

提名四川省科学技术奖候选项目公示

一、项目名称：

梯级水光蓄互补关键技术、装备及应用

二、提名者及提名意见：

（一）提名者

国网四川省电力公司

（二）提名意见

项目围绕梯级水光蓄互补关键技术与装备开展研究，建立了水光蓄互补联合运行完整技术理论体系，研制国内首台完全自主知识产权的全功率变速抽蓄成套装备，建成投运世界首个梯级水光蓄互补联合发电系统，入选联合国《世界小水电发展报告 2022》。项目授权发明专利 60 项，登记软著 15 项，发表论文 75 篇，出版专著 3 部，发布行标 3 项、团标 2 项。郭剑波、许唯临、王成山院士领衔的鉴定委员会认为：项目成果整体达到国际领先水平，打破了国外技术垄断，有效提升行业和国际影响力，为发展变速抽蓄和多能互补提供了可复制、可推广的典型建设模式和示范样板，经济社会效益显著，具有广阔的推广应用前景。

提名该项目为 2024 年度四川省科学技术进步奖。

三、项目简介：

大力推进水风光储等多能互补发展，建设抽水蓄能提升系统灵活调节能力，是建设新型能源体系的国家重大需求。梯级水光蓄互补是重要手段，变速抽水蓄能是关键装备，亟

需攻克一系列难题。

依托国家重点研发计划、四川省科技计划、国家电网公司项目等重大项目，超前谋划，产学研用协同攻关，实现了梯级水光蓄互补关键技术创新突破，研制成套装备并应用，主要创新成果如下：

1. 突破全功率变速抽水蓄能机组技术壁垒。揭示全功率变速抽蓄机组水力-机械-电气耦合稳定机理，从无到有形成了变速可逆式水泵水轮机、发电电动机、调速器、全功率变流器、励磁系统、协同控制器及其协同控制策略与方法等完整成套技术。

2. 提出梯级水光蓄互补系统容量与接入点配置方法。建立多时间尺度下适应不同互补模式的水光蓄资源模型，提出规划与运行、并/离网工况的梯级水光蓄双层容量优化配置方法，提出基于电站特征与电网支撑能力交互分析的接入点多目标优化方法，实现了多维不确定性下互补系统容量优化配置与接入。

3. 攻克梯级水光蓄互补系统多时间尺度联合运行难题。建立刻画光伏随机波动特性的伊藤随机过程模型，发明了水光蓄互补系统随机安全运行区间分析方法，提出基于变速抽蓄功率基值的光伏出力模糊自适应分解方法，对互补系统的送出平滑、响应速度、调节精度等实时控制要求，利用梯级水位控制与流量平衡进行平滑优化协调控制。

4. 研制了自主可控的梯级水光蓄互补系统成套装备及系列软件并推广应用。包括国内首套全功率变速抽蓄成套装备、梯级水光蓄互补系统联合运行控制与智能调度系统等系

列软件。建成投运世界首个梯级水光蓄互补系统，极大提升新能源友好并网水平。

项目授权发明专利 60 项，登记软著 15 项，发表论文 75 篇，出版专著 3 部，发布行/团标 5 项。郭剑波、许唯临、王成山院士领衔的鉴定委员会认为：项目成果整体达到国际领先水平，打破了国外技术垄断，有效提升行业和国际影响力。项目成果已在四川小金川流域整体应用。水光蓄互补技术推广至四川、西藏、贵州等省份 40 余个水光互补工程，引领梯级流域水风光一体化开发；变速抽蓄机组设计与控制技术有效支撑国产大型变速抽蓄机组研制，对产业发展具有重大意义。成果还推广至印尼、巴基斯坦、老挝、刚果（金）等“一带一路”国家，为我国企业“走出去”提供了有力支撑。近三年，直接经济效益超过 40 亿元，经济社会生态效益显著。

四、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利(标准)有效状态
1	发明专利	一种基于 CVaR 的多能互补发电系统的容量配置优化方法	中国	ZL202110821828.3	2022.03.08	6825391	国网四川省电力公司；四川大学	韩晓言；苏少春；胡灿；朱童；蒋万泉；刘继春；刘俊勇	有效
2	发明专利	全功率抽蓄机组最大功率阶段跃量评估方法、调控方法	中国	ZL202211199546.5	2021.12.07	7276215	国网四川省电力公司电力科学研究院	丁理杰；史华勃；韩晓言；陈刚；姜振超；王永灿；周文越	有效
3	发明专利	一种梯级水电与光伏协同运	中国	ZL202410132663.2	2020.02.14	6948078	国电南瑞科技股份有限公司；南京南瑞	单鹏珠；阎应飞；喻洋洋；陈鹏；	有效

		行的超前预测控制方法及系统					水利水电科技有限公司；国网四川省电力公司电力科学研究院；清华四川能源互联网研究院	蔡杰；陈刚；罗彬；史华勃；戎刚；丁理杰；王亦宁	
4	发明专利	水光互补系统离网条件下频率振荡控制方法及系统	中国	ZL202011098304.8	2022.03.25	4986062	国网四川省电力公司电力科学研究院；国网四川省电力公司	陈刚；丁理杰；王亮；韩晓言；魏巍；苗树敏；范成围	有效
5	发明专利	一种变速恒频抽蓄机组快速功率控制及频率振荡抑制方法	中国	ZL202010903605.7	2024.03.26	4833926	国网四川省电力公司电力科学研究院	史华勃；陈刚；滕予非；丁理杰；孙昕炜；刘畅；魏巍；王亮；石鹏	有效
6	发明专利	一种含水光的多能源互补发电系统容量配置方法	中国	ZL201811560486.9	2024.08.09	3693190	四川大学	刘继春；李健华；刘俊勇	有效
7	发明专利	全功率变频抽蓄水轮机工况运行全路径优化方法和系统	中国	ZL202111253962.4	2022.10.11	5505525	中国水利水电科学研究院；北京中水科水电科技开发有限公司	薛鹏；王鑫；陈锐；田娅娟；孟龙；张驰也；莫为泽；彭忠年；李铁友；瞿军；易艳林；何邦应	有效
8	发明专利	一种基于梯级径流式水电的光伏波动平滑控制方法与系统	中国	ZL202410105258.1	2024.04.09	6882652	南京南瑞水利水电科技有限公司；国电南瑞科技股份有限公司；国网四川省电力公司电力科学研究院；清华四川能源互联网研究院；南方电网储能股份有限公司西部检修试验分公司	单鹏珠；阎应飞；喻洋洋；陈鹏；蔡杰；陈刚；罗彬；史华勃；戎刚；丁理杰；王亦宁	有效
9	发明专利	一种利用梯级水电扩建全功率变速抽	中国	ZL202111424028.4	2023.08.01	6193670	国网四川省电力公司电力科学研究院	陈刚；韩晓言；丁理杰；王亮；史华勃；王永灿；	有效

		水蓄能机组的方法						王曦;周波;范成围;靳旦;李燕	
10	发明专利	全功率变速恒频抽水蓄机组控制模式切换方法、系统及设备	中国	ZL202111461090.0	2022.09.27	5485071	国网四川省电力公司电力科学研究院	史华勃、陈刚、丁理杰、王永灿	有效

五、论文专著目录

序号	论文（专著） 名称/刊名 /作者	年卷页码 （xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间 （年月 日）	通讯作 者（含 共同）	第一 作者 （含 共同）	国内作者	他引 总次 数	检索数 据库
1	水光蓄互补发电规划/中国电力出版社	/	2024 年 5 月 1 日	/	刘俊 勇	刘俊勇; 蒋传 文; 胡维昊; 刘继春; 韩晓 言	/	/
2	新能源电力系统随机过程分析与控制/科学出版社	/	2020 年 7 月 1 日	/	林今	林今; 陈晓 爽; 宋永华; 刘锋	/	/
3	梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望/电工技术学报	2020 年 35 卷 2712-2721 页	2020 年 4 月 28 日	陈刚	韩晓 言	韩晓言; 丁理 杰; 陈刚; 刘 俊勇; 林今	68	中国知 网
4	全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性/电力自动化设备	2024 年 44 卷 166-179 页	2023 年 7 月 3 日	史华勃	丁理 杰	丁理杰; 史华 勃; 陈刚; 周 文越; 姜海 军; 薛玉林; 杨炳全	2	中国知 网
5	Stochastic Online Generation Control of Cascaded Run-of-the-River Hydropower for Mitigating Solar Power Volatility/ IEEE Transactions on Power Systems	2020 年 35 卷 4709-4721 页	2020 年 4 月 29 日	林今	邱一 苇	邱一苇; 林 今; 刘锋; 宋 永华; 陈刚; 丁理杰	41	IEEE/I ET Electro nic Library (美国 电气电 子工程 师学会 数据 库)

六、主要完成人情况：

姓名	韩晓言	排名	1
行政职务	一级协理	工作单位	国网四川省电力公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	国网四川省电力公司
对本项目技术性创造贡献： 项目负责人，主持制定项目研究技术路线，负责各项研究工作推进和总体把控，提出梯级水光器互补联合发电系统三种互补模式，带领团队攻克了梯级水光蓄互补联合发电系列关键技术，并实现应用，对创新点 1、2、3、4 均有突出贡献。旁证材料：一种基于 CVaR 的多能互补发电系统的容量配置优化方法等 15 项发明专利，梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望等 25 篇论文，参与编写《水光蓄互补发电规划》专著 1 部。			
姓名	丁理杰	排名	2
行政职务	总经理	工作单位	四川思极科技有限公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	国网四川省电力公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、2、3、4 做出突出贡献。制定互补联合发电系统运行、控制与调度策略，提出全功率变速抽水蓄能机组协同控制技术路线，组织编制春厂坝变速抽蓄机组调试大纲推动项目成果示范应用，旁证材料：一种变速恒频抽机组快速功率控制及频率振荡抑制方法等 25 项发明专利，全功率变速抽水蓄能机组快速功率式小信号建模等 19 篇论文，参与编制 1 项行业标准。			
姓名	刘俊勇	排名	3
行政职务	无	工作单位	四川大学
技术职称	教授	完成单位	四川大学
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 2、4 做出贡献，提出了多元不确定性下梯级水光蓄互补系统容量优化配置方法，建立水光蓄接入模式及电网支撑能力评估指标体系，研发了梯级水光蓄互补电站规划软件，实现了多时间尺度关联、水光荷多元不确定性下水光蓄容量配置。旁证材料：一种含水光的多能源互补发电系统容量配置方法发明专利 6 项，10 篇论文，2 项软著，《水光蓄互补发电规划》专著 1 部。			
姓名	单鹏珠	排名	4
行政职务	无	工作单位	国电南瑞科技股份有限公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	国电南瑞科技股份有限公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、3、4 做出突出贡献，提出一种水电机组功率调节输入输出优化方法，研发梯级水光蓄互补联合运行控制与智能调度系统，并实现示范应用，有效降低梯级水光蓄联合送出功率波动，提升区域电网对新能源的消纳能力。旁证材料：一种梯级水电与光伏协同运行			

的超前预测控制方法及系统等 8 项发明专利，3 篇论文，2 项软著。			
姓名	马智杰	排名	5
行政职务	无	工作单位	中国电力工程顾问集团 华北电力设计院有限公司
技术职称	教授级高级工程师	完成单位	中国水利水电科学研究院
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、4 做出贡献，作为国重项目课题负责人，组织开展国内首台全功率变速抽蓄机组研制工作，突破全功率变速抽蓄成套设备技术壁垒，推动在春厂坝全功率变速抽水蓄能电站的并网运行。旁证材料：Adjustability Analysis of Variable-Speed Technology for Hydropower Unit Using Converter 等 3 篇论文，1 项行业标准。			
姓名	林今	排名	6
行政职务	无	工作单位	清华四川能源互联网研究院
技术职称	副教授	完成单位	清华四川能源互联网研究院
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 3、4 做出贡献，提出了基于随机模型描述的梯级水光动态建模方法，提出了基于伊藤过程和稀疏逼近的互补系统安全运行边界分析方法，研发了互补系统运行安全分析软件，为互补系统提供了安全运行边界。旁证材料：一种用于控制水光互补外送电网频率稳定的方法及系统等 5 项发明专利，11 篇论文，《新能源电力系统随机过程分析与控制》专著 1 部。			
姓名	王胜	排名	7
行政职务	总工程师	工作单位	中电建水电开发集团有限公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	中电建水电开发集团有限公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 4 做出贡献，组织开展国内首座全功率变速抽蓄电站建设工作，推动项目技术落地应用。旁证材料：梯级水光蓄互补联合发电系统工程中抽蓄机组厂房布置研究与结构设计等 2 篇论文。			
姓名	陈刚	排名	8
行政职务	国网四川电科院室副主任	工作单位	国网四川省电力公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	国网四川省电力公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、2、3、4 做出贡献，提出了全功率变速恒频抽蓄机组控制模式切换方法实现了全功率变速抽水蓄能机组的快速响应和高效运行；提出了水光互补系统离网条件下频率振荡控制方法，实现水光互补发电系统在离网运行时区域电网的频率稳定，保障了区域系统的安全稳定。旁证材料：水光互补系统离网条件下频率振荡控制方法及系统等 24 项发明专利，20 篇论文。			
姓名	陈向东	排名	9
行政职务	无	工作单位	中国电建集团成都勘测设计研究院有

			限公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 4 做出贡献，完成全功率变速抽水蓄能电站设计，推动项目技术落地应用。旁证材料：抽蓄电站抽蓄机组与常规机组混合布置结构等 2 项专利。			
姓名	史华勃	排名	10
行政职务	无	工作单位	国网四川省电力公司
技术职称	高级工程师	完成单位	国网四川省电力公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、4 做出贡献，提出了一种变速恒频抽蓄机组频率控制及功率响应性能提升方法，建立了全功率抽蓄机组多工况仿真模型，分析了机组动态稳定特性与功频调节特性，实现全功率变速抽水蓄能机组的快速变功率与快速变转速相结合的协调控制。旁证材料：一种变速恒频抽蓄机组频率控制及功率响应性能提升方法等 9 项发明专利，全功率变速抽水蓄能机组变速变功率协同控制策略研究等 8 篇论文。			
姓名	李桂芬	排名	11
行政职务	无	工作单位	哈尔滨电机厂有限责任公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	哈尔滨电机厂有限责任公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、4 做出贡献，提出了适应快速响应、宽变速范围等特点的最优全功率变速发电电动机最优设计方案，研制了 5MW 级全功率变速发电电动机，形成了全功率变速发电电动机设计、制造以及调试等完整成套技术，填补了国内空白。旁证材料：一种可变速电机电动工况次同步负载试验方法等 4 项发明专利，1 项软著。			
姓名	莫为泽	排名	12
行政职务	无	工作单位	中国水利水电科学研究院
技术职称	教授级高级工程师	完成单位	中国水利水电科学研究院
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 1、4 做出贡献。提出可逆式水泵水轮机快速有功功率响应能力多种运行模式及相应的运行方法，建立全功率变速水泵水轮机设计方法、运转路径和多种运行模式体系，研制国内首台套全功率变速可逆式水泵水轮机，填补国内空白。旁证材料：全功率变频水轮机工况快速有功功率响应运行方法和系统等 3 项发明专利。			
姓名	卢彦林	排名	13
行政职务	总工程师	工作单位	中电建水电开发集团有限公司四川小金川水电开发有限公司
技术职称	高级工程师	完成单位	中电建水电开发集团有限公司
对本项目技术性创造贡献：			

主要对创新点 4 做出贡献，提出了一种用于双并网模式变速恒频抽水蓄能电站的控制方法。 旁证材料：一种用于双并网模式变速恒频抽水蓄能电站的控制方法等 5 项发明专利。			
姓名	聂强	排名	14
行政职务	副总工程师	工作单位	雅砻江流域水电开发有限公司
技术职称	正高级工程师	完成单位	雅砻江流域水电开发有限公司
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 4 做出贡献，推动梯级水光蓄互补技术应用。旁证材料：一种水电集控中心一体化平台系统的云部署方法等 3 项发明专利。			
姓名	罗彬	排名	15
行政职务	无	工作单位	清华四川能源互联网研究院
技术职称	副研究员	完成单位	清华四川能源互联网研究院
对本项目技术性创造贡献： 主要对创新点 3、4 做出贡献，提出了基于多项式混沌展开的水光蓄互补系统随机安全运行分析方法，研发了梯级水光互补系统运行安全分析软件，为互补系统提供安全运行边界，并可校核发电计划的安全合理性，支撑工程示范应用。旁证材料：水光互补系统的运行安全校核方法和装置、电子设备等 8 项专利，梯级水光互补联合发电系统安全运行区间分析软件等 3 项软件著作权。			

七、主要完成单位及创新推广贡献：

单位名称	国网四川省电力公司	排名	1
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目牵头负责单位，对项目创新点 1、2、3、4 均有突出贡献，提出了项目的技术路线，组织开展项目技术攻关，提出梯级水光蓄中长期电量互补、短期电力互补、实时控制互补三种互补模式，攻克梯级水光蓄互补联合系统规划、运行、控制、调度系列关键技术，突破全功率变速抽水蓄能机组协同控制核心技术，牵头研发国内首套全功率变速抽水蓄能成套设备，打破国外技术垄断，在小金川流域建成世界首例梯级水光蓄互补联合发电系统，为新型电力系统提供了可复制、可推广的示范样板。			
单位名称	中电建水电开发集团有限公司	排名	2
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目的主要参与单位，对创新点 4 有突出贡献，主要负责承担梯级水光蓄联合运行发电系统和全功率变速抽水蓄能示范电站建设，形成了“195MW 水电+50MW 光伏+5MW 变速抽蓄”的小金川流域梯级水光蓄互补联合发电系统，支撑实现国内首座变速抽蓄电站和国际首个梯级水光蓄互补联合发电系统建设和应用。			
单位名称	清华四川能源互联网研究院	排名	3
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献：			

作为项目的主要参与单位，主要对创新点 3、4 有突出贡献，开展梯级水光蓄互补系统运行与控制技术研究，提出基于伊藤随机微分方程的光伏随机出力及梯级径流式小水电动态建模方法，以统一的微分方程形式建立梯级水光互补发电系统的完整随机动态模型，为互补系统的动态安全分析和控制奠定理论基础，研发了互补系统的安全运行区间分析软件，支撑梯级水光蓄互补系统安全运行。			
单位名称	国电南瑞科技股份有限公司	排名	4
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目主要完成单位，对创新点 1、3、4 有突出贡献。主要承担梯级水光蓄互补电站联合运行控制与智能调度系统、全功率变流器、励磁系统、协同控制器等设备及系统研制，实现了梯级小水电、光伏、抽蓄以及梯级水电站水库的优化协同控制，实现变速抽水蓄能关键核心技术的完全自主可控，为电站安全稳定高效运行提供了有力支撑。			
单位名称	中国水利水电科学研究院	排名	5
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目主要完成单位，对创新点 1、4 有突出贡献，负责全功率变速可逆式水泵水轮机和调速系统研制，提出了全功率变速水泵水轮机水力设计技术、机组快速平稳启/停及优化运行全路径、机组多种运行模式及相应的运行控制策略，助力全功率变速抽水蓄能机组突破了兼顾全运行范围高效稳定与快速功率响应能力的技术难题，有效支撑了国内首座全功率变速抽水蓄能电站建设。			
单位名称	四川大学	排名	6
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目主要参与单位，对创新点 2、4 有突出贡献，牵头开展梯级水光蓄互补系统容量优化配置及接入技术研究，提出了考虑水光荷不确定性的规划场景生成技术，建立了基于规划与运行一体化的双层容量优化模型，提出采用接入点多目标优化与电网支撑能力评估的两阶段优化方法，研发了梯级水光蓄互补电站容量配置和接入规划软件，为推广梯级水光蓄互补联合发电模式提供容量配置指引。			
单位名称	东方电气集团科学技术研究院有限公司	排名	7
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目的主要参与单位，对创新点 1、4 有创造性贡献。建立了基于 RTDS 的变速抽水蓄能控制器硬件在环仿真平台，对变速抽蓄多种运行模式控制策略开展仿真验证，为变速抽水蓄能电站的稳定运行提供有效保障。			
单位名称	哈尔滨电机厂有限责任公司	排名	8
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目的主要参与单位，对创新点 1、4 有突出贡献，主要承担 5MW 级全功率变速发电电动机的研发和制造工作，突破了全功率变速发电电动机设计中的电磁、通风、绝缘等各项关键技术难题，提出了适应快速响应、宽变速范围等特点的最优电磁方案及电机结构。			
单位名称	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公	排名	9

	司		
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 作为项目的主要参与单位，主要对创新点 2、3、4 有突出贡献，全程参与全功率变速抽水蓄能电站选点、设计、安装及调试，提出抽水蓄能扩建竖井式厂房结构以及抽蓄电站抽蓄机组与常规机组混合布置结构，保障了国内首座全功率变速抽水蓄能机组顺利投运，并开展梯级水光蓄互补规划技术推广应用。			
单位名称	雅砻江流域水电开发有限公司		10
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： 主要对创新点 4 做出贡献，推动梯级水光蓄互补技术应用，将项目提出的梯级水光蓄互补技术推广应用于雅砻江流域。			