

2024 年度山东省科技进步奖提名项目

一、项目情况

项目名称	大容量高效柔直变压器研制关键技术、成套装备及工程应用
项目简介	<p>随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，“大容量+高效”已经成为国内外柔直工程及配套设备发展的必然趋势。换流变压器是柔性直流输电单机价值和技术水平最高的设备之一，国内外生产厂家均无设计及制造大容量、高效柔性直流变压器经验，目前仍存在以下难题：①多场耦合工况下容量大、绕组电流大造成柔直变压器的漏磁通密度较大，直阻损耗、涡流损耗、杂散损耗等大大增加，局部过热、漏磁、防爆难以控制；②柔直变压器制造周期较长，制造精度和抗短路强度难以保证；③体积增大、油循环差导致大容量柔直变压器故障监测精度、检修效率难以保证。</p> <p>本项目构建了复杂工况下大容量柔直变压器材料与结构优选技术，增强了大容量柔直变压器的工艺、品质、试验把控，形成了大容量柔直变压器防燃爆与智能检修技术，汇聚产学研团队，构建了换流站大型关键设备设计、选型、生产、试验、工程应用不同阶段全流程技术链条，主要创新点如下：</p> <p>创新点 1：提出了复杂工况下大容量柔直变压器材料与结构优选技术。提出了大容量柔直变压器材料选型与结构设计多性能调控方法，多场计算值与实测值误差均小于 0.9 %。首创了损耗-温升约束下大容量柔直变压器材料与结构优选技术，构建了柔直变关键部位材料优选及磁屏蔽优化设计方案，相较同类产品空载损耗降低 25.7%、负载损耗降低 29.6 %、温升降低 48.8 %。发明了柔直变压器电弧放电防爆并行计算与结构抗爆优化设计方法，攻克了复杂工况下大容量柔直变设计的难题。</p> <p>创新点 2：提出了大容量柔直变压器智能制造与品质管控技术。独创了铁心步进阶梯接缝、解体式绑扎工艺和线圈链式绑扎工艺，建立了产品数字化样机与智能制造平台，提高了关键组部件的机械强度和电气绝缘裕度，解决了大容量柔直变压器抗短路力不足造成绝缘损伤的问题，提升了产品整体工艺装配效率和大电流及长期谐波运行工况下的运行可靠性。</p>

	<p>创新点 3：研发了大容量柔直变压器防燃爆与智能检修技术。提出了柔直变压器升高座与有载分接开关等关键部件燃弧试验方法，有效指导了变压器油箱防燃爆设计优化与性能考核；创新了柔直变压器机械状态评估技术，提出了考虑温度和累积效应的变压器抗短路能力校核方法，大幅提升了检修策略的科学性；提出了基于油中溶解气体扩散规律故障定位方法，实现柔直变压器出线部位死油区故障准确定位；研发柔直变压器内部智能检测机器人，深度定位误差$< \pm 10\text{mm}$，实现了柔直变压器内部故障的不排油检测，内部故障识别率高于 90%，检修效率提升 72 倍。</p> <p>项目创新性成果显著，突破传统研究技术瓶颈，引领大容量、高能效等级柔直变压器相关技术研究。经中国电力企业联合会组织专家鉴定，项目成果为单台容量 575MVA，世界范围内容量最大，也是国内首个考虑能效等级设计、损耗率最低的柔直变压器。</p> <p>该项目 2018 年实施至今：授权发明专利 17 项，编写标准 6 项，发表论文 20 篇。项目研究成果已在张北柔性直流电网示范工程、大湾区南粤直流背靠背工程中获得实际应用，经济社会效益显著，关键技术可推广应用于大容量柔直输电工程，从设备端有效降低了电力损耗，保障了新能源跨区域输送安全，加快了构建现代能源体系，为建设能源强国做出了贡献。经中国电力企业联合会组织专家鉴定，项目整体技术水平居于国际领先水平。</p>
--	---

二、提名单位及提名意见、提名等级

提名单位	山东省能源局
提名意见	<p>我单位认真审阅了该项目有关材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合山东省科学技术奖励委员会办公室的填写要求。</p> <p>按照要求，项目完成单位已对该项目的拟提名情况进行了公示，公示期间无异议。</p> <p>大容量、高能效柔性直流电网工程柔直变压器国内外生产厂家均无设计及制造经验，存在以下难题：①多场耦合工况下容量大、绕组电流大造成柔直变压器的漏磁通密度较大，直阻损耗、涡流损耗、杂散损耗等大大增加，局部过热、漏磁、防爆难以控制；②柔直变压器制造周期较长，制造精度和抗短路强度难以保证；③体积增大、油循环差导致大容量柔直变压器故障监测精度、检修效率难以保证。</p> <p>该项目构建了复杂工况下大容量柔直变压器材料与结构优选技术，增强了大容量柔直变压器的工艺、品质、试验把控，形成了大容量柔直变压器防燃爆与智能检修技术，构建了换流站大型关键设备从设计、选型、生产、试验、工程应用的全流程技术链条，为柔性直流电网工程的建设和可靠运行提供了有利保障。项目创新性成果显著，突破传统研究技术瓶颈，引领大容量、高能耗柔直关键设备技术研究，经中国电力企业联合会组织专家鉴定，项目整体技术水平居于国际领先水平。</p> <p>该项目 2018 年实施至今，共获得授权发明专利 17 项，编写标准 6 项，发表论文 20 篇。项目研究成果已在张北柔性直流电网示范工程、大湾区南粤直流背靠背工程中获得实际应用，运行状态良好，经济社会效益显著，关键技术可推广应用于大容量柔直输电工程，从设备端有效降低电力损耗，解决电网短路电流超标和大面积停电这两大安全隐患，大大提升高压电力装备和交直流复杂大电网的安全运行水平。</p> <p>该项目已征求了崔萍（山东建筑大学、热能工程）、叶华（山东大学、电气工程）、孙荣峰（山东省科学院、新能源）、马思乐（山东大学、智能控制）、逯一中（济南大学、光电催化与生物分析）等 5 名专家意见。</p> <p>本单位于 2024 年 6 月 3 日至 7 日通过省能源局网站对该项目进行公示。</p>
提名等级	对照山东省科学技术授奖条件，提名该项目为山东省科学技术进步奖二等奖。

三、主要完成单位情况

<p>完成单位排序及创新推广贡献</p>	<p>主要完成单位排序：山东电力设备有限公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、山东大学、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院、山东输变电设备有限公司、山东电工电气集团有限公司。</p> <p>1. 山东电力设备有限公司，排名 1。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>作为项目主要完成单位，为项目组织实施提供了良好的人才和条件支撑，对项目技术创新及推广应用做出了突出贡献。</p> <p>（1）对创新点 1 提出了损耗-温升约束下大容量柔直变压器材料与结构优选技术。首创了采用步进叠积磁密优化的柔直变铁心结构优选方法以及基于旁路补偿漏磁抑制的高场强区屏蔽结构，构建了柔直变关键部位材料优选及磁屏蔽优化设计方案。</p> <p>（2）对创新点 2 提出了铁心、绕组精度控制工艺。国内首次在大容量柔直变中应用了 70 高牌号硅钢片，创新性提出了铁心截面优化方案，采用了步进阶梯接缝单片叠积工艺和解体式铁芯绑扎工艺方法。配合山东输变电设备有限公司建立了产品数字化样机，采用新型工艺工装实现换流变压器的智能制造，保证了产品在高电压和大电流及长期谐波运行工况的可靠性应用。</p> <p>（3）对创新点 3 提出柔直变压器升高座与有载分接开关关键部件燃弧试验方法；研发了“螺旋桨+丝杠滑块”双驱动推进的柔直变压器内部智能检测机器人，深度定位误差$< \pm 10\text{mm}$，最大运动速度 0.3m/s，实现了柔直变压器内部故障故障识别率高于 90%，大幅缩短变压器停电检修时长，由 9 个工作日以上缩短至 3 小时以内。</p> <p>2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院，排名 2。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>组建了广东电网柔直技术攻关团队成员，全程负责组织参与南粤换流站柔直变压器等定制型直流主设备设计规范书的编制、审核、合同谈判、设计联络、设备冻结，参与了柔性直流换流变压器技术攻关。</p> <p>对创新点 3 揭示了短路冲击电流对变压器机械累积损伤的作用规律，提出了考虑温度和累积效应的变压器机械状态评估方法，实现了柔直变压器机械状态的准确实时评估；仿真、试验获取不同温度、电场下特征气体扩散系数，建立了油中气体 ReLU-DBN 诊断模型，形成了油中气体-故障反演方法，诊断效果优于 IEC 比值、Rogers 比值、Dornenburg 比值为特征参量的模型，有效解决了柔直变压器内部过热、放电复合型故障的准确评估和精确定位问题，定位误差小于 10cm。</p>
----------------------	--

	<p>3. 山东大学，排名 3。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>山东大学为项目组织实施提供了理论与方法的支撑，对创新点 1 配合山东电力设备有限公司建立了换流变振动与噪声模型，提出了振动与噪声抑制方法，分析了直流偏磁对换流变运行的影响，同时推动柔直变压器降损耗关键技术和高可靠性技术的研究。配合山东电力设备有限公司进行模型优化、方案校核，推动整个项目的理论深化研究。</p> <p>4. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，排名 4。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>对创新点 1 发明了柔直变压器电弧放电防爆并行计算与结构抗爆优化设计方法。提出了高能电弧放电区数值求解的无网格通量校正运移的小波变换并行算法，解决了电磁场集中区域有限元法求解高密度网格畸变的迭代发散问题。提出了柔直变压器电弧放电固-气-液耦合瞬态压力波传递与结构抗爆优化设计求解的信赖域正则化方法，克服了求解步长大引起的计算误差增加的问题。</p> <p>对创新点 3 配合山东电力设备有限公司提出了柔直变压器升高座与有载分接开关关键部件燃弧试验方法，首次开展大型变压器升高座、有载分接开关燃弧试验，获取不同能量故障下油箱内部压力变化规律，提出瓦斯继电器、压力释放阀等柔直变压器非电量保护的配置与整定要求，实现柔直变压器防燃爆性能考核与评估。</p> <p>5. 山东输变电设备有限公司，排名 5。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>对创新点 2 配合山东电力设备有限公司实现超特高压出线装置、变压器出线装置防下沉绝缘结构、阀套管支撑等关键组部件创新，建立了产品数字化样机与智能制造平台，优化了绝缘件加工、铁心剪裁叠装等工序设备，实现了端圈垫块、磁屏蔽、滑石片、油道垫条等小组件的自动装配，大大提高了柔直变压器生产智能化水平。</p> <p>6. 山东电工电气集团有限公司，排名 6。</p> <p>对本项目贡献：</p> <p>公司进行了前期市场调研，同时结合理论建模分析和最终结构方案，完善样机电磁计算和总布置设计，开展部件设计、校核与评审，形成全套自主图纸。</p> <p>对创新点 2 配合山东电力设备有限公司、山东输变电设备有限公司进行出线装置、调压绕组等结构创新，推动产品数字化样机与智能制造平台，优化工序装配工艺，最终依托工程需求实现大容量、高能效柔直变压器批量化制造。</p>
--	---

四、主要完成人情况

全部完成人排序及对项目的贡献	<p>主要完成人：孙优良、郭鹏鸿、杨仁毅、邓军、蔡玲珑、张黎、徐永伟、周斌、周丹、谢志成</p> <p>1. 孙优良，排名 1，山东电力设备有限公司总工程师，教授级高级工程师，山东电力设备有限公司，第一完成单位。</p> <p>对本项目贡献：项目主要负责人，从事该项目方案设计与核心技术攻关，负责样机研制的整体协调、策划与技术指导工作，开展柔直变关键降损耗技术研究和高可靠性技术研究。对创新点 1、2、3 有贡献。</p> <p>2. 郭鹏鸿，排名 2，山东电力设备有限公司总工程师，高级工程师，山东电力设备有限公司，第一完成单位。</p> <p>对本项目贡献：该项目主要参与者，具体负责实施本项目关键组部件创新和产品质量把控、工艺创新。对创新点 1、2 有贡献。</p> <p>3. 杨仁毅，排名 3，直流设计部主任，高级工程师，山东电力设备有限公司，第一完成单位。</p> <p>对本项目贡献：该项目主要参与者，负责大容量柔直变压器出线装置等关键组部件结构创新。对创新点 1、2 有贡献。</p> <p>4. 邓军，排名 4，南网高级技术专家，正高级工程师，中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，第四完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责柔直变压器电弧放电防爆并行计算与结构抗爆优化设计方法。对创新点 1、3 有贡献。</p> <p>5. 蔡玲珑，排名 5，变电所副所长，工程师，广东电网有限责任公司电力科学研究院，第二完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责本项目中大容量柔直变压器防燃爆与智能检修技术。对创新点 1、3 有贡献。</p> <p>6. 张黎，排名 6，博士生导师，副教授，山东大学，第三完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责基于模糊信息粒化的柔直变压器结构件热点分布规律分析和变压器振动特性分析。对创新点 1 有贡献。</p> <p>7. 徐永伟，排名 7，直流设计部技术总监，高级工程师，山东电力设备有限公司，第一完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责开展柔直变关键降损耗技术研究和高可靠性技术研究。对创新点 1、2 有贡献。</p> <p>8. 周斌，排名 8，直流设计部副主任，中级工程师，山东电力设备有限公司，第一完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责关键组部件创新和产品质量把控、工艺创新。对创新点 1、2 有贡献。</p> <p>9. 周丹，排名 9，正高级工程师，广东电网有限责任公司电力科学研</p>
----------------	--

	<p>究院，第二完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责实施本项目柔直变压器升高座与有载分接开关等关键部件燃弧试验方法和关键部件创新。对创新点 3 有贡献。</p> <p>10. 谢志成，排名 10，高级工程师，中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，第四完成单位。</p> <p>对本项目贡献：负责实施本项目变压器振动特性和结构抗爆优化设计方法。对创新点 3 有贡献。</p>
--	--

五、主要知识产权和标准规范等目录（不超过 10 件）

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	第一完成人是否为发明人（标准起草人）	第一完成单位是否为权利人（标准起草单位）
发明专利	一种换流变压器引线布置结构	中国	ZL201611158084.7	2018.12.11	3177057	山东电力设备有限公司； 国网山东省电力公司电力科学研究院	李昌蕾、孙优良、王明胜、杨鑫泰、郭鹏鸿、王磊、郭爱春、杨同勋	有效	是	是
实用新型专利	螺旋闭口静电环和调压线圈及柔性直流变压器线圈结构	中国	ZL202220064758.1	2022.08.16	17189878	山东输变电设备有限公司； 山东电力设备有限公司	张会敏；李庭庭；郭鹏鸿；杨仁毅；孙优良；杨伟光；焉媛媛；徐富强	有效	是	是
实用新型专利	一种绝缘接地屏蔽装置	中国	ZL202321539816.2	2023.12.19	20180578	山东电力设备有限公司 山东输变电设备有限公司	贾志玲；孙优良；柴东新；杨仁毅；郝娜；焉媛媛；李庭庭；张曼玉；张会敏；杜廷霞	有效	是	是
发明专利	一种新型超特高压出线装置的设计方法及出线装置结构	中国	ZL202010689245.5	2022.05.24	5177740	山东电力设备有限公司； 山东电工电气集团有限公司； 中国电力科学研究院有限公司	杨仁毅；季炜；栾兰；韩克俊；谈翀；刘光辉；侯岩岩；柴东新；谢宇；谷国栋；李金忠；王琳；孙建涛；张书琦；程涣超	有效	否	是

发明专利	变压器阀套管绝缘支撑和安装导向结构组件及装配方法	中国	ZL202011257584.2	2022.10.28	5543217	山东电力设备有限公司 山东输变电设备有限公司	张曼玉; 马玓; 郭鹏鸿; 王明胜; 杨仁毅; 贾志玲; 周斌; 柴东新; 杨伟光; 张阳阳; 甄浩宇; 邵会朋; 王栋栋	有效	否	是
实用新型专利	一种大电流分流调压绕组	中国	ZL201921165255.8	2020.04.14	10313068	山东电力设备有限公司 山东电工电气集团有限公司	张锋; 谈翀; 郭鹏鸿; 郭爱春; 杨仁毅; 张梓欣; 贾志玲; 郝娜; 杨帅; 王兴烛	有效	否	是
发明专利	一种变压器出线装置防下沉绝缘结构	中国	ZL202010793142.3	2022.12.16	5648945	山东电力设备有限公司 山东输变电设备有限公司	谈翀、卢理成、王磊、郭鹏鸿、马玓、张志强、王明胜、徐富强、徐永伟、李庭庭、孙丰州、袁建凯	有效	否	是
发明专利	一种变压器绕组变形故障定位检测方法	中国	ZL2011911379737.8	2021.11.02	4771296	广东电网有限责任公司 电力科学研究院	杨贤; 蔡玲珑; 孙文星; 肖祥; 马志钦; 周丹; 靳宇晖; 周永言; 刘剑锋; 向淳; 潘君镇	有效	否	否
发明专利	基于模糊信息粒化的变压器绕组热点温度波动范围预测方法	中国	ZL201810481085.8	2021.07.26	4554070	山东大学	赵彤; 张黎; 邹亮; 刘金鑫; 段小木; 王晓龙	有效	否	否
发明专利	特高压换流变压器内部瞬态电压传递规律试验装置及方法	中国	ZL202110485020.2	2022.08.16	5383128	中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心	邓军; 谢志成; 邓集瀚; 潘志城; 卢文浩; 梁晨; 刘青松; 张晋寅; 周海滨; 楚金伟; 彭翔; 梁毅灵; 刘金	有效	否	否