

## 科技进步奖公示信息

### 一、项目名称

能源互联网分布式能源功率寻优及多智能体协同控制研究

### 二、提名者及提名意见

张超，戴志勇，张爱民，樊康旗，张元歆

### 三、项目简介

能源互联网是以电力系统为核心和纽带，实现多种能源互联互通与协同互补的能源网络，其将在智能电网建设中发挥重要作用。然而，太阳能、风能等分布式能源的随机性与波动性，造成能源互联网功率发生波动，当波动较大时，将影响电网性能。本项目针对 10kV 固态变压器结构的能源互联网进行研究，首先综合半桥模块化多电平换流器（MMC）与 H 桥 MMC 的优势，设计基于混合 MMC 型固态变压器，通过自身控制来清除直流侧双极短路故障；其次，研究基于自适应极值搜索的功率寻优控制，确定输入和输出变量间的关系，通过给出状态量的反馈，实现光伏、风机功率输出与消耗达到最优，提高能源转换效率；再次，利用人工智能的强大数据分析和学习能力，研究深度强化学习网络，学习出能兼顾动态与稳态性能的全局协同优化方法，在约束条件下，抑制电网功率波动，保证能源互联网电压、频率稳定以及负荷损失最小。

该项目立足于电力电子化电力系统安全控制、稳定运行的基础科学问题，隶属于“电气工程”、“控制科学与工程”和“计算机科学

学与技术”的交叉领域，持续获得国家重点研发计划、国家自然科学基金、陕西省自然科学基金、国家电网、南方电网等科技项目的支持，历时 10 年，3 家单位联合攻关完成。为实现碳达峰、碳中和目标，电力系统正从依赖化石能源的传统电力系统向着以新能源为主体的新型电力系统转变。光伏、风力发电等新能源发电、直流输配电的大规模投入，负荷侧电能质量及调控性对电力电子设备的大量需求及使用，使得新型电力系统在“源-网-荷-储”各环节的电力电子化成为必然趋势；在其电力电子化过程中，电力系统的动态特性也随之发生了显著改变，传统交流电力系统分析、控制方法所带来的误差也将越来越大。为此，亟需发展电力电子设备与电网交互作用时的动态特性分析方法，为后续的系统稳定控制、异常工况穿越、保护策略开发等工作奠定基础。项目研究内容包括能源互联网中固态变压器的结构优化、分布式能源发电功率转换效率的提高，以及多智能体全局协同控制性能的提升，项目创新性成果如下：

(1) 固态变压器的结构优化：结合半桥型的模块化多电平换流器（MMC）固态变压器结构，研究了高压工频交流-高压直流电路的工作原理，提出了半桥和 H 桥混合拓扑结构的 MMC 前级电路；根据能量双向流动的要求，分析高压直流-高频交流-高频交流-低压直流电路的原理，设计了带有多端直流配电网结构的中间级电路；根据不同分布式电源、储能单元和用户负载的能量转换特点，分析低压直流-低压工频交流电路的原理，设计了接入 800V

直流电网和 380V 交流电网的后级电路。

(2) 分布式能源发电功率利用率的提高：研究了光伏系统的模型参数不确定和输出功率多峰值问题,分析动态遮阴对光伏特性输出的影响,提出了自适应极值搜索的光伏系统功率寻优控制,不断地自适应调整光伏电池的利用率,强迫光伏阵列尽可能工作在最佳点;研究了风电系统的模型参数不确定和输出功率曲线复杂的问题,提出了自适应滑模层极值搜索的风电系统功率寻优控制,确定输入变量和输出变量间的关系,通过给出状态量的反馈而实现系统输出、消耗等达到最优。

(3) 多智能体全局协同控制性能的提升：研究了能源互联网中能源管理系统存在各智能体模型简化和不确定性,不能实时动态控制,未涉及动态数据的问题,利用人工智能的强大数据分析和学习能力,构建了深度强化学习网络,提出了风电、光伏、储能及用户负荷等多智能体的全局协同控制策略,在能源互联网安全运行的约束条件下(如电网潮流、各智能体自身的有效工作范围和动态响应时间尺度等)实现了各智能体协同控制目标,即确保能源互联网与电网功率波动最小,能源互联网电压和频率稳定以及最小负荷损失。

#### 四、客观评价

#### 五、应用情况

(1) 南京因泰莱电器股份公司(新能源资源充沛地区调控参与

单位)

团队提供的电网新能源消纳能力评估技术，可建立包含风、光、火、水电机组和联络线的电力微网系统调度模型，并考虑机组的爬坡率、系统的旋转备用等约束条件，生成新能源消纳能力最大时的电力系统调度策略，为降低甘肃弃风弃光率提供了有效实施方案，提升了多种不确定性影响下甘肃电网新能源消纳和能力评估水平；此外，该团队基于深度强化学习网络的新能源微网全局协同控制技术，可在保障微网电压和频率稳定性的前提下，有效降低微网功率波动与负荷损失，提高电网调度性能，增强微网系统消纳能力。本项目关键技术的应用推广，为解决本省新能源消纳问题提供了技术保障，提升了本省新能源微网系统的综合性能，项目研究成果从 2022 年 5 月到 2024 年 5 月，共为企业带来新增销售额 12496 万元，其中新增利润 2501 万元。

(2) 西安星桥锐方科技有限公司（电网综合性研究参与企业）

通过该团队有关“一种模拟空间太阳能电站的功率寻优控制方法”项目成果的应用实施，实现了陕西省光伏发电系统最大功率点的智能跟踪，使光伏发电系统工作于最大功率点位置，提高了系统发电效率，降低了光伏电站运营成本。通过该团队有关多尺度功率预测技术的应用实施，实现了对风光电站发电出力预测，建立了包含新能源、传统能源、储能装置和联络线的电力系统调度模型，并以风光消纳能力最大建立目标函数，考虑传统发电机组爬坡率、旋转备用等约束，通过智能算法生成了新能源消纳能力最

大时的电力系统调度方案,开发了新能源消纳能力分析评估软件,给出了对应弃风弃光率,为电力系统调度决策提供了技术支撑,有效提升了我省新能源微网系统消纳水平,项目研究成果从2022年到2024年,共为企业带来新增销售额1364万元,其中新增利润272万元。

(3) 西安普欧斯电气技术有限公司（电能质量检测研究参与企业）

本公司与西安电子科技大学张超老师围绕“能源互联网分布式能源功率寻优及多智能体协同控制研究”项目开展了技术合作,并在光伏电站智能控制中应用了该团队有关光伏能源功率寻优、多智能体协同控制等方面的研究成果。应用结果表明:该团队的自适应极值搜索的光伏系统功率寻优控制技术可有效保障光伏系统发电性能,提高了太阳能的转换效率,为进一步提升空间太阳能发电效率提供了助力。本项目关键技术的应用推广,增强了光伏系统的综合性能,为未来空间太阳能电站的建设提供了理论和应用基础,项目研究成果从2022年到2024年,共为企业带来新增销售额655万元,其中新增利润130万元。

六、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种模拟空间太阳能电站的全局协同控制方法	中国	ZL 2020 1 0224852.4	2023 年 02 月 24 日	第 5749849 号	西安电子科技大学	张超;明正峰;汶涛;诸文智

2	发明专利	一种模拟空间太阳能电站的功率寻优控制方法	中国	ZL 2020 1 0225784.3	2021 年 10 月 22 日	第 4749603 号	西安电子科技大学	张超;明正峰;汶涛;诸文智
3	发明专利	基于滑模观测器的正交信号发生方法、正交信号发生器	中国	专利号:ZL 2018 1 1188279.5	2021 年 11 月 16 日	第 4796627 号	西安电子科技大学	张菊香;周宇昌;戴志勇;侯叶;李建文;赵佩绮;姚鑫
4	发明专利	电网电压频率和相角检测方法、系统、单相电网检测系统	中国	ZL 2018 1 1188248.X	2021 年 07 月 02 日	第 4521888 号	西安电子科技大学	张菊香;姚鑫;戴志勇;侯叶;李建文;周宇昌;赵佩绮
5	发明专利	一种电磁式俘能器	中国	ZL 20191091 8637.1	2021 年 07 月 23 日	第 4569999 号	西安电子科技大学	樊康旗;蔡美玲;谭钦雪;朱应敏
6	发明专利	一种线绳驱动的两自由度电磁式俘能器	中国	ZL 20191091 8636.7	2021 年 02 月 05 日	第 4240653 号	西安电子科技大学	樊康旗;谭钦雪;任获荣;蔡美玲
7	发明专利	煤矿带式输送机控制方法、装置、设备及可读存储介质	中国	ZL 2022 1 0648501.5	2023 年 04 月 07 日	第 5842704 号	西安交通大学	张爱民;王珊;杜羽东;张杭;黄晶晶;任志刚;张元歆
8	发明专利	一种基于虚拟磁链定向的控制电路及控制方法	中国	ZL 2012 10425728.X	2014 年 12 月 10 日	第 1542722 号	西安交通大学	陈晓菊;黄品品;张爱民;张杭;任志刚;王建华;王在福郎学斌;张

								蕾
9	发明专利	一种链式静止同步补偿器直流侧电压下平衡控制方法	中国	ZL 2012 10425347.1	2015 年 01 月 07 日	第 1559210 号	西安交通大学	陈晓菊; 黄品品; 张爱民; 张杭; 任志刚; 王建华; 王在福
10	发明专利	一种载波变频控制方法	中国	ZL2012 1 0425727.5	2015 年 04 月 29 日	第 1648525 号	西安交通大学	陈晓菊; 黄品品; 张爱民; 张杭; 王建华; 张游; 王在福

## 七、主要完成人情况

第一完成人：张超

项目负责人，全面负责项目研究方案和路线的制定与实施。对创新点一、二、三做出了创造性贡献，投入工作量占本人工作量的 60%以上，主要贡献为：

(1) 提出了固态变压器的结构优化及深度强化学习的能源互联网各智能体协同控制方法；

(2) 主持发明了一种模拟空间太阳能电站的全局协同控制方法和一种模拟空间太阳能电站的功率寻优控制方法；

(3) 牵头推动了能源互联网分布式能源功率寻优及多智能体协同控制应用；

(4) 牵头获准 2022 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖。

第二完成人：戴志勇

对本项目技术创造性贡献：

项目主要完成人，负责项目部分多智能体模型构建、参与了固态变压器的结构优化。对创新点一、三做出了创造性贡献，投入工作量占本人工作量的 60%以上，主要贡献为：

(1) 构建人工智能的深度强化学习网络，实现能源互联网全局动态最优协同控制，确保能源互联网与电网功率波动最小，能源互联网电压和频率稳定以及最小负荷损失；

(2) 参与发明了电网电压频率和相角检测方法及系统、单相电网检测系统技术。

第三完成人：张爱民

项目主要完成人，在本项目中参与完成了分布式能源功率寻优和智能体协同控制方法的创新，合作完成了部分项目成果的工程应用，作为第二完成单位西安交通大学负责人对创新点二、三做出了重要贡献、投入工作量占本人工作量的 50%以上。主要贡献为：

(1) 参与发明了一种基于虚拟磁链定向的控制电路及控制方法、一种链式静止同步补偿器直流侧电压下衡控制方法和一种载波变频控制方法；

(2) 合作完成了深度强化学习的能源互联网各智能体协同控制方法的创新。

第四完成人：樊康旗

项目主要完成人，负责开展基于自适应极值搜索的分布式电源功



率寻优研究任务。对创新点一、二做出了创造性的贡献，投入工作量占本人工作量的 60%以上，主要贡献为：

(1) 提出了基于自适应极值搜索的功率寻优方法，并结合各智能体全局协同控制层，保证电网安全稳定运行；

(2) 主持发明了一种线绳驱动的两自由度电磁式俘能器和一种电磁式俘能器；

(3) 构建了适用于 VSC 系统动态特性分析的静止同步发电机模型和等效的 Phillips-Heffron 模型，给出了电力电子化电力系统的稳定判据以及故障切除的临界条件。

第五完成人：张元歆

项目重要参与人，在本项目中参与完成了创新点一、三的部分内容。作为第三完成单位西安绿能电力控制技术有限公司负责人。投入工作量占本人工作量的 40%以上，主要贡献为：

(1) 参与了项目技术的工程应用，合作完成了一种模拟空间太阳能电站的功率寻优控制方法项目成果的工程应用。

## 八、主要完成单位情况及创新推广贡献

第一完成单位：西安电子科技大学

西安电子科技大学为本项目的第一完成单位，先后投入 23 人，其中教授 3 人，副教授 2 人，讲师 1 人，研究生 16 人。全面负责项目研究方案和路线的制定与实施，主导完成了项目的核心理论研究及关键技术开发，作为技术指导单位完成了多项项目成果的工程应用，是项目的主要完成单位。

(1) 结合半桥型的模块化多电平换流器(MMC)固态变压器结构,提出了半桥和H桥混合拓扑结构的MMC前级电路,带有多端直流配电网结构的中间级电路,接入800V直流电网和380V交流电网的后级电路,最后实现了混合型MMC结构能源互联网的应用;

(2)研究了光伏系统的模型参数不确定和输出功率多峰值问题,分析动态遮阴对光伏特性输出的影响,提出了自适应极值搜索的光伏系统功率寻优控制,不断地自适应调整光伏电池的利用率,强迫光伏阵列尽可能工作在最佳点;

(3) 相关成果连续两年获陕西高等学校科学技术奖二等奖。

第二完成单位: 西安交通大学

西安交通大学为本项目的第二完成单位,先后投入12人,其中教授1人,副教授2人,讲师/博士后3人研究生8人。在项目实施期间,与第一完成单位在混合MMC结构的能源互联网研发方面开展联合攻关共同实施了项目新技术在能源互联网拓扑结构中得到了应用。

(1)合作完成了带有多智能体的MMC后级电路的设计,在此基础上与第一完成单位共同开展了混合MMC固态变压器的应用;

(2)建立了能源管理系统模型,与第一完成单位共同实施了10kV能源互联网工程的建设,取得了良好的经济及社会效益,为项目成果的推广应用做出了重要贡献。

第三完成单位: 西安绿能电力控制技术有限公司

对本项目科技创新和应用推广情况的贡献:项目重要参与单位,

在本项目中参与完成了创新点一、三的部分内容。作为第三完成单位西安绿能电力控制技术有限公司负责人。投入工作量占本人工作量的 40%以上，

主要贡献为：

(1)参与了项目技术的工程应用，合作完成了一种模拟空间太阳能电站的功率寻优控制方法项目成果的工程应用。

## 九、完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同获奖	张超/1 戴志勇/2 张爱民/3	2017.1	2022.5	能源互联网分布式能源功率寻优及多智能体协同控制研究	2022 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖二等奖
2	论文合著	樊康旗/4	2018.10	2021.10	ChaoZhang,Boren Zhang,TaoWenKangqiFan. Anefficientharvester withautoregulatorydriving armto capture random wind energy,Sensors and Actuators A:Physical	论文
3	共同知识产权	张元歆/5	2018.4	2022.2	张爱民;王珊;杜羽东:张杭;黄晶晶;任志刚:张元歆.煤矿带式输送机控制方法、装置、设备及可读存储介质 ZL 2022 1 0648501.5	专利证书