

分类号: TM73

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220310111

题 目 基于虚拟同步发电机的光储系统控制研究

英文并列

题 目 Research on control of photovoltaic and energy storage system based on virtual synchronous generator

学生姓名: 吴宏伟

指导教师: 汪石农

专 业: 电气工程

研究方向: 电力系统及其自动化

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结果由本人承担。

学位论文作者签名：吴宏伟

日期：2025年 5 月 18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：

吴宏伟

日期：2025年 5 月 18 日

指导教师签名：

王强

日期：2025年 5 月 18 日

基于虚拟同步发电机的光储系统控制研究

摘 要

随着光伏机组在电力系统总装机容量中的占比持续攀升，其输出功率的波动性与难以提供有效惯量支撑的问题，对电力系统稳定运行构成了严峻挑战。光伏发电系统配备储能并采用虚拟同步发电机（Virtual synchronous generator, VSG）控制技术能够快速响应电网的调频调压需求，同时主动参与惯量支撑。本文以基于 VSG 的光储系统为研究对象，重点围绕其控制策略以及虚拟惯量和阻尼系数的调节问题展开研究，主要研究内容及创新点概括如下：

本文首先构建了两种光储系统结构，详细阐述其工作原理及能量流动过程。在此基础上，介绍系统的功率计算模块、滤波环节以及电压电流双环控制环节，探讨 VSG 关键参数对系统整体性能的影响机理，并从四个维度对虚拟惯量和阻尼系数的取值进行约束，为 VSG 参数的优化设计提供了理论依据。基于传统控制下光储系统的频率特性研究，构建了 VSG 控制策略下的光储系统频率响应模型。并且深入研究 VSG 控制技术与储能系统功率调节的协同工作机制，评估 VSG 的关键参数对光储系统频率调节的影响。

然后，为了提高基于 VSG 的光储系统的惯量支撑能力，提出了一种补偿电磁功率的 VSG 控制策略。该策略能在有功振荡的过程中提前感知有功超调的发生时间并对暂态电磁功率进行补偿，达到加快系统恢复稳定的效果。建立小信号状态空间模型以确定最优补偿系数及时间常数，并通过关键参数变化对模型根轨迹的影响来分析改进型控制策略的有效性。仿真结果验证了所提控制策略对提高光储系统惯量支

撑能力的有效性。

最后，针对弱电网下传统 VSG 控制策略在虚拟惯量和阻尼系数动态调节能力方面的不足，对 VSG 控制的工作特性建立 VSG 输出阻抗的小信号模型，绘制出回率矩阵特征值的奈奎斯特曲线图，分析 VSG 处于不同电网强度下的稳定性。然后，结合四个约束条件得到 VSG 的虚拟惯量和阻尼系数取值范围，进而提出基于自适应神经模糊推理系统（Adaptive neural fuzzy inference system, ANFIS）的 VSG 控制策略。通过仿真验证了基于 ANFIS 的 VSG 控制策略能实现光储系统的虚拟惯量和阻尼系数在弱电网下的灵活调节。

关键词：VSG，光伏发电，储能系统，惯量支撑，虚拟惯量，ANFIS

Research on control of photovoltaic and energy storage system based on virtual synchronous generator

ABSTRACT

As the proportion of photovoltaic units in the total installed capacity of the power system continues to rise, the fluctuation of their output power and the difficulty in providing effective inertia support pose serious challenges to the stable operation of the power system. The photovoltaic power generation system, equipped with energy storage and utilizing virtual synchronous generator (VSG) control technology, can quickly respond to the frequency and voltage regulation needs of the power grid, while actively participating in inertial support. This article focuses on the photovoltaic energy storage system based on VSG, exploring its control strategy and the adjustment of virtual inertia and damping coefficients. The main research content and innovative points are summarized as follows:

Firstly, this article constructs two types of photovoltaic and energy storage system architectures, providing a detailed elaboration on their working principles and energy flow processes. Building upon this foundation, the power calculation module, filtering process, and voltage-current dual-loop control mechanism of the system are introduced. Furthermore, it explores the mechanism by which key VSG parameters affect the overall system performance. Additionally, constraints are imposed on the values of virtual inertia and damping coefficient from four dimensions, thereby offering a theoretical foundation for the optimal design of VSG parameters. Based on the study of frequency characteristics of photovoltaic and energy storage system under traditional control, a frequency response model for these systems under the VSG control strategy is constructed. Additionally,

an in-depth investigation is conducted into the collaborative working mechanism between VSG control technology and power regulation of energy storage system, assessing the impact of key VSG parameters on frequency regulation within these systems.

Then, to enhance the inertia support capability of photovoltaic and energy storage system based on VSG, a VSG control strategy compensating for electromagnetic power was proposed. This strategy can detect the occurrence time of active overshoot in advance during active power oscillation and compensate for transient electromagnetic power, thereby accelerating system stability recovery. A small signal state space model was established to determine the optimal compensation coefficient and time constant, and the effectiveness of the improved control strategy was analyzed by examining the impact of key parameter changes on the model's root locus. The simulation results have verified the effectiveness of the proposed control strategy in enhancing the inertia support capability of the photovoltaic and energy storage system.

Finally, to address the limitations of traditional VSG control strategies in dynamically adjusting virtual inertia and damping coefficients under weak grids, a small-signal model of VSG output impedance is established to characterize the working properties of VSG control. The Nyquist plot of the return rate matrix's characteristic values is plotted to analyze the stability of VSG under varying grid strengths. Subsequently, by incorporating four constraint conditions, the range of virtual inertia and damping coefficient values for VSG is determined, leading to the proposal of a VSG control strategy based on adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS). Simulations have confirmed that the ANFIS-based VSG control strategy enables flexible adjustment of the virtual inertia and damping coefficients in photovoltaic and energy storage system under weak grids.

Hongwei Wu (Original draft)

Supervised by Prof. Shinong Wang

KEY WORD: VSG, photovoltaic power generation, energy storage system,
inertial support, virtual inertia, ANFIS

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 基于 VSG 的光储系统研究现状.....	2
1.2.1 光伏列阵的控制研究.....	2
1.2.2 储能技术在光伏发电系统中的应用.....	3
1.2.3 基于 VSG 的光储系统的研究现状.....	4
1.3 VSG 控制技术的基本原理.....	6
1.3.1 同步发电机的运行原理.....	7
1.3.2 VSG 控制技术的工作原理.....	9
1.4 主要研究内容.....	11
第 2 章 光储系统结构及 VSG 参数取值分析.....	13
2.1 两种常规的光储系统结构.....	13
2.1.1 功率计算和滤波环节.....	14
2.1.2 电压电流双环控制环节.....	15
2.2 VSG 相关特性的仿真.....	16
2.2.1 虚拟惯量和阻尼系数对功率的动态响应.....	16
2.2.2 虚拟惯量和阻尼系数对频率的动态响应.....	17
2.3 虚拟惯量和阻尼系数取值分析.....	18
2.4 本章小结.....	21
第 3 章 基于 VSG 的光储系统频率特性分析.....	22
3.1 传统光储系统的频率特性分析.....	22
3.1.1 传统光储系统的频率响应模型.....	22
3.1.2 传统光储系统的一次调频过程.....	24
3.2 基于 VSG 的光储系统的频率特性及稳定性分析.....	26
3.2.1 基于 VSG 的光储系统的频率时域响应.....	26
3.2.2 基于 VSG 的光储系统的频率特性分析.....	28
3.3 本章小结.....	30
第 4 章 基于 VSG 的光储系统控制策略研究.....	31
4.1 改进型 VSG 控制策略.....	31

4.1.1 改进型 VSG 控制策略分析	31
4.1.2 小信号状态空间模型与参数设计	34
4.2 仿真验证	36
4.2.1 基于改进型 VSG 的仿真验证	36
4.2.2 多机条件下光储系统的仿真验证	40
4.3 本章小结	42
第 5 章 弱电网下基于 ANFIS 的 VSG 控制策略	43
5.1 ANFIS 控制策略的优势	43
5.2 弱电网下 VSG 的稳定判据	43
5.2.1 弱电网下 VSG 的小信号电路模型	43
5.2.2 VSG 的稳定性判断	47
5.3 ANFIS 控制策略	48
5.3.1 参数自适应原理	48
5.3.2 ANFIS 控制结构设计	49
5.4 仿真验证	51
5.4.1 三种策略下的光储系统运行仿真	51
5.4.2 不同电网强度下光储系统运行仿真	53
5.5 本章小结	55
第 6 章 总结与展望	56
6.1 总结	56
6.2 展望	56
参考文献	58
攻读学位期间取得的研究成果	61
致 谢	62

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

能源是人类文明发展的根基，随着文明的演进不断发生变化，这一变化主要通过能源结构的转型得以实现。新一轮全球能源结构转型大致从 1998 年开始，其内在原因包括传统能源逐步老化、可再生能源技术的不断进步以及核聚变技术的研发突破；外部因素则是人类能源需求的持续增长，以及环境可持续发展对低碳经济的迫切需求，总体表现为从中高碳能源系列向低碳清洁能源系列进化^[1,2]。化石能源作为支撑我国工业化进程的基础能源，在推动经济社会发展的同时，也导致了大气污染、温室气体排放等环境问题，对生态系统和人类可持续发展构成了严峻挑战。党的十八大以来，中央系统性地将绿色发展理念深度融入经济社会发展的全流程和各领域，通过实施强有力的节能减排政策，推动经济增长模式从资源消耗型向绿色生态型的转变^[3]。因此，可再生能源问题越来越受到专家和公众的关注。

可再生能源，尤其是太阳能，作为一种稳定且持续的能源，能够在应对化石燃料消耗和全球变暖等问题中发挥重要作用，以满足日益增长的能源需求^[4]。与其他新能源发电方式相比，太阳能光伏发电具有巨大的开采潜力、无地域限制、安装简便且易于维护等显著优势，展现出广阔的发展前景。2021 年 4 月，南方电网公司发布战略规划白皮书明确指出，未来十年将继续加大对光电产业扶持力度，力争到 2030 年推动国内光伏装机容量突破 $1.2 \times 10^8 \text{ kW}$ ^[5]。另外，据国家能源局 2021 年 8 月发布的权威数据显示：截至 2021 年上半年，全国累计光伏装机容量达 $2.67 \times 10^8 \text{ kW}$ ，与“十二五”末期相比增长近 5 倍^[6]。可预见，光伏发电将在未来以新能源为核心的新型电力系统中发挥至关重要的作用。

但随着光伏机组在总装机容量中的占比不断提高，其对电力系统惯量特性、频率调节能力和电压稳定性的影响愈发显著，导致电网安全运行面临严峻挑战。一方面，光伏发电系统受气候变化的影响较大，其输出的波动性会加剧电网有功功率的不平衡；另一方面，随着传统机组逐步被静态的光伏元件所替代，系统惯性逐渐降低，进一步削弱电网的频率稳定性^[7]。当前，光伏发电系统响应电网的惯量支撑需求主要依托三种主流技术方案：减载运行、附加储能以及虚拟同步发电机（Virtual synchronous generator, VSG）技术。这些技术手段分别通过功率调节、能量缓冲和

模拟虚拟惯量等方式，有效提升光伏发电系统的频率响应能力和电网稳定性^[8]。

(1) 减载运行：减载运行依托下垂和虚拟惯量两类调频策略来实现光伏发电系统主动调节电网频率^[9]。其本质光伏提前预留一定有功备用，当电网出现频率波动时，采用下垂和虚拟惯量两种控制策略及时增减光伏出力，使光伏发电系统具备与传统机组类似的频率响应特性。

(2) 附加储能：储能电池与光伏发电系统协调配合参与电网的调频，可避免光伏发电系统单独参与电网调频时需要预留光伏出力的不经济问题，并且储能电池充放电的可控性和稳定性，使得光储系统相较于光伏发电系统单独参与电网调频表现出具有更高的可靠性^[10]。

(3) VSG 控制技术：VSG 可以提高微电网或弱电网的系统电压和频率支持能力，它现在被广泛应用于高渗透率分布式发电系统^[11]。其本质是在下垂控制的基础上进行改进，引入同步发电机（Synchronous generator, SG）转子运动和电磁暂态方程，利用旋转机组的运行机理控制逆变器。

VSG 有效地将电力电子装置的灵活性和 SG 的运行机制结合起来，是实现可再生能源资源优化配置的重要措施。随着 VSG 在电力系统中的日益集成，未来电力系统的很大一部分将由大量的 VSG 代替传统 SG 组成^[12]。然而，在复杂工况条件下，单一技术手段难以为光伏发电系统提供充足的惯量支撑。因此，为了减小分布式光伏电源对电网的影响，光伏发电系统依托于 VSG，并结合储能系统来抑制光伏电源功率的随机波动性，削弱分布式光伏电源对电网和用户的负面影响，满足其对电能质量和供电安全的要求。

1.2 基于 VSG 的光储系统研究现状

1.2.1 光伏阵列的控制研究

光伏阵列的运行效率不仅取决于其固有特性，更显著地受到外部环境因素的制约。为实现太阳能源的最优利用，光伏发电系统通常在最大的输出工作模式稳定运行。通过先进控制技术驱动电力电子装置，使光伏发电系统持续运行于最大功率输出状态的技术，即最大功率点跟踪（Maximum power point tracking, MPPT）控制技术。该技术是确保光伏发电系统高效运行的核心控制策略，对提升系统整体发电效率具有重要的工程实践意义^[13-15]。目前三种主要的控制方法分别是：

恒定电压法：一种简单的 MPPT 控制方法，通过将光伏阵列的输出电压维持

在接近最大功率点电压的恒定值，实现 MPPT。恒定电压法控制简单，适用于环境变化缓慢的场景，但无法精确跟踪最大功率点，效率较低。

扰动观测法：通过对系统输出施加微小扰动信号，实时检测并比较输出功率的变化情况，基于功率变化趋势动态调整扰动方向，从而确保系统逐步逼近并稳定工作在最大功率点。尽管该方法在运行过程中存在有功振荡和误判风险等固有局限性，但由于其控制算法简单、实现成本低且可靠性高，已成为当前光伏发电系统中应用最为广泛的 MPPT 控制策略之一。

电导增量法：通过实时监测电导的取值及其变化率来实现系统的最优功率输出。该方法具有显著的鲁棒性，其性能不受外界环境波动的影响，且与光伏电池的固有特性及参数无关，能够确保系统在复杂工况下保持较高的控制稳定性。然而，该方法的实现依赖于高精度的控制系统，同时对初始电压设置较为敏感，若初始化参数设置不当，可能导致系统功率损失显著增加，从而影响整体发电效率。尽管如此，电导增量法因其优异的稳定性和环境适应性，仍被广泛应用于高性能光伏发电系统中。

目前国内外广泛应用的 MPPT 技术主要包括扰动观测法和电导增量法，以及基于这两种方法衍生出的其他 MPPT 优化算法。这些方法在提高光伏发电系统效率和发电量方面发挥了重要作用。

1.2.2 储能技术在光伏发电系统中的应用

随着电网中可再生能源发电比例的持续提升，电力系统中不稳定性和抗干扰能力较弱的电源数量显著增加，这进一步推动了对储能系统的迫切需求。储能系统不仅能够有效降低光伏发电系统并网时对主电网的电流冲击，还可以在光伏发电充足时存储电能，发挥“削峰填谷”的作用，优化电力供需平衡。因此，储能系统与光伏发电系统的协同运行，将成为未来智能电网发展的重要组成部分，为电力系统的稳定性和高效性提供有力支撑^[16,17]。在光伏发电系统中，储能系统的配置发挥着关键性作用，其主要功能可归纳为以下四个方面：

(1) 功率波动平抑与系统稳定性提升：储能系统通过实时充放电调节，可有效抑制光伏发电固有的间歇性和波动性特征^[18,19]。

(2) 发电计划跟踪与预测精度优化：储能系统与先进预测算法相结合，可显著提高光伏发电出力预测的准确性^[20]。

(3) 负荷调节与电网调度能力增强：储能系统在电力需求高峰时段放电、低

谷时段充电的特性,使其具备显著的削峰填谷功能^[21]。此外,储能系统还可参与电力辅助服务市场,提供调频、备用等辅助服务,提升系统的经济性和可靠性^[22]。

(4) 电能质量改善与支撑高比例新能源接入:储能系统可通过快速响应和动态调节,有效解决电压波动、频率偏差等影响电能质量的问题,为高比例新能源接入提供技术支撑。并且储能系统结合电力电子变流器,可有效滤除光伏发电过程中产生的谐波,降低谐波对电网的污染,提高电能质量^[23]。

光伏发电系统对储能技术提出了多方面的要求:储能电池应具备高能量密度和高功率密度的特性,能够在较小的体积和重量下存储较大能量,以确保在光伏功率突变时快速提供补偿功率。现有的储能技术中,飞轮储能、电化学储能和超级电容储能因其独特的性能优势,更适用于光伏发电系统^[24]。这些技术能够有效实现对光伏发电系统的功率调度,确保系统稳定运行,并适应光伏发电的波动性和间歇性特点。

在电化学储能技术中,铅酸蓄电池凭借其成本低廉且制造工艺成熟,适合大规模生产等的优势,成为商业化应用最为广泛的一种电池。但也存在体积大、寿命短以及环保问题等缺点。而锂离子电池因其能量密度高、体积小、循环寿命长以及无污染等优点,在储能技术领域占据重要地位。不过,锂离子电池的特殊包装和内部过充电保护电路导致其成本较高,难大规模生产^[23]。全钒液流电池为代表的新型储能电池具有能量密度高、使用寿命长、可循环使用次数多等优点,并且其材料性能稳定、易于回收和环境友好等优点,被视为极具发展潜力的电力储能技术^[25]。本文使用铅酸蓄电池作为研究对象,其结构示意图如图 1-1 所示。

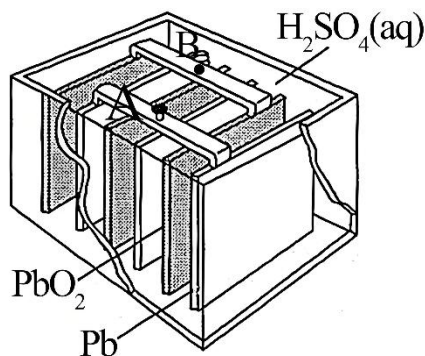


图 1-1 铅酸蓄电池极板结构示意图

1.2.3 基于 VSG 的光储系统的研究现状

分布式电源相较于传统的 SG,它具有控制灵活、响应迅速等优势,但也存在缺乏惯量和阻尼等缺点。随着分布式电源渗透率的持续上升,传统 SG 的装机比例

逐步下降,导致电力系统中的旋转备用容量和转动惯量减少,这对电网的安全和稳定运行构成了严峻挑战^[26]。当遭遇同样幅度的有功功率扰动时,系统很难在短时间内恢复电力平衡,可能会导致系统失稳,甚至逐步引发崩溃。此外,由于分布式电源输出功率的波动性和不确定性,其即插即用和自主协调运行的实现变得尤为困难^[27]。在此背景下,如何通过先进的控制策略实现分布式电源的稳定并网与协调运行,已成为亟待解决的关键技术难题。

从电力系统运行特性来看,SG 具有固有的并网友好性和兼容性。如果能够通过控制策略使分布式电源的接口变换器模拟 SG 的部分运行特性,不仅可增强分布式电源的并网友好性和与电网的兼容性,还可为电网提供必要的惯量支撑^[28]。借此,为了改善或解决分布式电源接入后电力系统惯量下降的问题,诸多学者提出 VSG 控制技术用来控制逆变器等电力电子变换器模拟 SG 的部分或全部特性。

VSG 的概念最早可以追溯到 1997 年,当时由 A-A. Edris 等人领导的 IEEE 柔性输电工作组在定义柔性输电系统术语时首次提出了静止 SG,这一概念成为 VSG 思想的雏形^[28]。2007 年,荷兰能源研究中心等十个科研机构与高校联合参与的 VSYNC 项目正式提出了 VSG 的相关概念,旨在解决因分布式电源渗透率较高而影响的电网频率稳定性问题^[29],这标志着 VSG 控制技术的正式进入研究阶段。同年,德国 Beck H.P.教授提出了名为 VISMA 方法^[30],这是一种典型的电流控制型 VSG 控制技术。通过研究传统 SG 的数学模型,计算出逆变器电流的参考值来控制逆变器输出电流,进而模拟出与 SG 相似的虚拟惯性和阻尼特性。

然而,对于当前电力系统的大环境下,基于受控电流源的控制算法并不适用于以电压源为主导的电力系统。大量电流源接入电力系统可能会对系统的稳定性产生威胁。为了解决电流源型 VSG 控制技术的这一不足,钟庆昌教授提出了一种电压源型 VSG 控制理论^[31],该策略能够有效模拟 SG 的调频和调压特性,同时实现 SG 的惯性和电磁特性。借此,VSG 步入快速发展阶段,国内以清华大学、合肥工业大学等高校为代表的研究团队也开始深入研究 VSG 控制技术。随着研究的不断深入,VSG 控制技术的研究领域也在不断拓展,除 VSG 控制结构架构本身的优化设计外,其系统稳定性分析、参数自适应整定及动态性能优化等关键技术问题,已成为当前国内外学术界研究的重点方向^[27,32,33]。

VSG 能够减少系统超调稳态误差和稳定时间,显著提高光伏发电系统的动态性能,并通过调节其参数来优化系统的惯量响应^[34,35]。而储能系统凭借其优异的动

态响应特性和灵活的调节能力，可在低惯量电力系统中实现毫秒级的有功功率支撑，已成为现代电力系统频率调节的关键技术手段^[36]。近年来，VSG 与光储系统的协同应用在提升电网稳定性和优化电能质量方面取得了显著进展。基于 VSG 的光储系统可充分利用储能系统的快速响应能力，进一步抑制光伏发电系统的频率波动，优化功率输出。当前，基于 VSG 的光储系统的研究主要集中在以下几个方面^[37-40]：

（1）VSG 控制策略的设计与优化：优化 VSG 的有功和无功功率控制算法，确保光储系统在并离网模式下的功率平衡。通过 VSG 控制为光储系统提供虚拟惯量，并改善系统的阻尼特性来抑制功率振荡，提高电网的动态稳定性，弥补光储系统因缺乏旋转惯量而导致的惯性不足问题。

（2）多 VSG 并联运行与协调控制：研究多个 VSG 并联运行时，光储系统的功率分配、频率协调和稳定性问题，避免因控制冲突导致的系统不稳定。探索多 VSG 系统中的主从控制策略或对等控制策略，实现系统的协同运行。

（3）VSG 在微电网中的应用：VSG 控制技术能提高电网的频率和电压稳定性，同时提升光储系统应对可再生能源波动性的适应能力。结合 VSG 控制技术，优化光储系统在微电网中的能量管理策略，实现经济性和可靠性的平衡。

光伏机组和储能系统的不同动态特性及其与电网的交互方式使得系统的控制和稳定性要求更加复杂。并且由于分布式电源多处于偏远地区，导致电网的强度降低，加大 VSG 维持光储系统稳定的难度^[41]。为了增强 VSG 在实际电网的适应性，文献[42]通过研究电网强弱对 VSG 运行的影响，提出在 VSG 控制环节中增加虚拟阻抗的方法。文献[43]仿真结果表明，电网强度降低或光伏输出功率增加都会使得光储系统的稳定性下降。这意味着在弱电网的情况下，VSG 的控制参数需要经过更加复杂和精细的设计，以确保光储系统的稳定运行。文献[44]通过搭建电网电压频率受扰动时 VSG 的小信号模型，提出改进型 VSG 控制参数的设计方法。

尽管基于 VSG 的光储系统在理论与实验中均已证明其可行性，但在实际应用中仍面临诸多挑战，包括系统协调控制、储能容量配置、成本优化等问题^[45]。因此，未来的研究重点将集中在提升 VSG 控制策略的智能化水平以及光储系统的效率和经济性，以推动该技术在电网中的广泛应用。

1.3 VSG 控制技术的基本原理

1.3.1 同步发电机的运行原理

电力系统中同步发电机的有功功率控制基本原理可通过图 1-2 所示的控制模型进行阐述。

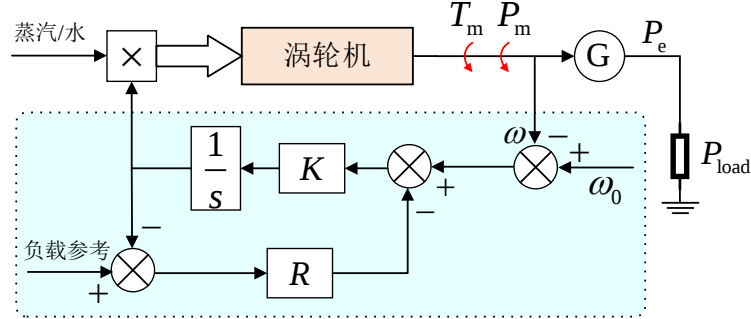


图 1-2 同步发电机有功控制原理

有功功率控制的基本原理主要涉及两个方面：转子运动方程和调速器。考虑到发电机组通常包含阻尼转矩分量，则 SG 的转子运动方程可表示为：

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \quad (1-1)$$

式中： P_m 和 P_e 分别为机械功率和电磁功率。 J 为 SG 的总转动惯量； D 为阻尼系数，表示阻尼转矩分量； ω_m 为转子的机械角速度。 J 是表示刚体转动惯量大小的关键物理量，同时也是决定转动系统惯性时间常数的重要参数。 J 转动惯量与惯性时间常数之间存在正比例关系，如式(1-2)所示，即转动惯量的增大会直接导致惯性时间常数的增加。

$$\begin{cases} M = \frac{2W_K}{S_B} = 2H \\ W_K = \frac{1}{2} J \Omega^2 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中： M 为惯性时间常数； H 和 S_n 代表电机在空载下转子从静止到额定转速的时间和额定容量； Ω 和 W_K 为 SG 的机械角速度和转子动能； S_B 为功率基准值。考虑到 SG 需要以并联方式运行，因此调速器通常采用下垂控制。其基本原理是在单台 SG 的积分环节中引入静态反馈环，以实现多台机组之间的功率分配和频率稳定。即

$$P_t = P_0 + \frac{1}{R}(\omega_0 - \omega) \quad (1-3)$$

式中： R 为速度下降率； P_0 和 P_t 分别表示为负载指令值和最终的发电机功率指令。SG 通过电磁感应原理将机械能转换为电能，其输出的三相交流电经由升压

变压器调整至合适的电压等级后，通过高压架空输电线路和地下电缆组成的电力网络进行远距离传输。在此过程中，输电线路的阻抗特性会导致一定的功率损耗和电压降。设电网电压相量为 $U_g \angle 0^\circ$ ，SG 输出电压相量可表示为 $E_s \angle \delta$ ， δ 为同步发电机的功角。图 1-3 为 SG 与电网之间的等效电路与矢量图。

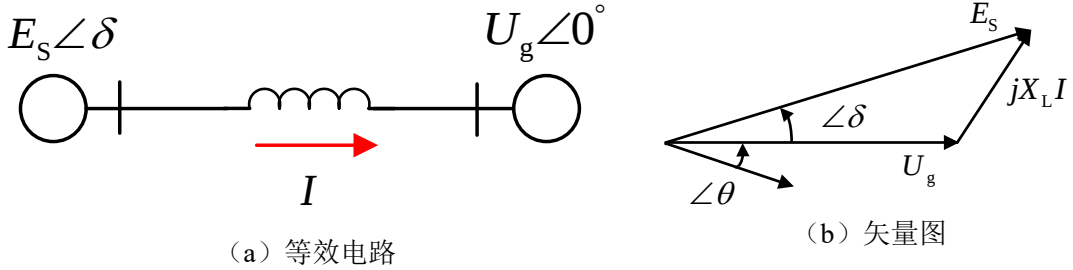


图 1-3 电源间的能量传递

由于系统输出阻抗为感性，线路电感远大于线路电阻，同时考虑到功角一般很小，因此可认为 $\sin \delta \approx \delta$ ， $\cos \delta \approx 1$ 。故有功功率传输方程为：

$$P_R = \frac{3E_s U_g}{X_L} \sin \delta \approx \frac{3E_s U_g}{X_L} \delta \quad (1-4)$$

式中： P_R 为线路的有功传输功率。根据上述条件，SG 从原动机到功率传输至负载端的完整控制过程，可通过图 1-4 所示的控制结构框图进行系统描述。

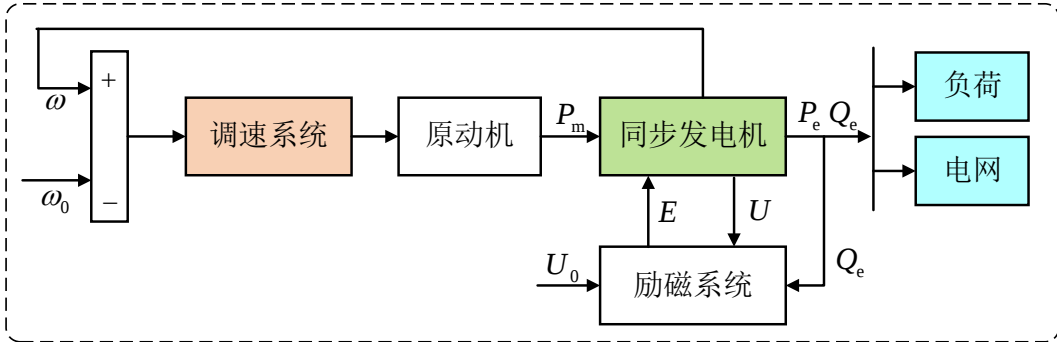


图 1-4 同步发电机有功控制结构

从图 1-4 可看出，SG 的有功功率输出主要由原动机输入的机械功率与发电机电磁功率之间的动态平衡决定。有功控制的核心在于通过调速器调节原动机的机械功率输入，以响应电力系统的频率变化和负载需求。转子运动方程描述了机械功率与电磁功率之间的动态平衡关系，而功角差则反映了两个发电单元之间的电压相位差异，这两者均体现了系统中发电单元之间的矢量关系。当这种矢量关系的平衡被打破时，系统会通过能量交换来重新建立平衡状态，直到恢复稳定状态。因此，在实际运行中，有功控制需要与频率调节、无功控制及励磁系统协调配合，以确保电力系统的稳定性和可靠性。

传统的 SG 配备了基本的励磁调节装置，并通过电压调节器实现对励磁电流的精准控制，确保 SG 输出端电压维持在稳定水平。这一控制机制通过动态调节励磁电流来补偿负载变化或系统扰动引起的电压波动，保障了发电机输出电压的稳定性和可靠性，是电力系统电压调节的重要组成部分。此外，励磁控制器还需要考虑电力系统的动态特性，如发电机的转子运动方程、励磁系统的滞后特性以及电力网络的阻抗特性等。通过合理设计控制参数，励磁控制器能够在系统受到扰动时快速恢复电压稳定，并支持电力系统的暂态和动态稳定性。励磁控制器的控制方程为：

$$Q_m = Q_{\text{ref}} + n(U_{\text{ref}} - U) \quad (1-5)$$

式中： n 为无功-电压控制的下垂系数； Q_{ref} 和 U_0 为逆变器输出的无功功率参考值和输出电压参考值。在考虑短线的前提下，无功功率传输方程可表示为：

$$Q_R \approx \frac{3U_g(E_s - U_g)}{X_L} \quad (1-6)$$

式中： Q_R 为线路的有功传输功率。根据上述公式，可得以下结论：

(1) 有功功率的传输主要依赖于两端电压的相位差。当送端电压相位超前于受端电压时，有功功率从送端向受端传输；当送端电压相位滞后于受端电压时，有功功率的传输方向相反。

(2) 无功功率的传输主要取决于两端电压的幅值差。为了实现无功功率的大量传输，两端之间需要维持较大的电压幅值差。

(3) 无功功率的传输会导致线路电流的增加，从而造成有功功率和无功功率损耗的增大。因此，在电力系统运行中，需合理控制无功功率的传输，以降低系统损耗并提高运行效率。

1.3.2 VSG 控制技术的工作原理

同步发电机由于其固有的转动惯量特性，使得发电系统在输出频率方面表现出较强的抗扰动能力。相比之下，采用开关器件控制的逆变器通过逆变电路和滤波电路对分布式电源的输出电流进行变换。这种结构导致基于电力电子接口的分布式发电系统缺乏 SG 所具备的转动惯量和阻尼特性，从而使其在频率稳定性和抗扰动能力方面相对较弱。通过将逆变器模型等效为旋转发电机模型，使分布式发电系统具备虚拟惯量特性，提升系统的动态响应能力和稳定裕度，进一步改善电网在扰动条件下的频率调节性能，如图 1-5 所示。

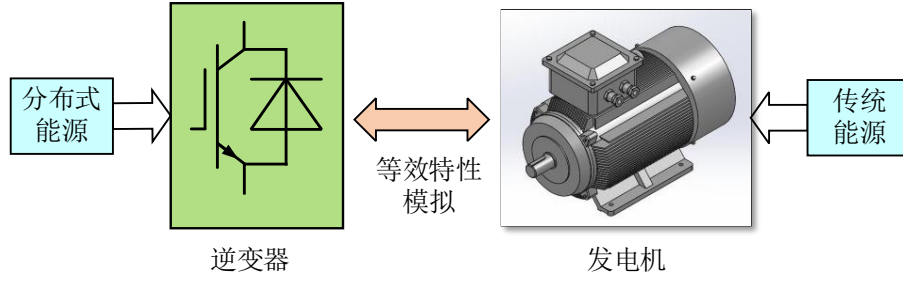


图 1-5 VSG 控制概念图

VSG 调速器采用下垂控制策略，旨在模拟同步发电机的功频特性。由下垂特性推导出 VSG 调速器的工作原理如式(1-7)所示：

$$P_m = P_{ref} + K_m(\omega_0 - \omega) \quad (1-7)$$

式中： P_{ref} 为有功功率的参考值； K_m 为一次调频下垂系数。下垂控制原理如图 1-6 所示。直线 1 和直线 2 分别表示 VSG 和所带负载的有功功率-频率特性曲线。当系统运行在额定频率 ω_{ref} 时，直线 1 与直线 2 相交于 A 点，此时 VSG 的输出有功功率恰好满足负载需求。当负载突然增加 ΔP 时，负载的特性曲线变为直线 3，与 VSG 的特性曲线相交于 B 点。此时，系统频率下降，VSG 的调速器开始响应，通过增加有功功率输出以满足负载的需求，从而使系统频率恢复到稳定状态。

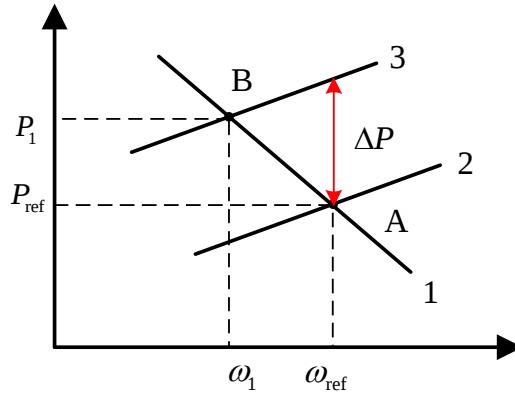


图 1-6 下垂控制原理图

将 SG 的转动惯量和阻尼系数引入光伏机组和储能系统的逆变器控制中，进而得到等效 SG 转子运动特性的 VSG 的转子运动方程，如式(1-8)所示。这种控制方式能够有效模拟传统 SG 的动态响应特性，为系统提供必要的频率支撑能力。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \delta = \int \omega dt \end{cases} \quad (1-8)$$

式中： J 和 D 分别为虚拟惯量和阻尼系数； δ 为功角； ω 和 ω_0 分别为转子角频率和系统参考角频率； P_m 为机械功率，等效为 VSG 的输入有功功率； P_e 为电

磁功率，等效为逆变器输出功率。结合式(1-7)和(1-8)，推出 VSG 有功环的控制回路结构如图 1-7 所示。

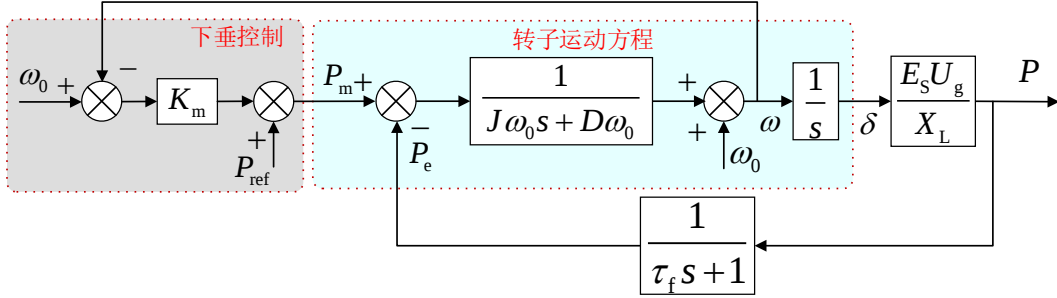


图 1-7 有功频率控制结构

VSG 通过模拟 SG 的无功-电压下垂关系来实现无功-电压控制，其控制方程为：

$$K_p \frac{dE_m}{dt} = K_q (U_{ref} - U) + Q_{ref} - Q \quad (1-9)$$

式中： U 和 U_{ref} 分别为逆变器输出电压实际值和参考值； K_q 为无功-电压控制的下垂系数； K_p 为无功功率的惯性系数； Q 和 Q_{ref} 分别为逆变器输出无功功率实际值和参考值； E_m 为 VSG 的电压偏差值。根据式(1-9)推导出 VSG 无功环控制回路结构如图 1-8 所示。

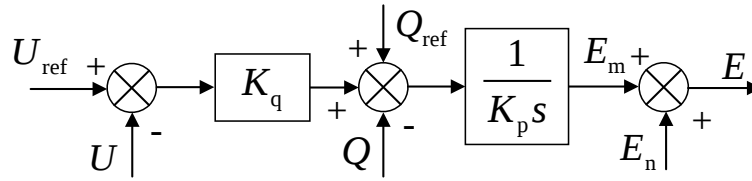


图 1-8 无功环控制回路结构图

1.4 主要研究内容

光伏发电系统通过配置储能装置并引入 VSG 控制技术，能够显著提升其在电力系统中的动态响应能力。这种技术组合不仅能够快速响应电网的频率和电压调节需求，还能够在系统受到扰动时主动提供惯量支撑，增强系统的暂态稳定性。此外，VSG 控制技术通过灵活调节 J 和 D ，进一步优化了光储系统在不同电网条件下的动态性能，为高比例可再生能源电力系统的安全稳定运行提供了重要保障。本文主要内容如下：

(1) 本文根据储能系统与 VSG 的协同工作机制，建立基于 VSG 的光储系统频率响应模型，分析其的频率时域响应来探究其调频特性，进一步研究关键参数变化对系统响应模型根轨迹的影响，来评估光储系统的频率稳定性。

(2) 为提升光储系统在微电网中的惯量支撑能力, 本文提出一种补偿电磁功率的 VSG 控制策略, 通过在转子运动方程中引入角频率偏差补偿项, 提前感知有功振荡并补偿暂态电磁功率, 从而有效抑制有功振荡和频率波动, 加快储能系统恢复稳定运行。

(3) 针对传统 VSG 控制策略在分布式电源高渗透率场景下适应性不足的问题, 本文建立 VSG 输出阻抗的小信号模型, 分析不同电网强度下的稳定性, 并结合 J 和 D 的取值范围, 进一步提出基于 ANFIS 的 VSG 控制策略, 实现 J 和 D 的灵活调节, 提升光储系统在弱电网下的抗扰动能力。

第2章 光储系统结构及 VSG 参数取值分析

2.1 两种常规的光储系统结构

光储系统并网系统有两种常规型结构图,如图 2-1 和图 2-2 所示。图 2-1 中,光伏电池通过电导增量法来控制升压电路接入直流母线,而蓄电池经过双向 DC/DC 电路并联接入直流母线。逆变器直流侧电压经过逆变器进行变换,再经过 LC 型滤波电路进行滤波,输出频率稳定的交流电。 I_{Labc} 为逆变器交流侧电流, I_{abc} 和 U_{abc} 分别表示经过滤波器的并网输出电流和输出电压。 L_f 和 C_f 分别表示逆变器交流侧滤波电感和滤波电容; L_g 和 R_g 分别表示电网的电感和电阻。

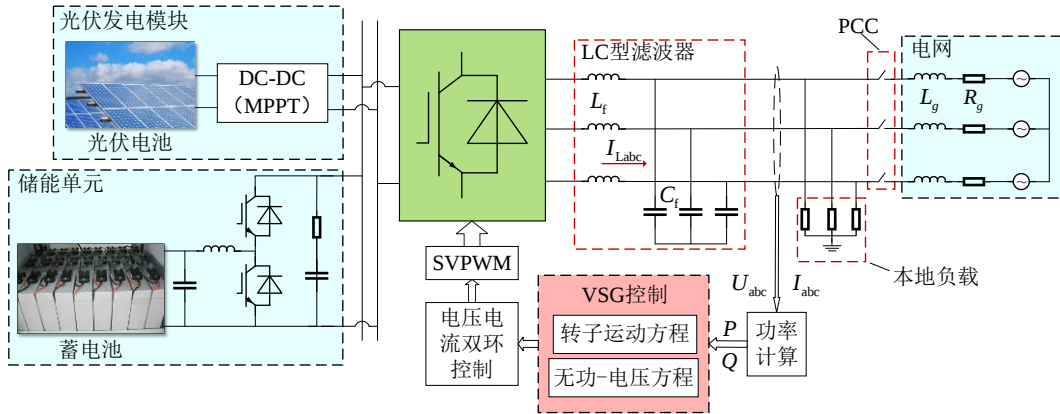


图 2-1 直流侧并联的光储系统结构

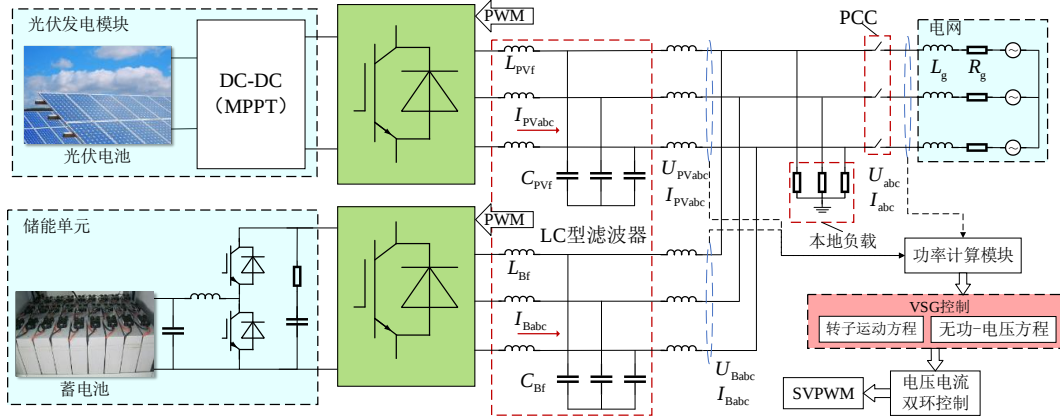


图 2-2 交流侧并联的光储系统结构

图 2-2 中,光伏发电模块和储能单元的逆变器交流侧经过滤波器并联接入公共连接点 (Point of common coupling, PCC) 处。其中,光伏机组和储能系统输出的直流电经过逆变器变换和 LC 型滤波电路滤波后,得到频率稳定的交流电。 P_{PV} 和 P_B 分别表示光伏机组和储能系统的输出有功功率。 L_{PVf} 和 C_{PVf} 分别表示光伏发电模块的逆变器交流侧滤波电感和滤波电容; L_{Bf} 和 C_{Bf} 分别表示储能单元的逆变

器交流侧的电感和电阻。此外，VSG 控制技术的工作过程如下：首先通过主电路测量的电容电压和电感电流信号，结合功率计算公式，计算出系统的输出有功功率和无功功率。再将功率输入到 VSG 算法中，生成双环控制环节的参考电压。然后双环控制环节产生调制信号，并通过空间矢量脉宽调制（Space vector pulse width modulation, SVPWM）技术驱动开关管，从而实现对逆变器的精确控制。

2.1.1 功率计算和滤波环节

通过电容电压和并网电流的 dq 轴分量可计算出并网的有功功率和无功功率。具体计算公式如下：

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ q = \frac{3}{2}(-u_d i_q + u_q i_d) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： p 和 q 分别为有功功率和无功功率瞬时值。 u_d 和 u_q 分别为电容电压的 dq 轴分量， i_d 和 i_q 分别为并网电流的 dq 轴分量。计算出的功率经过一阶低通滤波器滤波，得到滤波后的有功功率 P_f 和无功功率 Q_f 。

$$\begin{cases} P_f = \frac{1}{1 + \tau_f s} p \\ Q_f = \frac{1}{1 + \tau_f s} q \end{cases} \quad (2-2)$$

式中： τ_f 是一阶低通滤波器的时间常数，本文中滤波器的时间常数都相等； s 为拉普拉斯算子。逆变器的滤波电路有三种主流结构：包括 L 型，LC 型和 LCL 型滤波器，本文主要选择 LC 型滤波器。假设逆变器能够精确跟踪参考电压，系统的状态方程可描述为：

$$\begin{cases} u_{oa} = u_a - L \frac{di_{La}}{dt} - r i_{La} \\ u_{ob} = u_b - L \frac{di_{Lb}}{dt} - r i_{Lb} \\ u_{oc} = u_c - L \frac{di_{Lc}}{dt} - r i_{Lc} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中： u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 、 u_a 、 u_b 和 u_c 分别为三相输出电压和端电压； i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 为三相滤波电感电流； r 为滤波电感上寄生电阻，一般取值较小。由于三相电路对称，因此电感电流满足式(2-4)。

$$i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc} = 0 \quad (2-4)$$

同理可得滤波电容电压满足式(2-5)。

$$\begin{cases} C \frac{du_{Ca}}{dt} = i_{La} - i_{oa} \\ C \frac{du_{Cb}}{dt} = i_{Lb} - i_{ob} \\ C \frac{du_{Cc}}{dt} = i_{Lc} - i_{oc} \end{cases} \quad (2-5)$$

2.1.2 电压电流双环控制环节

电压电流双环控制是通过功率计算模块输出电压幅值与相位信息来精确生成调制波，并对滤波器的谐波电压实施抑制，从而削弱滤波器谐振对系统性能的负面影响。本文在 VSG 控制中添加电压电流双环控制环节，确保系统具备优异的动态响应特性。电压环与电流环均配置了 PI 控制器，以实现 VSG 输出电压和电流的高精度跟踪与动态调节，所设计的控制环节如图 2-3 所示。

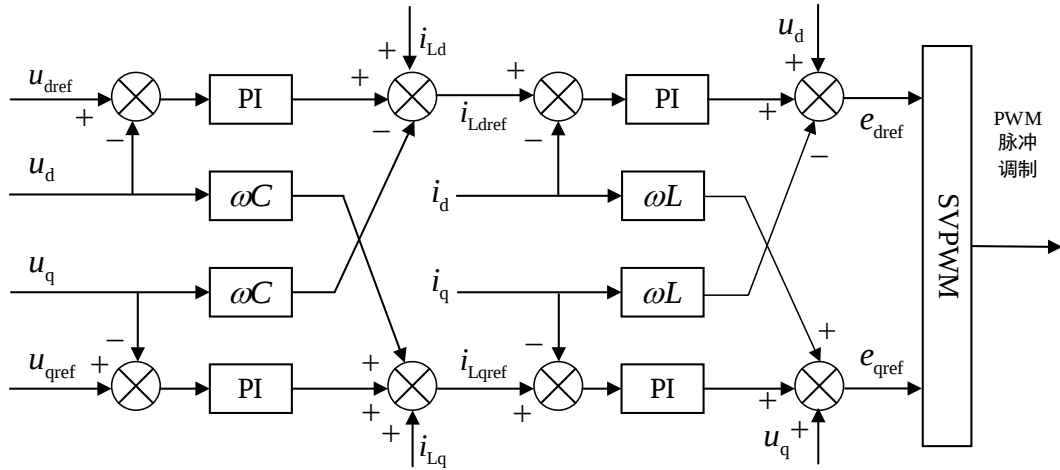


图 2-3 电压电流双环控制

其中， u_{dref} 和 u_{qref} 为电压环的输入参考量， i_{Ld} 和 i_{Lq} 为滤波电感的电流值， u_d 和 u_q 为电压环的输出量，同时也是电流环的输入参考量， e_{dref} 和 e_{qref} 为电流环的输出量，同时作为 SVPWM 的输入参考量，用于驱动基于 VSG 控制的逆变器运行。图 2-3 所对应的双环的控制方程如式(2-6)所示：

$$\begin{cases} \frac{d\phi_d}{dt} = u_{dref} - u_d; \frac{d\phi_q}{dt} = u_{qref} - u_q \\ \frac{d\gamma_d}{dt} = i_{Ldref} - i_{Ld}; \frac{d\gamma_q}{dt} = i_{Ldref} - i_{Ld} \\ i_{Ldref} = -\omega C u_q + K_{pv}(u_{dref} - u_d) + K_{iv}\phi_d \\ i_{Lqref} = \omega C u_d + K_{pv}(u_{qref} - u_q) + K_{iv}\phi_q \\ e_{dref} = u_d - \omega L i_{Lq} + K_{pc}(i_{Ldref} - i_{Ld}) + K_{ic}\gamma_d \\ e_{qref} = u_q + \omega L i_{Ld} + K_{pc}(i_{Lqref} - i_{Lq}) + K_{ic}\gamma_q \end{cases} \quad (2-6)$$

式中： ϕ_d 和 ϕ_q 为电压环 PI 调节器引入的状态变量， γ_d 和 γ_q 为电流环 PI 调节器引入的状态变量。 K_{pv} 、 K_{iv} 、 K_{pc} 和 K_{ic} 分别为电压环和电流环 PI 控制器的比例系数和积分系数。

2.2 VSG 相关特性的仿真

2.2.1 虚拟惯量和阻尼系数对功率的动态响应

为了实现最优的动态响应，通常需要在快速响应与系统稳定性之间进行权衡，这需要合理选择 J 和 D 。这二者是影响电力系统动态响应特性的两个关键参数，尤其在 VSG 的控制中，它们对功率动态响应的调节起着至关重要的作用。 J 反映了系统对频率变化的惯量响应能力。较大的 J 能够延缓频率变化的速度，使系统在功率波动时表现出更平滑的动态响应，从而提高系统的稳定性。然而，过大的 J 可能导致系统响应迟缓，降低对功率扰动的快速调节能力。相反，较小的 J 会使系统响应更快，但可能引入较大的频率波动，甚至导致系统不稳定。 D 决定了系统对振荡的抑制能力。较大的 D 能够有效抑制有功振荡，使系统更快地恢复到稳定状态，但过大的 D 可能导致系统响应过于迟缓，降低动态性能。较小的 D 虽然能够加快初始响应速度，但可能导致系统出现持续的振荡，甚至引发不稳定现象。本节从仿真的角度出发，深入研究 J 与 D 对 VSG 功频响应的作用机制，为 VSG 的参数设置提供理论依据。

设定 D 为固定值 10， J 分别取 0.05、0.2 和 1 时，系统有功功率的动态响应波形如图 2-4 所示。仿真初始阶段（0.5s 前），系统的有功功率稳定运行于 15 kW；在 0.5 s 时刻，负载的有功功率设定值阶跃变化至 5 kW。通过对动态响应波形的分析可知，随着 J 的增大，系统呈现出以下特征：有功功率的超调量显著增加，动态响应时间延长，系统惯量效应增强。这一仿真结果与理论分析结论高度吻合，验证

了 J 对 VSG 动态特性的重要影响。

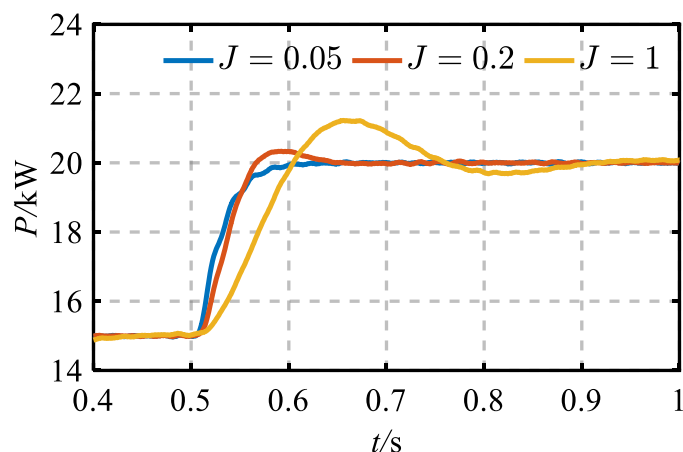


图 2-4 不同 J 下功率的动态响应

从广义理论层面而言， D 主要起到抑制结构或系统在受到外部冲击时产生的振荡幅度的作用。在电力系统的 SG 中，通常通过引入阻尼绕组来有效降低系统的振荡。然而，电力电子接口通常呈现欠阻尼特性，这可能导致系统的不稳定性。本文通过仿真探讨不同 D 对系统功率动态特性的影响。设定 J 为固定值 0.2， D 分别取 8、12 和 20，有功负载在 0.5 s 由原来 15 kW 突增到 20 kW 时，系统功率的动态响应波形如图 2-5 所示。通过对比 D 不同取值的仿真曲线，可得出以下结论：当 D 较小时，系统功率响应速度较快，但伴随较大的超调量和较多的振荡次数；随着 D 的增大，功率响应的超调量显著减小，动态过程趋于平滑。仿真结果表明，在特定范围内，随着 D 的增加，系统的超调量逐渐减小，振荡现象得到有效抑制，动态稳定性显著提升。这一规律验证了 D 在调节系统动态特性中的重要作用。

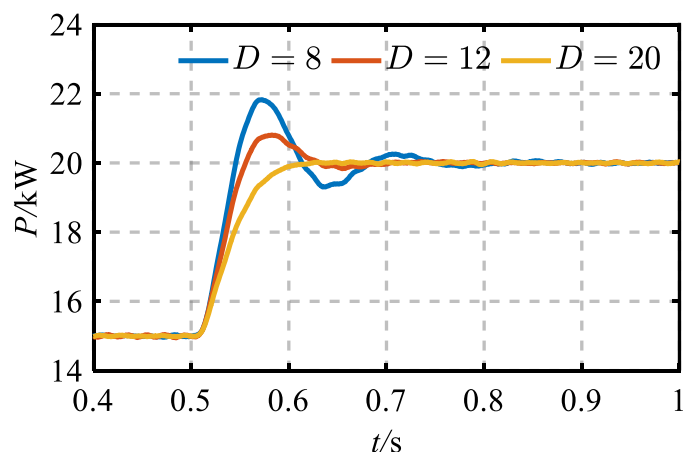


图 2-5 不同 D 下功率的动态响应

2.2.2 虚拟惯量和阻尼系数对频率的动态响应

根据 2.2.1 小节的条件得可到如图 2-6 和图 2-7 所示，系统在 0.5 s 时突增 5

kW 负载的频率动态响应图。综合分析可知，当负载功率突增时，VSG 通过改变相角来传输更多的有功功率，而储能单元持续输出功率，直到系统频率恢复到稳定状态。图 2-6 表明，随着 J 的增大，频率恢复至稳态所需的调节时间显著延长；图 2-7 显示， D 的增加有效减小了频率跌落幅度，同时缩短了调节时间，从而提升了系统的动态稳定性。

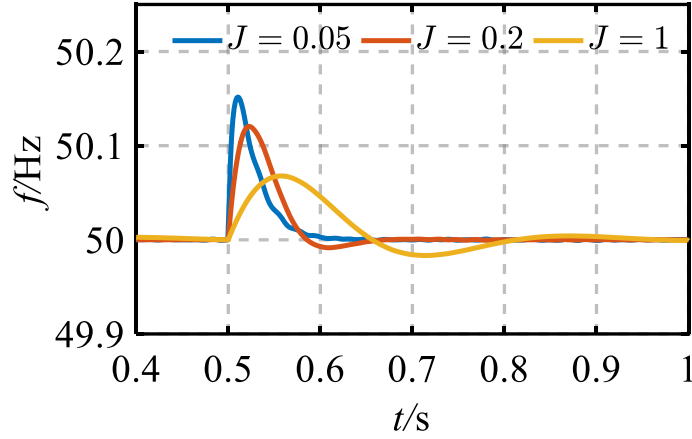


图 2-6 不同 J 下频率的动态响应

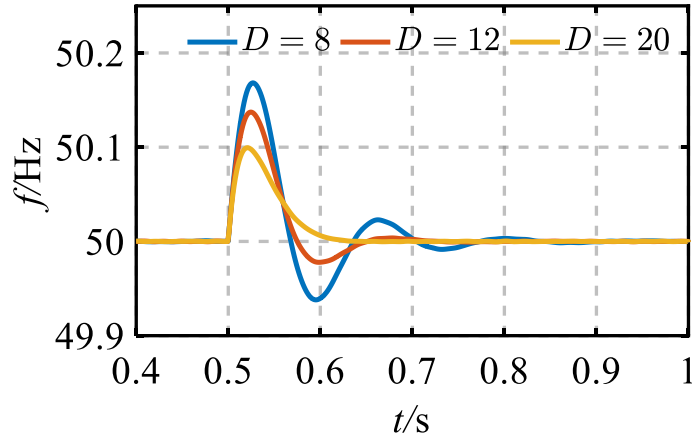


图 2-7 不同 D 下频率的动态响应

综上所述， J 和 D 对功率动态响应的影响是相互关联的，合理配置这两个参数对于提高电力系统的动态性能和稳定性至关重要。在实际工程中，需要根据具体应用场景和系统需求进行精细化设计和调整。

2.3 虚拟惯量和阻尼系数取值分析

根据图 1-7 和式(1-4)，可推导出有功功率环的闭环传递函数和开环传递函数如式(2-7)：

$$\begin{cases} G_c = \frac{K_p}{J\omega_0 s^2 + D_p \omega_0 s + K_p} \\ G_{po} = \frac{K_p}{J\omega_0 s^2 + D_p \omega_0 s} \end{cases} \quad (2-7)$$

式中： $K_p \approx 3E_S U_g / X_L$ ， $D_p = D + K_m / \omega_0$ 。由有功功率的传递函数可得典型二阶系统的固有角频率 ω_n 和阻尼比 ξ ，如式(2-8)所示。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{J\omega_0}} \\ \xi = \frac{D_p}{2} \sqrt{\frac{\omega_0}{JK_p}} \end{cases} \quad (2-8)$$

为了确保系统的稳定性，需要将相关参数调整到合理的范围内。由于 D_p 与阻尼系数 D 仅相差一个常数，为了简化分析过程，本文主要讨论了 J 和 D_p 取值范围。本文从四个方面对 J 和 D_p 取值进行限制，分别是有功功率环的阻尼比、逆变器输出有功功率的变化范围、有功环截止频率限制以及蓄电池的充放电约束条件。根据二阶系统暂态响应特性的可知，为优化系统动态性能，即在保证较小超调量的同时实现快速调节，通常选择 ξ 在 $0.5 \sim 0.8$ 之间^[46]。根据式(2-9)可推导出 D_p 的取值范围为：

$$\sqrt{\frac{JK_p}{\omega_0}} \leq D_p \leq 1.6 \sqrt{\frac{JK_p}{\omega_0}} \quad (2-9)$$

为了设计符合条件的 D_p ，需要同时考虑系统频率调节时的稳定性及其输出的动态特性是否符合电力系统标准。根据电力系统标准，逆变器输出有功功率的变化范围为额定容量的 $40\% \sim 100\%$ ^[47]。综合考虑以上条件，可以对 D_p 的取值进行以下限制：

$$D_p \leq \frac{k\Delta P}{\omega_0 \Delta \omega_{\max}} = \frac{S_n}{100\pi^2} \quad (2-10)$$

式中： S_n 为逆变器的额定容量； k 为输出有功功率的变化范围，本文取值为 1。此外，我国电网允许的频率偏差为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ，故最大角频率偏差 $\Delta \omega_{\max}$ 的取值为 π 。由于截止频率 f_c 处的开环传递函数 $G_{po}(j\omega)$ 的幅值增益为 1，可得式(2-11)：

$$J = \frac{D_p}{2\pi f_c} \sqrt{\left(\frac{K_p}{2\pi f_c \omega_0 D_p}\right)^2 - 1} \quad (2-11)$$

由式(2-11)可以看出, 在给定 f_c 的情况下, J 和 D_p 的取值主要受到电网电压 U_g 的限制, 而受到电网频率的影响基本没有^[48]。为了使系统具备同步发电机在动态过程的振荡特性并满足上述要求, 通常情况下最大截止频率 $f_{c\max}$ 选取在两倍工频的 10% 以内。并且当根号中的表达式始终大于等于 0, 才能确保方程成立。由此可得式(2-12):

$$D_p \geq \frac{K_p}{2\pi\omega_0 f_{c\max}} \quad (2-12)$$

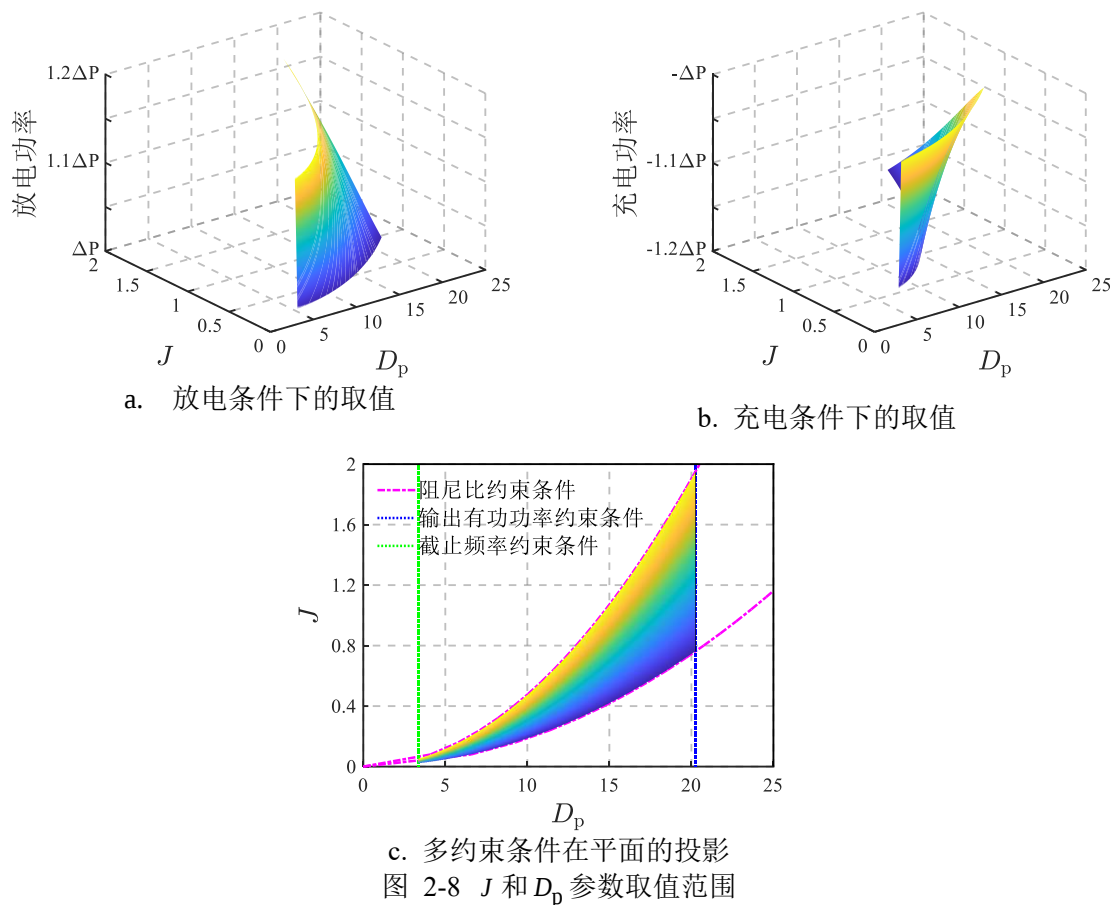
此外, 光储系统通过储能单元充放电来维持 VSG 逆变器直流侧电压的稳定, 从而使得系统的输出功率得以保持平衡。当 VSG 系统受到有功阶跃干扰 ΔP_e 时, 通过有功功率环的传递函数可推导出系统的有功功率输出响应为:

$$\Delta P = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \frac{\Delta P_e}{s} \quad (2-13)$$

式中: ΔP 为受到有功阶跃干扰时储能单元的充放电功率, 负值时表示充电, 正值时表示放电。由式(2-13)可知, 阻尼比的取值受到虚拟惯量和阻尼系数的大小影响。借此可求得系统关于阻尼比的有功功率响应的最大值为:

$$\Delta P_{\max} = (1 + e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}) \Delta P_e \quad (2-14)$$

储能单元对系统的功率支撑能力受到电池荷电状态(State of charge, SOC)的影响, 因此储能单元的充放电功率限制随着电池 SOC 的变化而变化。考虑到储能系统能够安全运行, 储能电池的初始 SOC 限制在 20%~80 之间进行充放电更有利于延长储能电池的使用寿命。本文设置储能电池的额定电压为 400 V, SOC 取值为 70%。此外, 在相同 SOC 条件下, 由于储能电池具有双向充放电特性, 储能单元的充放电功率限制也会有所不同^[49]。假设系统发生 $\Delta P=10$ kW 的阶跃变化, 利用储能单元充放电功率约束公式^[50]计算出储能单元的放电功率限值为 $1.6\Delta P$, 充电功率限值为 $-1.4\Delta P$ 。综上所述的四个对 J 和 D_p 取值范围的约束条件, 绘制出如图 2-8 所示, SCR=5.7 时的三维坐标系下的 J 和 D_p 取值范围。



2.4 本章小结

光储系统作为光伏发电和储能技术的新型能源整合成的系统，其结构的设计和关键参数的选取直接影响着系统的运行效率和稳定性。本章针对光储系统结构及 VSG 重要参数取值问题展开研究。其中，VSG 控制单元作为核心部分，负责模拟 SG 的运行特性，为系统提供惯量支撑，实现光储系统与电网的友好互动。此外，本章分析了 VSG 关键参数对系统性能的影响，并提出了约束参数取值的方法。仿真结果表明，合理设置 J 和 D 能够有效提高光储系统的并网运行性能，增强系统稳定性，为光储系统的推广与应用提供了理论依据和技术支持。

第3章 基于 VSG 的光储系统频率特性分析

储能系统能够通过快速充放电响应电网频率的变化，增强系统的动态性能，与 VSG 共同工作时，能进一步提升系统的频率调节性能。本章旨在分析基于 VSG 的光储系统的频率特性，通过建立系统的频率响应模型，研究 VSG 与储能系统协同工作的动态特性，探讨其关键参数对抑制电力系统频率波动的效果。

3.1 传统光储系统的频率特性分析

3.1.1 传统光储系统的频率响应模型

为了确保电力系统的稳定运行，需要充分考虑新能源机组对电网的惯量支撑能力。电网频率发生突变时，SG 可通过释放转子旋转动能来提供惯量支撑。这种支撑能力取决于电力系统中正在运行的常规机组容量，而高比例新能源机组中可通过提供虚拟惯量、负荷需求响应以及储能技术等方法来提升系统频率稳定性。一般利用虚拟惯性时间常数来衡量不同尺寸和功率等级的新能源机组的等效惯性。虚拟惯性时间常数的取值呈现非线性特征，其数值与所采用的控制算法、参数、能源类型及其能量转换特性密切相关。新能源机组等效惯性时间常数如式(3-1)所示。

$$H_{\text{sys}} = H_{\text{PV}} + H_{\text{B}} + H_{\text{L}} = W_{\text{K}} / S_{\text{B}} \quad (3-1)$$

式中： H_{sys} 为整个电力系统的等效惯量，该变量不受转速变化和转矩大小的影响； H_{PV} 和 H_{B} 分别为光伏机组和储能系统提供的虚拟惯量； H_{L} 为负载提供的惯量； W_{K} 为系统的广义动能； S_{B} 为系统总额定发电容量。考虑到光伏发电系统的下垂特性，将光伏机组的能量转换系统等效为一阶惯性环节，如式(3-2)所示。

$$\Delta P_{\text{PV}} = \frac{-K_{\text{V}}}{1+sT_{\text{V}}} \Delta \omega \quad (3-2)$$

式中： ΔP_{PV} 为光伏机组的功率调整量； K_{V} 为参与调频的单位调节功率； T_{V} 为时间常数，代表模型的响应速度； $\Delta \omega$ 为系统偏移角频率。为了经济最大化，通常是多个光伏电站共享一个储能电池来维持电力系统的频率稳定。假定系统内有 i 个光伏机组和 1 个储能系统，当光伏机组采用常规控制策略后，传统光储系统的频率响应模型如图 3-1.a 所示。

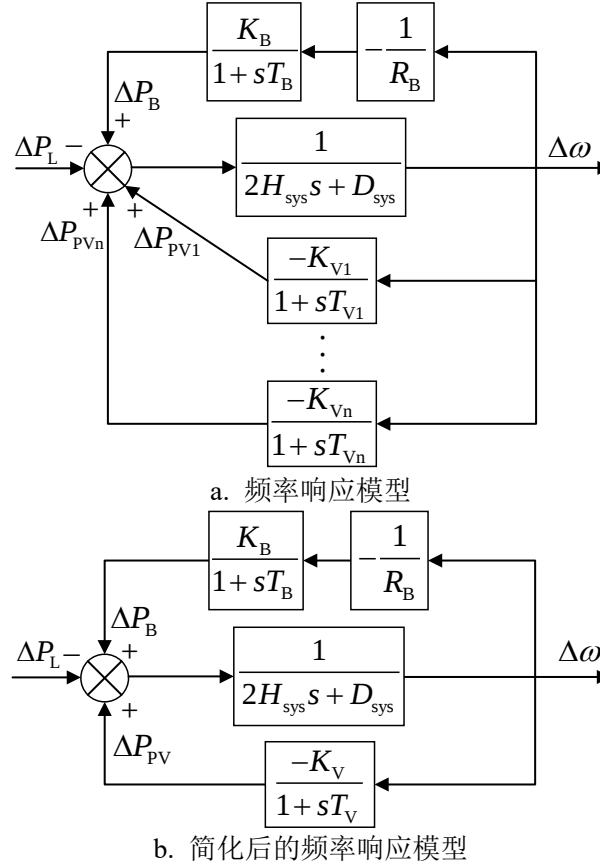


图 3-1 传统光储系统的频率响应模型

在图 3-1 中, R_B 、 K_B 和 T_B 分别表示储能系统的调差系数、容量系数和时间常数。文献[51]提出了一种聚合单机频率响应模型的方法, 利用该方法通过改变参数的取值, 将多个光伏发电机组聚合为一个等效的单机频率响应模型, 如图 3-1.b 所示。由此, 在仅考虑系统惯量响应和一次调频的情况下, 受扰后系统频率的动态响应为:

$$2H_{\text{sys}} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{PVi}} + \Delta P_B - \Delta P_L - D_{\text{sys}} \Delta\omega \quad (3-3)$$

式中: D_{sys} 为负荷阻尼系数; ΔP_L 为负载扰动功率; ΔP_{PVi} 为第 i 个光伏机组的一次调频功率调整量。在新能源机组的装机占比增加使得电力系统的惯量持续下降, 系统更容易受到外界扰动带来的影响。因此, 需要对电力系统的采取相应的频率调节策略来增强其抗干扰的能力。若系统惯量不足, 除了直接提高系统惯量水平外, 还可采取措施降低最小惯量需求以满足系统对惯量需求^[52,53], 具体措施及说明如图 3-2 所示。

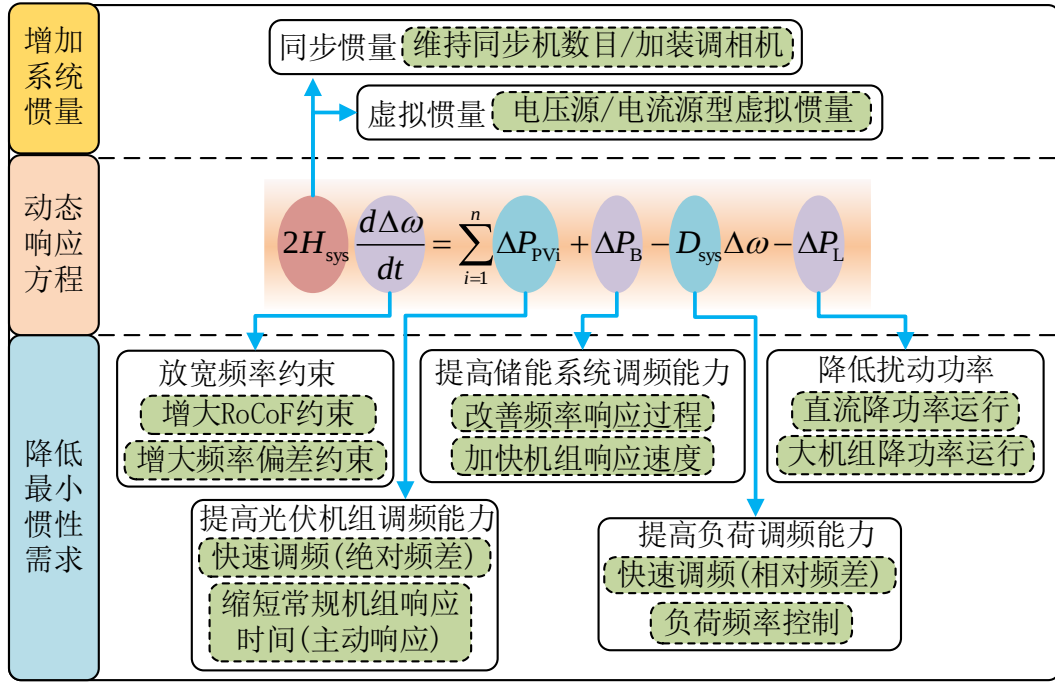


图 3-2 各项措施具体介绍

3.1.2 传统光储系统的一次调频过程

当负载扰动发生后，电力系统频率偏差极值受到惯量与一次调频能力的影响，并决定了是否会触发系统的低频减载动作。如果故障后引发的有功缺额大于系统预留的一次调频裕度，则需要通过低频减载来阻止频率进一步跌落；若缺额量小于调频裕度，但由于一次调频的惯量支撑能力有限，频率仍然跌落至触发低频减载的水平，则说明系统在惯量与一次调频裕度的设计上存在问题^[54]。因此，为避免系统受扰动后触发低频减载，得益于储能系统具备高质量的惯量支撑能力，合理地配置储能系统能够加快系统的响应速度和暂态频率恢复能力。

储能系统的物理特性使其响应速度较快，能先于火电机组参与频率调整，并且储能系统参与频率调整时可自主设定自身参数，其调节范围理论上可覆盖全功率范围^[53]。由于储能模块的惯性时间常数在时间尺度上远小于其他过程，对频率响应过程影响可忽略，故可将图 3-1 中 $1/(sT_B + 1)$ 环节等效成幅值为 1 的静态增益环节。由此，可得从 ΔP_L 到 $\Delta \omega$ 的传递函数为：

$$G_{\text{sys}}(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta P_L} = \frac{-1}{2H_{\text{sys}}T_V} \frac{T_V s + 1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-4)$$

其中：

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_V}{2H_{\text{sys}}T_V} + \frac{D_{\text{sys}}}{2H_{\text{sys}}T_V} + \frac{K_B}{2H_{\text{sys}}T_V R_B} \\ \xi = \frac{1}{2\omega_n} \left(\frac{1}{T_V} + \frac{D_{\text{sys}}}{2H_{\text{sys}}} + \frac{K_B}{2H_{\text{sys}}R_B} \right) \end{cases} \quad (3-5)$$

为分析发生负载扰动时系统频率响应特性，令 ΔP_L 为幅值为 ΔP_s 的阶跃输入，得到稳态角频率偏差：

$$\Delta\omega|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\Delta P_s}{s} G_{\text{sys}}(s) = - \frac{\Delta P_s}{K_V + D_{\text{sys}} + \frac{K_B}{R_B}} \quad (3-6)$$

其中， H_{sys} 只会影响频率动态过程，对稳态角频率偏差不产生影响。由式(3-4)可知，如果负荷发生阶跃，传递函数 $G_{\text{sys}}(s)$ 为二阶振荡环节，求得角频率偏差输出为：

$$\Delta\omega(s) = \frac{-\Delta P_s}{2H_{\text{sys}}T_V} \frac{T_V s + 1}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} = \frac{-\Delta P_s \omega_n^2}{K_V + D_{\text{sys}} + \frac{K_B}{R_B}} \frac{T_V s + 1}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3-7)$$

在系统运行在欠阻尼工况下，对式(3-7)进行拉普拉斯逆变换，求得角频率偏差在时域响应为：

$$\Delta\omega(t) = \frac{-\Delta P_s}{K_V + D_{\text{sys}} + \frac{K_B}{R_B}} (1 + A e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi)) \quad (3-8)$$

其中：

$$\begin{cases} A = \sqrt{(T_V^2 \omega_n^2 - 2\xi T_V \omega_n + 1)/(1 - \zeta^2)} \\ \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \\ \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \arctan\left(\frac{\omega_d T_V}{1 - \zeta\omega_n T_V}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta}\right) \end{cases} \quad (3-9)$$

令 $\Delta\omega(t)$ 的一阶导数为 0，可得对应最大角频率偏移量 $\Delta\omega_m$ 对应的时刻 t_p 为：

$$t_p = \frac{n\pi - \varphi_1}{\omega_d} = \frac{1}{\omega_d} [n\pi - \arctan\left(\frac{\omega_d T_V}{1 - \zeta\omega_n T_V}\right)] \quad (3-10)$$

式中： $n = 0, 1, 2, \dots$ 。最后，将式(3-10)代入式(3-8)中，得到 $\Delta\omega_m$ 为：

$$\Delta\omega_m = |\Delta\omega(t_p)| = \frac{\Delta P_s}{K_V + D + \frac{K_B}{R_B}} (1 + A e^{-\zeta\omega_n t_p} \sin(\omega_d t_p + \varphi)) \quad (3-11)$$

借助式(3-11)可得到不同惯量水平的电力系统受到相同负载干扰时的光储系

统一次调频过程，如图 3-3 所示。从图 3-3 中明显看出，无论增大电力系统的等效惯量，还是配备储能系统都能有效地抑制扰动时的频率波动，补偿故障后引发的有功缺额量，为一次调频响应争取必要的时间。

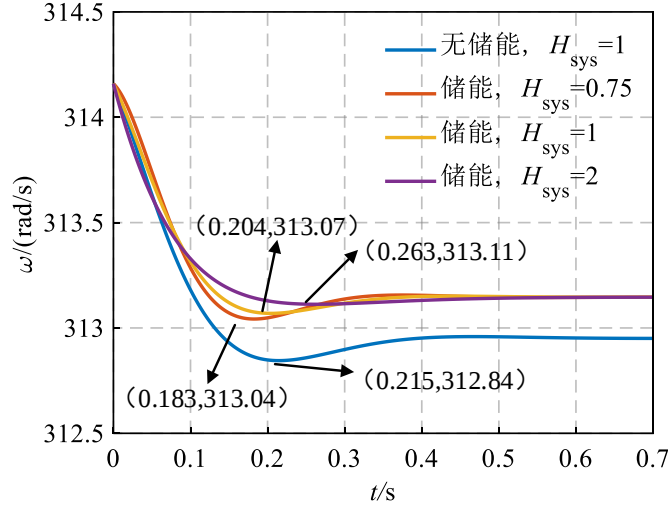


图 3-3 光储系统的一次调频过程

3.2 基于 VSG 的光储系统的频率特性及稳定性分析

3.2.1 基于 VSG 的光储系统的频率时域响应

为简单起见，线路阻抗主要呈现出感性，VSG 的输出有功功率和无功功率近似解耦。在此基础上，引入小信号扰动模型，则第 i 台 VSG 的电磁功率的小信号模型为：

$$\Delta P_i = \frac{3E_i U_g}{X_i} \sin \Delta \delta_i \approx K_i \Delta \delta_i \quad (3-12)$$

式中： X_i 是第 i 台 VSG 的线路阻抗和滤波环节阻抗的总等效阻抗， E_i 是逆变器输出电压的幅度； $\Delta \delta_i$ 为是逆变器和 PCC 之间的相位差； K_i 被定义为同步电压系数。考虑到电力系统输出阻抗的功角变化一般很小，因此可认为 $\sin \Delta \delta \approx \Delta \delta$ 。根据图 1-7 可得 VSG 的有功-频率传递函数：

$$h_i(s) = \frac{\Delta \omega_i}{\Delta P_i} = -\frac{1}{J_i \omega_0 s + D_i \omega_0 + K_{mi}} \quad (3-13)$$

式中： $h_i(s)$ 为一阶惯性响应，故在负载扰动下 VSG 单机运行时的自身频率将不会发生振荡。当 PCC 处角频率 $\Delta \omega_{bus}$ 发生变化时， $\Delta \omega_i$ 跟随 $\Delta \omega_{bus}$ 变化而实现频率同步，则功角变化表示为 $\Delta \delta_i = (\Delta \omega_i - \Delta \omega_{bus})/s$ 。结合式(3-13)得到 $\Delta \omega_{bus}$ 波动时，VSG 兼具惯量支撑和一次调频功能下的输出有功功率 ΔP_i 的传递函数：

$$\begin{cases} \Delta P_i = \frac{K_i \Delta \omega_{\text{bus}}}{K_i h_i(s) - s} = G_i(s) \Delta \omega_{\text{bus}} \\ G_i(s) = -\frac{K_i (J_i \omega_0 s + D_i \omega_0 + K_{mi})}{J_i \omega_0 s^2 + (D_i \omega_0 + K_{mi})s + K_i} \end{cases} \quad (3-14)$$

图 1-2 展示了 SG（以汽轮机为例）机械部分的结构框图，由此可得 SG 的功率-频率传递函数^[55]，如式(3-15)。在传统 SG 中，调速器通过调节原动机阀门实现能量转换，这一过程涉及机械运动的动态响应。然而，在 VSG 中，由于能量供应的响应时间极短，原动机机械运动环节可以被忽略，从而实现了更为灵活的控制。

$$G_H(s) = -\frac{k_m}{R} \frac{1 + F_H T_R s}{(1 + T_R s)(1 + T_g s)} \quad (3-15)$$

式中： $G_H(s)$ 为火力机组的频率响应传递函数； T_R 为再热器惯性时间常数； T_g 为响应时间常数； F_H 为高压缸产生的功率占总汽机功率的比例； $1/R$ 为简化的调速器纯增益； k_m 为同步机组可调出调频容量系数。比较 $G_i(s)$ 和 $G_H(s)$ 可看出，这两个传递函数具有相似的结构，因此 VSG 控制的光伏机组在运行时展现出类似同步发电机的物理特性。忽略逆变器自身的损耗，根据功率守恒原理，计算出系统的负载扰动功率 ΔP_L ，如式(3-16)所示。

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n = \Delta P_L \quad (3-16)$$

结合式(3-13)、(3-14)和(3-16)得到负载突变下 VSG 自身输出频率的传递函数：

$$G_{pi}(s) = \frac{\Delta \omega_i}{\Delta P_L} = \frac{G_i(s) h_i(s)}{\sum_{i=1}^n G_i(s)} \quad (3-17)$$

多机的功率分配与自身机组的阻抗大小有关，通常情况下， J 、 D 、 K_m 以及机组自身阻抗 X 成比例关系，如式(3-18)所示。

$$J_i : D_i : K_{mi} : \frac{1}{X_i} = J_1 : D_1 : K_{m1} : \frac{1}{X_1} \quad (3-18)$$

实际中的光储系统很难满足式(3-18)的关系，为了简化计算，将 $G_{pi}(s)$ 视为一阶系统。结合式(3-17)和(3-18)可得到系统发生负荷扰动时，VSG 输出的频率偏差输出为：

$$\Delta \omega_i = \gamma_i h_i(s) \frac{\Delta P_s}{s} = \frac{-\gamma_i \Delta P_s}{s(J_i \omega_0 s + D_i \omega_0 + K_{mi})} \quad (3-19)$$

式中，系数 γ_i 代表第 i 台 VSG 对总机组的出力程度，取值为 $G_i(s) / \sum_{i=1}^n G_i(s)$ 。

经过拉普拉斯逆变换后，求得角频率偏差时域响应为：

$$\Delta\omega_i(t) = \frac{-\gamma_i \Delta P_s}{D_i \omega_0 + K_{mi}} (1 - e^{-\sigma t}) \quad (3-20)$$

其中：衰减系数 $\sigma = (D_i \omega_0 + K_{mi}) / (J_i \omega_0)$ 。当外界负载发生变化时，通常情况下 σ 的取值较大，使得 VSG 自身的角频率得以迅速调整。

3.2.2 基于 VSG 的光储系统的频率特性分析

当光储系统工作在微电网环境时，负荷突变会导致 VSG 的机械功率与输出功率不匹配，原动机调速单元对系统角速度进行有差调节。在这此过程中，VSG 的输出有功功率响应表现为二阶振荡环节。该响应的主要特征取决于阻尼比的大小，当 VSG 运行在欠阻尼工况下，输出功率在负载扰动下将出现振荡。虽然振荡幅度会随着时间减小，但系统功率需要较长时间才能稳定。

为了抑制系统有功振荡并加快频率的稳定过程，储能系统的应用显得尤为重要。储能系统的常规控制策略是下垂控制，但由于频率信号连续变化，低惯量情况下难以达到预期效果^[56]。本文利用 VSG 控制策略同时对光伏机组和储能系统的逆变器进行控制，使其主动参与频率支撑，提高系统惯量来抑制系统有功振荡。忽略储能 SOC 的时变特性对自身功率变化和充放电能力的影响，结合图 3-4 和式(3-14)可得基于 VSG 的光储系统的频率响应模型，如图 3-4 所示。

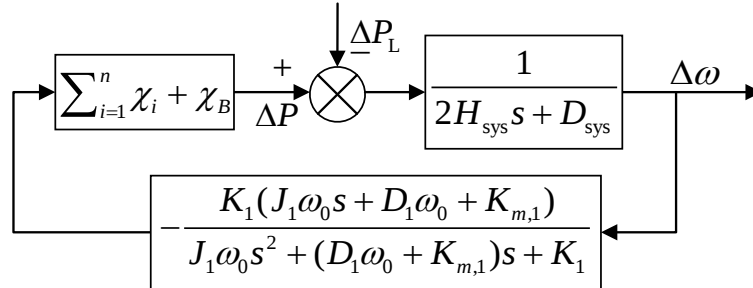


图 3-4 基于 VSG 的光储系统频率响应模型

图 3-4 中 $\chi_i = \gamma_i / \gamma_1$ 。系数 χ_B 为储能系统对第一台的光伏机组的影响程度，其取值与自身容量占比电力系统总容量的大小有关。通常情况下电力系统配置储能系统的容量为总容量的 10%~30%，本文选取储能系统 $\chi_B = 0.25$ 。根据图 3-4 和式(3-21)，采用三阶环节来模拟基于 VSG 的光储系统的调频特性，得到从负荷扰动 ΔP_L 到频率变化 $\Delta\omega$ 的传递函数：

$$G_{\text{sys}}(s) = -\frac{J_1 \omega_0 s^2 + (D_1 \omega_0 + K_{m,1})s + K_1}{As^3 + Bs^2 + Cs + D} \quad (3-21)$$

$$\begin{cases} A = 2H_{\text{sys}}J_1\omega_0 \\ B = 2H_{\text{sys}}(D_1\omega_0 + K_{m1}) + D_{\text{sys}}J_1\omega_0 \\ C = 2H_{\text{sys}}K_1 + D_{\text{sys}}(D_1\omega_0 + K_{m1}) + J_1\omega_0K_1(\sum_{i=1}^n\chi_i + \chi_B) \\ D = D_{\text{sys}}K_1 + (D_1\omega_0 + K_{m1})(\sum_{i=1}^n\chi_i + \chi_B)K_1 \end{cases} \quad (3-22)$$

式(3-21)中传递函数包含三个极点，分别为两个共轭极点 $s_{1,2} = -\sigma + j\omega_d$ 和一个负极点 s_3 ，其分布规律主要受虚拟功率、阻尼系数以及线路阻抗的影响。 σ 为衰减系数， ω_d 为自然振荡频率。由于系共轭极点的存在，当系统负荷发生突变时，响应模型的频率变化的时域响应为：

$$\Delta\omega(t) = 1 + \lambda_1 e^{s_1 t} + \lambda_2 e^{-\sigma t} \cos(\omega_d t + \phi) \quad (3-23)$$

式中： λ_1 和 λ_2 为两个模态的常系数，与系统的零极点分布有关； ϕ 为相位角。

VSG 控制模拟了 SG 的运行特性，但缺乏像 SG 那样为系统提供显著的惯量支撑，其动态性能依赖于控制参数^[57]。VSG 的参数取值并非基于发电机的实际物理特性，而是综合考虑储能的经济性、逆变器响应速度以及一系列影响因素。为了使 VSG 具有和 SG 类似的惯量支撑特性，通过调节参数 J_1 、 D_1 和 K_1 ，能有效地减少系统阶跃响应时的频率最大幅值，缩减系统达到稳态时间，如图 3-5 所示。

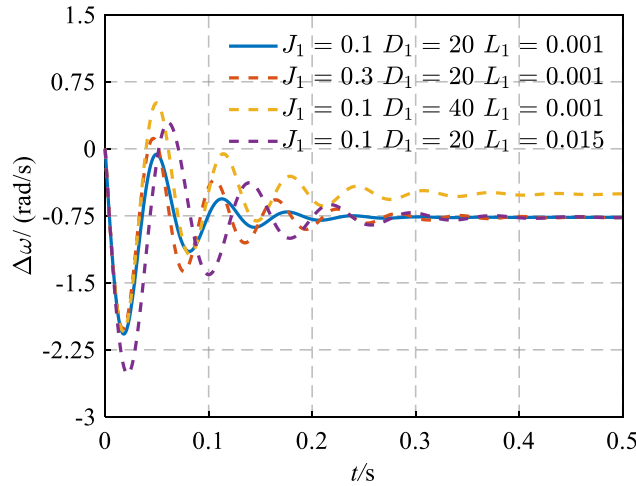


图 3-5 参数变化时频率响应过程

图 3-6 为 VSG 控制策略的三个重要参数变化时系统极点特征根分布，图中箭头所指为参数不断增加时的特征根分布变化趋势。图 3-6.a 中，当 J_1 增大时，系统根轨迹逐渐靠近虚轴， σ 逐渐变小， ω_d 振荡减小，表明 J_1 变大时，系统阻尼变小，系统调节时间可能变长。图 3-6.b 中，当 D_1 增大时，系统根轨迹逐渐远离虚轴， σ 逐渐变大， ω_d 振荡略微减小，表明当 D_1 变大时，系统阻尼变大，系统调节时间可

能变短。图 3-6.c 中, 当 X_1 增大时, 共轭极点逐渐靠近虚轴而负极点远离虚轴, σ 下降, ω_d 振荡减小, 表明 X_1 的增大会使系统的调节时间变长, 频率波动程度加剧。

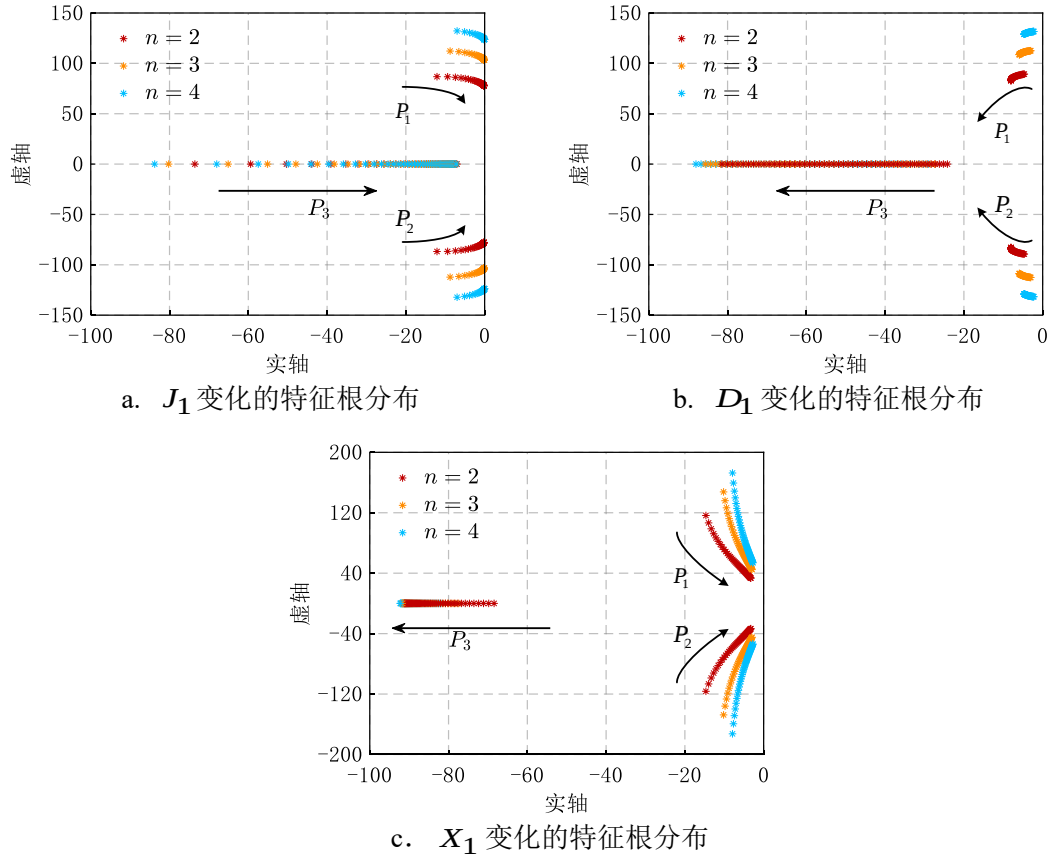


图 3-6 参数变化时极点特征根分布

此外, 随着 VSG 接入台数增加, 削弱了单台机组频率波动对整个系统的影响, 但是系统更容易发生频率波动, 降低整个系统的稳定性, 并且还要考虑到 VSG 之间的环流以及谐振等问题。所以在保证系统稳定运行的前提下, 尽可能多的接入合适数目的光伏机组显得尤为重要。为此, 本文利用储能系统改善频率响应能力, 并且研究随着光伏机组接入数目的增加对其自身角频率偏移量的影响, 可达到满足电力系统安全稳定运行的同时实现经济最大化的目的。

3.3 本章小结

本章针对光储系统的频率特性展开研究, 建立了系统频率响应模型, 分析 VSG 与储能系统协同工作的动态特性, 并探讨其对电力系统频率波动的抑制效果。研究表明, 当电力系统受到扰动时, 增加电力系统的等效惯量或配置储能系统都有助于减缓频率波动。这些措施为系统提供了充足的时间来进行一次调频响应, 避免频率过度偏离设定值。

第4章 基于 VSG 的光储系统控制策略研究

为提升基于 VSG 的光储系统在电网中的惯量支撑能力，本章提出了一种改进型 VSG 控制策略。该策略建立有功控制环节的电磁功率补偿机制，构建小信号状态空间模型以确定最优补偿系数及时间常数，并通过仿真验证了该策略在改善系统动态响应和惯量支撑方面的可行性。

4.1 改进型 VSG 控制策略

4.1.1 改进型 VSG 控制策略分析

在理想状态下，光伏机组输出有功功率不变，负载功率突增所导致的功率缺额全部由储能补偿，即 $\Delta P_B = \Delta P_{load}$ 。但实际运行中，储能系统瞬时补偿有功缺额有限，可能会由于补偿功率不足导致电力系统的频率跌落。因此，根据式(3-20)可知，VSG 自身角频率能够快速响应外界扰动。为此，本文提出引入补偿电磁功率的 VSG 控制策略，该策略在传统 VSG 控制的基础上，增加一个经过一阶惯性环节的自身角频率偏差，再乘以补偿系数后加入到转子运动方程中，进而在有功振荡的过程中提前感知超调的发生并对暂态电磁功率进行补偿，达到抑制有功振荡的效果。为了方便起见，本文以图 2-2 为例来分析改进型 VSG 控制策略，其得到改进后的模型结构如图 4-1 所示。

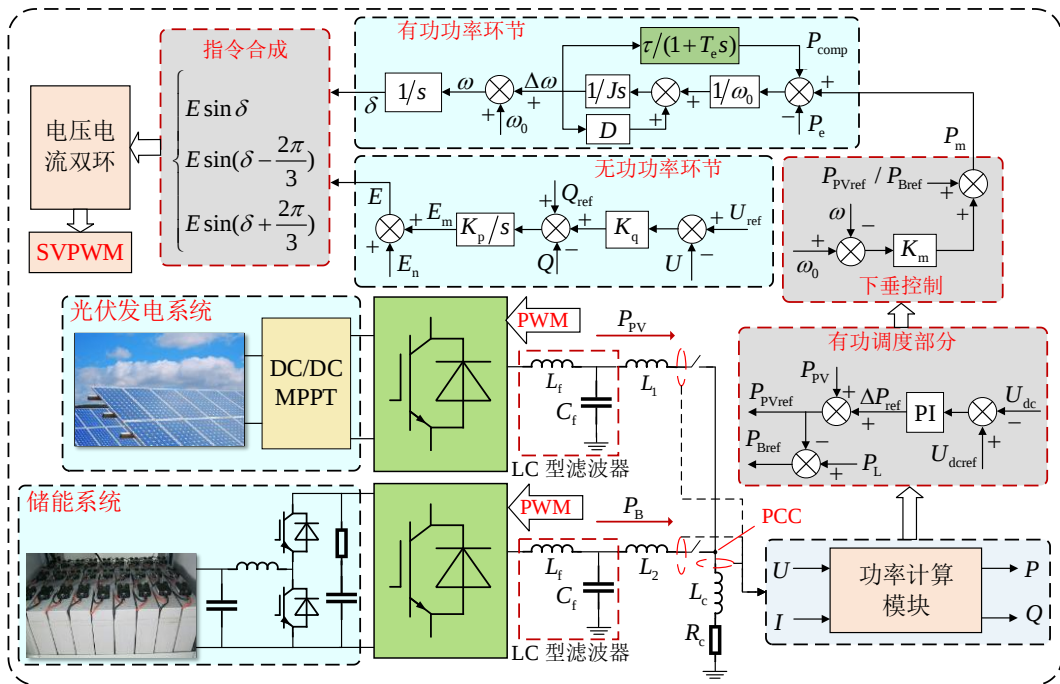


图 4-1 基于改进型 VSG 的光储系统模型

其中, L_1 和 L_2 分别表示光伏机组和储能系统的等效线路阻抗。为了最大化地利用光伏阵列所释放的能量, 对逆变器采用的 VSG 控制策略的有功参考功率进行优化, 利用 PI 控制器对逆变器直流侧电压进行调控得到光伏机组有功功率的参考值偏差 ΔP_{ref} 。而光伏机组的 VSG 有功功率的参考值 P_{PVref} 为光伏阵列经过 MPPT 模块所得最大有功功率 P_{PV} 与 ΔP_{ref} 之和, 其控制框图如图 4-1 中有功调度部分所示。 U_{dc} 和 U_{dcref} 分别为光伏机组逆变器直流侧的实际电压及其参考值。储能系统输出有功功率由能量管理或上层调度系统的功率指令 P_c 减去光伏发电系统的输出有功功率 P_{PV} , 即

$$P_{\text{Bref}} = P_c - P_{\text{PV}} \quad (4-1)$$

为了削弱由有功负载突变引发的 VSG 的转矩偏差, 实现储能系统的快速充放电, 本文引入一个经过惯性环节的自身角频率偏差, 以补偿转子运动环节的暂态功率差。结合公式(1-8)在有功功率输出环节增加补偿功率:

$$\begin{cases} J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_{\text{comp}} - D\omega_0(\omega - \omega_0) \\ P_{\text{comp}} = \frac{\tau}{1 + T_e s} (\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (4-2)$$

式中: P_{comp} 为暂态补偿电磁功率; τ 为补偿系数; T_e 为补偿功率的时间系数。

改进型 VSG 小信号模型如图 4-2 所示。

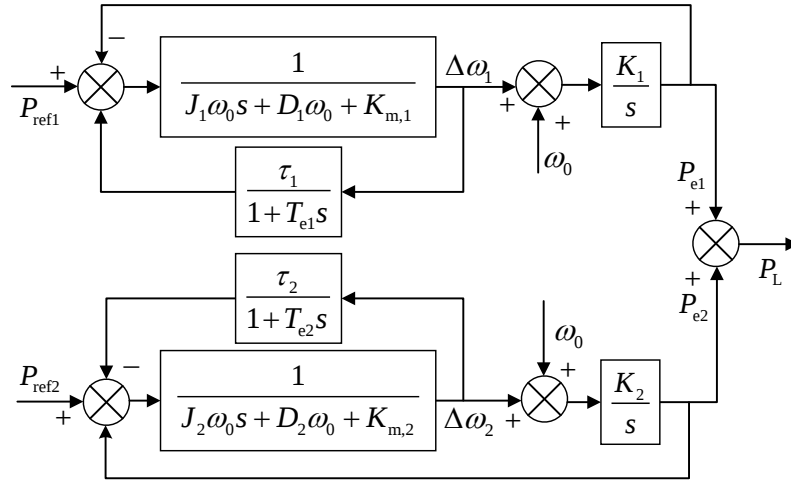


图 4-2 改进型 VSG 小信号模型

为了能够更加有效地补偿有功功率, 根据单台 VSG 对总机组的出力程度比来设置补偿系数:

$$\tau_1 : \tau_2 = \gamma_1 : \gamma_2 \quad (4-3)$$

VSG 输出功率的动态响应特性常用来评估控制策略的性能和内部参数的设置。结合式(4-3)和图 4-2 可得, 在负载扰动下的 VSG 的有功-频率传递函数:

$$\begin{aligned} h_i^*(s) &= -\frac{1}{J_i\omega_0 s + D_i\omega_0 + K_{mi} + \frac{\tau_i}{1+T_{ei}s}} \\ &= -\frac{1+T_{ei}s}{J_i\omega_0 T_e s^2 + (J_i\omega_0 + rT_{ei})s + r + \tau_i} \end{aligned} \quad (4-4)$$

式中: $r = D_i\omega_0 + K_{mi}$ 。比较两种 VSG 控制方式下的传递函数可看出, $h_i^*(s)$ 包含一个与惯性时间常数相关的额外极点, 使得系统能提前感知超调的发生, 快速响应的有功波动, 并且有效抑制频率超调量, 改善系统原有的惯量响应。

$$G_{sys}^*(s) = -\frac{J_1\omega_0 T_{e1}s^3 + (J_1\omega_0 + rT_{e1})s^2 + (r + \tau_1 + K_1 T_{e1})s + K_1}{As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E} \quad (4-5)$$

式中: $A = 2H_{sys}J_1\omega_0 T_{e1}$; $B = 2H_{sys}(J_1\omega_0 + rT_{e1}) + D_{sys}J_1\omega_0 T_{e1}$;

$C = 2H_{sys}(r + \tau_1 + K_1 T_{e1}) + D_{sys}(J_1\omega_0 + rT_{e1}) + \lambda K_1 J_1\omega_0 T_{e1}$;

$D = 2H_{sys}K_1 + D_{sys}(r + \tau_1 + K_1 T_{e1}) + \lambda K_1(J_1\omega_0 + rT_{e1})$; $E = D_{sys}K_1 + \lambda(K_1 r + \tau_1)$ 。图 4-3

显示了改进前后光储系统的有功频率传递函数。可明显看出, 改进的传递函数不仅可以减小 $\Delta\omega$ 稳态时的幅度, 还可以减小瞬态过程中 $\Delta\omega$ 的偏差。

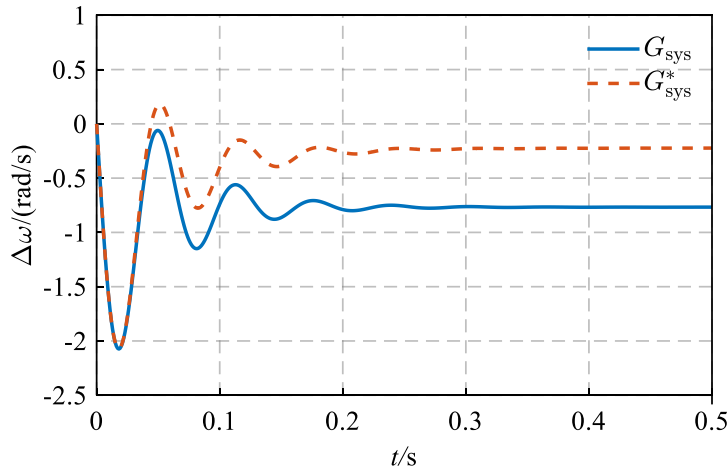


图 4-3 改进前后系统的频率响应过程

由于光储系统中各 VSG 参数取值不同导致自身机组表现出来的动态特性有所差异, 即使电力系统出现小扰动时, 其输出频率也可能产生较大的波动。因此, 针对低惯量条件下运行的光储系统, 需要评估 τ 和 T_e 取值变化时对系统稳定性的影响, 以达到选取合适参数来抑制系统的振荡功率的目的。

4.1.2 小信号状态空间模型与参数设计

为了分析光储系统的稳定性，结合式(4-4)和图 4-2，建立如式(30)所示的系统小信号状态空间模型，分析其动态响应特性。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (4-6)$$

式中：状态变量 $x = \left[\Delta\omega_1 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta\delta_1 - \frac{\Delta P_L}{K_1 + K_2} \quad \Delta P_{f1} \quad \Delta P_{f2} \right]^T$ ；输入 $u = [\Delta P_{ref1} \quad \Delta P_{ref2} \quad \Delta P_L]^T$ ；输出 $y = [\Delta\omega_1 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta P_{e1} \quad \Delta P_{e2}]^T$ ；系数矩阵 A 、 B 、 C 和 D 分别表示为：

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{K_{m1} + D_1\omega_0}{J_1\omega_0} & 0 & -\frac{K_1 T_{e1} + A_1}{J_1\omega_0 T_{e1}} & \frac{A_1}{J_1\omega_0 T_{e1}^2 K_1} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{m2} + D_2\omega_0}{J_2\omega_0} & \frac{K_1 T_{e2} + K_1 A_2 / K_2}{J_2\omega_0 T_{e2}} & 0 & \frac{A_2}{J_2\omega_0 T_{e2}^2 K_2} \\ \frac{K_2}{K_1 + K_2} & -\frac{K_2}{K_1 + K_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 & -\frac{1}{T_e} & 0 \\ 0 & 0 & -K_1 & 0 & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1\omega_0} & 0 & -\frac{K_1 + A_1/T_{e1}}{(K_1 + K_2)J_1\omega_0} \\ 0 & \frac{1}{J_2\omega_0} & -\frac{K_2 + A_2/T_{e2}}{(K_1 + K_2)J_2\omega_0} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_1}{K_1 + K_2} \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{K_1 + K_2} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0; & 0 & 0 & 0; & 0 & 0 & \frac{K_1}{K_1 + K_2}; & 0 & 0 & \frac{K_2}{K_1 + K_2} \end{bmatrix}。$$

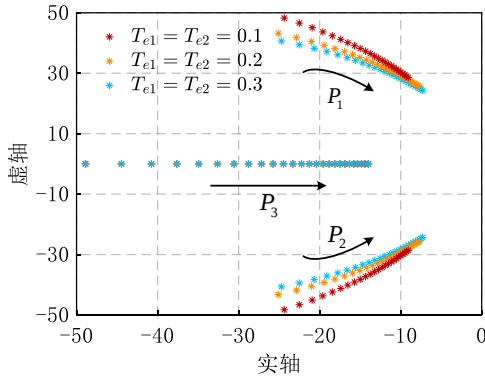
式中： ΔP_{f1} 和 ΔP_{f2} 是有功率经滤波得到的低频振荡分量，如下式所示：

$$\begin{cases} \Delta P_{f1} = \frac{T_{e1}}{T_{e1}s+1} \Delta P_{e1} \\ \Delta P_{f2} = \frac{T_{e2}}{T_{e2}s+1} \Delta P_{e2} \end{cases} \quad (4-7)$$

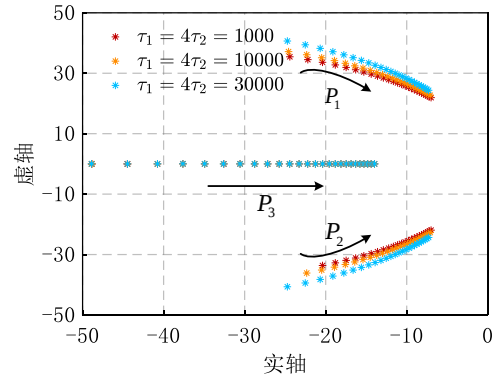
根据式(4-6)可得系统的传递函数矩阵为:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4-8)$$

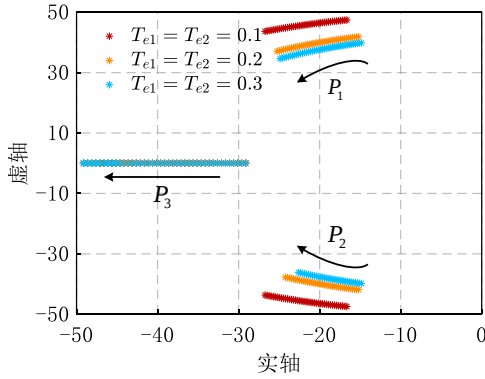
式中: I 为单位矩阵。将表 4-1 中 VSG1 和 VSG4 的参数代入系统矩阵 $G(s)$ 中并求解多项式, 可得如图 4-4 所示的传递函数根轨迹分布变化图。通过对其主导极点的特征根进行分析, 深入理解 VSG 与储能系统之间相互作用特性, 并优化补偿电磁功率新增项的参数取值。



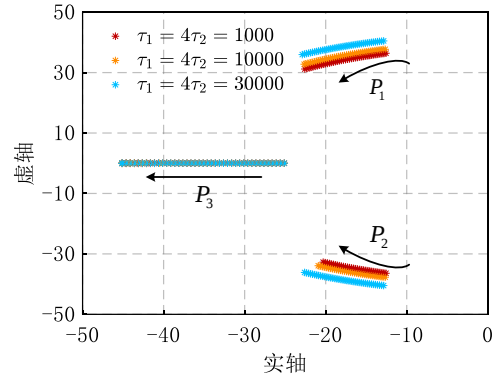
a. J 增大 T_e 不同时极点分布



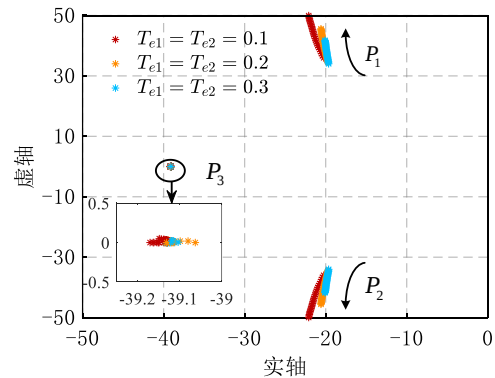
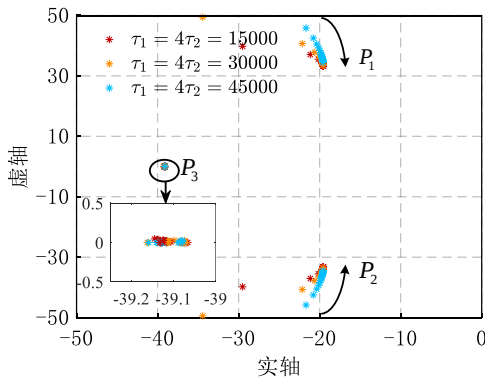
b. J 增大 τ 不同时极点分布



c. D 增大 T_e 不同时极点分布



d. D 增大 τ 不同时极点分布



e. T_e 增大 τ 不同时极点分布f. τ 增大 T_e 不同时极点分布

图 4-4 光储系统的根轨迹分布变化

图 4-4.a 和图 4-4.b 中随着 J 增加, 系统主导极点 P_1 、 P_2 和 P_3 从原来的位置逐渐靠近虚轴, 减缓系统的暂态过程, 使得系统的调节时间变长。由此通过增大 τ 或减少 T_e 达到减弱 J 过大致使系统稳定性较低的效果。由图 4-4.c 和图 4-4.d 可知, 随着 D 增加, 系统主导极点 P_1 、 P_2 和 P_3 逐渐远离虚轴, 系统阻尼变大, 调节时间变短, 提高系统的稳定性。由此通过增大 τ 或减少 T_e 可达到减弱 D 过小致使系统稳定性较低的效果。通过上述分析可知, 光储系统同时增加 τ 和减少 T_e 能够增强系统整体的阻尼特性, 实现更佳的阻尼效果。

根据图 4-4.e 可知, 随着 T_e 从 0.02 增大到 1, 光储系统的主导极点 P_1 和 P_2 逐渐向实轴靠近, 在此过程中 τ 的增加使得 P_1 和 P_2 更加靠近虚轴, 而 P_3 并不会随着 T_e 的变化而发生较大改变。分析图 4-4.f 可知, 系统的主导极点 P_1 、 P_2 随着 τ 从 6000 增大到 60000 而逐渐远离实轴, 在此过程中 T_e 的减少使得 P_1 和 P_2 更加远离虚轴, P_3 几乎没有变化。这意味着较大 τ 和较小 T_e 有利于加快系统的响应时间和调频速度。但 τ 的取值不宜过大, 否则会加剧系统有功振荡幅值。虽然为保证暂态补偿环节响应及时性, T_e 应该取值较小。但过小的 T_e 会使得 P_{comp} 成与机组自身角频率偏差之间近似成比例关系, 无法起到提前感知超调的发生, 降低改进型 VSG 控制效果。

4.2 仿真验证

4.2.1 基于改进型 VSG 的仿真验证

为了验证改进型 VSG 控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 平台搭建如图 4-1 所示的仿真模型。光伏机组使用电导增量法进行最大功率点追踪; 光伏阵列在光照强度为 1000 W/m^2 , 温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准状态下运行。主要仿真参数取值如表 4-1 中的 VSG1 和 VSG4 以及表 4-2 所示。VSG4 表示储能系统的参数取值。其中, 图 4-5 为光伏机组输出功率变化前后各个机组自身频率和输出功率的仿真。光伏机组的光照强度在 0.5 s 由原来的 1000 W/m^2 突变到 1200 W/m^2 , 然后在 1 s 时恢复到 1000 W/m^2 。图 4-6 为负载突变前后各个机组自身频率和输出

功率的仿真。其中，有功负载在 0.4 s 时由 16 kW 增加到 24 kW，在 1 s 时恢复到 16 kW。

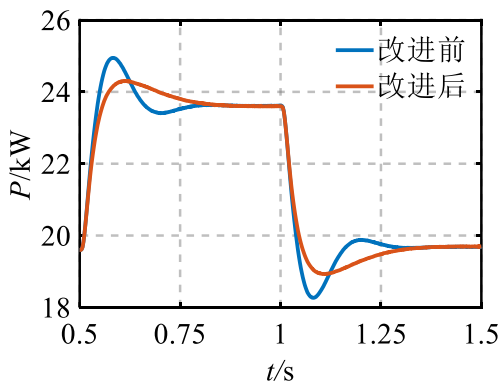
表 4-1 VSG 的重要参数

参数	VSG1	VSG2	VSG3	VSG4
$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.1	0.075	0.05	0.025
$D / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad})$	20	15	10	5
$K_m / (\text{W} \cdot \text{s} / \text{rad})$	6000	4500	3000	1500
X / Ω	3.14	6.28	9.42	12.56
$P_{\text{ref}} / \text{kW}$	19	14.25	9.5	\
τ	30000	22500	15000	7500
T_e / s	0.25	0.25	0.25	0.25

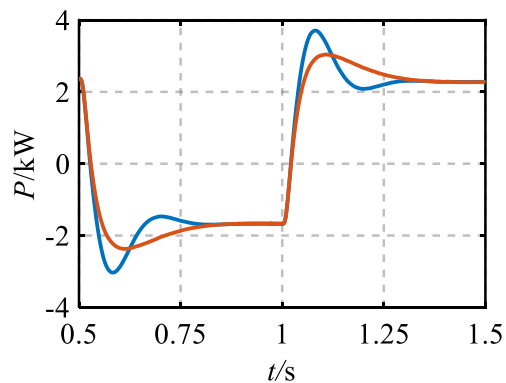
表 4-2 光储系统的重要参数

参数	取值	参数	取值
f_0 / Hz	50	R_L / Ω	0.5
E / V	220	L_f / mH	2
P_L / kW	40	$C_f / \mu\text{F}$	50

由图 4-5.a 和图 4-5.b 可知，当光伏机组输出功率变化时，改进后控制策略能够有效抑制光伏机组和储能系统的频率波动峰值。采用传统控制策略下的光伏机组最大功率偏差达到 1.34 kW，而改进后控制策略的最大输出功率偏差为 0.68 kW，功率超调量由原来的 34.3% 下降到 17.3%。此时，传统控制策略下的储能系统最大功率偏差量达到 1.33 kW。而采用本文所提控制策略的最大输出功率偏差得到显著地抑制，最大功率偏差量为 0.69 kW，功率超调量由原来的 34.0% 下降到 17.8%。根据图 4-5.c 和图 4-5.d，对比改进前后的光伏机组和储能系统频率波动可明显看出，负载变化对于改进前后光伏机组的频率波动峰值的影响不大，但储能系统的最大频率偏差量为由原本的 0.38 Hz 降低到 0.35 Hz，提升了抑制频率波动的效果。



a. 光伏机组有功输出波形



b. 储能系统有功输出波形

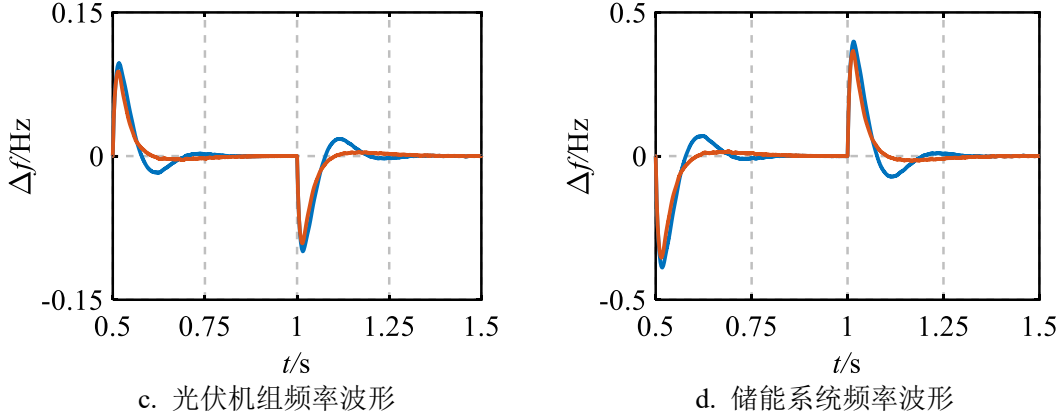
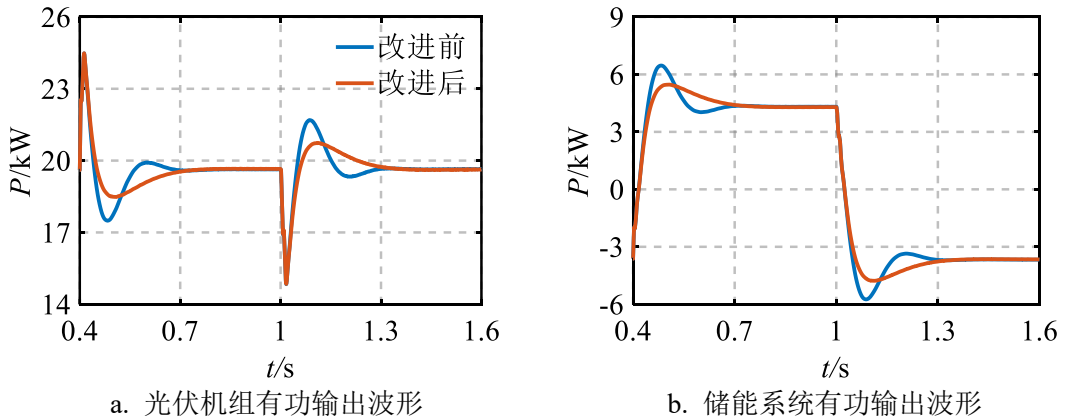


图 4-5 光伏机组输出功率变化时系统的有功/频率波形

根据图 4-6.a 和图 4-6.b 可知, 当负载变化时, 两种控制策略对光伏机组的频率波动峰值影响近似, 但改进型控制策略有效避免光伏机组的输出有功功率振荡, 使其能够平稳恢复。采用传统控制策略下的储能系统最大功率偏差量达到 2.1 kW。而采用改进后控制策略最大功率偏差量为 0.8 kW, 功率超调量由原来的 26.3%降低到 9.9%, 有效地抑制储能系统的输出有功振荡。由图 4-6.c 和图 4-6.d 可知, 当负载变化时, 改进前后光伏机组的频率波动峰值变化不大, 但对于储能系统而言, 最大频率偏差由原本的 0.52 Hz 降低到 0.47 Hz, 抑制频率波动效果得到提升。

由图 4-5 和图 4-6 可看出, 无论光伏机组或者储能系统, 改进型 VSG 相比传统 VSG 控制策略故障持续时间都得以缩短, 仅仅经过一个波峰便可恢复正常运行状态。可见, 改进型 VSG 控制策略能够加快系统恢复稳定时间, 增强电力系统抗扰动能力。此外, 在负载突增时, 储能系统的频率偏差 $\Delta\omega$ 为正值, 是因为其需要释放功率来弥补由负载突增所导致的有功缺额, 自身功角 $\Delta\delta_B > 0$ 。同理可知负载骤减时储能系统的功角变化情况。



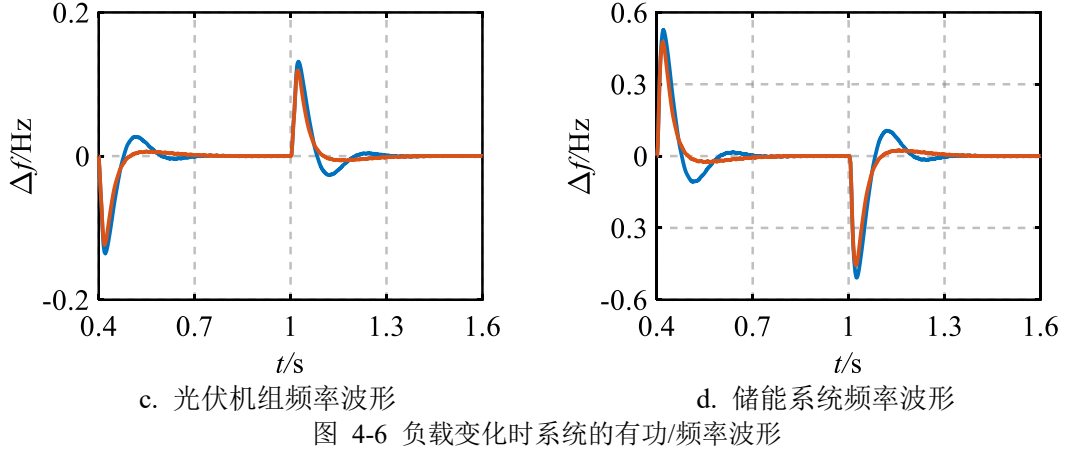


图 4-7 为当负载变化时,改进前后系统 PCC 处的频率波动。虽然改进后抑制系统的频率波动峰值的效果不够明显,但采用本文所提方法使得光伏机组和储能系统的输出功率由原本的振荡转变为平缓恢复,故障持续时间得以缩短,与理论相符合。

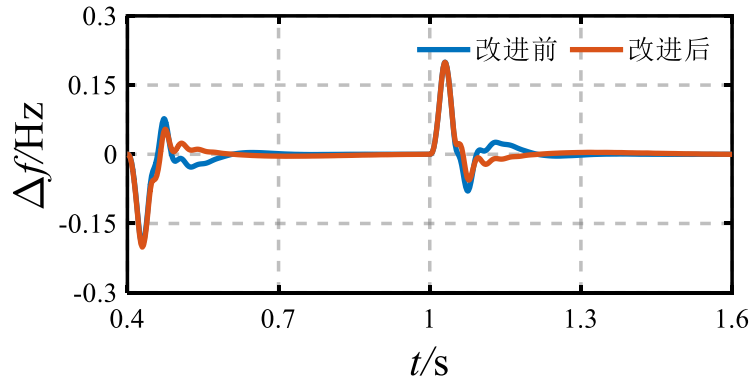


图 4-8 为光伏单元和储能系统的电流波形图。根据图 4-8,改进的控制策略有效地降低了负载变化期间光伏机组和储能系统输出电流的波动幅度,确保了输出电流的平稳过渡。具体而言,在图 4-8.a 和图 4-8.b 中,光伏机组的输出电流幅值稳定在约 42.2 A。而在图 4-8.c 和图 4-8.d 中,储能系统的输出电流在有功功率突增阶段保持稳定在 9.5 A,在骤降阶段保持稳定为 8.1 A。此外,尽管这两种控制策略对受到干扰时光伏机组的最大电流幅度的影响很小,但减小储能系统的最大电流振幅:在有功功率突增阶段从 14.1 A 减小到 11.8 A,在骤降阶段从 12.6 A 减小至 10.6 A。

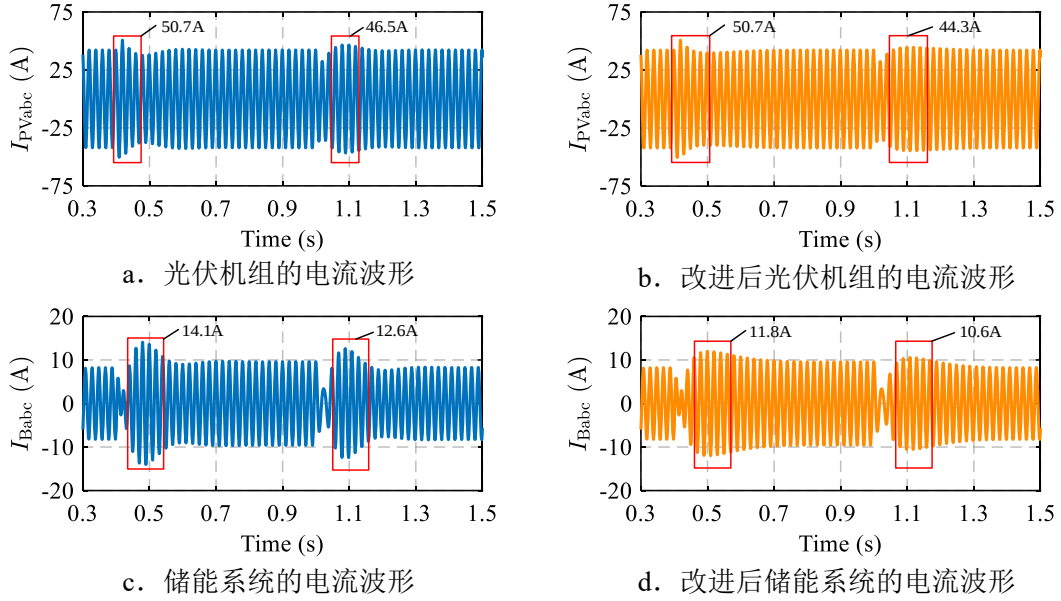


图 4-8 光伏发电系统和储能系统的电流波形图

图 4-9 为系统的补偿电磁功率变化波形。在 0.46 s 的有功功率突增阶段，光伏机组的最大补偿功率达到 1980 W，而储能系统的最大补偿电力为 1962 W。而在 1.06 秒的有功功率下降阶段，光伏发电机组的最大赔偿功率为 1959 W，储能系统的最大补偿功率为 1940 W。此外，可清楚地看到，光伏机组和储能系统的补偿功率的数值之和近似为零。

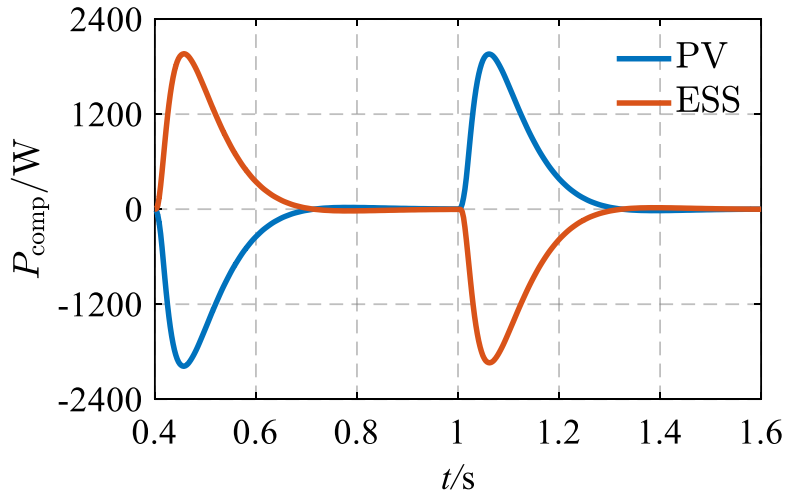


图 4-9 补偿电磁功率变化波形

4.2.2 多机条件下光储系统的仿真验证

为了验证改进型 VSG 控制策略对多机条件下光储系统输出特性的具体影响，在如图 4-10 所示光储系统的基础上再并入 VSG2 和 VSG3，详细参数设置如表 4-1 所示。负载在 0.6 s 时由 40 kW 突变到 48 kW，在 1.2 s 时恢复到 40 kW，改进前后系统的输出功率和自身频率变化的仿真如图 4-10 和图 4-11 所示。

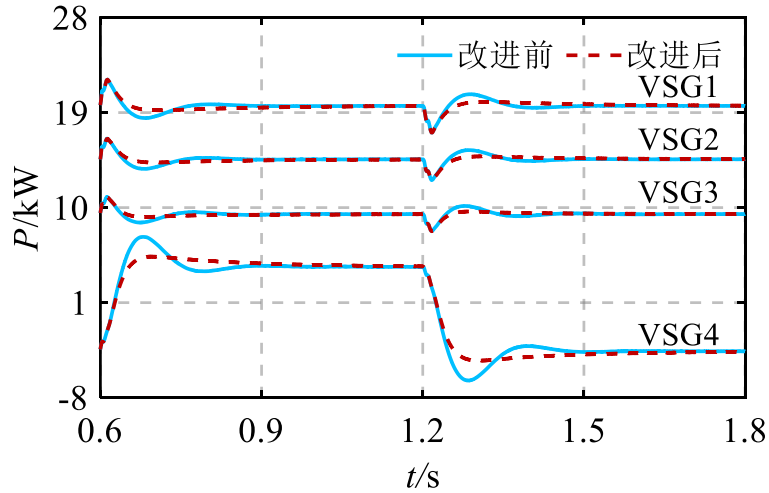
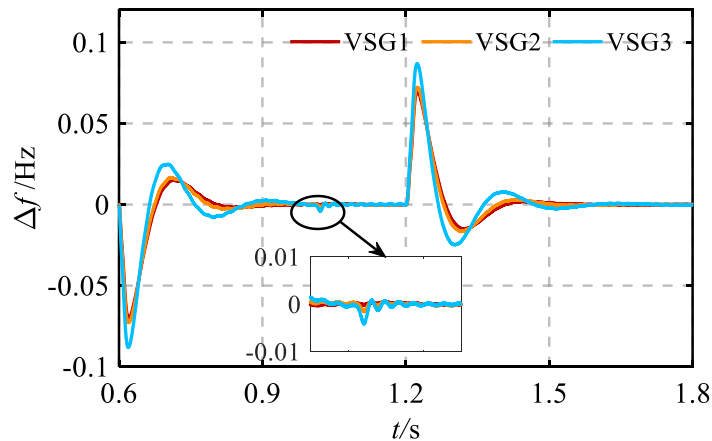
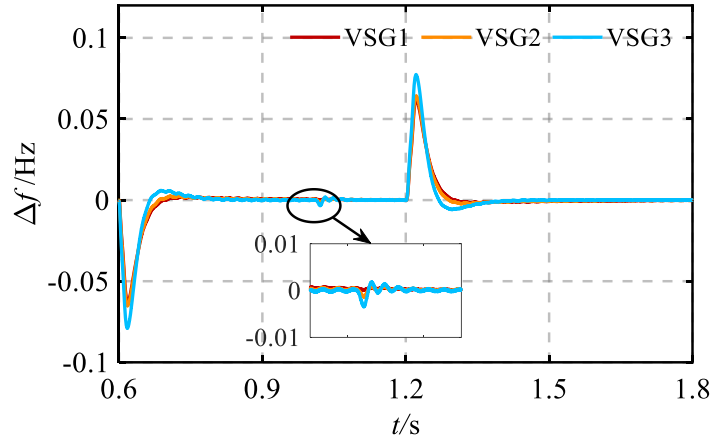


图 4-10 多机光储系统的有功功率波形

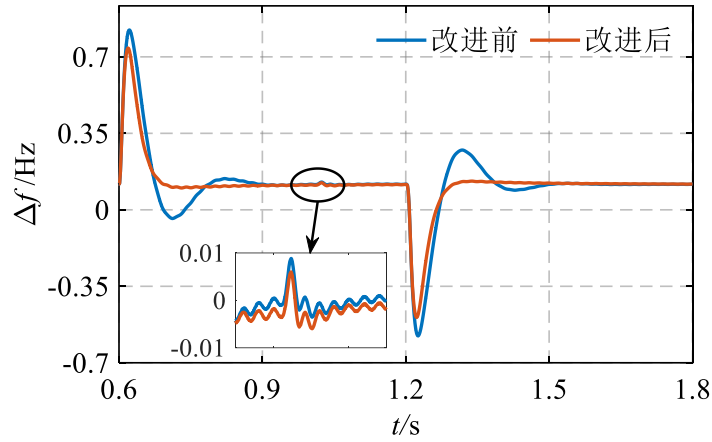
根据图 4-10 可知，当负载变化时，两种控制策略抑制光伏机组和储能系统的最大输出功率偏差效果与双机光储系统的情况下相似。在图 4-11.a、图 4-11.b 和图 4-11.c 中，受扰动时两种控制策略对光伏机组的频率波动峰值影响不大，但是储能系统的最大频率偏差量为由 0.61 Hz 降低到 0.52 Hz，自身频率恢复稳定状态的速度更快。通过比较双机和多机光储系统中的储能系统频率变化可明显看出，多机条件下的储能系统的最大频率偏差量更大，这进一步验证了接入设备台数增加会导致电力系统稳定性下降。值得说明的是，仔细观察图 4-11 可以发现，在仿真运行在 1 s 时各个机组自身频率发生轻微波动，这是因为在调整输出功率时，VSG3 的光伏机组控制模块判断光伏列阵并未工作在最大工作点处，需要重新追踪最大工作点，这导致光伏机组的输出功率发生变化，从而引起频率波动。



a. 改进前光伏机组的频率波形



b. 改进后光伏机组的频率波形



c. 储能系统的频率波形

图 4-11 多机光储系统的频率波形

由式(3-20)可知,若各台 VSG 的参数取值成比例关系,则负载突变时各个机组自身角频率的动态响应过程近似。但实际中复杂工况下各种因素对电力系统的影响使得光伏机组的频率波动与理论存在差异。储能系统由于需要快速释放能量来弥补有功缺额,导致其频率需要迅速变化来尽可能的改变功角偏差,从而在短时间内输出更多的有功功率,但这使得频率波动过大,加剧系统输出有功振荡。而采用改进型控制策略可在削弱电力系统频率波动幅值的同时提高系统的稳态恢复能力。

4.3 本章小结

基于 VSG 自身角频率能够快速响应外界负载突变,本章提出了引入补偿电磁功率的 VSG 控制策略。该策略在有功振荡的过程中提前感知超调的发生并对暂态电磁功率进行补偿,达到抑制频率波动和有功振荡的效果。此外,随着 VSG 接入台数增加,单台机组频率波动对整个系统的出力程度不断下降,电力系统更容易受外界影响而发生扰动。所以为了实现经济最大化,在保证系统稳定运行的前提下,尽可能多接入 VSG 也是极其重要的研究方向之一。

第5章 弱电网下基于 ANFIS 的 VSG 控制策略

为了确保光储系统在弱电网下能够稳定运行，本章提出一种基于 ANFIS 的 VSG 控制策略。首先研究 VSG 工作特性并对其进行建模，然后分析系统处于不同短路比（Short circuit ratio, SCR）下的稳定性。在约束虚拟惯量和阻尼系数取值的前提下，提出基于自适应神经模糊推理系统（Adaptive neural fuzzy inference system, ANFIS）的 VSG 控制策略。

5.1 ANFIS 控制策略的优势

传统 VSG 由于参数固定的局限性，导致系统难以满足弱电网的接入需求。因此，如何提高 VSG 参数的自适应调节能力已成为确保系统稳定运行的重要问题。与参数固定的 VSG 控制相比，参数自适应的 VSG 控制提高了系统的响应速度，有效地减小了 VSG 频率变化和功率超调量^[39,58,59]。然而，仅利用函数来实现调节参数自适应变化，无法满足系统在弱电网下的调频需求。文献[47]使用 RBF 神经网络设计出一种自适应 VSG 的控制策略。该策略利用 RBF 神经网络良好的非线性函数逼近的能力，有效克服固定 J 的不足之处，但是否适用于弱电网下的系统仍有待商榷。文献[60]提出一种基于模糊算法的自适应 VSG 控制策略，但该策略的模糊控制规则依靠经验而来。ANFIS 是一种基于模糊神经网络的特定实现，它结合了模糊逻辑控制和神经网络的优点，具有较强的非线性建模和学习能力^[61,62]。因此，本文提出基于 ANFIS 的 VSG 控制策略，以实现光储系统的 J 和 D 在弱电网下的灵活调节。

5.2 弱电网下 VSG 的稳定判据

5.2.1 弱电网下 VSG 的小信号电路模型

分析弱电网下 VSG 与电网的交互影响以及其稳定性有两种主要方法：状态空间法和基于阻抗的方法。然而，前者需要逆变器的硬件和控制设计的相关知识，使用该方法计算逆变器弱电网下输出阻抗比较困难。相比之下，使用可以测量，验证阻抗的方法可以更加便捷地进行 VSG 在弱电网下的稳定性分析。该方法的原理是根据电源和负载部分将系统划分为两个独立的子系统，然后将奈奎斯特（Nyquist）判据应用于两个子系统的阻抗比^[63]。本章研究弱电网下电压型 VSG，选用 LC 型

滤波器，并且当系统发生小信号扰动时，使用 dq 轴线性化的方法对其进行建模，获得如图 5-1 所示的 VSG 小信号电路模型。

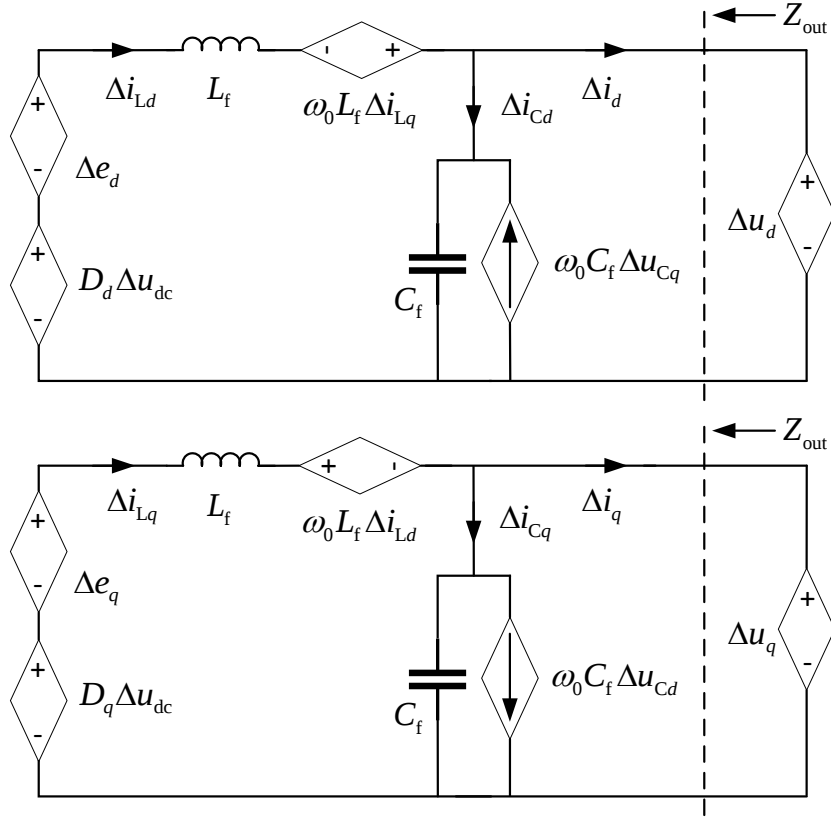


图 5-1 VSG 的小信号电路模型

在不考虑直流侧电压扰动 Δu_{dc} 的前提下， Δe_d 和 Δe_q 可近似等效为 VSG 输出电压的直交轴扰动量。 Δi_{Ld} 和 Δi_{Lq} 表示滤波电感的电流的直交轴扰动量； Δu_{Cd} 、 Δu_{Cq} 、 Δi_{Cd} 和 Δi_{Cq} 为滤波电容的电压电流的直交轴扰动量。 Δu_{Cd} 、 Δu_{Cq} 、 Δi_{Cd} 和 Δi_{Cq} 分别表示并网电压电流的直交轴扰动量。在图 5-1 的基础上，建立在 dq 坐标系下 VSG 输出阻抗的小信号模型，其建模原理如下：在逆变器与 PCC 处注入小信号的谐波电压扰动，该扰动会在逆变器的输出电流中产生谐波电流。通过对谐波电压和电流的幅值与相位进行分析，推导出 VSG 输出阻抗的频率特性^[64]。由于本章只研究 VSG 的交流侧，将直流扰动量赋值为 0，可得系统在 dq 坐标系下的表达式为：

$$\begin{cases} \Delta D_d u_{dc} + D_d \Delta u_{dc} = \Delta u_d - \omega_0 L_f \Delta i_{Lq} + s L_f \Delta i_{Ld} \\ \Delta D_q u_{dc} + D_q \Delta u_{dc} = \Delta u_q + \omega_0 L_f \Delta i_{Ld} + s L_f \Delta i_{Lq} \\ \Delta i_{Ld} = \Delta i_d - \omega_0 C_f \Delta u_q + s C_f \Delta u_d \\ \Delta i_{Lq} = \Delta i_q + \omega_0 C_f \Delta u_d + s C_f \Delta u_q \end{cases} \quad (5-1)$$

由上述公式可推导出 VSG 输出电压与 PCC 点电压电流的小信号传递函数的矩阵形式为：

$$u_{dc} \begin{pmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{pmatrix} + \Delta u_{dc} \begin{pmatrix} D_d \\ D_q \end{pmatrix} = F_1 \begin{pmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{pmatrix} + F_2 \begin{pmatrix} \Delta i_{Ld} \\ \Delta i_{Lq} \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

其中：

$$\begin{cases} F_1 = \begin{pmatrix} sL_f & -\omega_n L_f \\ \omega_0 L_f & sL_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sC_f & -\omega_0 C_f \\ \omega_0 C_f & sC_f \end{pmatrix} + I \\ F_2 = \begin{pmatrix} sL_f & -\omega_0 L_f \\ \omega_0 L_f & sL_f \end{pmatrix}^{-1} \end{cases} \quad (5-3)$$

式中： I 为二阶单位矩阵。在 dq 旋转坐标系下，稳态工作时的并网逆变器输出有功功率额定值和无功功率额定值分别为 P 和 Q ，VSG 输出电压分别为 e_d 和 e_q ，PCC 点处电压和电流分别为 u_d 、 u_q 、 i_d 和 i_q 。借鉴文献[65]的方法，在上述稳态工作点注入小信号扰动，消去静态工作点处的稳态量，忽略电网电压相位的扰动并舍掉二阶小信号扰动项，可得并网逆变器输出功率与输出电压电流的小信号传递函数的矩阵形式和 VSG 输出电压与 PCC 点电压的扰动关系的矩阵形式，如式(5-4)和(5-5)。

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = F_{PQ}^i \begin{pmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{pmatrix} + F_{PQ}^u \begin{pmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta e_d \\ \Delta e_q \end{pmatrix} = F_3 \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E_m \end{pmatrix} + F_4 \begin{pmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

式中：矩阵 F_{PQ}^i 和 F_{PQ}^u 为用于功率计算的小信号传递函数矩阵，其表达式如式(5-6)所示。

$$\begin{cases} F_{PQ}^i = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} u_d & u_q \\ u_q & -u_d \end{pmatrix} \\ F_{PQ}^u = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} i_d & i_q \\ -i_q & i_d \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5-6)$$

矩阵 F_3 ， F_4 为 VSG 输出电压与 PCC 点电压的扰动关系的传递函数矩阵，其表达式如式(5-7)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_3 = \begin{pmatrix} -E_m \sin \delta & \cos \delta \\ E_m \cos \delta & \sin \delta \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}_4 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{E_m \sin \delta}{U_d} \\ 0 & \frac{-E_m \cos \delta}{U_d} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5-7)$$

其中： δ 为 VSG 输出内电势与电网电压的相位差角， θ 为 VSG 输出电压相位， E_m 为 VSG 输出电压幅值。此外，由于直流扰动量 Δu_{dc} 近似为 0，可得：

$$\begin{pmatrix} \Delta e_d \\ \Delta e_q \end{pmatrix} \approx u_{dc} \begin{pmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{pmatrix} \quad (5-8)$$

结合上述公式，对 VSG 控制引入小扰动，消去静态点的稳态量，得到 dq 坐标下 VSG 输出相角与有功功率的小信号传递函数的矩阵形式如式(5-9)所示。

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E_m \end{pmatrix} = -\mathbf{F}_{PQ} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (5-9)$$

由于 VSG 并网系统在 d 轴分量近似为电压幅值，可得矩阵 $\mathbf{F}_{PQ}$ 的表达式如式(5-10)所示。

$$\mathbf{F}_{PQ} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{Js^2 + D_p s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Ks + K_q} \end{pmatrix} \quad (5-10)$$

综上推导得到各个传递函数方阵具体表达式以及其物理含义，由此得到图 5-2 所给出了 VSG 输出阻抗的小信号等效模型。

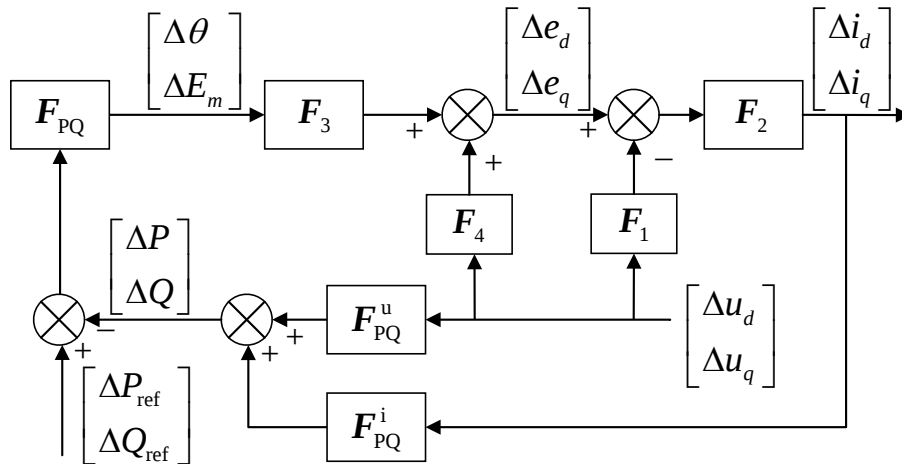


图 5-2 VSG 输出阻抗的小信号模型

图 5-2 中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_{PQ}^u 、 F_{PQ}^i 以及 F_{PQ} 均为 2*2 阶传递函数矩阵； F_1 和 F_2 为 VSG 输出电压和 PCC 点电压电流的小信号传递函数矩阵； F_3 和 F_4 为用于计算 VSG 输出电压的小信号传递函数矩阵； F_{PQ}^u 和 F_{PQ}^i 为用于功率计算的小信号传递函数矩阵； F_{PQ} 表示 VSG 功率环的传递函数矩阵^[46]。 $\Delta\theta$ 和 ΔE_m 分别表示 VSG 的相位扰动和幅值扰动。 ΔP 、 ΔQ 、 ΔP_{ref} 和 ΔQ_{ref} 表示 VSG 输出功率及其参考值的扰动量。根据逆变器输出阻抗的定义可得 Z_{out} 为：

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} = -Z_{out} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

由 VSG 输出阻抗的小信号模型得出逆变器交流侧的输出阻抗 Z_{out} 如式(5-12)所示：

$$Z_{out} = \frac{F_2 F_3 F_{PQ} F_{PQ}^i + I}{F_2 (F_3 F_{PQ} F_{PQ}^u + F_1 - F_4)} \quad (5-12)$$

通过分析回率矩阵 L 的特征根是否满足 Nyquist 判据，可评估在弱电网下 PCC 点存在谐波时 VSG 并网系统的稳定性。 L 的表达式为：

$$L = Z_g / Z_{out} \quad (5-13)$$

式中： Z_g 为电网阻抗。对于 VSG 并网系统的稳定性判断方法为：当 L 的两个特征根在复平面上的轨迹均不包围点 $(-1, j_0)$ 时，系统处于稳定状态。

5.2.2 VSG 的稳定性判断

电网强弱通常使用 SCR 来划分。SCR 大于 20 的电网称为强电网；而 SCR 小于 6~8 的电网称为弱电网。相较于强电网，弱电网因其网络结构中包含大量非线性负载及显著线路阻抗，呈现出高电网阻抗与低短路容量的电气特性。SCR 决定了 Z_g 的取值，进而影响 L 的大小，由此绘制出不同 SCR 下 L 特征根 λ_1 和 λ_2 的 Nyquist 曲线，如图 5-3 所示。当 SCR=7.6 时， λ_1 和 λ_2 曲线都没有包围 $(-1, j_0)$ 点，系统能够稳定运行；但随着 SCR 值逐渐减小， λ_1 曲线与虚轴的交点也逐渐向左移动。当 SCR=2.9 时， λ_2 曲线没有包围 $(-1, j_0)$ 点，而 λ_1 曲线包围 $(-1, j_0)$ 点 1 次。由此可知，随着 SCR 的越来越小， λ_1 曲线逐渐包围 $(-1, j_0)$ 点，导致系统运行不稳定。

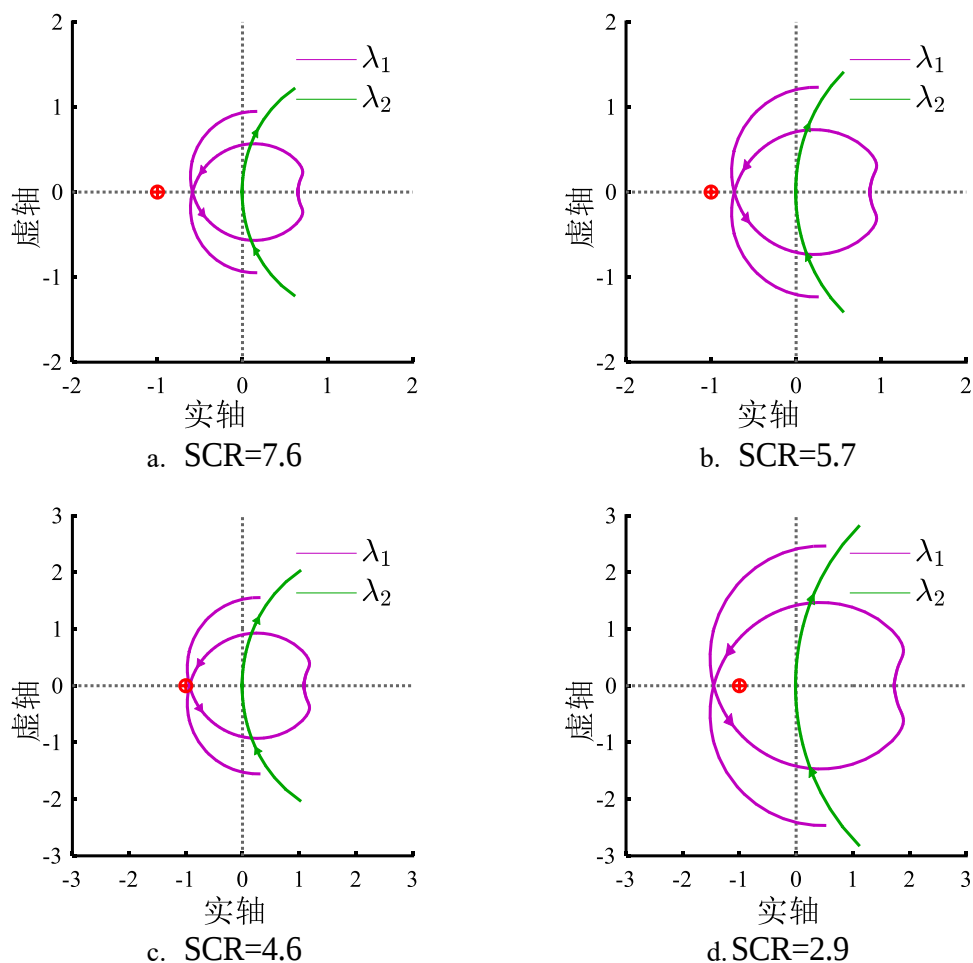


图 5-3 回率矩阵的 Nyquist 曲线

5.3 ANFIS 控制策略

5.3.1 参数自适应原理

由式(1-8)可以推导出式(5-14):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)}{J} \\ \Delta\omega = \frac{T_m - T_e - Jd\omega/dt}{D} \\ T_m = \frac{P_m}{\omega_0}, T_e = \frac{P_e}{\omega_0} \end{cases} \quad (5-14)$$

式中： T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩。根据式(5-14)可得，当 $T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)$ 不变时，角频率变化率 $d\omega/dt$ 和 J 成反比。同理，当 $T_m - T_e - Jd\omega/dt$ 不变时， D 和角频率偏差 $\Delta\omega$ 成反比。故可通过调整 J 和 D 来抑制系统频率变化，进而提高系统的稳定性。

5.3.2 ANFIS 控制结构设计

为了提高电网频率控制的精确性，本章提出了一种基于 ANFIS 的 VSG 控制策略，其工作原理是根据角频率误差及其变化率实时调节虚拟惯量和阻尼系数。ANFIS 网络结构与神经网络类似，但其本质仍是模糊控制^[65]。本文使用具有 5 层人工神经网络结构的模糊推理系统模型，其结构如图 5-4 所示。其中， J_0 和 D_0 为系统稳定时的虚拟惯量和阻尼系数。

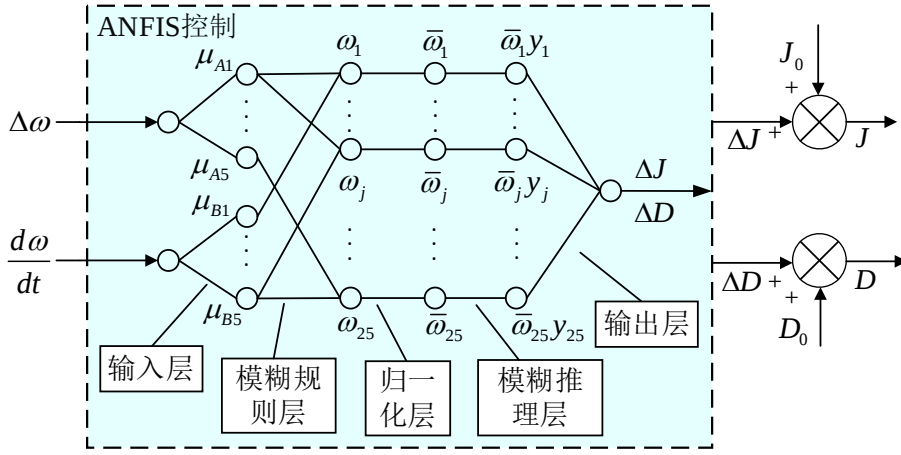


图 5-4 ANFIS 控制结构

输入层： x_1 和 x_2 为输入量，输入量通过隶属函数映射到对应的模糊集合中模糊化。每节点都对应着一种模糊语言变量值，如正大、正小、中等。其中， x 是节点 i （ i 取值为 1,2,3,4,5）的输入值。

$$\begin{cases} O_i^1 = \mu_{Ai}(x_1) \\ O_i^1 = \mu_{Bi}(x_2) \end{cases} \quad (5-15)$$

式中： μ_{Ai} 和 μ_{Bi} ——语言变量 Ai 和 Bi 的隶属函数。本文选用的隶属函数为三角形函数，其表达式为：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{c-a} & a < x \leq c \\ \frac{b-x}{b-c} & c < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (5-16)$$

式中： a 、 b 和 c ——三角形函数的三个点， c 为其峰点，这一层的参数称为前件参数。

模糊规则层：每个输出量的模糊集合数的乘积决定了该层的节点数。该层共有 25 个节点，每个节点对应一种模糊规则，其输出决定每条规则的激励度 ω_j 。其中，

j 代表 1 至 25 之间的整数。

$$O_i^2 = \omega_j = \mu_{Ai}(x_1) * \mu_{Bi}(x_2) \quad (5-17)$$

归一化层：该层节点数与上层相同，是对上层所得的规则激励度进行归一化处理。第 j 个节点输出第 j 个规则的激励度与所有规则的激励度和之比。

$$O_i^3 = \overline{\omega_j} = \frac{\omega_j}{\sum_j \omega_j} \quad (5-18)$$

模糊推理层：该层的每个节点都是一个具有节点函数的自适应节点。节点函数 y_j 是由输入量的线性组合得到的。

$$\begin{cases} y_j = c_j^0 + c_j^1 x_1 + c_j^2 x_2 \\ O_i^4 = \overline{\omega_j} y_j \end{cases} \quad (5-19)$$

式中： c_j^0 、 c_j^1 和 c_j^2 ——线性方程的参数，这一层的参数称为后件参数。

输出层：该层输出为所有输入信号的总和。如式(5-20)所示：

$$O_i^5 = \sum_j \overline{\omega_j} y_j \quad (5-20)$$

本文采用 MATLAB 中的 ANFIS 工具箱来进行训练，使用的参数更新法为混合学习算法，即更新参数同时在前向传递和反向传递中进行。具体的步骤如图 5-5 所示：

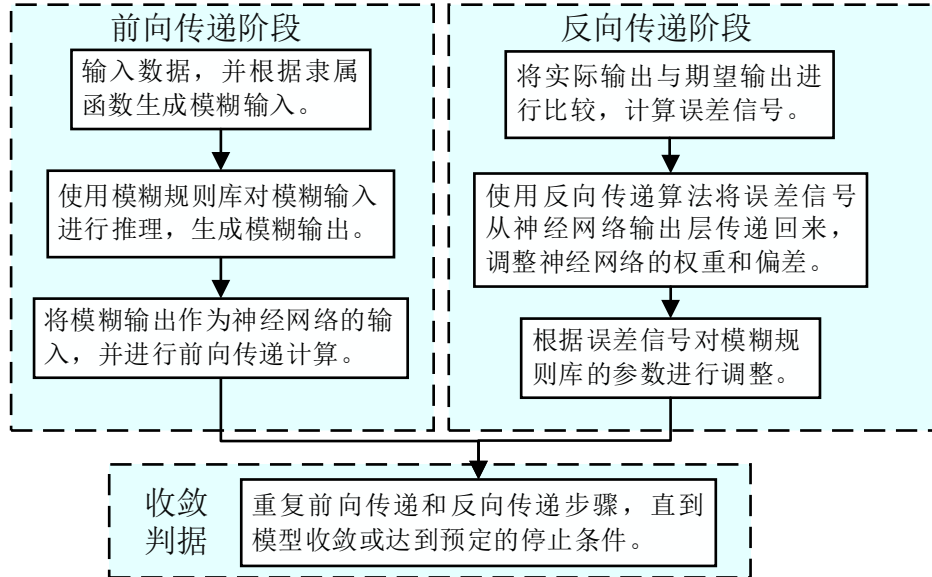
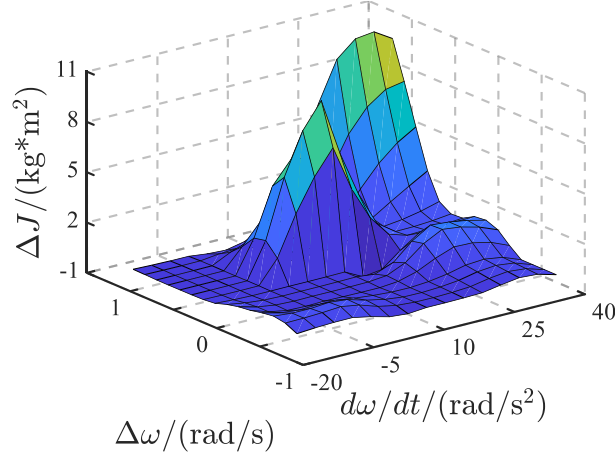


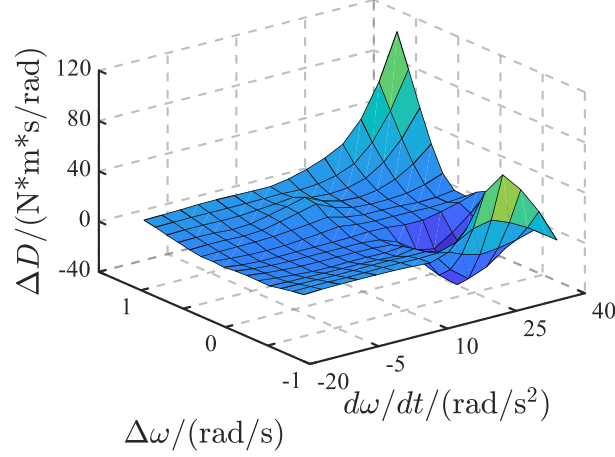
图 5-5 参数更新步骤

其中，模糊规则库是在模糊推理系统中使用的一个重要组成部分，它包含了一系列的模糊规则。通过这种方法，ANFIS 可以在训练过程中同时利用模糊推理系统的可解释性和神经网络的优化能力，更好的根据输入量角频率误差 $\Delta\omega$ 及其变化

率 $d\omega/dt$ 的模糊状态来自适应调整虚拟惯量误差 ΔJ 和阻尼系数误差 ΔD ，进而达到动态调整 J 和 D ，稳定系统频率的目的。此外，本文的训练数据来自文献[58]。训练 50 次后的 ΔJ 和 ΔD 的模糊推理输出曲面如图 5-6 所示。



a. ΔJ 的模糊推理输出曲面



b. ΔD 的模糊推理输出曲面

图 5-6 模糊推理输出曲面

5.4 仿真验证

5.4.1 三种策略下的光储系统运行仿真

为了验证不同的 VSG 控制策略对光储系统输出特性的具体影响，在 MATLAB/Simulink 平台搭建图 2-1 所示的光储系统结构。光伏发电模块使用电导增量法进行最大功率点追踪；光伏电池在光照强度为 1000 W/m^2 ，温度为 25°C 的标准状态下运行。主要仿真参数由表 5-1 和表 5-2 给出。

采用参数固定、参数自适应^[58]以及本文提出的 ANFIS 三种策略分别控制光储系统在 $\text{SCR}=5.7$ 下进行仿真。其中，ANFIS 控制策略的仿真具体过程如下：0 s 时，VSG 输出有功功率为 15 kW，采用固定 VSG 控制策略；0.5 s 时，切换成 ANFIS

控制。同时，VSG 额定有功功率突增 10 kW；在 1 s 时，VSG 额定功率下降到 18 kW。系统频率变化的仿真图如图 5-7 所示。

表 5-1 光储系统的参数取值

参数	数值	参数	数值
滤波电感 L_f /mH	3.2	滤波电容 C_f / μ F	20
固定虚拟惯量 J / ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.3	固定阻尼系数 D / ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)	8
额定输出功率/kW	20	逆变器直流侧电压/ V	800
额定频率/Hz	50	本地负载/kW	10

表 5-2 不同 SCR 下线路的参数取值

参数	数值			
SCR	4.6	5.7	6.5	7.6
阻抗电感 L_g /mH	5	4	3.5	3
阻抗电阻 R_g / Ω	0.16	0.125	0.11	0.1

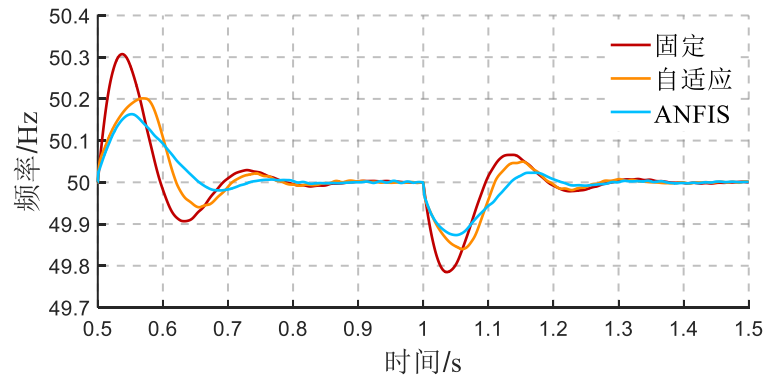


图 5-7 不同控制策略下系统频率变化

通过图 5-7 可知，无论系统输出有功功率增加或减少，ANFIS 控制策略都能将最大频率变化抑制在 0.15 Hz 左右。相比参数固定控制策略的 0.3 Hz 以及参数自适应控制策略的 0.2 Hz，ANFIS 控制策略能抑制频率振荡的效果十分显著，这提高了系统的稳定性，有效的抑制由外界扰动所带来的频率振荡。系统输出的有功功率能够更加证实这点，其仿真波形如图 5-8 所示。

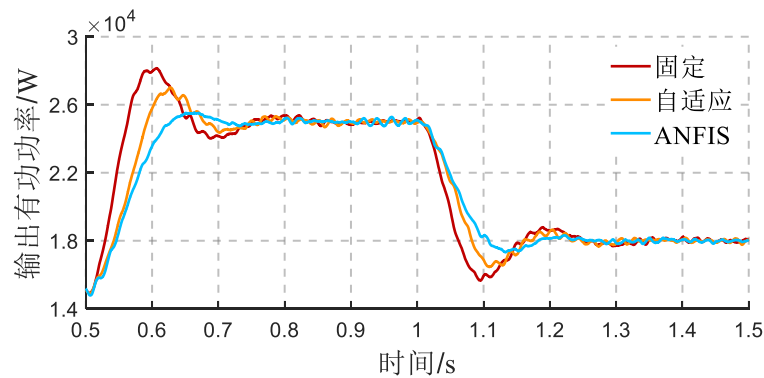


图 5-8 并网条件下系统有功功率变化

图 5-9 给出 ANFIS 控制策略下的系统调频特性仿真波形图。当系统输出功率

发生变化时,系统的 $\Delta\omega$ 和 $d\omega/dt$ 发生变化,ANFIS 控制模块开始进行调控,使系统的 J 和 D 发生改变,即通过 ANFIS 控制模块实现 J 和 D 随频率变化的灵活调控,从而达到平抑频率振荡,稳定输出功率波动的目的。

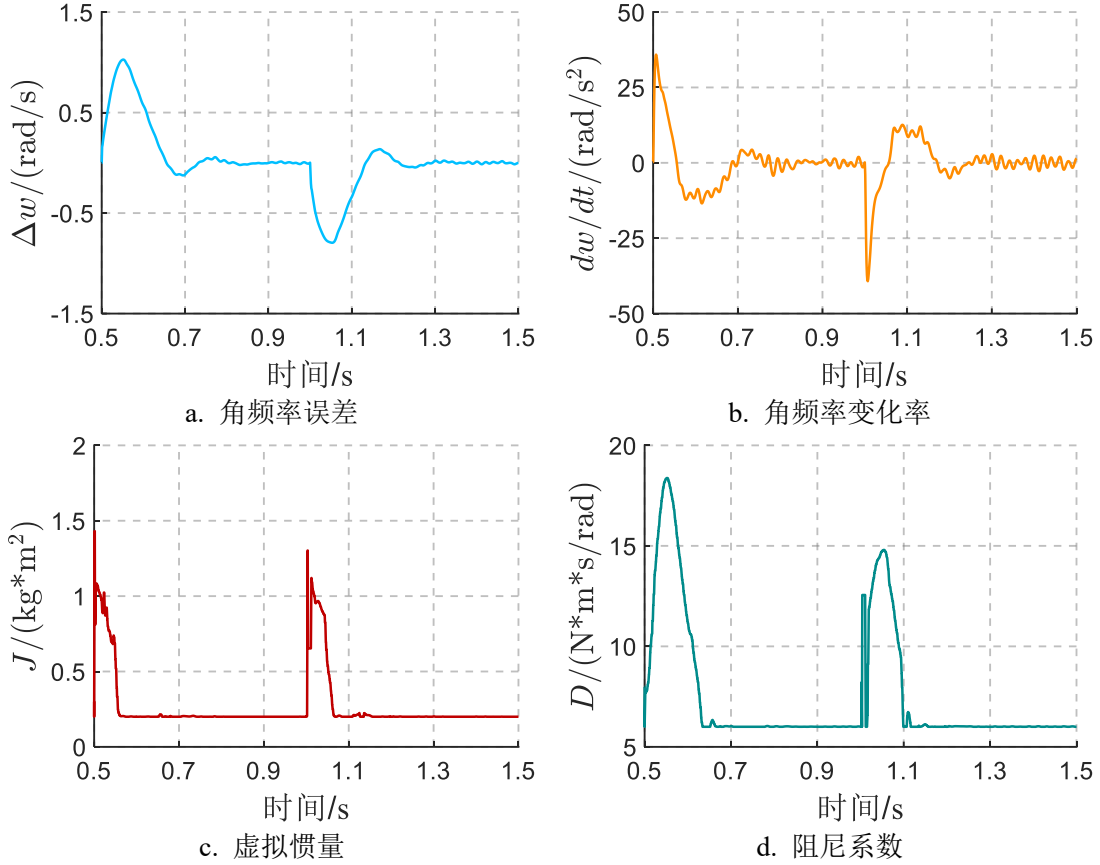
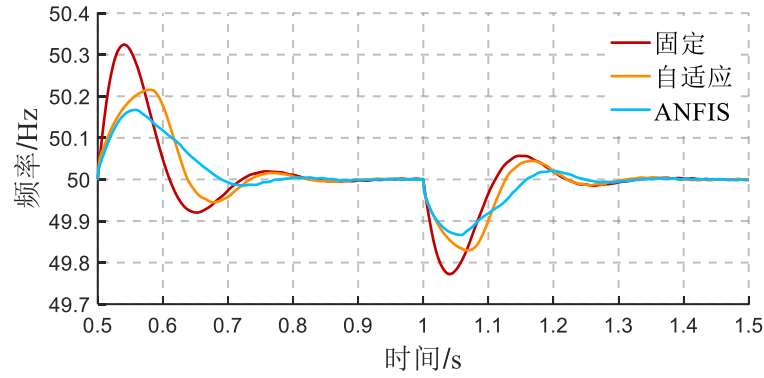


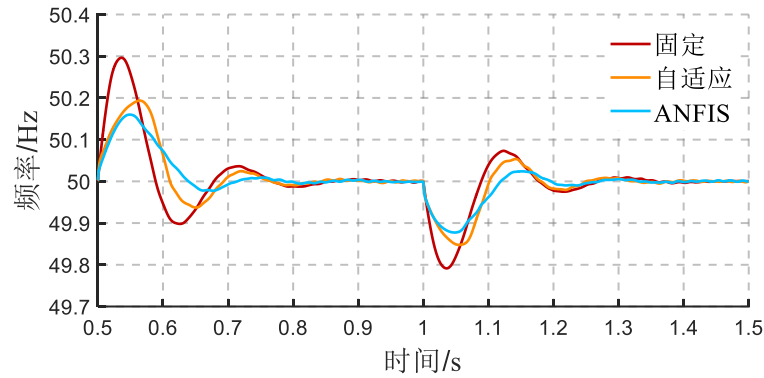
图 5-9 系统调频特性

5.4.2 不同电网强度下光储系统运行仿真

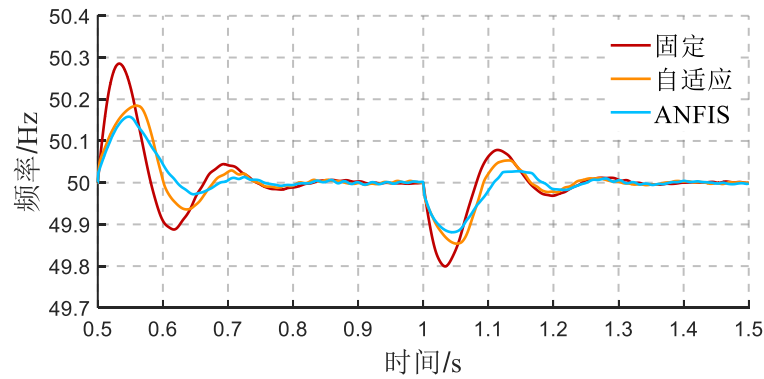
相比强电网,弱电网下光储系统表现出较差的稳定性,其抗干扰能力弱,易受到外界环境因素的影响。因此,确保弱电网下系统输出的电能质量是系统能够稳定运行的重点所在。为了研究不同电网强度下 ANFIS 的控制策略对系统稳定性的影响,本文对处于不同电网强度下光储系统进行仿真,仿真过程如并网运行过程相同,并和其他两种控制策略进行对比。图 5-10 为时间为 0.5 s 至 1.5 s,三种控制在不同电网强度下的系统频率变化图。图 5-10 可观察到,在不同电网强度下,采用 ANFIS 控制策略都能够有效地减轻系统频率振荡的情况。



a. SCR=4.6 的频率变化



b. SCR=6.5 的频率变化



c. SCR=7.6 的频率变化

图 5-10 不同电网强度的系统频率变化

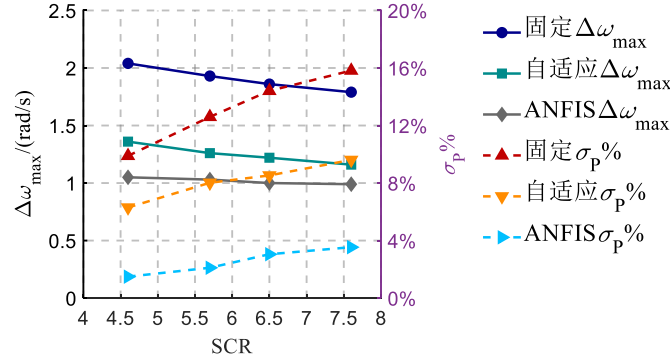
此外，对不同电网强度下功率突增阶段和功率骤降阶段的电流分别进行傅里叶分析，可得到表 5-3 所示的 THD。

表 5-3 不同电网强度下的电流 THD

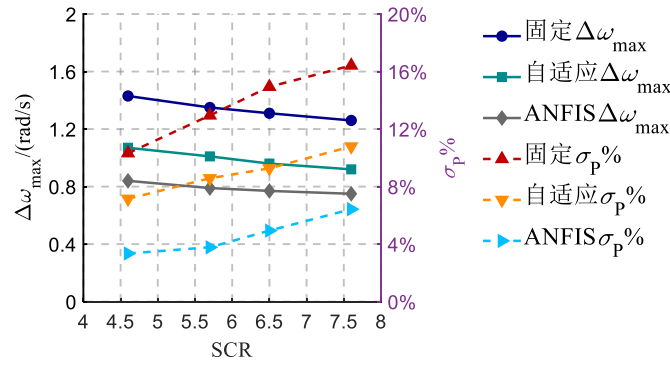
SCR	4.6	5.7	6.5	7.6
功率突增 THD/%	0.28	0.28	0.30	0.33
功率骤降 THD/%	0.36	0.40	0.43	0.45

由表 5-3 可知，不同电网强度下经过 ANFIS 控制的系统输出电流 THD 均在电网规定范围之内，满足电网对输出电能质量的要求，这表明该控制策略保证了系统在弱电网下能够稳定运行的可行性。并且随着电网强度下降，光储系统的电流 THD 随之下降，系统的稳定性反而提升。图 5-11 为三种控制在不同电网强度下的

最大角频率偏差 $\Delta\omega_{\max}$ 以及有功功率的超调量 $\sigma_p\%$ 。



a. 有功功率突增阶段



b. 有功功率骤降阶段

图 5-11 不同电网强度下的 $\Delta\omega_{\max}$ 和 $\sigma_p\%$

分析图 5-11 可知,相比其他两种控制策略,在弱电网下 ANFIS 控制策略能够对系统的 $\Delta\omega_{\max}$ 和 $\sigma_p\%$ 变化进行了更加有效的抑制,提高了逆变器应对电网阻抗变化的自适应能力,保障了系统功率稳定输出。

5.5 本章小结

本章研究了 VSG 输出阻抗对弱电网下系统稳定性的影响,并对 J 和 D 的取值进行约束,提出一种基于 ANFIS 的光储系统控制策略。该策略能够准确地捕捉系统角频率的动态特性,及时地调整控制参数,使 VSG 能够更好地解决由系统发生扰动所带来的调频问题,确保光储系统在弱电网下能稳定运行。研究结果表明:相比参数自适应控制,ANFIS 控制策略能更好的抑制系统有功振荡和频率波动,增强系统在弱电网下运行的稳定性。基于 ANFIS 控制的光储系统具有良好的抗干扰能力,改善了系统输出电能质量,提高了电网对光储系统的接纳能力。考虑到 ANFIS 控制策略特性,即利用训练数据生成合适的模糊推理输出曲面。因此,优化训练数据和模型结构都可以增强系统在弱电网下抑制系统频率振荡的能力。

第6章 总结与展望

6.1 总结

基于 VSG 的光储系统通过改进 VSG 的有功环控制以及引入 ANFIS 控制，有效提升了光储系统在复杂工况下的惯量支撑能力和稳定性，为高渗透率新能源电网的安全稳定运行提供了理论支持和技术解决方案。本文主要围绕基于 VSG 的光储系统的控制及其虚拟惯量和阻尼系数的调节问题展开研究，得出以下结论：

(1) 本文通过建立基于 VSG 的光储系统频率响应模型，分析 VSG 与储能系统协同工作的动态特性。研究结果表明增加系统等效惯量或配置储能系统能够有效减缓频率波动，为系统提供充足的一次调频响应时间，避免频率过度偏离设定值。研究结果将为设计更加稳定、可靠的光储系统提供理论支持，并为优化储能系统与 VSG 控制技术的配置提供参考依据。

(2) 为了提升基于 VSG 的光储系统在微电网中的惯量支撑效果，本文基于传统光伏机组调频原理，建立了光储系统的小信号状态空间模型，并通过根轨迹分析评估了系统频率稳定性。由此验证所提出的补偿电磁功率的 VSG 控制策略能有效地为光储系统提供惯量支撑，达到降低频率波动，抑制功率振荡的效果。

(3) 针对弱电网下传统 VSG 控制策略调节 J 和 D 方面的不足，本文建立了 VSG 输出阻抗的小信号模型，并通过 Nyquist 曲线分析了不同电网强度下系统的稳定性。结合 J 和 D 的取值范围，提出了基于 ANFIS 的 VSG 控制策略，实现了 J 和 D 的自适应调节，提升了光储系统在弱电网下的稳定性。

6.2 展望

随着全球能源结构向低碳化、清洁化转型，光伏机组在电力系统中的占比将不断增加，电网频率安全问题将变得更加复杂和关键。本文的研究为基于 VSG 的光储系统主动参与惯量支撑和关键参数的自适应调节提供了新的思路和技术手段，但仍存在若干亟待深入探讨的问题，未来研究可从以下几个方向展开：

(1) 随着风能、储能、氢能等多种分布式能源的快速发展，未来电力系统将呈现多能互补的格局。如何实现光储系统与其他能源形式的协同控制，优化系统整体的频率响应特性，将是未来研究的重点之一。

(2) 随着人工智能和大数据技术的快速发展，未来可以进一步探索这些技术

在光储系统的 VSG 控制中的应用。例如，利用深度学习算法对系统运行数据进行实时分析，预测频率波动趋势，并实现控制策略的自适应优化；或者通过大数据技术挖掘历史运行数据，构建更加精确的系统模型，为 VSG 控制提供更可靠的理论依据。

（3）随着分布式电源渗透率的不断提高，电网强度逐渐减弱，光储系统的稳定性问题将变得更加复杂。未来需要进一步研究极弱电网下光储系统的动态特性，开发适用于极端工况（如故障、孤岛运行等）的频率控制策略，确保系统在各种场景下的安全稳定运行。

总之，基于 VSG 的光储系统控制研究是一个充满挑战和机遇的领域。未来通过多学科交叉融合、技术创新和工程实践，有望进一步提升光储系统的运行性能，为构建安全、稳定、高效的现代电力系统奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 张映红. 关于能源结构转型若干问题的思考及建议[J]. 国际石油经济, 2021, 29(02):1-15.
- [2] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述(一)转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(09): 1-15.
- [3] 屈博, 刘畅, 李德智, 等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(02): 1-3+9.
- [4] QAZI A, HUSSAIN F, RAHIM N A, et al. Towards sustainable energy: A systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions[J]. IEEE Access, 2019, 7:63837-63851.
- [5] 饶宏. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 电力设备管理, 2021, 6(08):21-22.
- [6] 2021 年上半年光伏发电建设和运行情况[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(04):46.
- [7] 岳思恺, 赵维兴, 姚刚, 等. 光伏调节电网频率技术研究现状与展望[J]. 中外能源, 2022, 27(03): 12-23.
- [8] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.
- [9] 岳思恺, 赵维兴, 姚刚, 等. 光伏/光储参与调频的参数设计方法及对比分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(04): 77-89.
- [10] 丁明, 施建雄, 韩平平, 等. 光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(01): 116-123+174.
- [11] XU H, YU C, LIU C, et al. An improved virtual inertia algorithm of virtual synchronous generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2):377-386.
- [12] 杨威. 光储系统暂/稳态电压特性及并网协调控制策略研究[D]. 武汉大学, 2020.
- [13] 李晓飞. 基于虚拟电机技术的光储微网控制策略研究[D]. 陕西科技大学, 2021.
- [14] 唐国强. 光伏微电网混合储能系统控制策略研究[D]. 安徽理工大学, 2019.
- [15] 任建红. 光伏微电网混合储能控制策略研究[D]. 中北大学, 2021.
- [16] 刘芳. 基于虚拟同步机的微网逆变器控制策略研究[D]. 合肥工业大学, 2015.
- [17] 温峰. 集成储能电池的模块化多电平变流器控制策略研究[D]. 浙江工业大学, 2018.
- [18] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(03): 317-324.
- [19] CHENG F, WILLARD S, HAWKINS J, et al. Applying battery energy storage to enhance the benefits of photovoltaics[C]. 2012 IEEE Energytech, 2012:1-5.
- [20] 考虑季节特性与数据窗口的短期光伏功率预测组合模型[J]. 电力工程技术, 2025, 44(01): 183-192.
- [21] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(09): 232-237.
- [22] 王伟颖. 计及弱电网条件的光储发电系统研究[D]. 西南交通大学, 2018.
- [23] 李宁. 基于混合储能光伏发电系统长距离传输线谐波抑制策略[D]. 燕山大学, 2023.
- [24] 王鹏. 基于光伏-超级电容的构网型逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [25] 石天宇. 电池 SOC 估算与储能变流器集群协同控制[D]. 山东大学, 2023.
- [26] MATEVOSYAN J, SHARMA S, HUANG S H, et al. Proposed future ancillary services in electric reliability council of texas[C]. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015:1-6.
- [27] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- [28] 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]. 西安理工大学, 2022.
- [29] LOIX T. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control (deelname van omvormergekoppelde gedistribueerde energiebronnen aan de regeling van de netspanning)[C], 2011.
- [30] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]. 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007:1-6.
- [31] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259-1267.
- [32] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于自适应 VSG 控制策略永磁直驱风电系统研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(01): 116-124.
- [33] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于 VSG 的低电压穿越控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(02): 376-383.
- [34] NANDAKUMAR N, SYMON V A T P. Virtual synchronous generator-based frequency control

- strategy for grid-connected pv systems[C]. 2022 Second International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE), 2022:1-5.
- [35] WANG F, ZHANG L, FENG X, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5):5124-5133.
- [36] FANG J, TANG Y, LI H, et al. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4):2820-2824.
- [37] 水为涟, 王成亮, 杨庆胜, 等. 基于动态均衡原理的并联 VSG 参数匹配方法[J]. 电力电子技术, 2020, 54(08): 19-21.
- [38] 石荣亮, 兰才华, 张群英, 等. 储能 VSG 并联组网系统的有功振荡特性分析及其改进策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(05): 51-57.
- [39] CHEN X, LI Q, WANG T, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[C]. 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), 2022:214-219.
- [40] CHOOPANI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B. New transient stability and lvr improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1):527-538.
- [41] GAO W. Microgrid control strategy based on battery energy storage system-virtual synchronous generator (BESS-VSG)[C]. 2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC), 2020:1-6.
- [42] 施凯, 陈磊. 弱电网下提高 VSG 稳定性的虚拟阻抗方法 [J]. 电力科学与工程, 2021, 37(07): 26-33.
- [43] FANG C, LIU Y, HU Z, et al. Stability analysis of photovoltaic and battery energy storage systems integrated to weak grid[C]. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), 2020:480-484.
- [44] SONG Z, ZHANG J, TANG F, et al. Small signal modeling and parameter design of virtual synchronous generator to weak grid[C]. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2018:2618-2624.
- [45] 茆美琴, 丁勇, 胡健, 等. 含多光储 VSG 单元孤岛微网参数自适应功率协调与频率优化控制 [J]. 电源学报, 2020, 18(06): 20-32.
- [46] 周唱. 弱电网下 VSG 稳定性分析和控制策略研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2022.
- [47] YAO F, ZHAO J, LI X, et al. RBF neural network based virtual synchronous generator control with improved frequency stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6):4014-4024.
- [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] 李吉祥, 赵晋斌, 屈克庆, 等. 考虑 SOC 特性的微电网 VSG 运行参数边界分析[J]. 电网技术, 2018, 42(05): 1451-1457.
- [50] 孙亚帅. 光储并网虚拟同步发电机运行控制策略[D]. 燕山大学, 2021.
- [51] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical method to aggregate multi-machine sfr model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6355-6367.
- [52] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(01): 114-127.
- [53] ZHANG F, HU Z, XIE X, et al. Assessment of the effectiveness of energy storage resources in the frequency regulation of a single-area power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3373-3380.
- [54] 盛四清, 宋嘉炜, 吴坤轩, 等. 高比例新能源电力系统惯量响应与一次调频功能的匹配关系研究[J]. 现代电力, 2024, 41: 1-9.
- [55] 赵强, 张玉琼, 陈紫薇, 等. 计及储能的低惯量电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(03): 904-914.
- [56] SHIM J W, VERBIĆ G, KIM H, et al. On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation[J]. IEEE Access, 2019, 7:166353-166364.
- [57] WANG R, WANG Y, ZHANG P, et al. System modeling and robust stability region analysis for multi-inverters based on vsg[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 14(8):1-1.
- [58] CUI F, ZHANG B. Adaptive control strategy for moment of inertia and damping coefficient of virtual synchronous generator[C]. 2022 4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), 2022:193-197.
- [59] WANG Y, YANG D, FAN Z, et al. Rresearch on parameter adaptive control strategy of virtual

- synchronous generator[C]. 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 2022:292-297.
- [60] 周建萍, 胡成奕, 茅大钧, 等. 基于模糊控制的自适应虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2020, 33(01): 53-60.
- [61] 谭心, 吴林锋, 虞启辉, 等. 基于 ANFIS 的太阳能-空气源热泵供暖系统温度控制研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(02): 16-22.
- [62] JANG J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3):665-685.
- [63] GUO J, CHEN Y, WANG L, et al. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different DC-link voltage controllers under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10):11397-11408.
- [64] 韩刚, 蔡旭. 虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):116-122.
- [65] 金爱娟, 邵飞旋, 严紫光. 基于自适应模糊神经网络的感应电机矢量控制[J]. 电子科技, 2022, 35(09):65-73.

攻读学位期间取得的科研成果

- [1] 吴宏伟, 汪石农, 葛愿, 等. 弱电网下基于 ANFIS 的光储 VSG 控制策略. (已录用)
- [2] WANG S, WU H, GE Y, et al. A series resistance extraction method for health evaluation of photovoltaic modules[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12.
- [3] 王传志, 吴宏伟, 汪石农. 灰色关联分析与 FCM 融合的光伏阵列状态评估[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1-10.
- [4] 杨海挺, 吴宏伟, 汪石农. 复杂工况下光伏多峰 MPPT 研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1-8.

致 谢

在完成本篇论文的过程中，我深感自己并非孤军作战，而是得到了许多人的支持与帮助。在此，我谨向所有给予我关心、指导与帮助的人们表示衷心的感谢。

首先，我要特别感谢我的指导教师，汪石农副教授。您在整个研究过程中给予了我耐心的指导和无私的帮助。您的严谨治学态度和深厚的专业知识让我受益匪浅。在我选择研究方向和制定研究计划时，您总是耐心倾听并给予我宝贵的建议，使我能够明确研究目标并有效推进。在论文写作的每个阶段，您都给予我细致的反馈，帮助我不断改进和完善。感谢您对我学术成长的悉心指导。

其次，我要感谢我的同学和朋友们。与您们的讨论与交流，让我在研究过程中获得了许多新的视角和灵感。无论是在实验室的共同学习，还是在面对挑战时的相互鼓励，您们的陪伴让我倍感温暖。在项目实施过程中，我们一起克服了许多困难，分享了许多快乐。每一个成功的瞬间都凝聚了我们共同的努力与汗水。

此外，我还要感谢实验室的所有成员，感谢你们在研究中提供的支持与合作。大家在实验和数据分析中互相帮助、互相学习，形成了良好的团队氛围。正是这种协作精神，让我们的研究工作得以顺利进行。在此过程中，您们的建议与意见也让我更加深入地理解了相关知识，提升了我的研究能力。

最后，我要感谢我的家人。您们始终是我坚强的后盾。在我遇到困难和挑战时，您们给予我无条件的支持与鼓励，帮助我保持积极向上的态度。您们的理解和关爱是我不断前行的动力，正是因为有了您们的支持，我才能够安心投入到学习和研究中。

衷心感谢每一位在我论文写作过程中给予关心和支持的师长、同窗与挚友。正是得益于您们的悉心指导与无私帮助，我才能顺利完成这篇论文。希望在未来的学习和研究中，我能继续得到大家的指教与帮助，共同迎接更大的挑战与机遇。