**一、项目名称**

模块化多电平柔性直流输电技术、装备及工程应用

**二、推荐单位**

中国电机工程学会

**三、项目简介**

柔性直流输电技术是继交流输电和常规直流输电之后的新型输电技术，通过采用全控型电力电子器件构成的电压源型换流器，可任意改变系统输出的电压相角和幅值，在灵活控制传输的电能的同时又能独立调节无功功率，与常规交、直流输电相比具有诸多的技术优势。柔性直流输电技术可解决可再生能源并网、大城市输配网络构建和孤岛供电等电网难题，提高电网安全稳定水平，同时也是国际公认的海上风电场最佳并网方案。因此，柔性直流作为一种具有高度的可控性和高效、灵活运行方式的输电技术，已成为未来直流输电的发展趋势。

本项目历经8年自主创新，取得了一系列具有完全自主知识产权的重大成果。全面完成了基于模块化多电平技术的柔性直流输电基础理论研究、关键技术攻关、试验能力建设、成套设备研制、标准规范制定与工程技术研究，建成了世界首条模块化多电平柔性直流输电风电场并网工程。项目通过了由中国电机工程学会组织的成果鉴定，鉴定委员会认为“项目整体达到国际先进水平，其中模块化多电平换流器动态模拟仿真、高电压宽范围直流取能、全数字分段式IGBT驱动、多层面能量平衡电流控制及高速脉冲分配等技术达到国际领先水平”。

项目共获授权专利82项（其中国际发明1项、国内发明专利46项）；发表SCI论文12篇，EI论文61篇；制订国际标准和导则8项、国家和行业标准4项；编著了包括国内首部柔性直流输电技术专著《基于电压源换流器的高压直流输电技术》在内的学术著作4部。项目成果推动成立了由我国主导的首个国际大电网组织（CIGRE）工作组，制订了相关的国际电工委员会（IEC）和CIGRE标准，大幅度提升了我国在国际电工领域的影响力和话语权。

基于本项目成果，完成了上海南汇柔性直流输电示范工程的规划设计、设备研制、试验测试、系统调试等，并于2011年1月成功投入试运行，经受了工程实践的考验。

通过本项目的开发，我国在短时间内跻身国际高端电力装备制造的制高点，实现了高技术产业的跨越式发展。相关完成单位在近三年内新增产值约14.5亿元。随着世界范围内可再生能源等领域的快速发展，欧美发达国家已经规划了上百条千兆瓦级柔性直流工程，预计该项目成果在未来五年内至少将带来30-50亿元的直接经济效益。

**四、主要完成单位及创新推广贡献**

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 国网智能电网研究院 |
| 排名 | 1 | 法人代表 | 滕乐天 | 所在地 | 北京 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 负责项目技术路线的制定，完成了模块化多电平柔性直流输电的系列理论基础和关键技术研究、核心装备研发、工程实施和推广应用。主要贡献如下：1.负责并完成了模块化多电平柔性直流输电技术的应用基础理论、数学模型和计算分析手段开发。2.负责并完成了模块化多电平柔性直流输电系统研究和关键设备技术规范与参数配合方法研究。3.负责并研制了模块化多电平柔性直流系统关键设备,包括：模块化多电平柔性直流换流阀、阀基控制器等。4.主持和参与了模块化多电平柔性直流输电技术的国际、国家和行业标准和导则的制订。5.提出了多源注入试验方法，完成了模块化多电平柔性直流换流阀试验方法研究和成套试验装备研制，研制了基于可关断器件的动模试验平台。6.负责上海南汇直流工程的系统调试研究和现场调试，参与了工程设计和现场施工、设备验收等工作，并编制了技术报告等技术文件。7.参与了舟山多端柔性直流输电工程的可行性研究、工程方案制订和关键技术开发。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 中国电力科学研究院 |
| 排名 | 2 | 法人代表 | 郭剑波 | 所在地 | 北京 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 2010年，隶属中国电力科学研究院的本项目核心研发团队，整体划转到国网智能电网研究院。本项目前期的理论和技术研究成果为该团队在电科院期间完成，相关的专利等知识产权仍归中国电力科学研究院所有。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 国网上海市电力公司 |
| 排名 | 3 | 法人代表 | 李桂生 | 所在地 | 上海 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 国网上海市电力公司承担了上海南汇柔性直流输电工程的相关技术研究工作和工程实施工作。1.负责上海南汇柔性直流输电工程总体项目管理工作、总体方案审查和技术论证。2.参加了上海南汇柔性直流输电工程模块化多电平技术路线的确定。3.参加了上海南汇柔性直流输电工程高电位直流取能方式的研究及基于保护晶闸管的极端短路故障下IGBT保护技术研究。4.参与编制上海南汇柔性直流输电工程技术标准、规范和导则。5.组织和承担了上海南汇柔性直流输电工程的设计、现场施工和设备验收工作。6.参与了上海南汇柔性直流输电工程用模块化多电平换流阀、阀基控制器以及控制保护系统调试试验。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 国网浙江省电力公司 |
| 排名 | 4 | 法人代表 | 李卫东 | 所在地 | 浙江 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 国网浙江省电力公司承担了舟山五端柔性直流输电工程的相关技术研究工作和工程实施工作。1.负责舟山五端柔性直流输电工程总体项目管理工作、总体方案审查和技术论证。2.牵头实施了舟山五端柔性直流输电工程的整体设计。3.参加了舟山五端柔性直流输电工程换流器协调配合控制策略研究。4.牵头编制舟山五端柔性直流输电工程技术标准、规范和导则。5.组织和承担了舟山五端柔性直流输电工程的现场施工和设备验收工作。6.参与了舟山五端柔性直流输电工程用模块化多电平换流阀、阀基控制器以及控制保护系统调试试验。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 南京南瑞继保电气有限公司 |
| 排名 | 5 | 法人代表 | 沈国荣 | 所在地 | 江苏 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 南京南瑞继保电气有限公司承担完成上海南汇柔性直流输电工程以及舟山五端柔性直流输电工程换流站用控制保护系统关键技术研究。1.参与研究了柔性直流输电控制保护策略的研究和方案制订。2.负责研制了模块化多电平柔性直流输电工程站级控制保护设备。3.组织和承担了上海南汇柔性直流输电工程和舟山五端柔性直流输电工程站内控制保护系统的现场调试和设备验收工作。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 北京网联直流工程技术有限公司 |
| 排名 | 6 | 法人代表 | 刘开俊 | 所在地 | 北京 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 北京网联直流工程技术有限公司负责本项目的设备功能规范制订与工程监造。贡献如下：1．参与模块化多电平柔性直流输电系统的功能规范研究并完成工程用功能规范书的编制。2．参与制定柔性直流输电换流阀、控制保护系统、阀及控制保护系统、接口变压器等主设备的技术与试验规范。3．在设备研制、成套设计、工程设计、设备试验以及现场试验等关键环节中进行技术监督并提供技术咨询。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 中电普瑞电力工程有限公司 |
| 排名 | 7 | 法人代表 | 汤广福 | 所在地 | 北京 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 中电普瑞电力工程有限公司作为直流换流阀生产、试验以及工程实施团队。1.提出了主电路参数多目标协调优化的系统集成技术，完成了1000MW/±320kV柔性直流换流阀、阀控设备、站控设备样机研制。2．制订了系统的模块化多电平换流阀生产、出场测试、现场安装工作，完成了上海工程模块化多电平换流阀及其阀控设备供货。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 浙江大学 |
| 排名 | 8 | 法人代表 | 林建华 | 所在地 | 浙江 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 1．参与柔性直流输电系统与交流系统功率交换机理研究，建立了系统仿真模型，分析了模块化多电平柔性直流输电系统的稳态运行特性。2．参与柔性直流输电接入交流系统分析，建立系统不同暂态工况建立了换流器的输出特性等效模型。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 华北电力大学 |
| 排名 | 9 | 法人代表 | 刘吉臻 | 所在地 | 北京 |
| 对本项目科技创新和推广应用情况的贡献： |
| 1．参与模块化多电平换流阀内部电场、磁场分布特性研究，建立了换流器系统的宽频电磁模型，为换流阀电磁力均衡设计提供了依据。2．参与模块化多电平换流阀故障零部件性能长期演变规律研究，为换流阀可靠性设计提供参考依据。 |

**五、推广应用情况**

1.项目研究成果首次整体应用于±30kV/20MW上海南汇柔性直流输电工程，于2011年7月正式投运。3年多的运行情况表明，工程提高了南汇风电场的故障穿越能力，减少了交流系统故障引起的风电场停运事故。

2.项目研究成果推广应用于浙江舟山五端柔性直流工程，换流站总容量1000兆瓦，直流电压±200千伏，于2014年7月正式投运。工程提高了舟山各岛屿风电场的利用率和可靠性，实现了舟山北部岛屿间电能的灵活转换与相互支援。

3.项目成果推广应用于东北电力大学模块化多电平柔性直流输电动态模拟实验平台，平台于2013年11月正式投入使用。基于平台所建立的柔性直流仿真实验室，承接了大规模风电柔直并网系统输电能力评估与源网协调研究等国家自然科学基金项目，提升了东北电力大学的柔性直流系统仿真实力。

**六、曾获奖励情况**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **获奖项目名称** | **获奖时间** | **奖项名称** | **奖励等级** | **主要获奖人** | **授奖单位** |
| 模块化多电平柔性直流输电关键技术研究、装置研制及应用 | 2013年 | 中国电力科学技术进步奖 | 一等奖 | 汤广福;滕乐天;贺之渊;何维国;田杰 | 中国电机工程学会、中国电力科学技术奖励工作办公室 |

**七、主要知识产权证明目录**

| **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** | **专利有效状态** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 发明 | 一种基于全控器件的电压源换流器基本功能单元 | 中国 | ZL201110030469.6 | 2014.3.12 | 1359370 | 中国电力科学研究院；国家电网公司 | 汤广福；贺之渊；栾洪洲；李强；李云鹏 | 有效专利 |
| 发明 | 一种动态模拟装置与工程控制系统的联合试验方法 | 中国 | ZL201110171902.8 | 2014.2.12 | 1345803 | 中国电力科学研究院；国家电网公司 | 汤广福；刘栋；滕乐天；高阳；杨杰；俞国勤；包海龙 | 有效专利 |
| 发明 | 一种模拟MMC多个子模块的等时间常数缩小子模块板 | 中国 | ZL201010597222.8 | 2014.7.2 | 1472278 | 中国电力科学研究院；上海市电力公司 | 赵岩；刘栋；王姗姗；贺之渊；滕乐天；何维国；刘 隽；张新刚 | 有效专利 |
| 发明 | 一种自动切换工频保护定值的方法 | 中国 | ZL200910030219.5 | 2012.07.18 | 1004452 | 南京南瑞继保电气有限公司;南京南瑞继保工程技术有限公司 | 张翔;田杰;陈松林;李海英;李九虎 | 有效专利 |
| 发明 | 一种保护半导体器件串联运行的有源保护电路 | 中国 | ZL200810240400.4 | 2011.5.11 | 775943 | 中国电力科学研究院; 上海市电力公司 | 庞辉;贺之渊;易荣;李强;罗湘;滕乐天;刘隽 | 有效专利 |
| 发明 | 一种模块化多电平换流器柔性直流输电系统的起动方法 | 中国 | ZL201110100456.1 | 2014.4.23 | 1390371 | 中国电力科学研究院；国家电网公司 | 汤广福；孔明；刘栋；马巍巍；赵岩 | 有效专利 |
| 发明 | 一种模块化多电平换流器子模块控制保护方法 | 中国 | ZL201110007920.2 | 2014.2.12 | 1345849 | 中国电力科学研究院; 国家电网公司 | 贺之渊; 国彬; 杨岳峰; 李超; 高阳 | 有效专利 |
| 发明 | 一种模拟MMC子模块的集成控制子模块板 | 中国 | ZL201010597208.8 | 2014.3.12 | 1357772 | 中国电力科学研究院；上海市电力公司 | 刘栋；汤广福；贺之渊；赵岩；滕乐天；俞国勤；包海龙 | 有效专利 |
| 发明 | 一种高电位取能装置 | 中国 | ZL200810247061.2 | 2011.9.28 | 845049 | 中国电力科学研究院；上海市电力公司 | 苑春明；汤广福；贺之渊；刘谈平；刘栋；何维国 | 有效专利 |
| 发明 | 一种柔性直流输电MMC高压子模块的稳态运行试验方法 | 中国 | ZL201110035911.4 | 2014.7.2 | 1345849 | 中国电力科学研究院；国家电网公司 | 汤广福；査鲲鹏；高冲；罗湘；杨岳峰 | 有效专利 |

**八、主要完成人情况表**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 汤广福 | 排名 | 1 | 技术职称 | 教授级高级工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网智能电网研究院 |
| 对本项目技术创造性贡献：作为本项目技术总负责，主持了项目理论基础研究、关键技术开发、核心装备研制、试验与调试技术开发，提出了模块化多电平换流器的基本功率单元设计方法、模块化多电平柔性直流输电系统动态模拟方法、柔性直流输电工程启动方法、换流阀运行试验方法，牵头研制了模块化多电平柔性直流输电系统动态模拟平台和换流阀运行试验成套装置。旁证材料：专利ZL201110030469.6、ZL201110171902.8等，CIGRE导则447、IEC62543标准制订，中国电机工程学会技术成果鉴定等。 |
| 曾获国家科技奖励情况：2006年，“静止无功补偿器核心技术的研发及应用”，国家科技进步二等奖；2008年，“输电系统中灵活交流输电（可控串补）关键技术和推广应用”，国家科技进步一等奖。 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 滕乐天 | 排名 | 2 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网上海市电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：提出了模块化多电平换流阀纳秒级动态过程控制方法，主持了模块化多电平柔性直流换流阀及阀控装置、柔性直流控制保护装置的研发及其工程化应用，负责了上海南汇柔性直流输电工程的系统设计、工程实施、调试运行和标准规范的制订等工作。旁证材料：专利ZL201110171902.8、ZL201010597222.8等，中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 贺之渊 | 排名 | 3 | 技术职称 | 教授级高级工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网智能电网研究院 |
| 对本项目技术创造性贡献：提出了柔性直流输电的模块化功率单元设计方案，主持了全数字纳秒级驱动、多级串联正激变换取能电路、换流阀高速旁路等关键技术研发，完成了模块化多电平换流阀和成套试验装备的研制，参与了国际标准和导则的编写。旁证材料：专利ZL201110030469.6和ZL201010597222.8等，IEC62501和IEC62543的制订，国家能源局技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 何维国 | 排名 | 4 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网上海市电力公司 | 完成单位 | 国网上海市电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：负责模块化多电平柔性直流换流阀设备的工程化研发，上海南汇柔性直流输电示范工程的可行性论证和规划方案论证，主持完成上海南汇工程的调试和运行维护技术的研发。旁证材料：专利ZL201010597222.8、ZL200810247061.2，中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 田杰 | 排名 | 5 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 南京南瑞继保电气有限公司 | 完成单位 | 南京南瑞继保电气有限公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：负责模块化多电平柔性直流换流阀控制保护设备的关键技术研发和工程化应用，研制了模块化多电平换流站控制保护设备，并牵头完成了在上海南汇柔性直流输电和舟山多端柔性直流输电工程中的应用。旁证材料：专利ZL200910030219.5，中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况：2007年，“PCS-9500高压直流控制和保护系统及其工程应用”，国家科技进步二等奖。 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 杨勇 | 排名 | 6 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网浙江省电力公司 | 完成单位 | 国网浙江省电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：承担了浙江舟山五端柔性直流输电工程的设计、现场施工和设备验收工作，参加了浙江舟山五端柔性直流输电工程模块化多电平技术路线的确定，参与编制了浙江舟山五端柔性直流输电工程技术标准、规范和导则。旁证材料：浙江舟山工程验收意见。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 马为民 | 排名 | 7 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 北京网联直流工程技术有限公司 | 完成单位 | 北京网联直流工程技术有限公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：参与上海南汇柔性直流输电示范工程的可行性论证和规划方案论证，参与制定柔性直流输电换流阀、控制保护系统、阀及控制保护系统、接口变压器等主设备的技术与试验规范。旁证材料：中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 乔卫东 | 排名 | 8 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网上海市电力公司 | 完成单位 | 国网上海市电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：承担了上海南汇柔性直流输电工程的设计、现场施工和设备试验工作，参与编制了上海南汇柔性直流输电工程技术标准、规范和导则。旁证材料：中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 赵岩 | 排名 | 9 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网智能电网研究院 |
| 对本项目技术创造性贡献：提出了适用于双端及多端柔性直流输电系统的控制保护功能配置方案和控制保护与换流阀设备的接口方案，参与了上海南汇柔性直流输电工程换流阀控制保护系统研制。旁证材料：专利ZL201010597222.8和ZL201110100456.1等，中国电机工程学会、国家能源局技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 包海龙 | 排名 | 10 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网上海市电力公司 | 完成单位 | 国网上海市电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：参与了柔性直流输电换流阀的运行试验方法研究和试验规范的制订，参与了上海南汇柔性直流输电工程的设计、现场施工和设备试验工作，参与编制了上海南汇柔性直流输电工程的技术标准、规范和导则。旁证：专利ZL201110171902.8、ZL201010597208.8，中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 杨杰 | 排名 | 11 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网智能电网研究院 |
| 对本项目技术创造性贡献：负责了模块化多电平柔性直流输电系统的系统成套设计及主电路参数设计，提出了采用动模试验技术验证阀控控制功能的方法，参与研制了一体化全功能、全规模柔性直流动态模拟试验平台。旁证材料：专利ZL201110171902.8，中国电机工程学会、国家能源局技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况：无。 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 吕铮 | 排名 | 12 | 技术职称 | 工程师 |
| 工作单位 | 国网智能电网研究院 | 完成单位 | 国网智能电网研究院 |
| 对本项目技术创造性贡献：负责模块化多电平柔性直流换流阀运行型式试验方案设计，提出了模块化多电平换流阀宽频全工况等效试验方法和试验方法，设计了试验电路元件参数，参与研制了合成换流阀成套试验装置及换流阀运行试验装置的控制保护系统。旁证材料：中国电机工程学会、国家能源局技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 董云龙 | 排名 | 13 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 南京南瑞继保电气有限公司 | 完成单位 | 南京南瑞继保电气有限公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：参与模块化多电平柔性直流换流阀控制保护设备研制，负责上海南汇柔性直流输电工程站用控制保护分系统调试，参与柔性直流输电系统调试。旁证材料：中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 黄晓明 | 排名 | 14 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 国网浙江省电力公司 | 完成单位 | 国网浙江省电力公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：负责浙江舟山五端工程系统调试，参与了浙江舟山五端柔性直流输电工程的设计、现场施工和设备验收工作，参与编制浙江舟山五端柔性直流输电工程技术标准、规范和导则。旁证材料：浙江舟山工程验收意见。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 马玉龙 | 排名 | 15 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 北京网联直流工程技术有限公司 | 完成单位 | 北京网联直流工程技术有限公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：参与了上海南汇柔性直流输电工程及舟山柔性直流输电工程系统研究，编写了柔性直流输电换流阀、控制保护系统、阀及控制保护系统等主设备的技术标准与试验标准。旁证材料：中国电机工程学会技术成果鉴定。 |
| 曾获国家科技奖励情况： |