一、项目名称

光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用

二、推荐单位意见

推荐意见：

光伏和风力发电是新能源发电的重要组成部分，并网控制技术是光伏和风力发电系统稳定运行的关键技术。该项目在国家 863 计划、国家自科基金项目等资助下，紧紧围绕光伏逆变器、双馈风电变流器拓扑结构研究、并网控制理论及工程装备等关键技术，经过多年的科技攻关，取得了系列原创性研究成果。在中能华辰集团有限公司、甘肃华电环县风力发电有限公司、新疆华电淖毛湖风电有限责任公司等相关企业进行了工程应用，光伏逆变器、双馈风力变流器等设备的发电量、稳定性、电能质量、逆变器散热等各项指标优秀，运行情况良好，产生了显著的经济和社会效益，解决了工程装备的重大关键技术和重大难题，显著地推动了相关技术的发展和行业的科技进步。

同意推荐该项目申报湖南省科技进步一等奖。

三、项目简介

光伏和风力发电是新能源发电的重要组成部分，在全球能源结构中占据越来越重要的地位。并网控制技术是光伏和风力发电稳定运行的关键技术，随着大量可再生能源发电设备的接入，如何高效、安全并网已成为重要课题。本项目在国家 863 计划、国家自科基金项目等资助下研究光伏逆变器、双馈风电变流器拓扑结构、并网控制理论及工程装备等关键技术，经过多年的科技攻关，取得了系列原创性研究成果：

（1）针对常用控制方法控制精度低、稳定性差等问题，率先提出光伏直流微网母线电压控制方法、光伏组件功率输出控制方法。研制具有完全自主知识产权的模块化光伏并网逆变器。开发光伏并网系统隔离逆变器绝缘检测系统、带相位补偿的光伏并网逆变器控制系统、光伏 MPPT 变加速扰动控制系统等系列软件，解决光伏并网逆变器控制精度和稳定性关键技术问题。

(2) 针对现有风力发电机组并网故障间断运行问题，提出电网电压故障时风电机组不间断运行控制方法、双馈电机转子脉动功率计算和机网侧协同控制方法、电子器件多级水冷控制方法、风电场环境下级联 STATCOM 直流电容电压平衡控制方法。研制具有完全自主知识产权的风电机组不间断运行控制装置，级联 STATCOM 直流电容电压平衡控制装置，解决风力发电机组故障时不间断运行控制及 STATCOM 直流电容电压平衡控制等关键技术问题，实现了其高精度控制与安全稳定运行。

(3)创造性地研制多功能一体化光伏发电装置、光伏系统防逆流装置及其控

制方法、开关电源的故障检测系统、基于 WEB 的大功率整流设备在线监控装置、多个 IGBT 并联运行的保护电路、快启动低功率损耗的冷备用装置。研制大功率及中小功率整流装置计算机监测与控制系统软件、微电网通信系统突发误码测试系统软件。进而研发光伏、风电成套装备，解决新能源发电并网系列配套装置关键技术和重大难题。

(4) 针对光伏、双馈风电并网电能质量控制问题，提出基于后向最佳线性预测理论的谐波电流预测方法，研制谐波电流预测装置、提高风电并网暂态稳定性和电能质量的储能装置、含 STATCOM 与 PSS 的风电并网稳定性与电能质量改善装置、含分布式发电的配电网统一电能质量调节装置。研发风电场并网运行电能质量分析平台软件，解决微电网电能质量控制关键技术难题。

将以上系列创新方法和装置进行系统集成，自主研发了国内外独具特色的具有知识产权的新能源发电并网系列配套装置等三个系列共 20 种装备。本项目通过湖南省机械工业协会组织科技成果评价，项目成果总体技术处于国际先进水平，其中双馈电机转子脉动功率计算和机网侧协同控制方法达到国际领先水平。共授权发明专利 12 项、实用新型专利 7 项、软件著作权 13 项。SCI/EI 收录期刊论文 39 篇，CSCD 收录期刊论文 4 篇。在科学出版社等出版专著与教材 2 部。享受政府特殊津贴专家 1 人，二级教授 1 人，培养研究生 20 余人。新增产值 8.5 亿元，新增利润 8525 万元，上交利税 4293 万元，节约资金约 1.6 亿元。产生了显著的经济和社会效益，解决了工程装备的重大关键技术和重大难题，带动湖南及周边地区形成百亿产业群。

四、客观评价

1.科技成果评价

由湖南省机械工业协会组织召开的，以中国工程院院士、湖南大学罗安教授为主任委员的科技成果评价会鉴定意见为：**评价委员会一致认为，项目成果总体技术处于国际先进水平，其中双馈电机转子脉动功率计算和机网侧协同控制方法达到国际领先水平，同意通过科技成果评价**。

2.查新报告

科学技术部西南信息中心查新中心的查新报告结果为：**在所检文献以及时限范围内，除本项目外，国内外未见文献报道**。

3.国内外相关技术对比

本项目研制的集中型大功率光伏逆变器整体技术处于国际先进水平，具体技术参数对比分析如表 1 所示。

表 1 光伏逆变器具体技术参数对比分析

序号	比较内容	本项目	国内外其他公司
1	主电路	两电平逆变并联	两电平模块并联

		优点：系统输出效率高、小功率时输出谐波小，可模块化设计，可靠性高。	缺陷：系统输出效率低，小功率时输出谐波大，成本高。
2	控制系统	双 CPU 控制系统 优点：性能优越，可靠性高，灵活性强，易扩展、16 为片外 A/D 处理精度高。	传统单 CPU 控制系统 缺陷：集成度高，不容易扩展，12 位片内 A/D 处理精度低。
3	零电压穿越控制技术	正序分量快速提取，1ms 内实现锁相，动态性能好	陷波器实现正序分量提取，至少需要 5ms 实现锁相，动态性能较差
4	输出电能质量	自适应的谐波电流检测与抑制，输出电流谐波<1.5%	输出电流谐波<3%
5	冷却方式	一体化强迫风冷 优点：整柜器件全冷却，温升低，可靠性高，使用寿命长。	功率模块冷却 缺陷：只冷却功率模块单元，柜内温升高。
6	工艺测试	利用公司几十年从事大功率铁路牵引变流器先进技术经验，形成了一整套高标准的适用于光伏并网逆变器的制造测试工艺。	其他厂家特别是国内厂家大多数起步较晚，相关制造和试验工艺不完善。

本项目研制的风电变流器与国内外主流产品技术参数对比如表 2 所示，数据表明本项目产品在关键性能指标上整体达到国际先进水平，部分指标国际领先。

表 2 双馈变流器详细技术参数对比

性能指标	ABB	禾望	本项目
直流纹波系数（%）	2.55%	1.82%	1.52%
转矩响应（ms）	3.5ms	3.8ms	3.0ms
入网端电流谐波（%） （额定功率下）	1.0%	1.1%	0.9%
电网不平衡度适应性（%）	8% &1min	10% &1min	10% &2min
发电机端线电压尖峰值（V）	700 V	560 V	390V
电机端线电压 du/dt(V /us)	980 V/us	530 V/us	280V/us
发电机非轴伸端电压（V）	1.72V	1.53V	1.19V

注：表 2 数据是在张北风电场示范基地实测的数据。

4. 检验报告

(1)中国电力科学研究院检验报告：并网光伏逆变器(TGN74B 型)

1)该送检样品已完成在三相对称故障和单相不对称故障工况下的低电压穿越测试(含零电压穿越)，在所有测试点的电压跌落与恢复期间该送检样品均能不间断并网运行；2)该送检样品在各类故障工况期间，均能够按要求正确响应并发出无功电流，具备动态无功电流支撑能力；3)该送检样品在故障消除后，能够以较快的有功功率变化率恢复至故障前功率值。

(2)国家风电技术与检测研究中心检验报告：位于国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心张北风电试验基地#14 机位的 WT2000 型风电机组(序列号为 TF2012-002)符合国家标准 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》中第 10 章 10.1 条和 10.2 条对电网适应性的如下要求：1)测试点电压在标称电压的 90%-110%之间时，风电机组正常运行；2)测试点的闪变值满足 GB/T 12326、谐

波值满足 GB/T 14549、三相电压不平衡度满足 GB/T 15543 的规定时，风电机组正常运行；3)在不同电力系统频率范围内，风电机组的频率适应性符合规定。

5.企业应用评价

(1) 中能华辰 5MW 金太阳示范工程光伏电站：电站并网运行后，系统稳定可靠、操作方便、智能化程度高，人机操作界面友好，运行信息完善。逆变器采用双逆变并联拓扑和高性能控制平台，控制精度高，可单机运行，故障保护完善，完全满足电网接入规范要求。并网逆变器转换效率高，达 98%以上，输出电流谐波低，小于 1.5%。

(2)内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司库伦风电场：1.5 MW 双馈水冷风电变流器实现了高性能传动控制技术、良好的电网适应性、优异的人机交互故障诊断、先进的网测 PWM 整流技术的成功应用。较以往机组而言，该机组更加稳定，可维护性高。先进的网测 PWM 整流技术能够四象限运行，实现能量的双向流动，提高风机电能利用效率和功率因素，降低电网电流谐波含量，并且可向电网提供无功补偿。高性能传动控制技术的应用，提高了变流器的转矩控制精度，缩短了转矩响应时间，并且适用于大功率双馈发电机、鼠笼感应电机、永磁同步发电机等多种负载。

五、推广应用情况

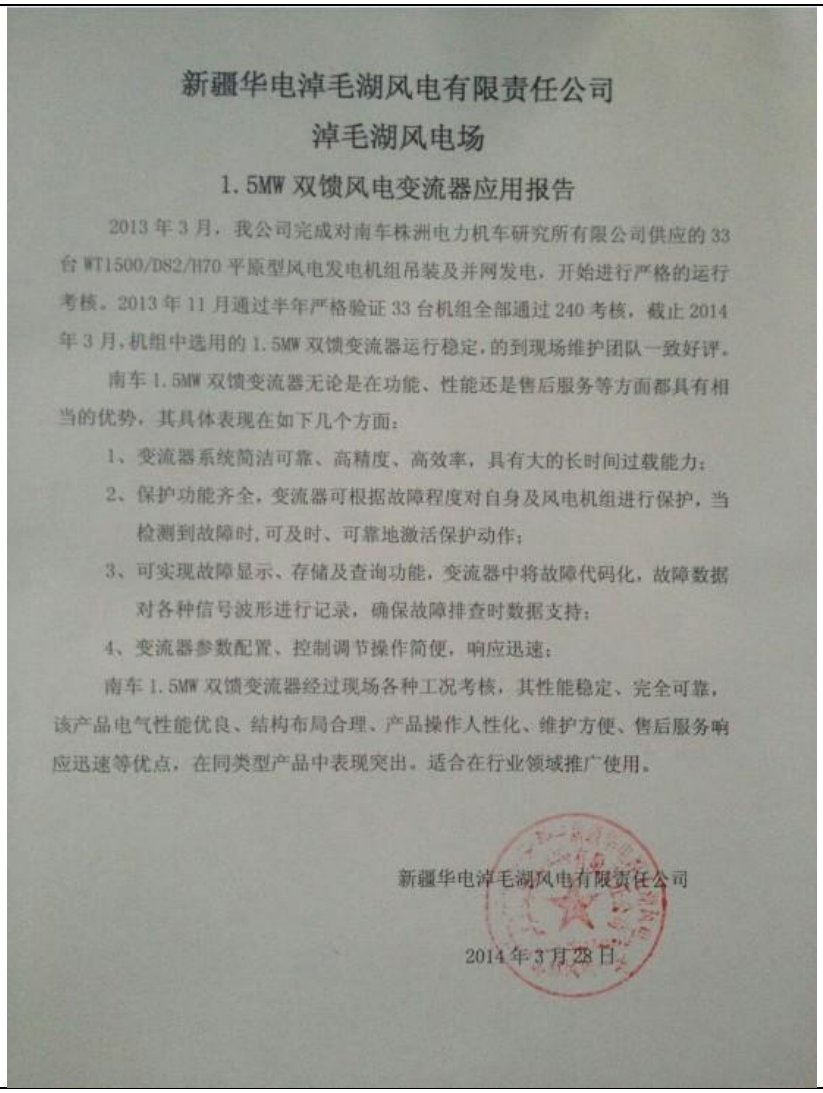
“光伏与风电并网控制关键技术及工程应用”项目于2013年3月完成项目的规划与立项，项目总投资4000余万元，以满足系列化光伏发电逆变器、光伏发电监控系统、直流汇流箱和配电柜等成套光伏产品的开发和产业化需要。

为了节约经费、加快产业化进程，项目组将湖南工业大学多年来在新能源并网控制关键技术以及逆变系统和电网之间的协调控制的研究成果，和中车株洲电力机车研究所50余年来在轨道交通领域内积累的变流、传动和网络技术积累和研究成果成功移植到新能源发电产业上，深入研究光伏发电技术领域特点，完成了系列化光伏逆变器和成套设备样机研制工作；借用现有开发平台、通过对现有轨道交通变频器和网络设备生产线和试验基地的改造和升级形成一套完整的技术和生产工艺，完成从产品研发、试验、批量生产、检验到并网发电系统集成整个过程，实现了光伏发电成套装备的产业化。

光伏与风电并网控制关键技术及工程应用的完成，取得了显著的经济效益和社会效益，部分用户使用报告如下：

序号	用户	用户使用报告

1	湖南兰天武陵能源科技有限公司	用户证明 致：株洲变流技术国家工程研究中心有限公司 我公司 长沙 项目 20 MW 光伏电站 2013 年 10 月共计采购 40 台光伏逆变器及其配套产品，于 2014 年 4 月并网发电，截至目前为止，光伏电站逆变器等设备发电量、稳定性、电能质量、逆变器散热等各方面均符合要求，运行情况表现良好。南车的售后服务及时响应，专业技能优秀，工作态度良好。 湖南兰天武陵能源科技有限公司 2014 年 8 月 12 日
2	中能华辰集团有限公司	**光伏并网发电系统** **用户使用报告** 中能华辰 5MW 金太阳示范工程光伏电站的电气系统包括（汇流箱、配电柜、并网逆变器、逆变器房）和监控系统全部采用株洲变流技术国家工程研究中心有限公司研制的产品。该电站于 2013 年 11 月并网发电，系统并网运行后，稳定可靠、操作方便、智能化程度高，人机操作界面友好，运行信息完善。 逆变器采用双逆变并联拓扑和高性能控制平台，控制精度高，可单机运行，故障保护完善，完全满足电网接入规范要求。监控系统界面信息包含运行信息、历史发电量查询、功率曲线、故障查询、参数设置等，非常方便运维操作。并网逆变器转换效率高，达 98%以上，输出电流谐波低，小于 1.5%。 系统各项技术指标良好，运行稳定，输出电能质量高，运维方便，确保了整个光伏电站的安全可靠运行和发电量，给本电站带来了可观的经济效益。 中能华辰集团有限公司 2014 年 6 月 15 日

3	湖南华电福新太平里风电有限公司	

新疆华电淖毛湖风电有限责任公司

淖毛湖风电场

1.5MW 双馈风电变流器应用报告

2013 年 3 月，我公司完成对南车株洲电力机车研究所有限公司供应的 33 台 WT1500/D82/H70 平原型风电发电机组吊装及并网发电，开始进行严格的运行考核。2013 年 11 月通过半年严格验证 33 台机组全部通过 240 考核，截止 2014 年 3 月，机组中选用的 1.5MW 双馈变流器运行稳定，的到现场维护团队一致好评。

南车 1.5MW 双馈变流器无论是在功能、性能还是售后服务等方面都具有相当的优势，其具体表现在如下几个方面：

1、变流器系统简洁可靠、高精度、高效率，具有大的长时间过载能力；

2、保护功能齐全，变流器可根据故障程度对自身及风电机组进行保护，当检测到故障时，可及时、可靠地激活保护动作；

3、可实现故障显示、存储及查询功能，变流器中将故障代码化，故障数据对各种信号波形进行记录，确保故障排查时数据支持；

4、变流器参数配置、控制调节操作简便，响应迅速；

南车 1.5MW 双馈变流器经过现场各种工况考核，其性能稳定、完全可靠，该产品电气性能优良、结构布局合理、产品操作人性化、维护方便、售后服务响应迅速等优点，在同类型产品中表现突出。适合在行业领域推广使用。

新疆华电淖毛湖风电有限责任公司

2014 年 3 月 28 日

六、主要知识产权目录

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	发明专利有效状态
发明	一种光伏直流微网母线电压控制方法	中国	201410207180.0	2016-04-06	2015963	湖南工业大学	李圣清、徐天俊、张彬、杨峻等	有效
发明	一种电网电压故障时风电机组不间断运行控制方法及装置	中国	201110178295.8	2013-6-9	1219201	南车株洲电力机车研究所有限公司	徐凤星、佘岳、刘连根等	有效
发明	风电场环境下级联 STATCOM 直流电容电压平衡控制方法	中国	201310079336.7	2015-04-01	1623484	湖南工业大学	李圣清、徐文祥、栗伟周、曾欢悦、李永安	有效
发明	一种光伏组件电能输出控制方法	中国	201410673677.1	2014-8-13	1460948	南车株洲电力机车研究所有限公司	蹇芳、冯江华、任其昌、唐海燕等	有效
发明	多功能一体化光伏发电装置	中国	201310174006.6	2013-10-23	3223366	南车株洲电力机车研究所有限公司	冯江华、蹇芳、唐海燕、陈艺峰等	有效
发明	一种模块化光伏并网逆变器结构	中国	201310417269.5	2016-3-23	1996101	南车株洲电力机车研究所有限公司	蹇芳、唐海燕、管仁德、唐洲、陈艺峰等	有效
发明	一种防逆流控制方法和装置	中国	201310450441.7	2013-9-29	1834576	南车株洲电力机车研究所有限公司	陈艺峰、王南、吴恒亮、赵香桂等	有效
发明	基于后向最佳线性预测理论的微电网混合型电力滤波器谐波电流预测方法	中国	201210587102.9	2015-04-15	1633712	湖南工业大学	李圣清	有效
发明	一种电子器件多级水冷装置	中国	201310353949.5	2016-5-25	2088425	南车株洲电力机车研究所有限公司	胡家喜、姚磊等	有效
发明	一种多个 IGBT 并联运行的保护电路	中国	201310381392.6	2015-11-4	1835087	南车株洲电力机车研究所有限公司	徐凤星、佘岳等	有效

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献
李圣清	1	院长	教授	湖南工业大学	湖南工业大学	项目主持人，全程参与项目的方案设计、装备研制和工程应用
胡家喜	2	主任	教授级高工	中车株洲电力机车研究所有限公司	中车株洲电力机车研究所有限公司	制定和主持了风电变流器系列化产品技术路线与项目开发
蹇芳	3	副主任	高级工程师	中车株洲电力机车研究所有限公司	中车株洲电力机车研究所有限公司	负责光伏产业技术及产品规划
匡洪海	4	无	教授	湖南工业大学	湖南工业大学	风电并网系统暂态稳定性研究
丁劲松	5	董事长	工程师	湖南科瑞变流电气股份有限公司	湖南科瑞变流电气股份有限公司	负责项目的方案设计及组织协调
唐海燕	6	部长	高级工程师	中车株洲电力机车研究所有限公司	中车株洲电力机车研究所有限公司	负责光伏逆变器主电路系统设计和仿真研究
林崇杰	7	无	工程师	湖南科瑞变流电气股份有限公司	湖南科瑞变流电气股份有限公司	开关电源研发及其故障检测系统研究
张上洋	8	部长	工程师	湖南科瑞变流电气股份有限公司	湖南科瑞变流电气股份有限公司	负责项目的方案设计及组织协调
张晓虎	9	无	讲师	湖南工业大学	湖南工业大学	智能配电网自愈控制系统研究
罗朝旭	10	无	讲师	湖南工业大学	湖南工业大学	并网逆变器电网同步技术研究和电能质量控制研究

徐凤星	11	无	工程师	中车株洲电力机车研究所有限公司	中车株洲电力机车研究所有限公司	双馈电机控制算法研究
陈艺峰	12	无	高级工程师	中车株洲电力机车研究所有限公司	中车株洲电力机车研究所有限公司	光伏并网逆变器控制技术研究

八、主要完成单位及创新推广贡献

1. 湖南工业大学

全面负责项目的总体规划和协调工作，为项目的完成提供人力、物力、财力等全方位的条件，其所属人员全程参与该项目的方案设计、研究开发、技术调试和项目推广工作。对项目的主要突出贡献在于：提出了光伏直流微网母线电压控制方法，开发光伏并网系统隔离逆变器绝缘检测系统、带相位补偿的光伏并网逆变器控制系统、光伏 MPPT 变加速扰动控制系统等系列软件，解决光伏并网逆变器控制精度和稳定性关键技术问题。提出了风电场环境下级联 STATCOM 直流电容电压平衡控制方法，研制了直流电容电压平衡控制装置，解决 STATCOM 直流电容电压平衡控制关键技术问题。研发快启动低功率损耗的冷备用装置、微电网通信系统突发误码测试系统软件。进而研发光伏、风电成套装备，解决新能源发电并网系列配套装置关键技术和重大难题。提出基于后向最佳线性预测理论的微电网混合型电力滤波器谐波电流预测方法，基于 BP 神经网络的微电网蓄电池荷电状态预测方法。研制谐波电流预测装置、提高风电并网暂态稳定性和电能质量的储能装置、含 STATCOM 与 PSS 的风电并网稳定性与电能质量改善装置、含分布式发电的配电网统一电能质量调节装置。研发风电场并网运行电能质量分析平台软件，显著提高了系统运行安全性与运行效率。主持国家自科基金及湖南省自科基金资助项目等 3 项，以排名 1 的身份获科技成果 1 项，授权发明专利及实用新型共 4 项，在《电工技术学报》等国内外知名刊物上发表论文百余篇，其中 SCI/EI 收录 26 篇，CSCD 收录 4 篇，在科学出版社出版专著 1 部。

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司

将中车株洲电力机车研究所50余年来在轨道交通领域内积累的变流、传动和网络技术积累和研究成果成功移植到新能源发电产业上，深入研究光伏发电技术领域特点，完成了系列化光伏逆变器和成套设备样机研制工作；借用现有开发平台、通过对现有轨道交通变频器和网络设备生产线和试验基地的改造和升级形成一套完整的技术和生产工艺，完成从产品研发、试验、批量生产、检验到并网发电系统集成整个过程，实现了光伏发电成套装备的产业化。

光伏与风电并网控制关键技术及工程应用的完成，取得了显著的经济效益和社会效益。本项目自2013年开展以来，完成了相关产品销售收入10亿元左右，取得了显著的经济效益，依托本项目的成果，我国在大功率光伏并网逆变器和风电变流器方面的技术水平显著提升，正在成为本领域世界先进技术的发源地。并完善了我省乃至我国光伏/风电产业链，促进我国新能源发电系统电力电子工业的自主创新和技术进步。

3. 湖南科瑞变流电气股份有限公司

深入研究双馈风力发电技术领域特点，完成了系列化风电变流器和成套设备样机研制工作，完成从产品研发、试验、批量生产、检验到并网发电系统集成整个过程，实现了双馈风力发电成套装备的产业化。

九、完成人合作关系

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果
1	论文合著，产业合作及其他	李圣清/第1	2013.3.1-2017.1.30	一种光伏直流微网母线电压控制方法；风电场环境下级联 STATCOM 直流电容电压平衡控制方法；基于后向最佳线性预测理论的微电网混合型电力滤波器谐波电流预测方法；含分布式发电的配电网统一电能质量调节装置；三相电压不平衡下级联 STATCOM 的控制方法；含微网的配网统一电能质量调节装置；一种风电场 HAPF 后向线性谐波电流预测方法；风电场中级联 STATCOM 直流侧电压控制方法；电能质量治理技术及应用；光伏与风电并网控制关键技术及工程应用项目协议书；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用。
2	产业合作及其他	胡家喜/第2	2013.3.1-2017.1.30	一种电子器件多级水冷装置；光伏与风电并网控制关键技术及工程应用项目协议书；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用。
3	产业合作及其他	蹇芳/第3	2013.3.1-2017.1.30	多功能一体化光伏发电装置；一种光伏组件电能输出控制方法；一种模块化光伏并网逆变器结构；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用。
4	论文合著、产业合作及其他	匡洪海/第4	2013.3.1-2017.1.30	DFIG-FMAC-PSS 控制对风电系统的暂态稳定性改善；STATCOM-PSS 控制对风电并网系统稳定性和电能质量的改善；一种快启动低功率损耗的冷备用装置；提高风电并网系统暂态稳定和电能质量的储能装置；一种风电并网系统稳定性和电能质量改善装置；光伏和

				双馈风电并网控制关键技术及工程应用。
5	产业合作及其他	丁劲松/第 5	2013.3.1-2017.1.30	一种基于 WEB 的大功率整流设备在线监控装置；株洲科瑞大功率整流装置计算机监测与控制系统 V6.0；株洲科瑞中小功率整流装置计算机监测与控制系统 V6.0；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
6	产业合作及其他	唐海燕/第 6	2013.3.1-2017.1.30	多功能一体化光伏发电装置;一种光伏组件电能输出控制方法；一种防逆流控制方法和装置；一种模块化光伏并网逆变器结构；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
7	产业合作及其他	陈艺峰/第 7	2013.3.1-2017.1.30	一种光伏组件电能输出控制方法；一种防逆流控制方法和装置；一种模块化光伏并网逆变器结构；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
8	产业合作及其他	林崇杰/第 8	2013.3.1-2017.1.30	一种基于 IGBT 串并联的电源；光伏与风电并网控制关键技术及工程应用项目协议书；一种用于高频开关电源的故障检测系统；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
9	产业合作及其他	张上洋/第 9	2013.3.1-2017.1.30	光伏与风电并网控制关键技术及工程应用项目协议书；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
10	产业合作及其他	张晓虎/第 10	2013.3.1-2017.1.30	光伏并网逆变器相位补偿控制系统软件；基于 GA 的光伏 MPPT 变加速扰动法控制系统软件；风电场并网运行电能质量分析平台；光伏并网系统隔离逆变器绝缘检测系统软件；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
11	论文合著、产业合作及其他	罗朝旭/第 11	2013.3.1-2017.1.30	Analysis and control of a reduced switch hybrid active power Filter；First-order generalized integrator based frequency locked loop and synchronization for three-phase grid-connected converters under adverse grid conditon；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用
12	产业合作及其他	徐凤星/第 12	2013.3.1-2017.1.30	一种电网电压故障时风电机组不间断运行控制方法及装置；一种多个 IGBT 并联运行的保护电路；光伏和双馈风电并网控制关键技术及工程应用