

编号		
所属学科	K	动力与电气工程

B. 自然科学类

陕西省教育厅专项科研计划项目 申 请 书

项目名称：接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度研究

项目负责人：雷宇

所在单位：西安电力高等专科学校

申请日期：2025-09-01

陕西省教育厅

二零一六年制

研究项目	名称	接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度研究						
	所属学科	K	动力与电气工程					
	申请金额	2.0000	起止年月	2025-09-01 — 2027-09-01				
	依托科研平台名称							
项目负责人	姓名	雷宇		性别	女	出生日期	1994-02-10	
	学位	硕士	最后学位获得时间	2019-06-22		是否硕导、博导	否	
	专业技术职务	083	工程师	定职时间				
	主要研究方向	变电运检技术；配电网及其自动化技术		联系电话	13259987661		所在学校	西安电力高等专科学校

项目组成员						
姓名	年龄	专业技术职务	学位	所在单位	项目分工	本人签字
寇磊	44	高级工程师	学士	西安电力高等专科学校	项目实施	
庄园	38	高级工程师	硕士	西安电力高等专科学校	项目实施	
蒋琪	50	教授	学士	西安电力高等专科学校	项目实施	
孙淑仪	27	其它	硕士	西安电力高等专科学校	数据分析	

胡蓓蓓	30	讲师	硕士	西安电力高等 专科学校	项目实施	
-----	----	----	----	----------------	------	--

正式申报材料

主要研究内容	<p>为了缓解化石能源危机及其带来的碳排放等环境污染问题，高比例可再生能源将逐步接入电力系统中，陆上风电和光伏发电随机性、波动性、相关性将会给高比例新能源系统带来新能源高效消纳、电网规划决策、安全经济运行方面的巨大挑战，本项目针对高比例再生能源并网下构网型系统控制策略及系统优化调度展开研究。构网型变流器是构网型系统的核心，以构网型变流器为研究对象，通过研究构网型变流器的新型拓扑以及控制策略，提高构网型并网系统的频率稳定性，电压稳定性等稳定性指标。研究建立储能变流器并联数学模型；分析考虑虚拟阻抗的无功功率分配和考虑 SOC 的有功功率分配的方法，提出一种结合自适应虚拟阻抗和 SOC 均衡的改进下垂控制策略。研究用户侧空调、电动汽车充电桩和分布式储能等分布式资源参与一、二、三次调频的控制策略。调度平台收集虚拟电厂内部分布式资源信息，包括室内温度、电动汽车当前电量、充电挡位情况、储能的荷电状态等。这些信息经过处理、计算和预测，VPP 整体上报调频容量给电网。调度平台接收到电网下发的调度指令后分解，将调频功率分配给储能、电动汽车充电桩及可控负荷等分布式资源。针对高比例新能源下构网型系统的并网稳定性研究，这一方向的技术突破将显著提高电网的稳定性，减少因频率和电压波动引发的停电风险，从而降低企业和社会的经济损失。其次，在构网型储能变流器多机互联控制技术研究方面，通过开发先进的控制策略，能够实现多机储能设备的高效协同运行，这不仅提升了系统的整体能效，还能通过减少设备损耗和延长设备寿命来降低运营与维护成本。最后，针对互联电力系统下的虚拟电厂调频技术研究，通过优化调度策略和频率响应能力，虚拟电厂能够更加灵活地管理分布式能源的输出，实现与传统电力系统的深度融合。这种高效的调频技术将降低系统调度成本，并减少因频率波动导致的电力质量问题，从而带来显著的经济效益。</p>
--------	--

研究内容摘要	<p>(1) 以构网型变流器为研究对象，通过研究构网型变流器的新型拓扑以及控制策略，提高构网型并网系统的频率稳定性，电压稳定性等稳定性指标。</p> <p>(2) 研究建立储能变流器并联数学模型；分析考虑虚拟阻抗的无功功率分配和考虑 SOC 的有功功率分配的方法，提出了一种结合自适应虚拟阻抗和 SOC 均衡的改进下垂控制策略。</p> <p>(3) 研究用户侧空调、电动汽车充电桩和分布式储能等分布式资源参与一、二、三次调频的控制策略。</p>
先进性、创新点	<p>先进性：伴随着国家相关政策的颁布以及改革的不断深入，我国对于高比例新能源并网下电力电子设备稳定运行控制技术及系统优化调度研究正如火如荼地进行着。针对接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度的研究，将显著提高电网的稳定性，减少设备损耗和延长设备寿命，降低运营与维护成本，从而带来显著的经济效益。</p> <p>创新点：(1) 提出一种提高构网型并网稳定性的控制策略；(2) 提出一种构网型储能变流器多机互联技术控制策略；(3) 提出一种最有效的虚拟电厂调频控制策略；</p>
技术指标	<p>(1) 提出一种新的构网型变流器拓扑和控制策略；确保并网过程中系统能有效抑制扰动，保持频率波动小于$\pm 0.1\text{Hz}$（标定值），电压偏差小于$\pm 5\%$。</p> <p>(2) 成功建立并验证多 PCS 并联系统的数学模型，并在实际系统中实现。提出并实现基于自适应虚拟阻抗和 SOC 均衡的改进下垂控制策略，并进行实验验证。</p> <p>(3) 调度平台收集虚拟电厂内部分布式资源信息，当系统频率偏差超出允许范围时，按照一、二、三次调频过程展开。</p>
预期成果	<p>(1) 解决高比例新能源接入导致的电网频率、电压波动等并网稳定性问题。</p> <p>(2) 提出一种基于构网型变流器的高效控制策略，增强系统对大扰动的响应能力。</p> <p>(3) 提高多 PCS 系统的稳定性与容错能力，降低谐波干扰和振荡的影响。</p> <p>(4) 优化多 PCS 并联运行中的功率分配和负荷</p>

共享机制，确保电池 SOC 均衡，延长电池寿命。（5）调度平台收集虚拟电厂内部分布式资源信息，当系统频率偏差超出允许范围时，开展三次调频。 预期成果：研究工作报告 1 份；高水平论文 1 篇；实用新型专利 1 项。					
新技术：		新工艺：		新材料：	
新装备：		新产品：		新品种：	
软件著作权：		集成电路布图：		药证：	
标准：		规范：		其他：	
论文：	1	著作：		研究工作报告：	1
专利：	1	培养博士：		培养硕士：	
资政、调研报告：					

工作进度安排(每项不超过 60 字)	
2025-09-01 — 2025-09-30	1、召开项目启动会，明确团队成员分工； 2、搜集相关资料，为后续研究奠定基础。
2025-10-01 — 2025-11-30	1、了解新能源并网、电力电子设备运行控制技术现状； 2、明确建立应用背景与研究项目的相关性。
2025-12-01 — 2025-12-31	1、深入调研目标台区的源网荷储； 2、对现有并网优化调控策略进行，分析优缺点，为后续电力电子设备控制策略改进提供参考。
2026-01-01 — 2026-03-31	1、确立项目研究的关键问题和整体实现方案 2、根据整合的数据资料和调研结果撰写项目研究的可行性报告。
2026-04-01 — 2026-05-31	分析新能源并网以及电力电子设备控制技术改进的科学方法理论。

2026-06-01 — 2026-07-31	完成新能源并网技术研究，实现安全接入及高频数据采集。
2026-08-01 — 2026-10-31	完成基于电力电子设备稳定控制研究，实现电能质量就地优化控制。
2026-11-01 — 2026-12-31	1、完成台区虚拟电厂的技术研究； 优化预测模型为台区负荷调整技术提供理论指导。
2027-01-01 — 2027-02-28	1、完成基于虚拟电厂的台区负荷调整技术研究； 完成台区供用电平衡调控方法。
2027-03-01 — 2027-06-30	1.对研究结果进行分析总结，调整相应设计方案。 2.撰写论文及实用新型专利。
2027-07-01 — 2027-09-01	1.整理项目相关技术方案及研究结果； 2.撰写《接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度研究》技术报告；

项目负责人承担教育厅项目情况				
项目编号	项目名称	批准时间	结束时间	完成情况

承 诺 书

本人承诺严格遵守法律法规，服从有关文件要求和管理，确保所填报内容真实有效，数据准确客观，符合有关保密规定和学术道德规范要求，无知识产权等方面的争议。如存在违法违规违纪问题，自愿接受有关调查和处理。

承 诺 人：

年 月 日

单位审查与保证

1、系、所或依托平台审查意见（包括：审查项目的科学意义、实用价值、研究工作基础、经费预算合理性、申请者业务素质、研究能力和科学作风）

负责人（签字）：

单位（公章）

年 月 日

2、学校审查意见：

已对申请书进行了审核，同意上报。承诺在项目获得资助后做到以下几点：

- (1) 保证对研究计划所实施所需的人力、物力和工作时间等条件予以支持；
- (2) 严格遵守陕西省教育厅有关资助项目管理、财务管理等各项规定；
- (3) 督促项目负责人和本单位项目管理部门按教育厅的规定及时报送有关报表和材料；

需要说明的其他问题:

单位负责人 (签章)

单位（公章）

年 月 日

陕西省教育厅自然科学研究项目可行性研究报告

项目名称：	接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度研究
申请单位：	西安电力高等专科学校
起止时间：	2025 年 9 月至 2027 年 9 月
项目负责人：	雷宇
通信地址：	西安市长乐西路 180 号
邮政编码：	710032
联系电话：	13259987661
传 真：	
申请日期：	2025 年 8 月

一、国内外研究开发现状和发展趋势

1. 国内外对构网型系统并网稳定性的研究

构网型系统的核心是构网型变流器,国内对构网型变流器的研究主要集中在控制策略方面。构网型变流器内环电压、电流控制与外环功率控制的时间尺度相差较大,因此可以在稳定性分析中忽略内环的影响,将内环看作单位增益,即,其传递函数可看作“1”。用于分析构网型变流器小信号稳定性的几何方法,可以着重解决线路阻抗变化导致的系统失稳问题,并通过虚拟电感控制提高系统的稳定性。统一的动态功率耦合模型,可以着重解决构网型变流器有功和无功功率耦合导致的失稳问题,并认为下垂控制有助于减弱功率耦合的不利影响,而虚拟同步机控制则会放大这种耦合作用。可变虚拟惯量和阻尼的构网型变流器控制方法,可以实现参数自适应调节。基于工频周期平均模型,系统性的虚拟同步机控制参数整定方法,可以通过设计合理的外环参数避免功率耦合引发的系统失稳。应当注意的是,以上研究虽然在理论分析中并未考虑内环控制的影响,但是在实际的仿真和实验中均使用了内环控制。理论分析中忽视内环控制影响的主要原因在于其模型阶数较高,考虑内环将导致分析不便,甚至无法分析。构网型变流器的阻抗电路模型,将各个控制环路的效果等效为电路中的虚拟阻抗,从而加深对这些控制作用的认识和理解。研究结果表明,电压环和电流环的基本功能是实现跟踪控制,但是在这个过程中,引入了不同种类的控制阻尼,而且控制器阻尼特性与多个控制参数相关。这一研究框架的不足在于,内环控制的模型阶数较高,因此不得不对一些重要的影响因素进行简化。例如,无功电压下垂控制被简化为一个固定的虚拟电抗,这时无功下垂系数变化产生的影响就无法直接地反映在变流器输出导纳模型中。

研究构网型变流器控制环路间的相互作用,发现即便采用较为合理的设计方式对内环进行参数整定,也无法完全避免内外环控制间的动态耦合。控制环路间的耦合可能发生在外部电网环境发生变化的情况下,也就是说,即使在控制器设计的过程中避免了控制环路间的相互作用,但是当接口电网强度等外部指标发生变化时,相互作用仍然会发生,而固定的预设参数无法应对这种情况。对于这种相互作用,采用特征值法和基于广义奈奎斯特判据的多入多出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)阻抗模型虽然可以分析系统稳定性,但是所有影响因素都将

杂糅在一起，无法对控制环路间的相互作用做出清晰的机理性描述。

美国能源部投资 2500 万美元支持建立通用构网型逆变器联盟（UNIFI），该联盟由美国国家可再生能源实验室、美国电力科学研究院和华盛顿大学主导，旨在推动构网型技术的发展和應用。构网型控制技术通过变流器向系统并网点提供一个具有一定维持能力的电压源，实现等效惯量和系统强度支撑。美国在构网型控制策略方面进行了深入研究，包括下垂控制、虚拟同步发电机控制等，并分析了这些控制策略的优缺点及面临的挑战。

2. 国内外对构网型储能变流器多机互联技术的研究

并网运行时，储能电站配合风电场和光伏电站，实现平抑输出波动、提升跟踪日前调度计划能力及削峰填谷的功能。随着 PCS 并联台数的增加，会衍生出多种稳定性问题，主要包括：并网情况下，由于变压器漏抗及线路阻抗等原因，多台 PCS 与电网产生关联耦合构成复杂的高阶电路结构，此时 PCS 的谐振特性会发生改变，在原有谐振尖峰的基础上会另外在高、低频处产生谐振尖峰，传统控制策略难以对其抑制，造成各台 PCS 输出电流谐波含量增加，严重情况下甚至会造成 PCC 点电压发生谐振导致整个储能系统停机。除了以上问题，还有系统稳定性和可靠性不足、光伏发电随机性和波动性以及各电堆的荷电状态问题。

PCS 并网电流就会发生谐波振荡，导致 THD 变大，针对该问题有无源阻尼控制和有源型阻尼控制两种方法。无源阻尼控制即在 PCC 直接并联电阻 R 来作为全局谐振抑制单元，从而增加系统阻尼抑制谐振。有源型阻尼控制策略通过优化每台 PCS 的控制算法，通过在电流环内引入虚拟电阻增加系统阻尼，抑制多台 PCS 并联后交叉耦合产生的四个谐振尖峰。

针对电堆荷电状态优化，研究人员提出了一种结合自适应虚拟和 SOC 均衡的改进型 VSG 控制策略。该方法解决了线路阻抗差异导致的压降差以及无功功率不均和 SOC 差异导致的电池过度充放电问题。

3. 国内外对虚拟电厂调频控制策略的研究

为了缓解化石能源危机及其带来的碳排放等环境污染问题，近年来可再生能源不断并入电网。经由大量电力电子装置并入电网，导致部分可再生能源发电机组的频率与转子转速解耦，这对电网现有的调频响应能力提出了新的挑战，即高渗透率可再生能源的电力系统对调频资源有了更多和更高的要求。传统方式下，

火电机组提供调频辅助服务的性能较差,已无法满足高可再生能源渗透率电网对调频响应能力的需求,因此国内外纷纷开始研究新的调频策略,找出一些创新的解决方案。

国内对虚拟电厂调频技术的研究正在快速发展,并且已经取得了一些显著成果。在政策支持与规划方面,国家和地方政府正在推动虚拟电厂的发展,例如深圳虚拟电厂实施计划(2022-2025年)提出了发展智能有序充电技术、双向能源互动商业模式,并计划建立高达1GW的可调容量,形成约年度最大负荷5%的稳定调节能力;在技术路线与标准方面,虚拟电厂技术发展路径涉及数字化技术、控制技术、物联网技术与通信技术的集成应用。中国已建立了包括电网安全与节能国家重点实验室在内的虚拟电厂创新单元,并制定了一系列技术标准,如DB4403/T 343-2023等;目前,虽然国内虚拟电厂的商业模式尚不清晰,主要集中于需求响应和提供节能监控服务,但随着电力市场化改革的推进,预计将逐步形成成熟的市场机制,使虚拟电厂能够通过参与电力现货市场等方式获得收益;对于技术验证,深圳虚拟电厂通过运用5G专用切片技术,成功验证了虚拟电厂调频技术,实现了10秒内完成200千瓦的调频,这标志着虚拟电厂在技术层面已基本具备了实体电厂的功能,能够为电网提供辅助服务,平抑新能源的随机性和波动性。国内虚拟电厂调频技术的研究正处于积极探索和快速发展阶段,随着技术进步、政策支持和市场机制的逐步完善,该技术将不断成熟并为国家电力各方面提供极大的便利。

国外的虚拟电厂(VPP)发展较早,市场环境较为成熟,运营模式多样。例如,德国的虚拟电厂主要集中于管理分布式能源,通过形成有机整体参与电力市场和提供电力相关辅助服务;在政策法规方面,国外典型国家如欧盟和美国普遍出台了针对需求响应聚合商、虚拟电厂等概念的法规,明确了聚合商的定义和参与市场的规则,为虚拟电厂聚合能源资源提供法律保障;在技术手段方面,国外也较为先进,虚拟电厂服务商普遍应用先进数字化平台并拥有优化调控算法等核心技术,实现对各类聚合资源的智能监测、管理和调度。例如,德国的Next-Kraftwerke通过其NEMOCS平台聚合了大量分布式资源,使用基于大数据的智能算法,使可再生能源发电机组和工业用户更加灵活、快速地响应价格信号;国外的商业模式也较为明确,其虚拟电厂已经实现了商业化,主要通过电力市场

交易、参与调峰调频、配置储能参与辅助服务等方式获益。国外虚拟电厂的发展为国内提供了宝贵的经验和启示，尤其是在政策法规、市场机制、技术应用和商业模式等方面，值得国内在推动虚拟电厂发展过程中借鉴和学习。

4. 高比例可再生能源下构网型系统并网稳定性研究的发展趋势

随着全球能源需求量的不断上涨，大量化石燃料正迅速被消耗，这不仅引发全球的能源危机，同时也造成了全球环境污染的持续加剧。在此背景下，世界能源格局亟需新一轮的变革，以风光为代表的可再生能源的发展正蓬勃兴起。国家能源局、国家发改委在《能源生产与消费革命战略(2016-2030)》强调“坚持分布式与集中式并举，以分布式利用为主，推动可再生能源高比例发展”。这标志大量分布式新能源将接入配电网之中，清洁低碳化的新型配电网正逐步形成。

随着政策支持和相关技术的进步，我国风电、光伏产业高速发展，成本下降和产品迭代更新的速度不断加快，应用市场稳步扩大，装机量、发电量均持续提高。我国相关研究机构发布的《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究》报告提出，到 2050 年，中国要实现 60%电力来自可再生能源，届时风电和光伏发电装机容量将分别达到 23.96 亿千瓦和 26.96 亿千瓦，分别占可再生能源发电量比例为 28%和 42%。高比例可再生能源接入的未来电力系统中，陆上风电和光伏发电随机性、波动性、相关性将会给高比例新能源系统带来新能源高效消纳、电网规划决策、安全经济运行方面的巨大挑战，故进一步研究新能源出力特性及相关性特征、深入研究电网多方协同规划和优化运行机制对我国电网并网稳定性等方面具有重要的理论和实践指导意义。

5. 构网型储能变流器多机互联控制技术研究的发展趋势

随着可再生能源的快速发展，能源存储技术在电力系统中扮演着越来越重要的角色，储能成为新能源转型的必备基础设施。储能电站容量需求的不断增长，从兆瓦级到百兆瓦级的趋势日益明显。在这种情况下，单个功率转换系统(PCS)已经难以满足储能系统的需求。但更大容量的 PCS 不仅对功率器件有更高的要求，其故障风险也增大。因此，多个 PCS 并联运行的储能系统成为必要选择。

在新型电力系统中，构网型控制技术(grid-forming control technology, GFM)具有电压支撑和主动惯量特性，以此替代同步机实现电网支撑，并维持电力系统稳定性，因此 GFM 具有广阔的发展和应用前景。目前多 PCS 并联系统的动态

响应特性仍难以描述，其与电网的交互影响也不明确，因此亟需从多台 PCS 的集成、控制与能量管理等方面提出解决方案。

6. 互联电力系统下的虚拟电厂调频技术研究的发展趋势

虚拟电厂技术是实现发电机组及用电负荷经济运行的关键技术之一。在运行控制层面，虚拟电厂通过多类型发用电资源的优势互补及联合调控，降低各类型资源的运行成本或提高了其经济效益；在参与电力市场层面，虚拟电厂通过协同多类型发用电资源共同参与多级电力市场，提高了各类型资源发用电的灵活性及运营的经济效益。此外，虚拟电厂技术也是实现分布式发电资源及负荷侧需求响应资源参与电力市场的聚合技术之一。在控制方面，一些发用电资源例如容量较小的分布式发电机组以及单位容量小但群体规模大的需求侧资源具有灵活控制、随机性强等特点，通过虚拟电厂技术将大量的同质资源聚合并协调控制，能够为电力系统提供辅助服务；在参与电力市场方面，这些资源因为容量较小，不符合电力市场准入规则，抑或是单独参与电力市场的成本过高，通过虚拟电厂技术聚合大量资源并参与到电力市场，能够为这些资源节约用电成本、带来提供辅助服务的经济利益，进一步促进这些资源积极提供电力辅助服务。

高效经济及性能优异的调频资源已经成为高可再生能源渗透率的电网中不可或缺的一部分。随着近几年风电渗透率不断增加，原本电力系统的调频资源已经无法满足电网的需求。可再生能源经由大量电力电子装置并入电网，导致部分可再生能源发电机组的频率与转子转速解耦，这对电网现有的调频响应能力提出了新的挑战，电力系统对调频资源有了更多容量及更高性能的要求，因此，调频技术是缓解高可再生能源渗透率电网的调频资源需求的关键技术之一，研究出可适应新时代虚拟电厂需求的调频技术非常有必要。

二、项目研究内容、关键技术和研发目标

1. 项目研究内容

(1) 高比例新能源下构网型系统并网稳定性分析

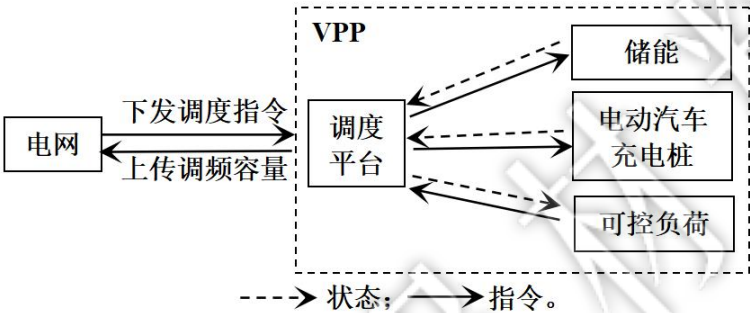
构网型变流器是构网型系统的核心。以构网型变流器为研究对象，通过研究构网型变流器的新型拓扑以及控制策略，提高构网型并网系统的频率稳定性，电压稳定性等稳定性指标。

(2) 构网型储能变流器多机互联控制技术研究

研究建立储能变流器并联数学模型；分析考虑虚拟阻抗的无功功率分配和考虑 SOC 的有功功率分配的方法，提出一种结合自适应虚拟阻抗和 SOC 均衡的改进下垂控制策略。

(3) 互联电力系统下的虚拟电厂调频控制策略研究

本项目旨在研究用户侧空调、电动汽车充电桩和分布式储能等分布式资源参与一、二、三次调频的控制策略。构建虚拟电厂参与调频辅助服务框架并分析具体流程，流程图如图一所示。



图一 虚拟电厂参与调频辅助服务框架流程图

调度平台收集虚拟电厂内部分布式资源信息，包括室内温度、电动汽车当前电量、充电挡位情况、储能的荷电状态等。这些信息经过处理、计算和预测，VPP 整体上报调频容量给电网。调度平台接收到电网下发的调度指令后分解，将调频功率分配给储能、电动汽车充电桩及可控负荷等分布式资源。

2. 关键技术

这个项目的研究关键在于解决高比例新能源并网情况下电力系统的稳定性和可靠性问题。随着风能、太阳能等可再生能源占比的不断提升，传统的电力系统稳定性面临巨大的挑战，因为新能源的间歇性和波动性特征会导致电网频率、电压等运行参数的大幅波动。首先，研究高比例新能源下构网型系统的并网稳定性，需要深入理解电力系统在新能源占比较高时的动态行为，以及如何通过优化系统结构和控制策略来维持稳定性。其次，在多机互联的情境下，储能变流器作为关键设备，其控制策略的有效性直接影响系统的整体稳定性，因此需要开发新的多机互联控制技术，确保在复杂网络环境下不同设备之间的协调运行。最后，虚拟电厂作为分布式能源管理的重要手段，其调频技术研究也是关键，因为虚拟电厂的调度不仅需要实现新能源与储能的高效互动，还要在电力系统波动时迅速

响应，以确保频率稳定。

3. 研发目标

(1) 解决高比例新能源接入导致的电网频率、电压波动等并网稳定性问题。

(2) 提出一种基于构网型变流器的高效控制策略，增强系统对大扰动的响应能力。

(3) 完善新能源发电对电网稳定性影响的评估方法，为未来电网规划和调度提供理论依据。

(4) 提高多 PCS 系统的稳定性与容错能力，降低谐波干扰和振荡的影响。

(5) 优化多 PCS 并联运行中的功率分配和负荷共享机制，确保电池 SOC 均衡，延长电池寿命。

(6) 提升多 PCS 并联系统的动态响应能力，适应电网频繁的负荷变化与波动。

(7) 调度平台收集虚拟电厂内部分布式资源信息，当系统频率偏差超出允许范围时，对其进行调整。在虚拟电厂中，包括电动汽车充电桩、储能以及可控负荷等分布式资源，通过电力电子变换器与电网连接，其并网逆变器常采用下垂控制，按照一、二、三次调频过程，分为 3 个阶段展开。

三、技术方案及创新点

1. 高比例新能源下构网型系统并网稳定性分析及其创新点

查阅文献资料，总结归纳现有的构网型变流器拓扑和控制策略的研究现状，然后选择一种最优拓扑为研究对象，建立构网型变流器的数学模型，综合考虑稳定性指标，提出新的控制策略，提高并网稳定性。

创新点：提出一种提高构网型并网稳定性的控制策略，并验证其有效性。

2. 构网型储能变流器多机互联控制技术研究及其创新点

DC/AC 模块在下垂控制策略下，将提供稳定电压的电池作为虚拟原动机，提供虚拟机械转矩，逆变器的输出滤波感抗模拟同步发电机中定子绕组电抗，逆变器的电动势和同步发电机的内电动势等效，滤波电感和功率器件的等效电阻等效同步发电机的电枢电阻，逆变器输出端电压等效于同步发电机的电枢端电压，以此满足系统的功率需求，快速跟随功率指令。在此基础上，加入结合自适应虚

拟阻抗和 SOC 均衡的改进下垂控制方法。

在实际运行时，储能系统的 SOC 存在差异，因此需考虑 SOC 不同来调整出力，即调整输出功率，让 SOC 高的储能模块分配更大的负载功率，以均衡各储能模块 SOC，提高电池利用效率。

构网型 PCS 并联控制中，功率的合理分配至关重要，逆变器控制参数、线路阻抗的不同，都会造成逆变器的输出功率不均，使系统间存在环流，从而影响系统稳定性。因此通过对虚拟阻抗的设计将所有逆变器的等效输出阻抗设计为阻性，实现负荷功率的均分。通过合理的设计逆变器输出阻抗，降低多逆变器间的环流最大值，保证储能变流器的稳定运行。

创新点：提出一种构网型储能变流器多机互联技术控制策略，并验证其性能。

3. 互联电力系统下的虚拟电厂调频控制策略研究及其创新点

当系统频率偏差超出允许范围时，应对其进行调整，否则将会对电网造成影响。在虚拟电厂中，包括电动汽车充电桩、储能以及可控负荷等分布式资源，通过电力电子变换器与电网连接，其并网逆变器常采用下垂控制。

按照一、二、三次调频过程，分为 3 个阶段。第 1 阶段，采用快速响应性好的分布式资源（如储能等）参与调频，迅速响应调度平台下发的指令以减小频率偏差，对应于一次调频过程；第 2 阶段，加入响应稍慢的分布式资源（如充电桩和可控负荷等），以增加系统调频能力，对应于二次调频过程；第 3 阶段，储能退出而充电桩和可控负荷继续参与调频服务，降低调频成本并保持系统频率在允许范围内，对应于三次调频过程。

创新点：提出一种最有效的虚拟电厂调频控制策略，并验证其合理性。

四、项目的研究基础及技术支撑条件

1. 新能源并网稳定性分析

(1) 稳定性概念和评价指标

新能源并网系统的稳定性是指系统在外部扰动或内部变化下，能够保持正常运行且不发生不稳定性或失稳的能力。稳定性评价旨在确保系统在不同工况下都能提供可靠的电能输出，并对系统的鲁棒性和可控性进行综合考量。

1) 频率稳定性。频率是电力系统运行中的一个重要参数，其稳定性直接关

系系统的运行质量。频率稳定性是指系统在外部扰动下，电力系统频率能够迅速恢复到稳态，并保持在额定值附近。评价频率稳定性通常使用频率偏差和频率漂移等指标。

2) 电压稳定性。电压稳定性是指系统在负载变化或故障情况下，电压能够保持在合适的范围内不发生明显波动。常用的评价指标包括电压偏差、电压波动和电压暂降等。

3) 动态响应。动态响应是指系统对外部扰动的快速调整能力，通常通过阶跃响应、暂态稳定性等来评价。动态响应的好坏直接关系系统对负载波动或故障的应对能力。为更具体地展示新能源并网系统的稳定性，表 1 提供了常见的稳定性评价指标及其典型数值范围。

表 1 常见的稳定性评价指标及其典型数值范围

稳定性指标	典型数值范围	评价标准
频率偏差	$\pm 0.1\text{Hz}$ 以内	在额定频率附近波动较小
电压偏差	$\pm 5\%$ 以内	电压波动在合理范围内
动态响应时间	数十毫秒至数秒	对外部扰动具有迅速响应的能力
暂态稳定裕度	大于 20%	在故障发生后能够迅速恢复稳定

(2) 新能源并网系统的稳定性分析方法

1) 暂态稳定性分析方法

暂态稳定性分析主要关注系统在大幅度扰动后的响应，尤其是在故障发生后系统是否能够保持稳定运行。数字仿真是一种广泛使用的方法，通过模拟系统的动态过程进行分析。在进行数字仿真时，记录系统在故障发生后的频率和电压响应。例如，发电机转子的摆动和电网电压的波动。通过数据分析，可以观察到系统在不同故障情况下的暂态响应特点。频率的偏移、电压的波动幅度等数据可以用于评估系统的暂态稳定性。对比不同仿真场景下的数据，识别系统在各种情况下的性能差异，可为改进系统提供依据。

2) 静态稳定性分析方法

静态稳定性分析主要关注系统在平衡状态下的稳定性，潮流计算和灵敏度分

析是常用的方法之一。a)进行潮流计算时,获取系统各节点的电压、功率等参数。通过数据分析,可以发现电压偏差较大的节点、潮流分布情况等。这些数据有助于判断系统在负载变化、新能源接入等情况下的静态稳定性。b)进行灵敏度分析时,记录不同参数变化对系统的影响。通过分析灵敏度数据,确定系统对不同因素的敏感性,为制定合理的系统优化策略提供依据。

综合利用暂态稳定性分析和静态稳定性分析,通过数据分析获取系统性能的详细信息,可为系统运行和管理提供科学依据。这种深入分析方法有助于发现潜在问题、提高系统抗扰能力,确保新能源并网系统稳定可靠地运行。

(3) 新能源并网系统的稳定性影响因素

1) 电力系统的动态特性对新能源并网系统的稳定性至关重要。系统的惯性、阻尼和弹性等参数直接影响系统对外部扰动的响应。电力系统的总体惯性随着新能源发电单元的接入可能发生变化,这影响系统的短时频率响应。不同的阻尼水平和弹性特性会对系统的阻尼振荡和过电压等问题产生不同的影响。因此,对电力系统的动态特性进行精确的建模和分析是提高系统稳定性的关键。

2) 新能源发电特性也是稳定性的关键因素之一。新能源发电具有不稳定的特性,例如风光资源的波动会导致新能源发电功率的快速变化,对系统频率和电压稳定性提出挑战。此外,不同类型的新能源发电单元对电压的响应速度可能存在差异,这对系统的电压稳定性产生影响。因此,深入理解和分析新能源发电特性对系统的稳定性评估至关重要。

3) 系统运行模式也直接影响新能源并网系统的稳定性。并网运行模式要考虑系统间的互联互动,包括频率同步、电压同步等问题。在一些特殊情况下,新能源发电系统可能选择离网运行,此时需考虑系统的孤岛运行稳定性。因此,对系统运行模式的选择和管理也是确保新能源并网系统稳定性的重要方面。

2. 变流器多机互联分析

微电网中新能源大都由变流器接入,因此,研究和解决变流器互联问题对推进微电网的进步具有至关重要的作用。但变流器具有惯性低的特点,容易受到扰动的影响,进而使母线电压出现波动。另外,当互联系统中无功负荷分布不均或线路参数摄动时,传统虚拟阻抗控制不能使无功按容分配。

在微电网中,多变流器互联运行,各变流器之间通过线路进行连接,系统中

存在多条母线。多变流器互联系统中同样可能出现扰动，并且扰动对多变流器互联系统的影响更加复杂，当其中一条母线中出现不平衡负载时，其不但能对本地变流器产生影响，还可能通过变流器之间的线路把扰动传输给其他变流器，影响其他变流器的性能，降低了整个互联系统的稳定性。

互联变流器控制策略：

(1) 主从控制

主从控制是指当多变流器互联系统离网运行时，其中一台变流器采用 V/f 控制，或者其中几台变流器采用下垂控制或虚拟同步机控制（VSG 控制），这类变流器的控制器是主控制器，起到支撑整个互联系统电压和频率的作用，而其它变流器采用 PQ 控制，这类变流器的控制器是从控制器，起着控制和调节功率的作用。

(2) 对等控制

对等控制是指互联系统中各变流器的控制策略具有相同的地位，各变流器均对互联系统的电压和频率有控制作用，各变流器一般均采用下垂控制或虚拟同步机控制，可以同时调节变流器输出的电压、频率、有功和无功。相比于主从控制，对等控制利于各微源的即插即用，无需通信，降低了设备成本，实现并离网切换更加容易。

(3) 分层控制

互联系统的分层控制有两层和三层两种控制模式。在两层控制中，主要分为电力电子层和网络通信层，网络通信层的中央控制器根据采集的电力电子层的信息制定计划，并下发指令到电力电子层，电力电子层中的各变流器根据上层指令调节自身输出的电压、频率和功率。在三层控制中，最上层的配电网管理系统负责控制系统中的微网群，中间层的中心控制器负责控制微电网，最下层的控制器负责控制各个逆变器和负荷。

3. 虚拟电厂调频策略分析

虚拟电厂由若干新能源系统及分布式可控负荷组成，与传统火电机组配合可在电力市场中为电网提供调频的辅助及管理服务，多种分布式资源相结合可以协同增效，提高系统的稳定性与经济效益。

虚拟电厂调频策略的原理主要基于通过先进的信息通信技术和软件系统,实现对分布式能源(如分布式电源、储能系统、可控负荷等)的聚合和协调优化,以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统。其核心思想是依托互联网和现代信息通讯技术,把分布式电源、储能、负荷等分散在电网的各类资源相聚合,进行协同优化运行控制和市场交易,实现电源侧的多能互补、负荷侧的灵活互动,对电网提供调峰、调频、备用等辅助服务。

本项目组成员共计6人,其中包括教授1位,高级工程师2位,工程师1位,讲师1位,均具有丰富的电力行业输、配、变电设备管理、运行、维护的专业知识与经验,能够位项目研发提供指导。

本项目研发内容所需的相关软硬件实验设备具备使用条件,能够保障理论研究的顺利进行。

五、工作进度安排和阶段目标

序号	时间段	阶段目标
1	2025 年 9 月	1. 召开项目启动会,明确团队成员分工; 2. 搜集相关资料,为后续研究奠定基础。
2	2025 年 10 月 -11 月	1. 了解新能源并网、电力电子设备运行控制技术现状; 2. 明确建立应用背景与研究项目的相关性。
3	2025 年 12 月	1. 深入调研目标台区的源网荷储; 2. 对现有并网优化调控策略进行,分析优缺点,为后续电力电子设备控制策略改进提供参考。
4	2026 年 1 月 -3 月	1. 确立项目研究的关键问题和整体实现方案 2. 根据整合的数据资料和调研结果撰写项目研究的可行性报告。
5	2026 年 4 月 -5 月	分析新能源并网以及电力电子设备控制技术改进的科学方法理论。
6	2026 年 6 月 -7 月	完成新能源并网技术研究,实现安全接入及高频数据采集。
7	2026 年 8 月 -10 月	完成基于电力电子设备稳定控制研究,实现电能质量就地优化控制。
8	2026 年 11 月 -2026 年 12 月	1. 完成台区虚拟电厂的技术研究; 2. 优化预测模型为台区负荷调整技术提供理论指导。

9	2027 年 1 月 -2 月	1. 完成基于虚拟电厂的台区负荷调整技术研究； 2. 完成台区供用电平衡调控方法。
10	2027 年 3 月 -6 月	1. 对研究结果进行分析总结，调整相应设计方案。 2. 撰写论文及实用新型专利。
11	2027 年 7 月 -9 月 1 日	1. 整理项目相关技术方案及研究结果； 2. 撰写《接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度研究》技术报告；

六、预期成果形式及先进程度

1. 预期成果形式：研究工作报告 1 份；高水平论文 1 篇；实用新型专利 1 项。

2. 先进性：伴随着国家相关政策的颁布以及改革的不断深入，我国对于高比例新能源并网下电力电子设备稳定运行控制技术及系统优化调度研究正如火如荼地进行着。针对接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度的研究，将减少因频率和电压波动引发的停电风险，提升并网稳定性有助于优化电力资源配置，减少传统调峰电源的启停频次。在构网型储能变流器多机互联控制技术研究方面，通过开发先进的控制策略，能够实现多机储能设备的高效协同运行。最后，针对互联电力系统下的虚拟电厂调频技术研究，通过优化调度策略和频率响应能力，虚拟电厂能够更加灵活地管理分布式能源的输出，实现与传统电力系统的深度融合。

七、推广应用前景分析

针对接入高比例可再生能源下构网型系统控制策略及系统优化调度的研究，这一方向的技术突破将显著提高电网的稳定性，减少因频率和电压波动引发的停电风险，从而降低企业和社会的经济损失，节省运营成本。多机储能设备的高效协同运行，这不仅提升了系统的整体能效，还能通过减少设备损耗和延长设备寿命来降低运营与维护成本。同时，高效的储能系统将推动储能设备的市场应用，为相关产业带来新的经济增长点。最后，优化虚拟电厂的调度策略和频率响应能力将降低系统调度成本，减少因频率波动导致的电力质量问题，从而带来显著的经济效益。财务合规性方面，项目各研究方向在资金投入和使用上将严格遵循预算控制、采购管理、财务审计等标准，确保资金的透明度和合理性。同时，通过

科学的财务规划与风险管理，确保项目的成本控制与效益最大化，为后续的产业化推广提供坚实的财务基础。综上所述，该项目通过对三个关键技术方向的深入研究，不仅能够实现技术的突破和应用效益的提升，还能在财务合规性上提供有力保障，确保项目的经济性和可持续发展。

综上所述，本项目具有可行性。

正式申报材料