

研
究
开
发交流传动电力机车牵引和制动
工况下谐波特性对比分析赵纯民¹, 张建柏²

(1. 株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001;

2. 兰州铁路局 机务处, 甘肃 兰州 730050)



作者简介：赵纯民（1983-），男，硕士，工程师，主要研究方向为机车变流控制。

摘要：通过对交流传动电力机车的四象限变流器工作方式介绍，分析机车牵引工况和制动工况下输入电流的谐波分布，最后通过仿真及试验验证2种工况下输入电流的谐波分布情况一致。

关键词：交流传动；变流器；四象限控制；谐波分析

中图分类号：U264.2+.23

文献标识码：A

文章编号：1000-128X(2012)03-0015-02

Harmonic Comparison and Analysis on Traction and Brake Condition of AC Drive Electric Locomotive

ZHAO Chun-ming¹, ZHANG Jian-bai²

(1. Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Locomotive Department, Lanzhou Railways Bureau, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Four-quadrant converter system of AC drive electric locomotive was stated, and input current harmonic distribution under traction and brake condition was analyzed, which was proved consistent by simulation and experimental results.

Key words: AC drive; converter; four-quadrant control; harmonic analysis

0 引言

随着交流传动技术的不断发展和完善，交流传动电力机车在我国主要干线大量投入运行，交流机车谐波干扰的问题受到越来越多的关注。本文从理论上对交流传动电力机车四象限变流器工作方式进行分析，阐述机车牵引和制动时对工网的谐波干扰，分析2种工况下网侧电流的谐波特性。

1 交流传动机车 PWM 变流器的原理概述

1.1 控制原理

图1为机车四象限变流器的工作原理图。已知输入电压 u_s 、调制电压 u_N 、交流侧电感 L ，若忽略电路电阻压降，则交流电路的电压平衡方程式为

$$u_s - u_N = L \frac{di_s}{dt} \quad (1)$$

矢量表示则为

$$\vec{U}_s = \vec{U}_N + j\omega_s L \vec{I}_s \quad (2)$$

由式(2)可知，在给定输入电压 $\vec{U}_s$ 及电感 L 的情况下，只要控制 $\vec{U}_N$ 的幅值和相位，也就控制了电流 $\vec{I}_s$ 的幅值和相位。

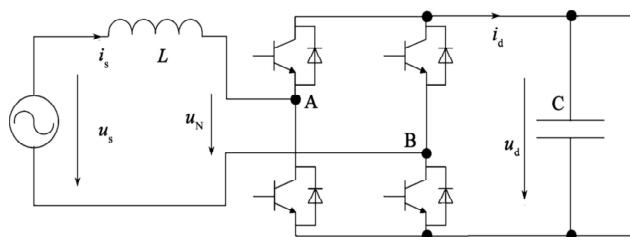


图1 四象限变流器工作原理图

1.2 电路运行状态

交流侧电量的矢量关系如图2所示， $\vec{U}_s$ 为输入电压， $\vec{I}_s$ 为输入电流， $\vec{U}_L$ 为电感电压， $\vec{U}_N$ 为调制信号。令 $u_s = U_{sm} \sin \omega t$ ， $i_s = I_{sm} \sin \omega t$ ，图中 u_N 为正弦调制信号，当 i_s 和 u_s 同相时， u_N 将滞后于 u_s 一个角度 ϕ ，变流器向负载输送电能，即机车处于牵引状态；当 i_s 和 u_s 反相时， u_N 将超前于 u_s 一个角度 ϕ ，电能从负载端反馈回电网，即机车处于制动状态。

收稿日期：2011-11-14

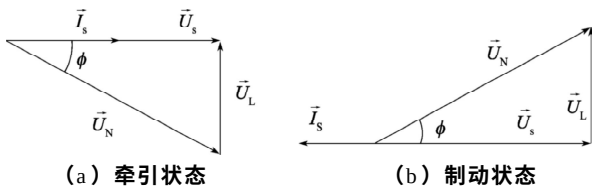


图2 网侧电量矢量关系图

2 变流器谐波分析

2.1 PWM 调制波谐波分析

通过利用2个双极性PWM波的谐波表达式间接求取单极性调制PWM波的谐波表达式,单极性调制PWM波 u_{AB} 的谐波表达式为^[1]

$$u_{AB} = MU_d \sin(\omega_s t - \phi) + \frac{2U_d}{\delta} \sum_{m'=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n(m'M\delta)}{m'} \times \sin[(m'(2N)+n)\omega_s t - n\phi] \cos(m'\delta) \quad (3)$$

式中: $M=U_{ABm}/U_c$; $N=\omega_c/\omega_s$; $m=2m'$, m' 为相对于载波的谐波次数; n 为相对于调制波的谐波次数。

2.2 输入电流的谐波分析

变流器输入电流的谐波情况取决于输入电压 u_s 及变流器中间电压 u_{AB} 。设变流器的输入电压 u_s 表达式为

$$u_s = U_{sm} \sin(\omega_s t) = \sqrt{2}U_s \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

再由式(1),得到 i_s 的表达式为

$$i_s = \frac{MU_d \sin \phi}{\omega_s L} \sin(\omega_s t) + \frac{2U_d}{\delta \omega_s L} \sum_{m'=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n(m'M\delta)}{m'} \frac{\cos(m'\delta)}{2m'N+n} \times \sin[(m'(2N)+n)\omega_s t - n\phi + \frac{\delta}{2}] \quad (5)$$

由式(5)可知变流器输入电流的谐波分布情况和PWM波电压 u_{AB} 的谐波分布情况完全一致,只是其幅值将随着谐波次数的增加而更迅速地减少。

2.3 机车制动时输入电流的谐波分析

当机车处于制动工况时,由上述分析可知:

$$u_m = U_{sm} \sin(\omega_s t + \phi) \quad (6)$$

则对应的中间电压 u_{AB} 和输入电流 i_s 的表达式为

$$u_{AB} = MU_d \sin(\omega_s t + \phi) + \frac{2U_d}{\delta} \sum_{m'=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n(m'M\delta)}{m'} \times \sin[(m'(2N)+n)\omega_s t + n\phi] \cos(m'\delta) \quad (7)$$

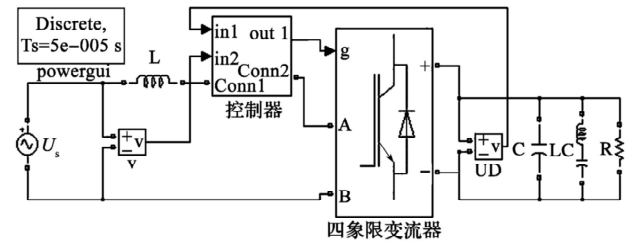
$$i_s = -\frac{MU_d \sin \phi}{\omega_s L} \sin(\omega_s t) + \frac{2U_d}{\delta \omega_s L} \sum_{m'=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n(m'M\delta)}{m'} \frac{\cos(m'\delta)}{2m'N+n} \times \sin[(m'(2N)+n)\omega_s t + n\phi + \frac{\delta}{2}] \quad (8)$$

对比式(5)和式(8)可知,在机车牵引状态和制动状态下,输入电流的谐波分布情况并无差异。

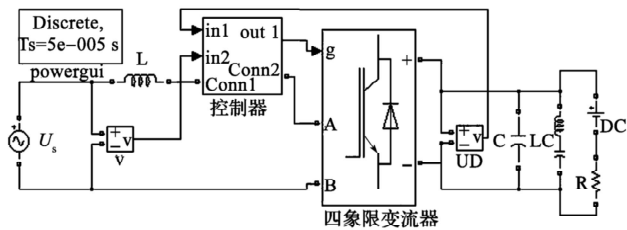
3 仿真分析对比

针对上述分析结果利用MATLAB Simulink进行计算机仿真。

仿真的主电路与图1相同,牵引和制动时的仿真模型分别如图3所示。



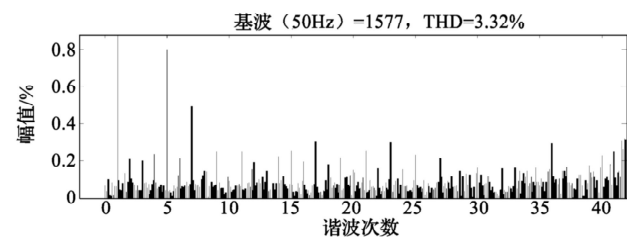
(a) 牵引时仿真模型



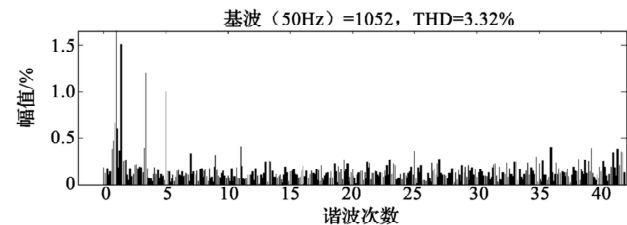
(b) 制动时仿真模型

图3 变流器仿真电路图

设定输入电压为AC 970 V, 50 Hz, 输入电感0.8 mH, 开关频率450 Hz, 直流输出为DC 1 800 V, 仿真结果如图4所示。



(a) 牵引工况下的数据



(b) 制动工况下的数据

图4 牵引制动时输入电流谐波仿真结果

由图中数据可知牵引或制动时,其谐波含量差异极小,与前面的分析结果相同。

为了进一步验证分析结果,采用某交流传动电力机车主变流器进行试验验证,验证结果也与分析及仿真的结果一致。图5为部分试验波形。

(下转第29页)

随着开槽的宽度逐渐增大, 夹角逐渐靠近结构胶, 因为结构胶的一面被固定, 所以当夹角处于结构胶附近时, 应力会明显上升。当宽度到达70 mm时, 应力达到最大124 MPa。图9(b)为此开槽夹角处的等效应力分布情况。由此可知, 结构胶对玻璃的应力分布影响较大, 设计中需要注意尽量使结构胶远离矩形开槽的夹角位置, 以免引起较大的应力, 致使钢化玻璃破坏。

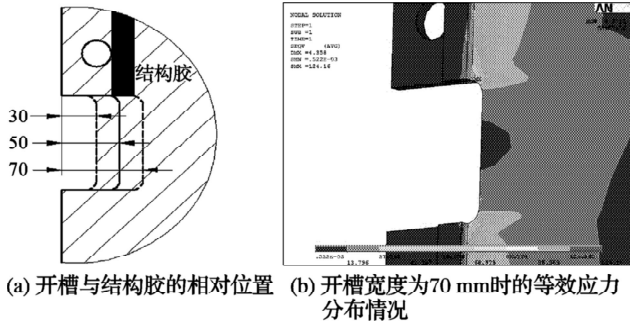


图9 不同开槽宽度时矩形开槽和结构胶的相对位置

3 结语

本文利用APDL语言程序建立了屏蔽门钢化玻璃的参数化有限元分析模型, 考虑了各种载荷形式, 对钢化玻璃结构特性进行了分析, 并针对钢化玻璃的相关参数进行优化分析, 得到了以下结论:

①钢化玻璃的最大应力与各载荷之间为线性关系, 说明钢化玻璃在其工况载荷下的承载特性处于弹性范围内。

②钢化玻璃的应力随玻璃厚度的变化比较明显。薄的钢化玻璃的承载能力较差, 但是当玻璃的厚度达到一定程度后, 玻璃的承载能力提高很小。在选择或者设计玻璃时应注意: 玻璃的厚度不能太薄, 以有效地降低应力, 且也不需要太厚, 以防止超重等, 避免不必要的材料消耗。在该工况条件下, 玻璃的最佳厚度应在8~10 mm。

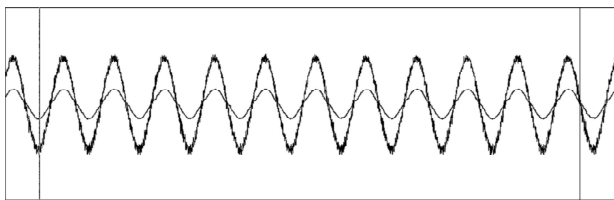
③适当的矩形开槽圆角可以解决钢化玻璃的应力集中问题。半径较小的圆角对解决应力集中的帮助较小, 圆角半径增大到一定程度时, 应力集中得到消除。设计中要采用适当半径的圆角, 既要有效地减小应力, 又不影响其外观。该工况下7~10 mm为最佳圆角半径范围。

④起固定作用的结构胶对钢化玻璃的应力影响较大, 设计中应尽量避免结构胶靠近矩形开槽的夹角位置, 以免引起较大的应力, 导致钢化玻璃破坏。

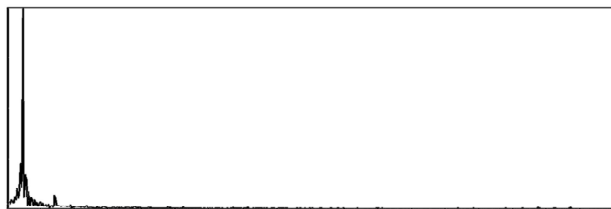
参考文献:

- [1] 陈韶章. 地下铁道站台屏蔽门系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 36-39.
- [2] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 1-2.
- [3] 夏国华, 朱锦杰, 童树庭. 平板玻璃钢化有限元数值分析 [J]. 玻璃与搪瓷, 2008, 36(5): 2-10.

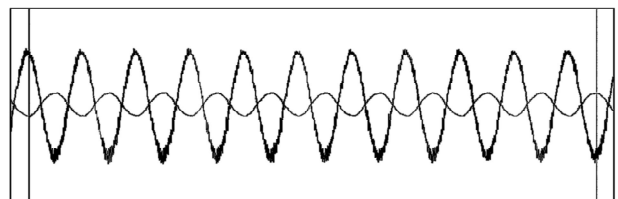
(上接第16页)



(a) 牵引时输入电压 u_s 和输入电流 i_s 波形



(b) 牵引时输入电流 i_s 的谐波分析



(d) 制动时输入电流 i_s 的谐波分析

图5 牵引制动时变流器数据图

4 结语

①单相四象限变流器输入电流 i_s 的谐波分布情况和PWM波电压 u_{AB} 的谐波分布情况完全一致, 只是其幅值将随着谐波次数的增加而更迅速地减少。

②变流器在牵引和制动工况下, 输入电流 i_s 的谐波

分布情况并无差异。

参考文献:

- [1] 张志学. 单相电压源PWM变流器的谐波分析 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006(5).
- [2] 刘凤君. 正弦波逆变器 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.