



2018年德阳市创新驱动系列 学术交流文集

上册
报告论文集

2018Nian DeYangShi ChuangXin QuDong XiLie
XueShu JiaoLiu WenJi (ShangCe)

四川科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

2018 年德阳市创新驱动系列学术交流文集: 上下册 /
陈云彬主编. -- 成都: 四川科学技术出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5364-9177-9

I. ① 2… II. ① 陈… III. ① 科学技术 - 技术发展 -
德阳 - 文集 IV. ① G322.771.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 202589 号

2018 年德阳市创新驱动系列学术交流文集

主 编 陈云彬

出 品 人 钱丹凝

责任编辑 李珉 任维丽

责任出版 欧晓春

封面设计 思托文化

出版发行 四川科学技术出版社

成都市槐树街 2 号 邮政编码 610031

官方微博: <http://weibo.com/sckjcb>

官方微信公众账号: sckjcb

传真: 028-87734039

成品尺寸 210mm × 285mm

印张 32.25 (上下册) 字数 650 千 (上下册)

印 刷 四川盛图彩色印刷有限公司

版 次 2018 年 9 月第一版

印 次 2018 年 9 月第一次印刷

定 价 120.00 元 (上下册)

ISBN 978-7-5364-9177-9

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书, 请与本社邮购组联系。

地址 / 成都市槐树街 2 号 电话 / (028)87734035 邮政编码 / 610031

2018年德阳市创新驱动系列 学术交流文集（上册）

编委会

主 编 陈云彬
副主编 张 林
编 委 杜 颖 喻晓钢 吴 岚 彭云中
洪思新 钟辉蓉 余 敏

前 言

习近平总书记在党的十九大报告中指出，创新是引领发展的第一动力，是建设现代化经济体系的战略支撑。德阳市创新驱动系列学术交流活动（原学术大会）是德阳市人民政府主办的大型学术技术交流活动，旨在围绕实施创新驱动发展战略主题，推进德阳大型学术技术交流的常态化、系列化，主题鲜明，包容性广泛。经过多年的努力，已经成为全市科技工作者开展学术技术交流的重要平台和碰撞创新火花的重要渠道，成为聚智聚力、推动科技工作者进入德阳建设发展主战场的重要载体，成为德阳科技文化活动的重要品牌。

2018年德阳市创新驱动系列学术交流活动围绕全面推动“高质量发展”战略布局、贯彻落实省委十一届三次全会及市委八届七次全会精神、推动德阳创新驱动转型发展开展学术技术交流，凝聚全市科技工作者为德阳建成全省经济副中心城市，全力打造装备智造之都、改革开放高地、古蜀文化名城、美丽幸福家园献智出力。

本次系列学术交流活动包括5个产业高端技术专题研讨会

和6个创新驱动转型发展学术交流会，主要围绕智能制造与机器人产业发展、农林供给侧结构性改革与德阳绿色发展、绿色制造推动食品产业创新发展、精准医疗与医药健康产业发展、绿色建筑与城市建设、绿色环保饲料产业科技创新、现代装配式工程技术、德阳康养产业发展、德阳市科技服务业发展、新材料产业发展、青少年创新人才培养等专题开展专题讨论和学术交流，为德阳市实施创新驱动发展战略建言献策，为大力推进德阳全面改革创新和创新驱动发展提供智力支撑。

本次系列学术交流活动共交流学术论文300余篇。经组织专家评审、推荐、编委会认真审核，收录学术报告论文68篇，学术交流论文106篇，分别编印为《2018年德阳市创新驱动系列学术交流文集（上册报告论文集）》和《2018年德阳市创新驱动系列学术交流文集（下册交流论文集）》以飨读者。

编者

2018年9月

目 录

1 智能制造与机器人产业发展

基于中矢量调制和中点电位控制的零序环流抑制方法·····	曾钰琳	王东升	1		
机器人电缆的研发·····	王 昆	陈旭彤	5		
筒形类锻件热处理过程中变形规律的研究·····	贾新胜	冯 敬	安笑琴	毛 蔚	10
玻璃粉及其制备工艺对太阳能PERC电池性能的影响·····	陈浩宇	杨 红	朱 健	吴红兵	12
汽轮机喷嘴组电子束焊接工艺试验研究·····	裴金廷	温银江	张从平	15	
混合流水车间中间缓冲区配置问题研究·····	董晓婷	19			
基于MFC的电子接插件瞬断检测显示界面·····	陈银环	25			
基于电源侧保护的中性线断线自动保护系统·····	罗光伟	张文君	殷佳琳	28	
激光传感器的机器人障碍物检测研究·····	鲜 敏	马 勇	郑 翔	30	
特殊结构的电力电缆与架空绝缘电缆及其关键技术·····	刘春昉	吉鸿飞	刘永红	贺治江	34
研发高等级重型发电用燃气轮机的探讨·····	王平子	40			
OPC100/49ED型将军柱式起重机设计研发·····	肖 勇	李 健	张庆明	熊春梅	44
便携式通用航空地形感知系统的设计与实现·····	张 永	刘晓东	50		
SINUMERIK 840DSL在大型卧车上的应用·····	周家刚	52			
汽车变速器输入轴断裂失效分析·····	谢 东	王方文	康人木	56	

2 农林供给侧结构性改革与德阳绿色发展

浅析习近平同志生态文明思想和绿色发展理念·····	喻晓钢	胡宗发	59		
德阳市农作物秸秆资源化综合利用研究·····	欧凤林	欧阳勃	王文科	64	
中国汉代苑囿建设发展研究·····	周 俊	喻晓钢	代 玉	黄 琯	66
浅谈德阳蔬菜产业发展成效·····	王家国	林 英	71		
德阳市湿地水鸟资源多样性研究·····	王 戈	郑 雄	刘志武	喻晓钢	73
什邡市实施乡村振兴战略的思考·····	摆建梅	喻晓钢	78		
手工空心挂面推动中江乡村振兴的路径设计·····	徐文春	83			
德阳市国省重点保护野生动物资源多样性研究·····	喻绍岳	王 戈	刘志武	郑 雄	85
德阳市沱江水域野生鱼类资源多样性研究·····	张台贵	喻晓钢	潘成清	倪 俊	90
德阳市中药材种植产业发展存在的问题及对策·····	兰珍林	喻晓钢	王雅飞	郑 文	95

野生植物标本的采集与制作·····	郑 雄	喻晓钢	98
德阳市民间资本投资林业发展存在的问题及对策·····	左 谦	喻晓钢	王文勇 101
德阳市野生杜鹃花科植物资源多样性研究·····	喻越山	刘志武	王 戈 郑 文 105
浅析农业知识产权保护存在的问题及对策·····	许万金	杨泽露	刘文忠 喻晓钢 109
德阳市农村安全饮用水工程建设存在的问题及对策·····	倪 俊	姜显琪	喻晓钢 原 宁 113

3 绿色制造推动食品产业创新发展

浓香型白酒智能化制曲的研究及应用零序环流抑制方法·····	徐姿静	王 婷	唐清兰 116
不同产区银耳矿质元素的比较分析·····	陈丽娟	雷 激	孙曼兮 119
液相色谱-串联质谱法测定蔬菜中杀虫磺·····	陈 俊	苟 健	廖 敏 124
AA3连续流动分析仪测定白酒中氰化物的方法研究·····	张 强	李冰川	唐 昆 127
石墨炉原子吸收和电感耦合等离子体质谱测定花生 中镉含量的对比·····	黄 露	邓书健	刘天鹏 130
电感耦合等离子体质谱测定包装硬质糖果中 铅、砷、铝、铬、镉含量·····	黄 露	邓书健	刘天鹏 133
鲜枣加热干制过程中苯甲酸、山梨酸、 糖精钠安赛蜜的变化研究·····	陈 红	冯 吉	135
动物源性食品卫生安全影响因素探析·····	刘宏晓	喻晓钢	郑 文 138

4 精准医疗与医药健康产业发展

平衡计分考核在急诊门诊医生绩效分配中的对比分析·····	李效全	曾 英	孙 健	赵小兰 141
三镜联合下胆总管切开取石胆总管一期缝合·····	刘志强	彭 航	徐 琳	李全生 144
不同血液灌流方案对急性百草枯中毒预后的影响·····	汪红霞	姜 伟	146	
德阳市精神卫生服务与管理的分析及策略·····	王文骁	148		
多层螺旋CT影像学特征对肝肺吸虫病和小肝癌的鉴别诊断··	麦 刚	张 生	谢思明	陈拥华 150
不同肠内营养时机对重型颅脑损伤病人术后并发感染的影响研究·····	龚鸿昌	152		
动态心电图对于冠心病心律失常的诊断和监测价值·····	罗玉兰	154		
食道癌根治术采用不同麻醉方法的 应激反应、神经阻滞及苏醒效果观察·····	徐昌兵	156		
分析疏经通督推拿、康复训练联用对 改善脑卒中患者偏瘫肢体运动能力的效果·····	龙忠国	赵志宏	毛小春	杨晓丽 159
绵竹市工业企业职业病危害现状调查及趋势分析·····	蒙庆春	冯孝胜	160	

全血 γ -干扰素释放试验对结核性脑膜炎 的早期辅助诊断价值探讨·····	邓 雯 赵贺红 钟册俊 吕晓菊	163
联合检测血清GP73、AFP及AFP-L3在 原发性肝癌中的诊断价值·····	王晓燕	165
经前上胸壁切口切除甲状腺良性肿瘤临床研究·····	周 檣 杨振德 梁廷华 向 东	168
经皮肾镜气压弹道联合超声负压吸引 治疗肾铸型结石效果观察·····	谢英金 何俊杰 肖 辉 吴 勇	170
进一步推进卫生健康事业的思考·····	胡 红	172

5 绿色建筑与城市建设

德阳市城市园林绿化要注重生物多样性保护·····	辜 琴	176
建筑施工技术及监管优化的路径分析·····	王世红	178
浅谈新技术在项目建设中的运用·····	景小琴	180
德阳市主城区潜在历史建筑保护与利用初探·····	王 晋	182
浅论德阳市生态停车场设计方法·····	黄 琯	185
浅析绿色建筑融入城市建设发展·····	张 鹰 刘兴璋	188
主要园林树种重点病害及其防治·····	张明智	191
牛腿式悬挑钢管扣件外脚手架在建筑领域的应用·····	刘登军	192
德阳市特色小城镇建设发展的思考·····	王 燕 狄 勃	195
“空城”现象成因及防范对策·····	刘 芸	197
浅谈城市建设项目施工的环境管理·····	黄仁东	201
浅谈远传抄表系统在民用燃气中的应用·····	王 莉	203
绿色建筑与节能环保·····	黎科伦	205
浅析如何提高工程建筑质量控制·····	杜 勇	207
BIM（建设项目信息化模型）平台综合应用分析·····	彭笑川	209



基于中矢量调制和中点电位控制的零序环流抑制方法

曾钰琳¹ 王东升² / 1 东方风电有限公司 2 东方电气自动控制工程有限公司

【摘要】以两台T型三电平逆变器并联系统模型为基础，指出零序环流的激励源是并联逆变器间零序电压差，根据这个结论和T型三电平的特点，本文提出了一种只采用中矢量加零矢量的调制策略（2MV1Z）来保持各台T型三电平逆变器零序电压为相同定值，从而消除零序激励源和零序环流，并提出了结合中点电位控制的零序环流抑制方法以保证中点电位平衡和抑制可能出现偏移的零序环流；最后仿真验证了算法的有效性。

【关键词】三电平逆变器 环流分析 调制算法 谐波分析

一、T型三电平储能逆变器并联系统零序环流模型

图1给出了由两台共享直流母线和交流母线的T型三电平逆变器组成的并联系统拓扑结构。其中C为直流母线电容， C_f 为交流侧滤波电容； L_{v1} 、 L_{v2} 分别为逆变器1和逆变器2的交流侧滤波电感， L_{g1} 、 L_{g2} 分别为逆变器1、2的网侧滤波电感； R_1 、 R_2 、 R_{g1} 、 R_{g2} 分别为电感 L_{v1} 、 L_{v2} 、 L_{g1} 、 L_{g2} 的等效电阻； O_1 、 O_2 分别为逆变器1和逆变器2的母线中点；P、N分别为正负直流母线；n为三相电网中性点。

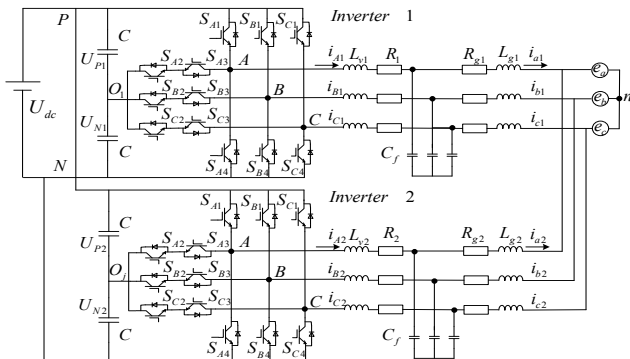


图1 共享交、直流母线并联系统拓扑结构

假定流过电感的电流及直流母线电压在一个开关周期内

保持不变，忽略死区的影响，根据基尔霍夫定律可以得到两台T型三电平逆变器间的环流回路微分方程为：

$$\begin{cases} L_{v1} \frac{di_{A1}}{dt} + R_1 i_{A1} + L_{g1} \frac{di_{g1}}{dt} + R_{g1} i_{g1} + S_{a1} \frac{U_{dc}}{2} = L_{v2} \frac{di_{A2}}{dt} + R_2 i_{A2} + L_{g2} \frac{di_{g2}}{dt} + R_{g2} i_{g2} + S_{a2} \frac{U_{dc}}{2} \\ L_{v1} \frac{di_{B1}}{dt} + R_1 i_{B1} + L_{g1} \frac{di_{g1}}{dt} + R_{g1} i_{g1} + S_{b1} \frac{U_{dc}}{2} = L_{v2} \frac{di_{B2}}{dt} + R_2 i_{B2} + L_{g2} \frac{di_{g2}}{dt} + R_{g2} i_{g2} + S_{b2} \frac{U_{dc}}{2} \\ L_{v1} \frac{di_{C1}}{dt} + R_1 i_{C1} + L_{g1} \frac{di_{g1}}{dt} + R_{g1} i_{g1} + S_{c1} \frac{U_{dc}}{2} = L_{v2} \frac{di_{C2}}{dt} + R_2 i_{C2} + L_{g2} \frac{di_{g2}}{dt} + R_{g2} i_{g2} + S_{c2} \frac{U_{dc}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

由零序环流定义可知，对于本系统零序环流 i_0 可以表示为：

$$i_0 = (i_{A1} + i_{B1} + i_{C1}) = (i_{a1} + i_{b1} + i_{c1}) = -(i_{A2} + i_{B2} + i_{C2}) = -(i_{a2} + i_{b2} + i_{c2}) \quad (2)$$

将式（1）的三个方程式相加，并将式（2）带入后化简可以得到关于零序环流 i_0 的关系式：

$$\begin{aligned} & (L_{v1} + L_{g1} + L_{v2} + L_{g2}) \frac{di_0}{dt} + (R_1 + R_{g1} + R_2 + R_{g2}) i_0 \\ & = \frac{U_{dc}}{2} [(S_{a2} + S_{b2} + S_{c2}) - (S_{a1} + S_{b1} + S_{c1})] \end{aligned} \quad (3)$$

定义零序开关矢量 S_{01} 和 S_{02} ，令 $S_{01} = S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}$
 $S_{02} = S_{a2} + S_{b2} + S_{c2}$ 。将零序开关矢量带入式(3)可以得到：

$$(L_{v1} + L_{g1} + L_{v2} + L_{g2}) \frac{di_0}{dt} + (R_1 + R_{g1} + R_2 + R_{g2}) i_0 = \frac{U_{dc}}{2} (S_{02} - S_{01}) \quad (4)$$

式(4)即为采用开关函数描述的零序环流模型，可以看出零序环流与等效环路阻抗、直流母线电压以及并联逆变器的开关状态三者都有关系，零序环流等效电路如图2所示：

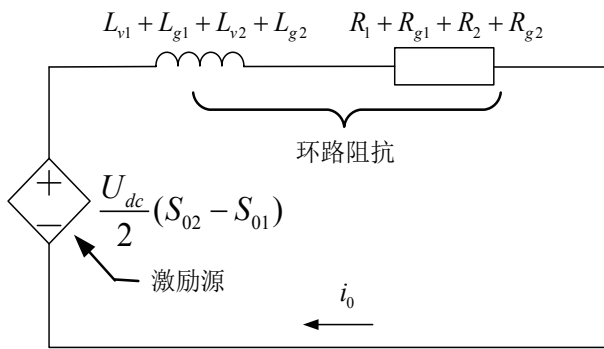


图2 零序环流等效电路

通过图2可以看出，抑制零序环流有增大零序环路阻抗和减少零序环流的激励源两种方法；增大零序环路阻抗会导致体积、成本和损耗的增加，一般很少采用，本文将采用减少零序环流激励源的方法抑制零序环流。

二、2MV1Z调制算法谐波性能分析对比

逆变器输出波形的质量直接影响逆变器的总谐波失真和损耗，所以对谐波进行分析具有重要的意义，本文采用空间矢量方法对谐波进行分析。

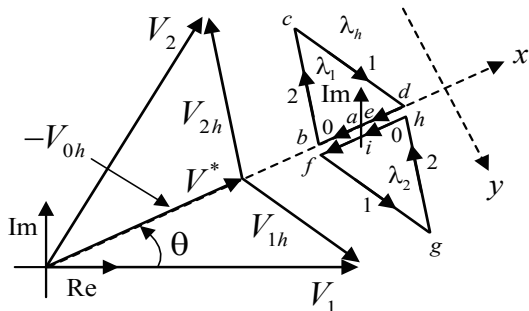


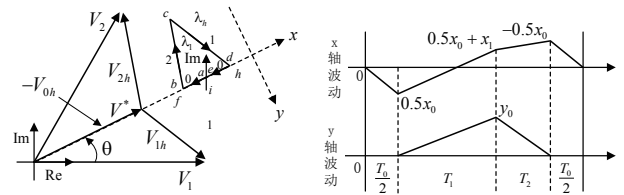
图3 谐波磁通轨迹

图3以一个三角形扇区为例，给出了一个载波周期内谐波磁通矢量的轨迹，图中 V_2 表示参考电压矢量，由空间矢量

V_1 和 V_2 合成； V_{1h} 和 V_{0h} 表示一个载波周期的谐波电压矢量，其中 $V_{1h} = V_1 - V^*$ 、 $V_{2h} = V_2 - V^*$ 、 $V_{0h} = V_0 - V^*$ ；谐波电流的轨迹可以通过调制比 M 、谐波电压矢量和零矢量的选择得到，为简化分析，可以认为当负载为纯感性时谐波磁通矢量 λ_h ($\lambda = Li$)与谐波电流等，谐波磁通矢量 λ_h 的轨迹是由谐波电压矢量 V_{1h} 、 V_{2h} 和 V_{0h} 组成的三角形，第 N 个载波周期的谐波磁通矢量可以通过式计算得到：

$$\lambda_h(M, \theta, V_0) = \int_{NT_s}^{(N+1)T_s} (V_k - V^*) dt \quad (5)$$

式(5)中 V_k 为逆变器输出电压矢量，在一个开关周期中随开关状态的变化而变化。为了简化计算，通常只用计算其中一个三角形轨迹 λ_1 ，表示半个载波周期的谐波磁通的轨迹，为一个载波周期谐波磁通矢量 λ_h 的1/2。当载波频率 f_s 远大于基波频率 f_e ($f_s/f_e > 20$)时，可以认为参考电压矢量 V^* 在一个载波周期内没有发生变化。设以与参考电压矢量 V^* 同向的坐标轴为 x 轴，垂直于 x 轴的为 y 轴，可以得到谐波磁通在 x 轴和 y 轴的分量如图4所示。



(a)谐波磁通轨迹

(b)谐波磁通波动分量

图4 谐波磁通轨迹与波动分量

图4中 T_0 、 T_1 、 T_2 分别表示一个载波周期中参与合成矢量作用时间的一半；同时可以得到图中 x_0 、 x_1 、 y_0 的具体表达式如下：

$$\begin{cases} x_0 = -V^* \cdot T_0 \\ x_1 = (V_1 \cos \theta - V^*) \cdot T_1 \\ x_2 = (V_2 \cos(\frac{\pi}{3} - \theta) - V^*) \cdot T_2 \\ y_0 = V_1 \sin \theta \cdot T_1 = V_2 \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \cdot T_2 \end{cases} \quad (6)$$

所以半个载波周期中谐波磁通矢量 λ_1 在 x 轴和 y 轴的波动分量 ψ_x 和 ψ_y 可分别由式(7)和式(8)表示：

用中，主电路参数很难做到完全相同，特别是滤波电感，图8给出了两台并联逆变器滤波器参数各不相同且三相不平衡的仿真波形：

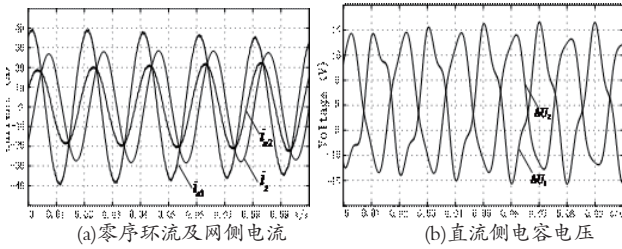


图8 采用2MV1Z调制算法电感参数不同仿真波

由图8可以看出当滤波器参数不一致时只采用2MV1Z调制算法会出现很大的零序环流，并网电流受到严重影响，母线中点电位也出现非常大的波动，所以实际系统中必须要加入专门的零序环流和中点电位的控制。图9给出了滤波器参数各不相同且三相不平衡时，采用本文所提出的结合中点电位控制的零序环流抑制算法的仿真波形。

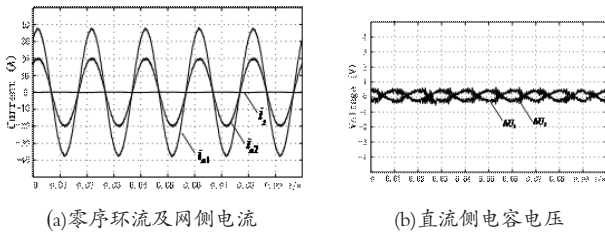


图9 滤波器参数不一致采用控制算法的仿真波形

由图9可以看出当滤波器参数不一致时，采用本文提出的结合中点电位控制的零序环流抑制方法后，零序环流几乎为零，并网电流波形直流显著变好，中点电位也能控制在非常小的范围内波动，证明了在忽略死区时，本文提出的采用2MV1Z调制算法，以及结合中点电位的零序环流抑制整体算法，对于抑制零序环流和平衡中点电位的有效性。

以下仿真均忽略了死区的影响，为验证实际应用中死区的影响、死区补偿的效果，以及加入死区及死区补偿后本文提出的结合中点电位的零序环流抑制算法的有效性，现统一加入死区，同样取两台并联逆变器的载波相位相差，其中一台满载，另一台半载，仿真条件及波形说明如下。

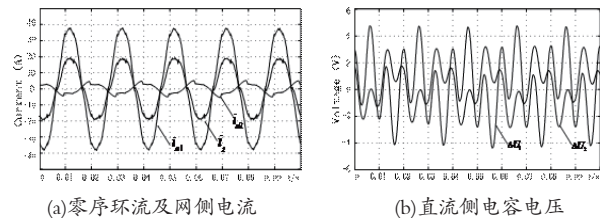


图10 采用2MV1Z调制算法加入死区仿真波形

图10给出了加入死区，两台并联逆变器三相滤波器参数平衡相等，且只采用2MV1Z调制算法的仿真波形。同图7对比可以看出，对于只采用2MV1Z调制算法的情况，加入死区对于中点电位的影响不大，但是会导致零序环流变大，并网电流波形质量变差。加入死区补偿之后的仿真波形如图11所示。

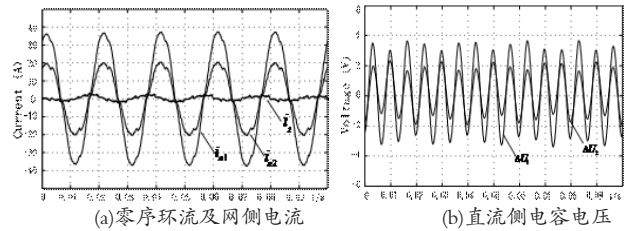


图11 采用2MV1Z调制算法加入死区及死区补偿仿真波形

由图11可以看出加入死区补偿之后零序环流减小，并网电流波形变化中点电位波动稍微平稳，证明了死区补偿对于抑制零序环流的有效性。

同样，在加入死区补偿以后，考虑两台并联逆变器滤波器参数各不相同且三相不平衡，得到仿真波形如图12所示。

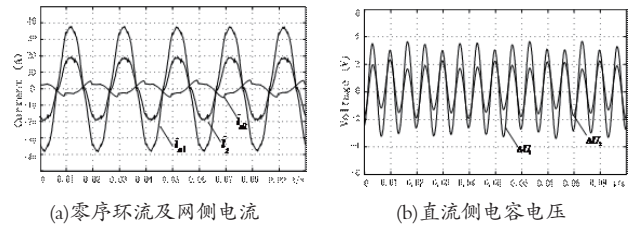


图12 采用2MV1Z调制算法加入死区及死区补偿电感参数不同仿真波形

由图12可以看出在滤波器参数各不相同且三相不平衡的情况下，加入死区补偿之后仍有较大的零序环流，并网电流波形质量变差，中点电位波动也变大；但是相较于图8可以看出，加入死区补偿之后，零序环流明显减小，并网波形质量显著变好，中点电位波动也变小很多，证明了死区补偿的有效性。

图13给出了滤波器参数各不相同且三相不平衡的情况下，加入死区及死区补偿之后，采用本文提出的结合中点电位控制的零序环流抑制算法的实际工作情况的仿真波形图。

由图13可以看出在上述实际最恶劣的仿真条件下零序环流几乎为零，并网电流波形质量非常好，中点电位在较小的范围内波动，充分证明了本文提出针对T型三电平储能逆变器并联系统的采用2MV1Z调制算法、2MV1Z调制算法的死区补偿方法以及结合中点电位控制的零序环流抑制方法的综合控制策略的有效性。

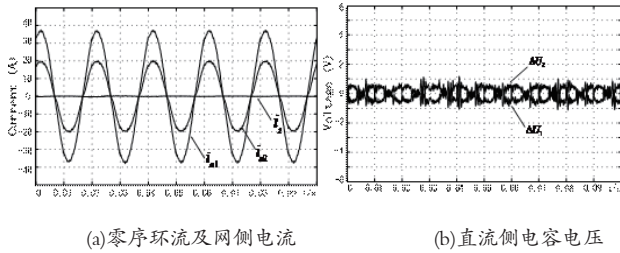


图13 实际工作情况仿真波形

四、小结

本文就由两台T型三电平储能逆变器组成的并联系统进

行了建模分析，指出了零序环流的激励源是并联逆变器间的共模电压差；提出了采用2MV1Z调制算法维持各并联逆变器共模电压恒定以减小零序激励源，并对2MV1Z调制算法的死区补偿进行了分析说明；由于在电流零点存在方向误判，存在无可避免的、不可预料的零序激励，为补偿可能出现的单向偏移，提出了结合中点电位控制的零序环流抑制方法；并对2MV1Z调制算法的性能进行了分析对比；最后给出了仿真结果，证明了理论分析的正确性以及提出方法对于抑制零序环流的有效性。

机器人电缆的研发

王 昆 陈旭彤 / 特变电工（德阳）电缆股份有限公司

一、引言

如今的制造业，正酝酿着一轮技术和市场的竞合，随之也涌现了诸如智能制造、智能生产等一批新的概念。机器人正闪亮登场，尽管我国仍处于发展机器人起步阶段，但是从需求上来看，我国已成为全球最大的机器人市场，约占全球市场的1/3，据前瞻产业研究院发布的《工业机器人行业产销需求预测与转型升级分析报告》数据显示，2017年我国机器人市场规模达到62.8亿美元，2012~2017年的平均增长率达到28%。根据国家工信部、发改委、财政部三部委联合印发的《机器人产业发展规划（2016~2020年）》，该规划为“十三五”期间我国机器人产业发展描绘了清晰的蓝图。规划中提到，到2020年我国工业机器人年产量达到10万台，六轴

及以上机器人5万台以上。预计未来几年，中国机器人市场将达千亿元人民币。

二、机器人电缆技术要求的探讨

目前，电缆制造行业中一般引用莱茵 2 PFG 2577/08.16《Requirements for Cables used in Robot System》，该规范按照用途将电缆分为5级，机械寿命试验项目和分级对比见表1；当前我们正在研究的机器人电缆属于拖链电缆，而在技术要求和试验验证部分我们参照4级电缆要求设计（预期目标更高）。

结合4级电缆规范中要求的机械寿命试验方法，制定所研发机器人电缆的性能验证要求，具体如下。

表1 电缆分级及机械寿命试验要求

	Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V	次数(万)
二轮曲绕						
($\leq 4\text{mm}^2$)	X	X	X	X	X	100
弯折&旋转			X		X	5
弯折			X		X	3
拖链弯曲		X				500
90°弯折 ($>4\text{mm}^2$)	X	X	X	X	X	100
2D扭转				X	X	500
垂直扭转				X	X	50
3D扭转				X	X	500
一般用途	只90°弯折	拖链	跨R, T轴	扭转	跨手臂扭转	

(一) 二轮曲绕试验

试验要求：按照GB/T 5023.2—2008中第3.1条的规定进行试验，设备示意如图1。

试验结果：单个试样次数达到规定的寿命次数，且未发生导通报警情况。

(1) 将试样取下，进行直流电阻测量，并且对比未进行试验前的直流电阻数值，记录电阻变化率，电阻变化率不超过5%。

(2) 将试验进行浸水耐压试验，2.0kV 5min，试样应不击穿。

(3) 检查试验表面，应未出现裂纹，线芯短路现象，否则视为不合格。

单个试验若试验曲绕次数未达到规定的寿命次数，已经出现导通报警、护套开裂的现象，则判定不合格。

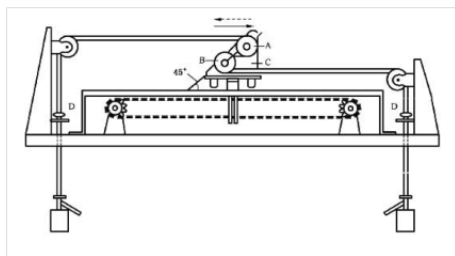


图1 二轮曲绕试验示意图

(二) 拖链试验

试验要求：本试验应使用图2所示设备进行。拖链轨道两端固定在设备上，其中固定端不随设备移动，移动端随着驱动装置以1m/s的平均速度在行程1m的距离之间往复运动。

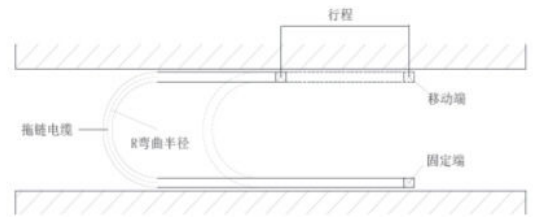


图2 拖链试验装置图

试样制备：取3.5~4.5m长的试样，将电缆两端脱皮50mm，同时将试样两端的绝缘线芯脱皮15mm，并将每两根绝缘线芯串联，最后空闲一个或两个线头无须接通，电缆的每两根绝缘线芯间形成一个通路。

样本最少为5根。

试验步骤：试样应在导通状态下进行试验。布线方法如图3所示。弯曲半径应为电缆直径的6倍，被测试样两端应保持平行，且进行循环往复在水平方向来回移动，到达另一端的终端时，停止移动，然后沿履带返回到起始端，恢复到初始状态，此为一个周期。

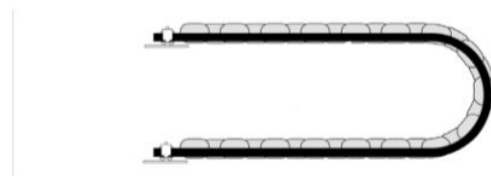


图3 拖链试验安装示意图

试验结果：单个试样次数达到规定的寿命次数，且未发生导通报警情况。

(1) 将试样取下，进行直流电阻测量，并且对比未进行试验前的直流电阻数值，记录电阻变化率，电阻变化率不

超过5%。

(2) 将试验进行浸水耐压试验, 2.0kV 5min, 试样应不击穿。

(3) 检查试验表面, 应未出现裂纹, 线芯短路现象, 否则视为不合格。

单个试验若试验次数未达到规定的寿命次数, 已经出现导通报警、护套开裂的现象, 则判定不合格。

当5根试样出现不多于1根试样不合格时, 则判定该项试验合格。

(三) 90° 弯曲试验

试验要求: 取1.5m长的试样, 将电缆两端脱皮50mm, 同时将试样两端的绝缘芯线脱皮15mm, 并将绝缘芯线串联, 最后空闲一个或两个线头无须接通, 整根电缆的绝缘芯线形成一个通路。

样本最少为5根。

试验步骤: 将试样的顶端固定在图4所示的设备上, 两轮上夹端留有20cm的长度, 弯曲半径为6倍电缆直径, 并在试样底端悬挂0.5N/mm²的重锤, 试样芯线与设备导通。

试样应垂直于导体轴线平面作180° 往复弯曲运动, 当弯曲到极端位置时, 应与导体轴线的两边各呈90° 角。弯曲频率为60次/min。

试验结果: 同拖链试验结果判断。

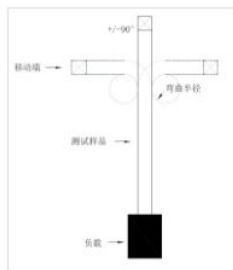


图4 90° 弯曲试验示意图

(四) 垂直扭转试验

试验要求: 取1.5m长的试样, 将电缆两端脱皮50mm, 同时将试样两端的绝缘芯线脱皮15mm, 并将每两根绝缘芯线串联, 最后空闲一个或两个线头无须接通, 整根电缆的绝缘芯线形成一个通路。

样本最少为5根。

将试样的顶端和底端固定在图5所示的设备上, 试样芯线与设备导通。

试样应沿着垂直于导体轴线的平面作 ± 180° 往复扭转运动, 当扭转极端位置时, 应与导体轴线的两边各呈180° 角。

弯曲频率为12次/min。

试验结果: 同拖链试验结果判断。

三、 机器人电缆的研发

(一) 产品型号, 规格及电压等级确定

经过综合考虑, 将试制样品型号规格定为JTEU6 × 1.0 300V。

(二) 技术要求

1. 导体

1.0mm²导体根数设计为126/0.10mm, 采用7股结构, 每股设计为18/0.10mm, 每股中可以适当设计增强纤维或芳纶丝进行导体加强, 股线绞向与复绞绞向相反, 股线节距和复绞节距控制适当, 这样的导体会具备优异的抗弯曲疲劳, 抗拉和抗扭转功能。

2. 绝缘

前期经过项目对比筛选, 选择TPE弹性体作为绝缘层, 其原材料性能详见表2, 并规定了绝缘标称厚度为0.25mm, 最薄点为0.20mm。

表2 TPE弹性体材料性能和实测值

序号	项目名称	单位	指标	实测值
1	密度	g/cm ³		1.15
2	老化前			
	拉伸强度 不小于	Mpa	15	29.3
3	断裂伸长率 不小于	%	200	850
	老化后			
3	老化试验 温度	°C	136 ± 2	
	老化试验 时间	h	168	
	拉伸强度 保留率 最小	%	75	90
4	断裂伸长率 保留率 最小	%	75	105
4	低温冲击 脆化	-60°C	通过	失效数0/30
5	邵氏硬度	A		92 (参考)
6	击穿场强	V/m		3.4*1010

3. 成缆和填充物

绞合节距应不大于绞合外径的10倍，成缆方向为右向。
 缆芯间的间隙应采用增强材料填充。

4.护套

选择TPU弹性体材料作为样品线护套料，其原材料性能详见表3，并规定了护套标称厚度为1.1mm，最薄点为0.84mm。

表3 TPU弹性体材料性能和实测值

序号	项目名称	单位	指标	实测值
1	密度	g/cm ³		1.23
2	老化前			
	拉伸强度不小于	Mpa	20	25.8
	断裂伸长率不小于	%	300	550
3	老化后			
	老化试验温度	℃	113 ± 2	
	老化试验时间	h	168	
	拉伸强度保留率最小	%	70	86
	断裂伸长率保留率最小	%	65	92
4	低温冲击脆化	℃	-40℃ 通过	失效数0/30
5	邵氏硬度	A		82 (参考)
6	浸矿物油试验			
6.1	试验条件温度	℃	70 ± 2	
	时间	h	24	
6.2	抗张强度最大变化率	%	± 30	12
6.3	断裂伸长率最大变化率	%	± 30	10

(三) 成品电缆机械寿命性能验证

成品电缆常规性能均符合技术标准要求，下面重点分析机械寿命性能测试结果。

产品试验前JTEU 6 × 1.0绝缘芯线电阻分别为：

1# 18.08、2# 18.12、3# 18.30、4# 18.14、5# 18.32、6# 18.41 Ω/km。

1. 二轮曲绕试验结果

二轮曲绕试验结果详见表4，产品外观和绝缘线芯表面均无异样，该结果显示二轮曲绕试验符合设计标准。

2. 拖链试验结果

拖链试验结果详见表5，该结果显示拖链试验符合技术

表4 二轮曲绕试验记录

试样周期	检验样品日期	环境温度	耐压试验	实测直流电阻Ω/km	外观现象	有无通断	电阻变化率%	备注
100W次	2018.3.7	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 18.56	良好	通	3.0%	导体无断丝
				2# 18.78			3.6%	
				3# 19.10			4.4%	
				4# 18.45			1.7%	
				5# 18.55			1.3%	
				6# 18.48			0.4%	

表5 拖链试验记录

试样周期	检验样品日期	环境温度	耐压试验	实测直流电阻Ω/km	外观现象	有无通断	电阻变化率%	备注
500W次	2018.4.8	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 18.45	良好	通	2.0%	导体无断丝
				2# 18.20			0.4%	
				3# 18.30			0.9%	
				4# 18.55			2.3%	
				5# 18.35			0.2%	
				6# 18.58			0.9%	

表6 90° 弯曲试验记录

试样周期	检验样品日期	环境温度	耐压试验	实测直流电阻Ω/km	外观现象	有无通断	电阻变化率%	备注
50W次	2018.4.3	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 18.90	良好	通	4.5%	导体无断丝
				2# 18.70			3.2%	
				3# 19.18			4.8%	
				4# 18.20			0.33%	
				5# 18.38			0.33%	
				6# 18.48			0.4%	
100W次	2018.4.8	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 18.39	良好	通	1.7%	导体无断丝
				2# 18.38			1.4%	
				18.33			0.2%	
				4# 18.21			0.4%	
				5# 18.28			-0.2%	
				6# 18.32			-0.5%	
150W次	2018.4.8	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 20.26	良好	通	12%	导体有断丝
				2# 19.17			5.8%	
				3# 18.15			-0.8%	
				4# 18.45			1.7%	
				5# 19.02			3.8%	
				6# 18.52			0.6%	
500W次	2018.3.6	20℃	2.0kV/5min 通过	/	良好	通	/	导体有断丝

注：500w次是最早上的一根样品，当时没有考虑导体电阻的变化，只考虑其余性能参数。

表6 垂直扭转试验记录

试样 周期	日期	检验样品 环境温度	耐压试验	实测直 流电阻 Ω/km	外观 现象	有无 通断	电阻变 化率%	备注
150W 次	2018.4.8	20℃	2.0kV/5min 通过	1# 18.20	良好	通	0.7%	导体 无断 丝
				2#18.16			0.2%	
				3# 18.37			0.4%	
				4# 18.25			0.6%	
				5# 18.37			0.3%	
				6# 18.44			0.2%	

标准要求；因追求更高的标准，目前该试验还在延续中，后期将再探讨1 000万次，1 500万次，2 000万次结果。

3.90° 弯曲试验结果

根据规范规定4mm²以上试验要求做该试验，本着样品性能验证的思路和客户之前的交流，本次也增加了该试

验，90° 弯曲试验详见表6，该结果显示90° 弯曲试验在100万次时符合设计标准（规范要求4mm²以上，试验次数100万次）；150万次时导体出现断丝，电阻偏差超过规范要求，但是绝缘线芯表面和护套表面均无异样；500万次后正常电气性能均能符合要求，绝缘线芯表面和护套表面无异样，但是导体断丝情况严重，导体中大部分单丝断裂。

注：500万次是最早上的一根样品，当时没有考虑导体电阻的变化，只考虑其余性能参数。

4.垂直扭转试验结果

垂直扭转试验结果详见表6，该结果显示在150万次垂直扭转试验后符合设计标准（标准规定50万次）；因追求更高的标准，目前该试验还在延续中，后期将再探讨200万次，300万次，500万次结果。

四、结论

研制生产的机器人电缆，各项性能达到预期设定的科研技术指标要求，且有些指标优于现有规范要求，相信随着机器人领域的发展，其必将有更为广阔的市场空间。