

综
述
与
评
论

高速铁路弓网电接触研究综述

陈 立, 吴广宁, 高国强, 朱 军, 王 波

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 陈 立 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘技术在电气化铁路的应用以及电力系统接地技术。

摘 要: 针对弓网电弧产生机理、电弧能量损耗、载流摩擦磨损规律、弓网材料的选取等方面, 综述了国内外对弓网电弧和载流摩擦的研究现状, 指出了弓网电接触研究过程中存在的问题, 提出了该领域今后可能发展的方向, 为更深入的研究打下基础。

关键词: 弓网; 电接触; 电弧; 载流摩擦; 高速铁路; 电气化铁道

中图分类号: U225

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)05-0006-04

Research Reviews on Electrical Contact Between Pantograph and Catenary of High-speed Railway

CHEN Li, WU Guang-ning, GAO Guo-qiang, ZHU Jun, WANG Bo

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Domestic and oversea researches on mechanism of arc, arc energy loss, discipline of friction and wear with current and pantograph and catenary materials were discussed, and probable issues during studies and related researching direction were pointed out, which supplied a foundation for further researches on electrical contact between pantograph and catenary.

Key words: pantograph and catenary; electrical contact; arc; friction and wear with current; high-speed railway; electrified railway

0 引言

高速铁路是当今世界铁路发展的主题, 提升列车运行速度是世界各国不断追求的共同目标。自 1964 年世界上第 1 条高速铁路日本东海道新干线开通以来, 法国 TGV 技术、德国 ICE 技术也在高铁领域迅猛发展。2010 年 9 月 28 日, 国产“和谐号”CRH380A 新一代高速动车组在沪杭高铁从杭州到上海虹桥试运行, 最高速度达到了 416.6 km/h, 这一成绩刷新了世界铁路运营试验的最高速度。

随着我国铁路几次大提速, 电气化铁道弓网电接触问题日益突显。提升速度会导致列车在运行时产生上下的振动, 这种振动使弓网之间的离线率提高。离线率的提高一方面使弓网受流质量降低, 供电系统稳

定性下降, 另一方面使弓网接触电阻增大, 能量损耗也随之增大。电气化铁路的不断提速致使弓网系统的载流量成倍增长, 弓网电弧现象也变得越来越严重。电弧的出现恶化了受流质量, 使材料的耐磨损性能下降, 缩短受电弓滑板 and 接触网导线的使用寿命, 严重时还会引发意外事故^[1]。因而如何提高弓网受流质量, 消灭弓网故障, 减少材料磨耗量, 是高铁领域亟待解决的重要问题。研究弓网电接触问题对促进我国高速铁路的发展具有重要的意义^[2]。

1 弓网受流系统

电力机车运行时, 受电弓从接触网取得 25 kV 交流电通过主断路器进入机车牵引变压器, 将接触网的高压交流电变成低压交流电, 然后经整流和逆变供给牵引电动机, 牵引电动机驱使列车前进^[3], 如图 1 所示。

在牵引供电系统中, 弓网关系尤为重要。受电弓的升弓系统施加予集电头, 接触网沿线各点的刚度不同, 使接触导线在受到受电弓接触压力作用时产生不

收稿日期: 2011-06-15; 收修改稿日期: 2011-08-24

基金项目: 教育部新世纪优秀人才基金(NCET-07-0718); 教育部博士点新教师基金项目(200806131015); 国家 973 计划资助项目(2011CB7)

同程度的上升,从而使受电弓产生上下振动。在运行中,气流对受电弓产生一个随速度增加而迅速增大的气动力,同时也使接触压力增大。这3种作用力的合力,如果太小则受流质量不佳,如果太大会增加接触导线和集电头接触板的磨损。此外,接触网导线因硬弯、硬点而高度忽高忽低,在变坡点处可能会产生拉弧现象,高温电弧灼伤接触线工作面,使接触线工作面出现麻点^[1,3]。当受电弓高速通过时,产生严重的拉弧易导致弓网故障,同时会给以后接触网运营带来隐性故障点。

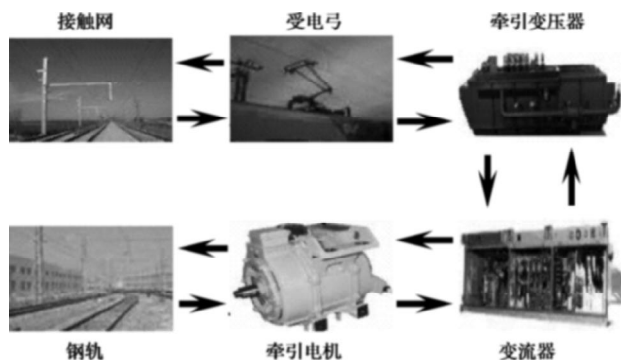


图1 牵引供电系统

2 弓网电接触研究现状

当受电弓和接触网良好接触并给机车供电时,弓网受流系统主要考虑载流摩擦的影响;当受电弓和接触网随着速度增加而离线频繁时,弓网受流系统主要考虑弓网电弧的影响。因此,国内外的学者对弓网电接触的研究集中在弓网电弧和载流摩擦两大领域上^[4-5]。

2.1 弓网电弧

在电力机车运行过程中,离线而产生的弓网电弧越来越受到工程技术人员关注,这种弓网电弧虽然能维持列车取流的持续性,但是会使车载变压器承受高频振荡过电压,还会烧蚀接触线,缩短接触线使用寿命,严重时还会烧断接触网导线,造成重大事故。随着列车速度的提高,这类问题愈发突出。工程实践表明,弓网电弧问题是电气化铁路提速的核心问题之一。

在国际上,很多国家早在20世纪六七十年代就开始研究弓网电弧了。高速铁路发展较早的国家如德国、日本、法国等提出了采用精密机械技术使受电弓和接触网的匹配关系达到最佳,从而减少弓网离线率^[6-7]。然而实践证明,仅仅通过机械技术消除弓网电弧是不可能的,因此有必要对电弧的电气特性等进行更深入的研究。文献[8]认为电弧长度、弓网间相互滑动速度、电极材料及几何形貌、电弧电流、电极端电压和天气状况都会影响弓网电弧燃烧的稳定性,要保证弓网离线后列车仍能通过电弧良好受流,最佳电弧的长度应该控制在5~10 mm,且电弧电流不能低于50 A。文献[9]描绘了弓网分离时电弧电压与时间的关系图,并指

出在弓网持续5 ms的离线过程中,随着电流的逐渐下降,电弧电压出现了高达156 V的高峰,该文献还提出了电弧能量的计算公式 $E = \sum U \cdot I \cdot \Delta t$ (式中 U 为电弧电压, I 为电流, Δt 为燃弧时间)和电弧侵蚀量与电弧能量关系 $W_s = a \cdot E^b$ (式中 W_s 为材料侵蚀量, E 为电弧能量, a 、 b 为与材料相关系数)。文献[10-11]通过最大线速度为30 m/s的盘销式弓网电弧模拟系统试验,发现电流在过零点时,电压波形呈现不同程度的畸变,畸变的程度取决于电流过零点的时间、转盘的转速和电弧电流大小,如图2所示。该文献还认为产生的弓网电弧会发射宽频电磁波,这些电磁波通过接触网和钢轨传递,严重干扰牵引功率和轨道电路的信号通信系统。此外,电压畸变会产生直流分量,直流分量在整个牵引供电系统中传递,使得牵引变压器直流偏磁,造成变压器温度升高、振动加剧、噪声过大,严重影响牵引变压器正常工作。

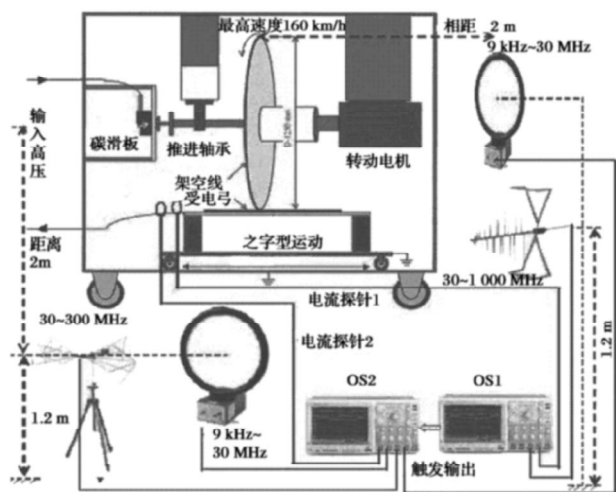


图2 OHL ICE Team 弓网电弧模拟试验设备示意图

我国在弓网电弧研究方面起步较晚,研究主要是针对载流摩擦、弓网材料及最佳机械匹配等方面,关于弓网电弧电气特性和能量特性等方面,国内的研究还处于萌芽阶段。文献[12-13]根据瞬态传导理论建立弓网系统电弧烧蚀模型,并利用MATLAB进行仿真分析,认为静止电弧在很短时间内就能导致接触线表面熔化,运动电弧随着列车运行速度提高而对接触线的热侵蚀程度减轻。文献[14]认为在阻性负载下分断电弧的电弧电压随电极的开距近似成线性比例增加而增加,电弧稳态燃烧时电弧电流大小只与负载大小和电源电压有关,接触电弧的电弧最大开距只与电极的形状和电源的电压有关。文献[15]利用Mayr电弧模型对牵引供电系统仿真,发现在车载变压器的高压侧并联一个适当大小的电容能很好地抑制弓网电弧产生的过电压,从而减小电弧的能量损耗,减轻电弧烧蚀的程度。文献[16]发现电容特性负载下的电弧强度最多不超过电感特性负载下的电弧强度的35.59%,利用直流

斩波技术把机车交流传动系统做成无变压器化结构,不但实现电容特性负载,而且对车载电气传动系统小型轻量化具有重要意义。

2.2 载流摩擦

载流摩擦磨损是指处于电场中的摩擦副在有电流通过条件下的摩擦磨损行为。在电气化铁路的电力系统中,受电弓滑板与导线间的摩擦接触状态是衡量受流标准的重要指标。受电弓滑板和导线的摩擦磨损性能决定了机车连续运行的时间,如何获得良好的受流质量成为该领域的研究重点,引起了世界各国的密切关注。

近年来,日本、德国、法国等国家出现了载流摩擦研究的高潮,重点在载荷、速度、润滑、电流大小和电弧等物理条件和电学条件下,对电场中受电弓滑板的摩擦学性能和接触行为的影响^[17-18]。他们通过大量试验探索载流摩擦的机理、摩擦材料的选取等方面,取得了许多成果,尤其日本的研究成果最为丰富(约50%的数据资料都来自日本)。文献[19]认为载流磨损过程中铜滑板摩擦界面初始磨屑在机械磨耗起作用形成鳞片状,随后热应力变化及离线电弧的产生导致磨屑在多种磨损作用下转变成雨滴状。文献[20]利用粉末冶金内氧化法制备一种CuLa₂O₃新型复合材料,在销盘试验机上与GCr₁₅钢盘摩擦,电弧侵蚀后磨损表面的扫描电镜图显示,材料磨损表面有电弧侵蚀坑和熔化金属,直径为1~3 μm,主要成分是铜和氧的球形水滴状颗粒及裂纹。文献[21]认为,对相同能量的交流电弧和直流电弧所引起的磨耗进行对比,交流电弧比直流电弧所引起的磨耗更严重,是电流从滑板流入接触导线的反极性磨耗量是正极性磨耗量的4倍,反极性在整个过程中起了很大的作用。文献[22]对Cu-Ag-Cr合金接触线进行载流摩擦磨损研究,扫描电镜图显示其表面有与滑行方向平行的凹槽、侵蚀坑及一些球形颗粒。文献[23]认为高的电流密度可导致材料的热膨胀,从而引起热弹塑性变化,材料表面的热塑点吸收了摩擦热量和电流热量直到被磨平为止。由于热塑点被磨掉后,加在该点的载荷转移到附近区域形成新的热塑性区域,很多的热量来源于强电流和摩擦热,再加上电弧的热作用使材料表面熔化形成熔池,而作用于熔池的电磁力及摩擦副之间的相互运动则驱使液态金属流动,形成流速场,当液态金属的流速超过一定值时,便以小液滴的形式从摩擦副间飞散出去,形成飞溅。

国内也在探索载流摩擦磨损规律、弓网最佳摩擦副、浸金属碳滑板、碳纤维滑板、复合材料滑板等方面进行了积极的研究,并取得了一定的进展。文献[24]认为对于载流摩擦,电因素的介入对摩擦磨损有重要的影响,其中电场、电流以及电弧的作用都将极大地改变受电弓滑板的摩擦学性能。文献[25]通过在CETRUMT22上做试验,发现弹性支撑能降低载

荷的振幅、保证良好的受流,选择合适的加载范围和一定刚度的弹簧支撑能有效地降低电弧烧蚀带来的材料损失,延长摩擦副的使用寿命。文献[26]通过最高线速度160 m/s、最大试验电流200 A的试验机进行数据测量,发现电流强度和电弧燃炽时间对电弧侵蚀起着决定作用,在受流接触中的电流应用变化范围很大,最小电弧电流约 10^{-2} A,而强电流可达 10^5 A。该文献还认为碳和铝合金材料的电弧侵蚀过程主要以阴极蒸发为主,而铜基粉末冶金材料的电弧侵蚀过程主要以阳极为主。文献[27]认为载流条件下由于摩擦接触表面界面膜的存在,会在摩擦面上引起电弧,产生大量摩擦热和电弧热,从而产生2种磨损:一种是产生大面积的氧化区域,形成氧化磨损;另一种是由电弧飞溅形成的氧化硬质相颗粒产生磨粒磨损。文献[28]认为火花放电时以电弧烧蚀和氧化磨损为主,电弧放电时以电弧烧蚀和氧化磨损为主,并伴有明显的粘着磨损,在弓网受流过程中既要保证适当的法向压力,也应保证摩擦副接触面积的合理匹配。文献[29]建立了30 000 r/min、最大输出电流800 A的高性能滑动磨耗试验机,并发现随着电流增大,铜基粉末冶金滑板、浸铜碳滑板2种滑板材料的接触电阻、温度以及磨耗率都在增大,浸铜碳滑板材料的接触电阻变化率较小,但接触表面的温度偏高,滑板磨耗率变化较小,受流磨损性能较好。文献[30]在HST-100载流高速摩擦磨损机上试验,认为随着速度的增加,电弧的强度和发生频率均增大;低速情况下主要是磨粒磨损和粘着磨损,高速下情况下主要是电弧侵蚀和粘着磨损,且浸金属碳滑板材料在电弧侵蚀下,磨损机理主要为材料转移和熔融飞溅机理,如图3所示。

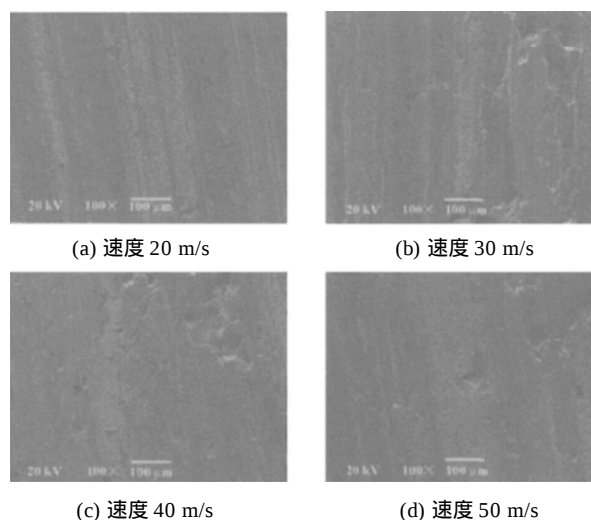


图3 在80 A、60 N条件下销试样摩擦表面照片

3 展望

综上所述,为了不断深入探索弓网电接触这一复

杂的物理现象,提高弓网受流质量,国内外学者对弓网电接触领域进行了长期、持续的试验研究,不断地发现其中的物理规律。但是,在弓网电接触研究方面仍存在问题,主要体现在以下3方面:

在试验设备的设计方面,现有的设备有很多有待改进的地方。由于设备普遍是研究学者自行搭建的,许多运行参数不是很理想,通常存在试验电压低、电流小、转速慢的问题。此外,试验设备基本采用盘销式结构,这种模拟弓网运行的方式可能与实际的弓网存在一些差异。

在弓网电接触理论研究方面,国内外学者在电气特性方面的研究还不够深入,尤其是在弓网电弧的产生和熄灭机理、影响因素、时空分布规律、传输特性及其抑制和消除方法等方面还有待于进一步开展研究。关于电弧侵蚀的定量研究不多,电弧的侵蚀机制及规律的研究至今还没有一个完善的电弧侵蚀接触线的物理模型用于计算接触线的被侵蚀程度。

受流质量是评价受电弓和接触网接触优良程度的一个指标,指的是受电弓集电头和接触网间流通负荷电流的流畅程度。现有的规程一般采用“离线率”评价弓网受流情况,但是随着列车运行速度的提升,离线率势必会上升,这种从机械上的统计是否能表达一种电气特性也值得我们探讨。

4 结语

弓网电接触过程是一个电场、磁场、热场、气流场变化的综合作用过程,其不仅取决于接触面的电流和电压、滑板 and 接触线材料,还与气候、气压等环境因素有关。为了提高电气化机车的运行速度,保障电气设备的安全,有必要对弓网电弧的物理模型、电气参数等进行定量研究,结合表面磨损机制,分析材料的摩擦磨损性能,探索弓网电接触存在的问题。对于弓网电弧产生机理、影响电弧因素、时空分布规律、载流摩擦侵蚀模型和弓网受流质量的评价等方面还有待进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 刘波. 电力机车弓网离线检查装置[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [2] 金学松, 温泽峰, 张卫华. 世界铁路发展状况及其关键力学问题[C]//第13届全国结构工程学术会议论文集(第1册). 北京: 清华大学出版社, 2004: 96-100.
- [3] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴2005[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2005.
- [4] JIS E2002—2001, Electric traction overhead lines Fittings Test methods[S].
- [5] EN50367, Railway Application—Current Collection Systems—Technical Criteria for the Interaction between Pantograph and Overhead Line[S].
- [6] Lowke J J, Ludwig H C. A Simple Model for High Current Arc Stabilized by Forced Convection[J]. J. Appl. Phys., 1975, 46: 3325-3329.
- [7] Fang M T C, Brannen D. A Current Zero Arc Model Based on Forced Convection[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1979, 7(4): 217-229.
- [8] Klapas Demetrios, Hackam Reuben. Magnetically Controlled Arcs for Power Collection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, 17(2): 174-178.
- [9] KUBO S, KATO K. Effect of Arc Discharge on the Wear Rate and Wear Mode Transition of a Copper-impregnated Metalized Carbon Contact Strip Sliding Against a Copper Disk[J]. Tribology International, 1999(32): 367-378.
- [10] Surajit Midya, Dierk Bormann, Anders Larsson, et al. Understanding Pantograph Arcing in Electrified Railways—Influence of Various Parameters[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Detroit: IEEE EMC Society, 2008: 1-6.
- [11] Shobert E I II. Sliding electrical contacts[C]//Proceedings of the 39th IEEE Holm Conference on Electric Contacts Pittsburgh. PA, USA: IEEE Components, Hybrids, and Manufacturing Technology Society, 1993: 123-134.
- [12] 吴积钦. 弓网系统电弧的产生及其影响[J]. 电气化铁道, 2008(2): 27-29.
- [13] 吴积钦, 钱清泉. 弓网系统电弧侵蚀接触线时的热分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(3): 31-34.
- [14] 何常红. 弓网电弧模拟系统的研制和试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 5-19.
- [15] 雷栋, 吴广宁, 张雪原, 王万岗, 何常红. 高速铁路弓网电弧抑制方法的研究[J]. 电气化铁道, 2008(5): 1-4.
- [16] 王俊儒, 李学山. 电力机车负载特性对弓网电弧的影响[J]. 中国水运, 2010, 10(9): 108-110.
- [17] 李占军, 孙乐民天, 张永振. 载流摩擦磨损研究现状及前景[J]. 铁道运输与经济, 2005, 27(1): 82-84.
- [18] 李鹏, 张永振, 孙乐民. 受电摩擦磨损的研究现状[J]. 河南科技大学学报, 2002, 23(4): 34-37.
- [19] Azevedo C R F, Sinatora A. Failure analysis of a railway copper contact strip[J]. Engineering Failure Analysis, 2004(11): 829-841.
- [20] Zheng R G, Zhan Z J, Wang W K. Wear behavior of $\text{Cu}_2\text{La}_2\text{O}_3$ composite with or without electrical current[J]. Wear, 2010, 268: 72-76.
- [21] 松山晋作. 受电弓的受流摩擦学[J]. 电力牵引快报, 1997(1): 52-60.
- [22] Jia S G, Liu P, Ren F Z, et al. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper—based trip for high—speed electrified railways[J]. Wear, 2007, 262: 772-777.
- [23] Marshall R A. The mechanism of current transfer in high current sliding contacts[J]. Wear, 1976, 37: 233-240.
- [24] 马行驰, 何国求, 陈成澍, 等. 现代轨道交通摩擦集电材料及相关载流摩擦磨损研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 63-65.
- [25] 董霖, 陈光雄, 朱昊, 等. 支撑刚度对载流摩擦磨损特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(4): 7-10.
- [26] 戴立民, 丁新华, 林吉忠. 铝包覆浸金属碳滑板材料受流磨损性能的试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2002(3): 22-24.
- [27] 沈向前, 孙乐民, 张永振. 载流条件下铬青铜/3D碳/碳复合材料摩擦副的摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2006(1): 72-74.
- [28] 丁涛, 陈光雄, 卜俊, 周仲荣. 载流摩擦磨损中不同放

(下转第20页)

矢量状态选择信号。

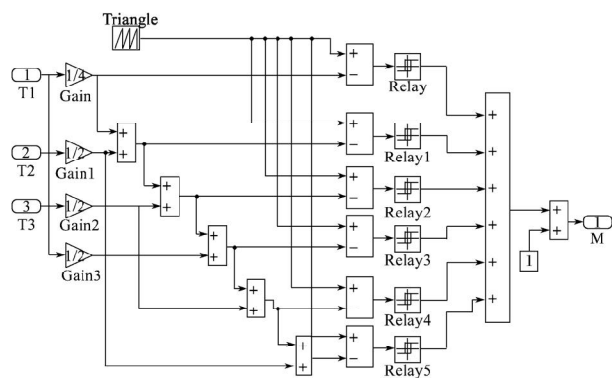


图9 矢量状态时间分配图

3 仿真结果

应用以上搭建的模块对某型动车组用三电平逆变器进行了仿真,输入为线电压2 000 V的三相正弦交流信号;开关频率为10 kHz,即 $T_s=0.000\ 1\text{ s}$ 。输出端相电压波形如图10所示,线电压波形如图11所示,扇区判断仿真波形如图12所示。

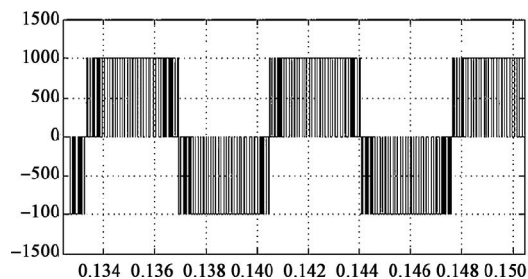


图10 三电平逆变器输出相电压波形

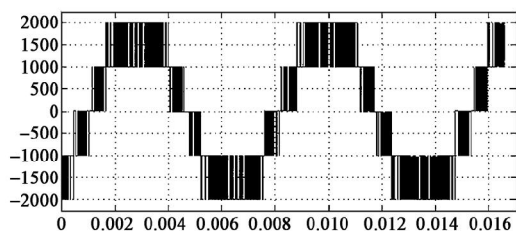


图11 三电平逆变器输出线电压波形

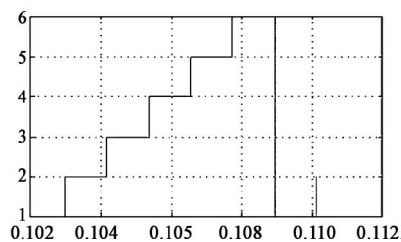


图12 扇区判断仿真波形

从图10、图11可以看出,三电平逆变器输出端相电压为3个电平,线电压为5个电平,与理论分析基本一致。从图12可以看出扇区 N 的变化规律为1-2-3-4-5-6,对应于图2的 - - - - - 扇区,说明空间电压矢量 U 正好以逆时针的方向沿着磁链圆的轨迹旋转。综合以上可知本文针对某型动车组用三电平逆变器SVPWM控制算法所搭建的模型是正确的。

4 结语

三电平逆变器相对于二电平逆变器而言,输出电压波形阶梯数增加,更加接近于正弦波。另外,计算机仿真技术能以较低的成本,在较短的时间内完成系统的前期研究,为动车组设计提供了一种较为简便的方法。

参考文献:

- [1] 李启明. 三电平SVPWM算法研究及仿真[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 17-26.
- [2] 王利军. 高速动车组再生制动工况变流器控制算法研究与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 31-38.
- [3] 杨毅. 基于空间电压矢量法_SVPWM_的三电平逆变器的研究[D]. 上海: 东华大学, 2007: 40-48.
- [4] 陶然, 苏建徽. 三电平SVPWM算法的研究[J]. 测试技术, 2008(1): 23-25.
- [5] 侯春, 何凤友. 基于Matlab_Simulink的三电平SVPWM的仿真设计[J]. 冶金自动化, 2007(s2): 229-231.
- [6] 宋飞, 林烨. 基于SVPWM的三电平逆变器仿真研究[J]. 船电技术, 2005(2): 42-44.
- [7] 肖庆恩, 何礼高. 三电平逆变器SVPWM控制的一种简化算法及实现[M]. 电气传动自动化, 2004, 26(5): 21-24.

(上接第9页)

- 电现象的机理研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 83-87.
- [29] 郭凤仪, 侯刚, 等. 基于电气化铁路的高性能滑动磨损实验机研制[C]. // 第十八届煤矿自动化与信息化学术会议论文集. 北京: 中国矿业大学出版社, 2008: 204-210.

- [30] 胡道春, 孙乐平, 上官宝, 张永振. 电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 36-42.
- [31] 王中辉, 蒋力培, 起铂金, 焦向东. 发展中的电弧等离子体温度场诊断技术[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(5): 654-657.