时，无功功率变化幅度较小，VSG 逆变器的功率控制部分会自动调节逆变器输出的有功

功率和频率，使 VSG 逆变器的频率实时追踪电网频率，减小两者误差，达到系统稳定的效果。当电网电压波动时，本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略会调节 VSG 逆变器输出的无功功率，以提供电网所需的无功补偿，虽然有功功率和无功功率会短暂出现波动，但会快速地恢复正常，确保电网稳定运行。综上可知，本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略会根据电网的变化来调整其功率，面对一定程度的波动可快速响应从而维持系统的稳定，从而实现并离网的平滑切换。

4.4 本章小结

本章提出了基于 VSG 的模糊 LADRC 的预同步控制策略，该策略可以消除系统运行过程中阻抗对预同步的影响，减少了系统并网时对锁相环的使用和并离网过程中的冲击电流，增加系统的反应速度和稳定性。首先，基于逆变器并离网的实现基本原理，提出了基于电网侧虚拟功率的预同步策略，介绍了虚拟功率和虚拟电流的计算方法和其如何分别对逆变器输出电压相位及幅值进行调节，实现 VSG 逆变器电压和电网电压的同步。然后，为优化预同步的过程，通过对生成角频率的有功环进行小信号模型分析，得出 LADRC 对 VSG 产生的频率可实时调节，减小频率的误差。最后，为加强系统的响应速度、精度和控制性能，用模糊控制算法对 LADRC 中 LSEF 的参数进行实时整定，优化对外输出，通过对比仿真实验验证了模糊 LADRC 的预同步控制策略实现 VSG 逆变器并离网平滑切换的可行性和第 2 章所提混合储能控制的正确性。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

本文主要研究了基于 VSG 的光储微网逆变器并离网平滑切换控制策略。首先,对 VSG 控制原理和其中的转动惯量和阻尼系数进行分析和总结,进而提出了 VSG 惯量阻尼自适应控制策略;然后,针对 VSG 逆变器在并离网切换过程中会产生较大冲击和延时问题,提出了模糊 LADRC 预同步控制策略。主要研究内容如下:

(1)介绍了本文所研究的光储微网系统总体结构,对 VSG 控制原理和方法进行了阐述,构建了电压电流双闭环控制结构。随后建立了光伏电池数学模型,针对传统电导增量法的不足,提出了改进变步长电导增量法,仿真实验验证了该策略有效增强了系统的稳定性和响应速度。最后建立了混合储能单元的数学模型,并对混合储能的控制策略和运行方式进行了分析。

(2)利用对有功功率环节的参数分析研究了 J 、 D 和 K_o 与系统稳定性关系。首先,根据各个参数独立变化时的根轨迹图,分析各参数的取值情况。其次,结合 J 和 D 对系统频率变化率和频率偏差的影响,提出了改进的惯量阻尼自适应控制策略,为了保证系统的稳定性,对控制策略中的主要参数进行了整定。最后,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件,对比分析了本文改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略和与常规的 J 和 D 自适应控制策略以及固定的 J 和 D 控制策略的输出有功功率和频率特性。仿真结果表明,本文提出的改进惯量阻尼自适应控制策略在动态性能和稳定性方面显著优于其他控制策略。

(3)针对 VSG 逆变器并网与离网模式之间切换时存在频率和电压波动、功率不平衡、不同步以及稳定性下降等问题,本文提出了一种模糊 LADRC 预同步控制策略。首先,为了消除系统运行过程中阻抗对预同步的影响,提出了基于电网侧虚拟功率的预同步策略,减少了系统并网时对锁相环的使用。然后,通过对有功控制环和 LADRC 控制原理的分析,得出二阶 LADRC 可以增加 VSG 系统的鲁棒性。最后,利用模糊控制算法对 LADRC 主要参数进行整定,增强系统的自我调节能力。仿真结果表明,本文所提策略可以平滑地进行并网和离网的互相

切换，降低了离网到并网切换过程中的冲击电流和加快了系统预同步的过程。

5.2 展望

虽然本文对基于 VSG 的光储微网逆变器并离网平滑切换控制策略进行了相关研究，取得了一些成果，但因个人能力和精力有限，该课题仍存在诸多不足，主要有：

（1）本文所提的光储微网系统较为单一，现实中的诸多新能源都会接入电网，如何采用先进的控制策略协调各个发电单元和储能单元的工作是接下来的研究重点。

（2）本文只是对单个 VSG 逆变器进行研究，多机并联的诸多问题并未考虑，如何在多个 VSG 逆变器同时工作时进行并离网的平滑切换是接下来的主要研究方向。

（3）本文所提改进 VSG 惯量阻尼自适应控制策略，只是进行了纯控制理论方面的研究，现实生活中滤波电感和电容的取值也影响到 VSG 输出特性，后续还应该对相应的参数选择进行更为深入的研究。

（4）本文所提模糊 LADRC 预同步控制策略比较单一，在实际电力系统中，电网条件复杂多变(如弱电网、孤岛电网、故障电网等)，未来研究可以探索切换过程中电网故障的快速检测与容错控制等问题。

（5）本文所有的理论研究需要与实际应用相结合，但因实验室条件限制，目前只在仿真软件上进行了相关验证，未制作 VSG 逆变器样机以验证本文所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 冯义华. 孔繁钢: 新能源将趋向“主体能源”转变[J]. 农电管理, 2023, (12):48-49.
- [2] 李一帆. 构建新型电力系统背景下人力资源管理思考[J]. 中国电力教育, 2022, (04): 21-22.
- [3] Han H, Hou X, Yang J, et al. Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(1): 200-215.
- [4] M Chen, D Zhou, F Blaabjerg. Modelling, Implementation, and Assessment of Virtual Synchronous Generator in Power Systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020(3): 399-411.
- [5] 曾岭瑞, 刘毅力, 崔关奇. 基于虚拟电抗的微电网改进下垂控制策略[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(10): 69-76.
- [6] 赵冠皓, 肖烈禧, 周辉. 基于下垂控制的直流微电网群大信号稳定性分析[J]. 电气应用, 2022, 41(12): 1-8.
- [7] 汪怡秀, 王辉, 郝玢鑫, 等. 基于VSG的电网电压不平衡下并网逆变器控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(05): 696-702.
- [8] 王薛茹. 基于参数自适应的分布式光伏发电系统VSG控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [9] 喻宙, 苏白娜, 徐世周. 逆变器VSG小信号建模与参数设计[J]. 电气传动, 2020, 50(08): 79-86.
- [10] 陈昊, 杨旭红, 张云飞, 等. 基于模糊控制的虚拟阻抗VSG功率解耦策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 135-141.
- [11] 杨万里, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向频率稳定性提升的VSG暂态稳定性增强方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(01): 52-66.
- [12] 段炳臣, 楚鹏冲. 基于VSG的光伏并网准Z源逆变器控制[J]. 自动化应用, 2023, 64(02): 153-157.
- [13] 李彦哲, 郭旭, 董海鹰, 等. 独立微网中自适应转动惯量的VSG控制策略[J].

- 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 144-150.
- [14] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于RBF的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(09): 132-139.
- [15] 李劲松, 许新雨, 李国锋, 等. 基于自适应电流补偿的VSG增强功率解耦控制策略研究[J/OL]. 电机与控制学报, 1-15[2025-03-04].
- [16] 张礼杰, 许峰, 朱庭耀, 等. 基于模糊自适应的并网逆变器优化控制[J]. 电子设计工程, 2024, 32(18): 71-76+81.
- [17] 赵南南, 乔鹏博, 周鹏飞, 等. 基于改进灰狼算法的VSG参数自适应控制策略[J]. 电力科学与工程, 2024, 40(09): 33-43.
- [18] 王印松, 金涛, 翁疆. 改进转动惯量自适应控制的虚拟同步发电机[J/OL]. 中国测试, 1-6[2025-03-04].
- [19] 王立娜, 王逸超, 谭丽平, 等. 基于自适应指数函数的变参数VSG控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(03): 124-131.
- [20] Karimi A, Khayat Y, Naderi M, et al. Inertia Response Improvement in AC Microgrids: A Fuzzy-Based Virtual Synchronous Generator Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4321-4331.
- [21] Du W, Fu Q, Wang H F. Power System Small-Signal Angular Stability Affected by Virtual Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3209-3219.
- [22] Shi K, Song W, Ge H, et al. Transient Analysis of Microgrids With Parallel Synchronous Generators and Virtual Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 95-105.
- [23] M. Jingkun, Y. Kaiqi, C. Ziliang and Z. Mingchao, Research on Seamless Switching Method between Grid and Island, 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian, China, 2021, pp. 118-121.
- [24] 王秀云, 刘国钦, 梁晓龙, 等. 基于改进虚拟同步发电机的预同步并网控制研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(01): 92-98.
- [25] D. Dong, B. Wen, D. Boroyevich, P. Mattavelli and Y. Xue, Analysis of Phase-Locked Loop Low-Frequency Stability in Three-Phase Grid-Connected Power

- Converters Considering Impedance Interactions, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 310-321, Jan. 2015.
- [26] 吴丹丹, 葛强, 徐金, 等. 基于虚拟功率的VSG并网控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(04): 458-463.
- [27] 沈志雨, 董哲, 李佼洁. 基于VSG的无PLL光储并网预同步控制策略[J]. 电工技术, 2022, (08): 46-49+158.
- [28] 高永军, 孙向东, 周兆吉. 基于虚拟阻抗功率的无锁相环并网预同步控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(04): 99-102.
- [29] 李旭枫, 陆立民, 成乐祥, 等. 基于自适应虚拟阻抗改进无功环路的虚拟同步功率解耦控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3752-3760.
- [30] 戚军, 李袁超, 童辉, 等. 基于动态虚拟电流前馈的预同步VSG功率二阶解耦策略[J]. 电网技术, 2020, 44(09): 3556-3565.
- [31] J. Wang, N. Ramli and N. H. A. Aziz, Pre Synchronization Control Strategy of Virtual Synchronous Generator (VSG) in Micro-Grid, in IEEE Access, vol. 11, pp. 139004-139016, 2023
- [32] 邢鹏翔, 贾璇悦, 许长清, 等. 基于功率匹配和自适应惯性的VSG预同步控制方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(03): 69-75.
- [33] 朱腾飞. 基于自适应虚拟电机的风光储微电网控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [34] K. Günther and C. Sourkounis, Investigation of Virtual Synchronous Machine Control for the Grid-Side Converter of Wind Turbines with Permanently Excited Synchronous Generator, IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 2395-2401.
- [35] 杨睿祺. 基于VSG的并网逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [36] 王晓雷, 朱五军. 一种光伏电池工程数学模型修正方法的研究[J]. 自动化应用, 2016, (5): 77-79, 84.
- [37] 李文志, 马承芳, 罗威, 等. 基于光伏并网系统的变步长最大功率追踪研究[J]. 电气应用, 2023, 42(5): 1-8

- [38] 郭航辰. 基于电导增量法的光伏MPPT控制策略研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- [39] 周建萍, 朱建萍. 自适应变步长电导增量法的最大功率点跟踪控制[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(3): 235-239.
- [40] 贺兴民. 光伏发电最大功率点跟踪及储能协调控制策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- [41] 李匡成, 季亚昆, 刘政. 蓄电池模型研究综述[J]. 电源技术, 2017, 41(03): 505-507.
- [42] R. R. Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, et al. Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications," in IEEE Access, vol. 11, pp. 105761-105809, 2023.
- [43] 吴舟, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 计及储能动态的VSG惯量阻尼自适应控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 83-91.
- [44] 张晓辉, 党媛, 党存禄. 基于参数协同自适应的VSG控制策略研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(10): 1-5+10.
- [45] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 72-77.
- [46] MIGUEL A, TORRES L, LOPES L A C, et al. Self tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [47] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125- 131.
- [48] 吴鸣, 吕志鹏, 秦岭, 等. 变电网运行条件下虚拟同步发电机鲁棒控制参数设计[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3743-3753.
- [49] 卢栩舜, 朱金荣, 王磊. 基于虚拟同步发电机的并离网控制策略优化[J]. 电子设计工程, 2023, 31(13): 156-162.
- [50] C. Zhang, J. Zhang and C. Wang, Research on Seamless Switching Between Islanded and Grid-Connected Operations of Photovoltaic Inverters Based on

- Model Prediction, IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 2023, pp. 1-6.
- [51] 张鑫. 基于VSG的微电网频率稳定控制方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [52] 张博. 基于虚拟同步发电机的风光储预同步并网控制研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [53] J. Liu, C. Hou, A. Liu, S. Wen and M. Zhu, Pre-synchronization Control of Port Shore Power Grid Connected Inverter Based on VSG, 2023 IEEE PELS Students and Young Professionals Symposium (SYPS), Shanghai, China, 2023, pp. 1-6.
- [54] 赵俊宇. 逆变器并离网下简化VSG控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [55] 吴丹丹. 虚拟同步发电机改进预同步并网控制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [56] W. Gao, F. Ding, M. Shi, X. Ge, J. Lei and R. Huang, A Pre-Synchronization Strategy for Grid-Forming Loop-Closing Device in Distribution Network, 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Nangjing, China, 2022, pp. 4816-4820.
- [57] 程天琪. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [58] 王鹏. 基于虚拟同步发电机的参数自适应控制和频率稳定性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [59] 杨旭红, 杨一矜, 潘宇, 等. 基于RBF-LADRC的虚拟同步发电机控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(03): 319-325.
- [60] 胡寿松. 自动控制原理(第6版)[M]. 科学出版社, 2013.
- [61] 熊保星, 甘文洋, 陈铭治, 等. 基于模糊线性自抗扰的水下机器人定深控制[J/OL]. 控制工程, 1-9[2025-03-04].
- [62] 黄新宇, 梁泉, 陈先福, 等. 基于VSG的接口变换器参数模糊自适应控制策略[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(02): 360-373.

研究成果

- [1] 李涛, 张春, 罗苏明, 等. 一种改进变步长电导增量法的MPPT跟踪策略[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2024, 37(05):15-21.
- [2] 第一作者. 基于模糊自抗扰的光储预同步VSG并网策略[J]. 发电技术. (CSCD, 已收录未发表)

致 谢

行文至此，意味着我的研究生生涯已接近尾声。回首这段充满挑战与成长的旅程，心中唯有感恩。

首先，衷心感谢我的导师张春教授。感谢您在我科研道路上的悉心指导，从论文选题、方法设计到成果凝练，每一步都倾注了您的心血。您严谨的治学态度、渊博的学术视野和谦和的为人风范，将永远激励我在未来的学术与工作中精益求精。

感谢电气工程学院的各位老师，你们的专业课程与宝贵建议为我奠定了扎实的研究基础。同时，感谢课题组欧阳昌乐、胡添诚等在实验与写作中的无私帮助，那些共同奋斗的日夜将成为我珍贵的回忆。

特别感恩我的父母与家人，你们无条件的支持与理解是我面对困难时的最大底气。

最后，向参与论文评审与答辩的各位专家致以诚挚谢意，感谢你们百忙中提出的宝贵意见。

求学之路暂告段落，但求知之心永不止步。谨以此文献给所有照亮我前行之路的人。

尚德敏学 唯实惟新

