

科学技术进步奖公示内容

一、 项目名称：矩阵式变换器关键技术研究及应用

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该项目在国家自然科学基金委员会、陕西省科技厅与教育厅以及西安电力电子研究所等的资助下，围绕矩阵式变换器（MC）关键技术历经 10 年难题攻关研究和产业化转化应用，提出了混合式换流方法，攻克了阻碍 MC 工业应用的换流瓶颈技术难题；提出一种 Z-源矩阵变换器及其直通因子自适应控制方法，以及一种基波幅值线性控制的过调制方法，分别从硬件和软件方向彻底解决了 MC 电压传输比低的固有难题，拓宽了工业应用领域；提出一种带相位补偿功能的网侧性能优化控制，提升了 MC 环保特性；提出一种具有电网非正常工况补偿功能的功率预测控制方法，消除了非正常工况影响，解决了其弱抗扰性固有缺陷；提出一种精简矩阵变换器双向功率流协调控制，推广应用于离子加速器磁铁励磁电源领域。

该项目于 2020 年获陕西高等学校科学技术奖二等奖，基于该项目多年成果先后开发出多款矩阵式变频器系列产品，此节能环保型四象限变频器已成功应用于建筑升降机、起重机、吊车和行车等场合，具有优良性能，并相对于传统产品实现节能 12.4% 以上。矩阵式励磁电源成果已成功应用于中科院近物所离子加速器励磁电源和甘肃武威肿瘤医院重离子治癌磁铁励磁电源。上述产品填补了国内空白，累计销售达 1 亿多元，取得了显著经济效益和绿色节能环保收益，应用前景广阔。

我单位认真审阅了该推荐材料及完成人资格，项目申报材料真实完整，项目完成单位、人员排序无异议，符合陕西省科学技术奖申报要求。特提名该项目申报陕西省科技进步二等奖及以上。

三、 项目简介：

本项目属于电力电子与电力传动学科矩阵式功率变换技术领域的前沿性课题。本课题组在矩阵式变换器（MC）关键技术方面开展了长达 10 年的深入攻关研究，依托国家自然科学基金、教育部博士点基金、陕西省国际合作与交流计划以及企业技术转让等项目，成功开发并产业化了具有自主知识产权的矩阵式变换器系列产品。主要技术内容包括：

(1) 针对阻碍矩阵式变换器工业应用的换流固有难题，发明一种混合式换流方法，消除了由换流失效导致的过电流/过电压尖峰，实现了 MC 安全可靠换流，提高了可靠性，为其工业应用扫除了障碍，成功应用于矩阵式变频器产品中。

(2) 针对矩阵式变换器电压传输比低的问题，提出一种 Z-源矩阵变换器硬件解决方案及其直通因子自适应控制方法，实现了电压传输比和输出频率的任意调节，达到了抑制非正常输入对输出性能影响的效果，拓宽了拓扑工业应用领域。

(3)为有效解决矩阵式变换器电压传输比低的问题,提出一种基于基波幅值线性控制的矩阵式变换器过调制策略软件方法,在不改动硬件前提下,将其电压传输比从 0.866 提高到 0.955,使矩阵式变换器可以满足更高电压工业应用场合需求。

(4)为提高矩阵式变换器的网侧性能,提出一种带相位补偿功能的矩阵式变换器网侧性能优化控制,实现对输入功率因数和波形的控制,确保任何条件下 MC 均具有输入单位功率因数和高质量正弦电流的优良网侧性能。

(5)针对电网非正常工况下矩阵式变换器弱抗扰性固有问题,提出一种具有电网非正常工况补偿功能的功率预测控制方法,消除非正常工况影响,解决其弱抗扰性固有缺陷。

(6)将关键技术拓展至其它矩阵类变换器中,提出一种精简矩阵变换器双向功率流协调控制,实现该拓扑的能量双向流动协调控制,推广应用于加速器磁铁励磁电源。

该成果获得授权发明专利 13 项,获批国家级课题 5 项、省部级课题 6 项、研究所/企业技术转化横向项目 12 项、纵横项 28 项共 791.9 万元,在 IEEE TIE、IEEE JESTPE、IET-PE、中国电机工程学报等国内外行业内知名期刊发表论文 60 篇,其中 SCI/EI 共 50 篇。

四、 客观评价:

4.1 获奖情况

(1)项目“矩阵式变换器关键技术研究及应用”获得 2020 年度陕西高等学校科学技术奖二等奖;

(2)项目“交流电机节能环保型变频调速器”获温岭市人民政府颁发的 2018 中国·温岭全球泵与电机高层次人才创业大赛优胜奖;

4.2 技术鉴定

2020 年 6 月 10 日,陕西省科技厅组织专家,对申报人承担的陕西省科技计划项目“离子加速器超导磁铁用精简矩阵变换器高精度自抗扰失超控制”(项目编号:2017KW-035)进行了鉴定验收。以王战玺为代表的专家验收意见为“精简矩阵变换器(RMC)较传统系统同等功率条件下节能 30%,节能效果显著,且对电网零污染,推广应用后无需对电网进行谐波治理和无功补偿,同时 RMC 无储能电容,装置寿命长,具有良好的社会效益,完成了合同中规定的技术指标(输入电流总谐波畸变率低于 5%,输出电流稳定度 $<2 \times 10^{-5}/8h$,输出电流纹波 $<2 \times 10^{-4}$,输出电流跟踪误差 $<\pm 2 \times 10^{-4}$,能抵御一定 20%以内不平衡输入电压影响,抵御突升突降额定值 40%以内输入电压突升突降影响)”,技术指标达到了国际领先水平。其中结题报告已被陕西省科学技术情报研究院收录于陕西省科技报告服务系统,并颁发了收录证书(证书号:SNSTR-2020-001046)。

4.3 查新报告

本项目主要技术特点经教育部科技查新工作站(Z08)查新,查新结果综合表明,本项目开展的以下技术要点:(1)提出一种混合式换流方法,提高了可靠性;(2)提出一种 Z-源矩阵变换器及其直通因子自适应控制方法,抑制非正常输入对输出性能影响;(3)提出一种基于基波幅值线性控制的 MC 过调制策略;(4)提出一种带相位补偿功能的 MC 网侧性能优化控制;(5)提出一种具有电网非正

常工况补偿功能的 MC 功率预测控制；（6）提出一种精简型 MC 双向功率流协调控制。项目技术在所检出的国内外相关文献中未见报道，项目技术具有先进性。

五、 应用情况：

该成果由西安电力电子技术研究所、西驰电气股份有限公司等实现技术转化应用，先后开发出多款矩阵式变频器系列产品，此节能环保型变频器已成功应用于建筑升降机、起重机、吊车和行车等场合。矩阵式励磁电源关键技术已联合西安大易电子科技有限公司等实现产品转化，分别成功应用于中科院近物所离子加速器励磁电源和甘肃武威肿瘤医院重离子治癌磁铁励磁电源。该成果在上述产品基础上已向相近行业产品辐射替代，地域上已辐射应用陕西、甘肃、山东和浙江等区域工业场合。上述产品累计销售达 1 亿多元，取得了显著的经济效益，同时实现了良好节能减排和绿色环保效益。

六、 主要知识产权和标准规范等目录：（限 10 条，所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2021 年 12 月 31 日之前。）

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	适用于双级矩阵变换器整流级的混合式换流方法	中国	ZL201310739564.2	2017.1	2338626	西安理工大学	宋卫章, 贺瑾, 钟彦儒
2	发明专利	带偏磁控制的精简矩阵变换器模型预测控制方法	中国	ZL201710891517.8	2020.4	3766964	西安理工大学	宋卫章, 刘江, 杜晓斌
3	发明专利	双级矩阵变换器驱动的同步磁阻电机模型预测控制方法	中国	ZL201611005682.0	2019.5	3392289	西安理工大学	宋卫章, 贾欢, 闫佳
4	发明专利	双级矩阵变换器驱动的永磁同步电机滑模速度观测器	中国	ZL2013100737905.2	2016.1	2257620	西安理工大学	宋卫章, 马宝剑, 钟彦儒
5	发明专利	带缓冲吸收电路的箝位式 Boost 变换器	中国	ZL201310099856.4	2016.2	1958842	西安理工大学	宋卫章, 钟彦儒, 汪丽娟
6	发明专利	Z 源矩阵整流器及其矢量调制方法	中国	ZL201510443459.3	2017.1	2442068	哈尔滨工业大学	刘洪臣, 赵丹, 纪玉亮
7	发明专利	一种混合励磁同步电机多目标优化预测控制方法	中国	ZL201710473171.X	2019.1	3642661	西安理工大学	赵纪龙, 景梦蝶, 孙向东
8	发明专利	一种隐极式混合励磁电机恒功率损耗模型预测控制方法	中国	ZL201810157108.X	2018.8	3241487	西安理工大学	赵纪龙, 景梦蝶, 全小伟, 孙向东

9	发明专利	一种定/转子永磁型变磁通轴向磁通切换永磁发电机	中国	ZL201810156820.8	2020.2	3696464	西安理工大学	赵纪龙, 全小伟, 景梦蝶, 孙向东
10	实用新型	非同相逆并联同极单元上下结构整流器	中国	ZL200920031994.8	2010.4	1395887	西安电力电子技术研究所	付新民, 陆剑秋, 王云利, 陈会飞, 侯霄峰, 高军才, 付清

七、主要完成人情况:

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	宋卫章	教授	系主任	西安理工大学	西安理工大学	本项目部分关键控制技术的提出者和发明人, 与相关公司联合产品开发的策划者、执行人及产业化推广, 本项目 28 篇论文的第一作者, 5 项发明专利第 1 发明人, 2 项国家自然科学基金和 4 项教育部等省部级基金负责人, 18 项纵横向项目主持人。提出了一种适用于 MC 的混合式换流方法, 扫除了阻碍 MC 推广应用障碍; 提出一种 Z-源矩阵变换器及其直通因子自适应控制方法、电网非正常工况补偿功能的 MC 功率预测控制方法。对创新点 1、2、6 均有重要贡献。
2	侯霄峰	教授级高工	部长	西安电力电子技术研究所	西安电力电子技术研究所	提出一种 MC 网侧性能优化控制策略, 提出一种具有电网非正常工况补偿功能的 MC 功率预测控制方法。指导该成果转化和市场推广。对创新点 4、5 有重要贡献
3	刘洪臣	教授	副处长	哈尔滨工业大学	哈尔滨工业大学	作为项目技术骨干, 提出一种 MC 过调制策略和 Z 源矩阵整流器及其矢量调制方法, 拓宽了 MC 工业应用领域。负责产品样机研发, 对创新点 3、4 有重要贡献
4	党超亮	讲师	无	西安理工大学	西安理工大学	作为项目技术骨干, 提出了电网非正常工况下的功率预测控制和双向功率流协调控制算法, 在原理样机研制和成果转化的过程中负责硬件样机研发、部分控制算法软件程序设计。对创新点 5、6 均有重要贡献。
5	王保荣	高级工程师	处长	西安电力电子技术研究所	西安电力电子技术研究所	作为项目技术骨干, 提出了一种精简矩阵变换器能量双向流动控制策略, 在该项目产业化推广应用过程中负责指导工作。对创新点 6 有重要贡献。
6	赵纪龙	副教授	无	西安理工大学	西安理工大学	作为项目技术骨干, 提出了网侧性能优化策略和双向功率流协调控制算法, 在产品样机研制和成果转化过程中负责算法软件研发。对创新点 4、6 有重要贡献。

7	李生民	副教授	无	西安理工大学	西安理工大学	作为项目技术骨干，提出了 Z-源矩阵变换器控制算法和一种基于极限轨迹的 MC 过调制策略，同时在此项目中协助了产品样机研制和成果转化工作。对创新点 2、3 均有重要贡献
8	徐艳平	副教授	无	西安理工大学	西安理工大学	作为项目技术骨干，提出了二矢量和三矢量两种模型预测方法，完善了预测控制理论，负责 MC 预测控制算法研究与开发，保证了成果转化的顺利完成。对创新点 6 有重要贡献。
9	钟彦儒	教授	无	西安理工大学	西安理工大学	项目主要完成人和指导者，提出一种改进型 Z-源矩阵变换器拓扑，提出一种 MC 换流策略，指导该项目与相关公司联合产品开发与产业化推广应用。对创新点 1、2 有重要贡献。

八、 主要完成单位及创新推广贡献：

排 名	完成单位	创新推广贡献
1	西安理工大学	西安理工大学自 2009 年开始开展矩阵式变换器关键技术研究，进行了系统的理论研究、技术难题攻关、仿真和实验验证，样机研发到产品推广应用。主要贡献有：（1）提出了矩阵变换器混合式换流方法，攻克了阻碍 MC 推广应用瓶颈技术；提出了一种 Z-源矩阵变换器及其直通因子自适应控制方法，抑制非正常输入对输出性能影响；提出一种基于基波幅值线性控制的过调制策略，提高了 MC 电压传输比，拓宽了工业应用领域；提出一种具有电网非正常工况补偿功能的 MC 功率预测控制，提高了其抗扰性。（2）提出一种精简矩阵变换器双向功率流协调控制，并应用于离子加速器磁铁励磁电源，实现加速器磁铁高精度励磁同时，还具有节能环保特性。（3）研发了包含上述创新点的矩阵式变频器和精简矩阵型加速器磁铁励磁电源产品，并联合合作研究所和公司研发了系列产品，其中矩阵式变频器推广应用于建筑升降机、起重机、吊车和行车等场合。MC 励磁电源应用于加速器储能环和肿瘤医院重离子治癌磁铁励磁电源。
2	西安电力电子技术研究所	针对矩阵式变换器换流困难、网侧性能易受到影响和电网非正常工况弱抗扰性问题，研究所开展了上述难题攻关，提出了创新解决方法，主要贡献有：（1）提出了考虑窄脉冲和扇区切换点的 MC 换流方法，解决了 MC 换流失效难题，提高了可靠性；（2）提出一种 MC 网侧性能优化控制策略，确保任何条件下矩阵式变换器均具有输入单位功率因数和高质量正弦电流的网侧性能。提出一种具有电网非正常工况补偿功能的 MC 功率预测控制方法，解决了 MC 弱抗扰性问题；（3）研发了矩阵式变频器和矩阵式磁铁励磁电源产品，分别应用于矿井提升机变频器和重离子加速器磁铁励磁电源。

3	哈尔滨工业大学	针对矩阵变换器电压传输比低、网侧性能易受负载影响等问题，提出了创新性解决方法，主要贡献有：（1）提出一种基于基波幅值线性控制的MC过调制策略，仅利用软件算法弥补了矩阵式变换器电压传输比低的固有缺陷，使矩阵式变换器可以满足更高电压工业应用场合需求。（2）提出一种Z源矩阵整流器及其矢量调制方法和一种带相位补偿功能的MC网侧性能优化控制，实现了对输入功率因数和波形的优化控制，确保任何条件下矩阵式变换器均具有输入单位功率因数和高质量正弦电流的网侧性能。（3）研发了嵌入上述算法的矩阵式变频器样机，从而使矩阵式变频器适用于更高电压场合，并使在各种负载工况下均具有优良网侧性能。
---	---------	---

九、完成人合作关系说明：（合作方式包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。）

完成人合作关系情况汇总表

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	宋卫章、党超亮、赵纪龙、李生民、徐艳平、钟彦儒	2009	2020	矩阵式变换器关键技术研究及应用	共同获奖：陕西高等学校科学技术奖二等奖
2	共同发表文章	宋卫章、党超亮、钟彦儒	2009	2020	矩阵式变换器研究	共同发表论文
3	共同产品产业化	宋卫章、侯霄峰、王保荣	2010	2020	矩阵式变频器和励磁电源研发	共同产品产业化：应用证明
4	共同立项	宋卫章、刘洪臣	2014	2020	矩阵式变换器研究	任务书

西安理工大学宋卫章（第1完成人）、党超亮（第4完成人）、赵纪龙（第6完成人）、李生民（第7完成人）、徐艳平（第8完成人）、钟彦儒（第9完成人）通过科研团队以及项目成果的方式，长期保持紧密的科研合作关系。一直从事矩阵式变换器相关的研究工作，共同获奖及发表学术论文等。

西安理工大学宋卫章（第1完成人），西安电力电子技术研究所侯霄峰（第2完成人）、王保荣（第5完成人），合作开展矩阵式变换器关键技术攻关，产品研发和市场应用推广，通过科研团队以及项目合作的方式，长期保持紧密的合作关系