

基于 Adaline 算法的高速磁浮列车谐波检测及抑制方法

毛中亚 王 勇 李凌霄 王宗艳

(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 为了减小高速磁浮谐波对牵引网产生的影响, 保障高速磁浮列车的正常运行, 需研究高速磁浮牵引供电系统中的谐波特性及其相应的谐波抑制方法。[方法] 分析了高速磁浮牵引供电系统的构成, 并对双三相半控 12 脉冲多重整流电路及其谐波进行了理论分析和仿真。根据 Adaline 神经网络算法原理和高速磁浮谐波特性, 构建基于 Adaline 的高速磁浮谐波检测模型。采用谐波补偿控制策略, 产生与检测出的谐波方向相反、大小相等的电流作为补偿信号, 对系统畸变电流进行谐波抑制。[结果及结论] 仿真结果表明: 采用基于 Adaline 算法的谐波检测及抑制方法前, 谐波畸变率为 11.16%, 而采用该方法后, 各次谐波含量明显降低, 谐波畸变率下降为 1.41%。研究结果表明: 所提谐波检测及抑制方法可以有效减少谐波畸变, 提高牵引供电系统的稳定性和工作效率。

关键词 高速磁浮; 谐波检测及抑制; Adaline 算法

中图分类号 U266.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.02.004

Harmonic Detection and Suppression Method for High-speed Maglev Trains Based on Adaline Algorithm

MAO Zhongya, WANG Yong, LI Lingxiao, WANG Zongyan

(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to reduce the impact of high-speed maglev harmonics on traction network, and to ensure the normal operation of high-speed maglev trains, it is necessary to study the harmonic characteristics of the high-speed maglev traction power supply system, and the corresponding harmonic suppression methods. [Method] The composition of the high-speed maglev traction power supply system is studied, the dual three-phase half-controlled 12-pulse multiple rectifier circuit and its harmonics are theoretically analyzed and simulated. Based on the principle of the Adaline neural network algorithm and the harmonic characteristics of high-speed maglev trains, a high-speed maglev harmonic detection model based on Adaline

is constructed. A harmonic compensation control strategy is used to generate compensating signal of current with equal magnitude but opposite direction to the detected harmonics, for harmonic suppression of the system distorted currents. [Result & Conclusion] Simulation results indicate that before adopting the harmonic detection and suppression method based on Adaline algorithm, the harmonic distortion rate is 11.16%. After applying this method, the content of each harmonic decreases significantly, and the harmonic distortion rate decreases to 1.41%. The research results demonstrate that the proposed harmonic detection and suppression method can effectively reduce harmonic distortion, thereby improving the stability and operational efficiency of the traction power supply system.

Key words high-speed maglev; harmonic detection and suppression; Adaline algorithm

近年来,我国高速磁浮技术获得了快速发展,尤其是运行速度为 600 km/h 的高速磁浮列车的示范运营,标志着其技术水平已进入到世界领先水平。高速磁浮列车牵引供电系统采用直流电流供给同步直线电机和各种车载设备用电,直流电流主要通过多重整流器整流交流电流后获得。在这个过程中,多重整流器的开关动作会产生较多高次谐波,进而导致电流畸变^[1-2],而这些畸变电流会降低高速磁浮列车系统的安全性和可靠性,同时也会造成电网电能质量的下降。

目前,神经网络因其简单性、学习能力和强泛化能力受到了研究者们的关注,已被应用于谐波检测领域。神经网络具有自适应能力和学习能力,通过训练可以自行处理数据,自动发现研究对象的规律和特点。应用神经网络的目的是利用特定的函数和网络结构来训练神经网络的权值和参数,使目标输出及均方误差最小。利用神经网络对高速磁浮谐波进行有效检测,并采取适当的控制策略产生相应的补偿电流对谐波进行抑制,减少电网电流的畸变。

本文针对高速磁浮列车牵引供电系统中存在的谐波问题,通过构建基于 Adaline 神经网络算法的高速磁浮谐波检测模型,采用谐波补偿控制策略,进行了谐波检测及抑制的仿真研究。研究结果表明,所提谐波检测及抑制方法可以有效减少系统中的谐波畸变率,改善电流波形品质,提高电能质量。本文研究可为高速磁浮列车的安全稳定运行提供一种有效的谐波抑制策略,具有一定的工程应用价值。

1 高速磁浮列车牵引供电系统谐波分析

1.1 牵引供电系统

以上海磁浮列车示范运营线的牵引供电系统为例进行分析,其主要由四部分组成:①同步直线电机,即电动能转换装置;②逆变器,其是采用 PWM(脉冲宽度调制)控制的 GTO(门控晶闸管)逆变器;③直流联结电路;④整流器,其是采用双三相半控 12 脉冲的多重整流装置^[3,4]。牵引供电系统产生可变电电压和可变频率信号,为同步直线电机提供动力,进而驱动列车运行。高速磁浮列车牵引供电系统框图如图 1 所示。

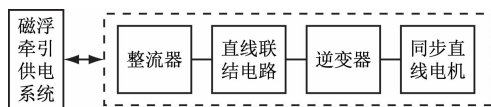


图 1 高速磁浮列车牵引供电系统框图

Fig. 1 Block diagram of high-speed maglev train traction power supply system

牵引供电系统产生谐波电流的原因有:①在整流器切换过程中,有谐波电流注入供电系统;②逆变器作用。由于大部分逆变器谐波在进入电源侧前已被直流母线电路滤除,逆变器产生的谐波相对较弱,其影响可以忽略不计。因此,本文所提谐波抑制方法主要针对多重整流器运行时产生的谐波。

1.2 多重整流电路

在上海磁浮列车示范运营线的牵引供电系统中,采用的是等效 24 脉冲多重整流装置,即用两个双三相半控 12 脉冲多重整流电路并联连接组成。在三相半控 12 脉冲多重整流电路中,整流变压器的一、二次侧绕组分别以 Yy0 和 Yd11 型联结,其匝数

比分别为 1:1 和 1:√3,两组二次侧变压器经过移相后可以使得输入电压成 30° 相位差,其电压幅值大小相等,分别与三相半控 6 脉冲多重整流电路耦合。当每个整流桥的相位控制角相同时,直流侧输出电压每周脉动 12 次,构成 12 脉冲输出的多重整流电路。当这样的两个结构并联在一起时,就构成了双三相半控 12 脉冲多重整流电路,等效高速磁浮牵引系统的 24 脉冲多重整流系统。由于高速磁浮的多重整流系统主要是由两个三相半控 12 脉冲多重整流电路并联构成的,所以其谐波的主要特性与三相半控 12 脉冲多重整流电路的谐波特性相似。

网侧整流变压器一次侧输入端电流 I_a 可以表示为:

$$I_a = \frac{4\sqrt{3}I_d}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (-1)^k \sin \omega t \right] \quad (1)$$

式中:

I_d ——整流器输出电流;

n ——谐波次数, $n = 12k \pm 1$;

k ——正整数;

t ——时间;

ω ——市电网角频率。

由式(1)可知,双三相半控 12 脉冲多重整流电路的 I_a 主要有 $12k \pm 1$ 次谐波,即高速磁浮畸变电流中的主要谐波为 11、13、23、25、35、37 次等高次谐波。

2 基于 Adaline 算法的高速磁浮谐波检测

根据前文的谐波分析,对式(1)进行改写:

$$I_a = w_1 \sin \omega t + w_2 \sin 11\omega t + w_3 \sin 13\omega t + w_4 \sin 23\omega t + w_5 \sin 25\omega t + w_6 \sin 35\omega t + w_7 \sin 37\omega t + w_8 \cos \omega t + w_9 \cos 11\omega t + w_{10} \cos 13\omega t + w_{11} \cos 23\omega t + w_{12} \cos 25\omega t + w_{13} \cos 35\omega t + w_{14} \cos 37\omega t \quad (2)$$

式中:

w_1, w_2, \dots, w_{14} ——基波和各次谐波的权值。

定义矩阵 W 、 S 、 C 分别为基波和各高次谐波的权值矩阵、正弦谐波矩阵和余弦谐波矩阵,则式(2)中的函数关系可以表示为:

$$W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{13} \ w_{14}] \quad (3)$$

$$S = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5 \ s_6 \ s_7]^T = [\sin \omega t \ \sin 11\omega t \ \sin 13\omega t \ \sin 23\omega t \ \sin 25\omega t \ \sin 35\omega t \ \sin 37\omega t]^T \quad (4)$$

$$C = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5 \ c_6 \ c_7]^T = [\cos \omega t \ \cos 11\omega t \ \cos 13\omega t \ \cos 23\omega t \ \cos 25\omega t \ \cos 35\omega t \ \cos 37\omega t]^T \quad (5)$$

$$I_a = W \begin{bmatrix} S \\ C \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^7 w_i s_i + \sum_{j=1}^7 w_{j+7} c_j \quad (6)$$

式中:

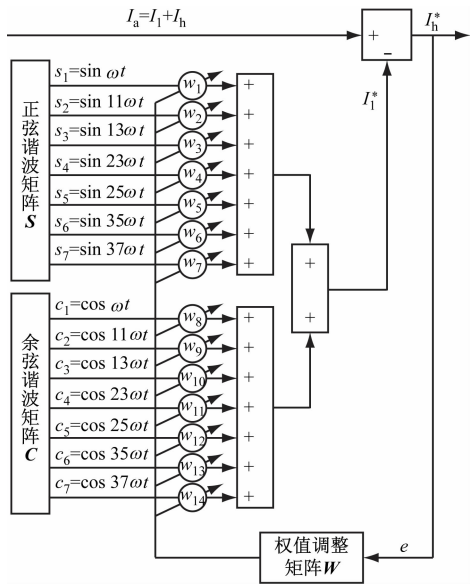
s_i ——基波($i=1$)和高次谐波($i \neq 1$)的正弦波分量;

w_i ——基波($i=1$)和高次谐波($i \neq 1$)正弦波分量的权值;

w_j ——基波($j=1$)和高次谐波($j \neq 1$)余弦波分量的权值;

c_j ——基波($j=1$)和高次谐波($j \neq 1$)的余弦波分量。

由式(3)一式(6)可以构造 Adaline 神经网络谐波检测模型,其示意图如图 2 所示。



注: I_1 为畸变电流的基波成分; I_h 为畸变电流中的高次谐波成分; I_1^* 为神经网络检测出来的畸变电流中的基波成分; I_h^* 为神经网络检测出来的畸变电流中的高次谐波成分; e 为误差函数。

图 2 Adaline 神经网络谐波检测模型示意图

Fig. 2 Diagram of Adaline neural network harmonic detection model

Adaline 神经网络使用梯度下降法来更新权值,使得代价函数 J 最小化^[5-6]。根据梯度下降法的更新规则^[7],可以通过式(7)来更新权值:

$$w_{t+1} = w_t - \eta \partial J / \partial w_t \quad (7)$$

式中:

w_t —— t 时刻各次谐波的权值;

η ——学习速率,且 $0 < \eta < 1$ 。

根据图 2 所示的 Adaline 神经网络谐波检测模

型,除去基波后,畸变电流中的高次谐波成分为:

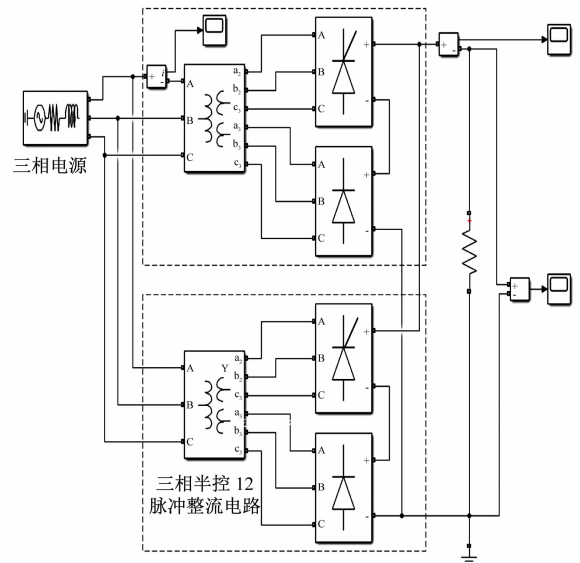
$$I_h^* = \sum_{i=2}^7 w_i s_i + \sum_{j=2}^7 w_{j+7} c_j \quad (8)$$

利用基于 Adaline 算法的谐波检测模块检测出高次谐波分量,然后在谐波补偿控制模块采用一定的补偿控制策略对谐波进行抑制。所采用的补偿控制策略是根据检测出的谐波情况,将其转化为与其方向相反、大小相等的电流,并作为补偿信号馈入牵引供电网。这种基于 Adaline 算法的谐波检测及抑制方法,可以抵消牵引供电系统中的高次谐波信号,有效抑制牵引供电系统中的谐波信号,达到对牵引供电系统电流信号进行谐波抑制的目的。

3 基于 Adaline 算法的谐波检测及抑制仿真

3.1 多重整流电路仿真

把两个半控 12 脉冲多重整流电路并联连接,再接入三相电压,并在直流输出处接上阻感负载,即可模拟高速磁浮系统的 24 脉冲多重整流电路模块。根据高速磁浮牵引系统多重整流电路原理,在 MATLAB/Simulink 软件中对 24 脉冲多重整流电路进行仿真。高速磁浮多重整流电路仿真图如图 3 所示。仿真后得到的输出端电压、输入端三相电流及谐波 FFT(快速傅里叶变换)仿真波形如图 4 所示。



注:A、B、C 为输入电流端; a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 为输出电流端。

图 3 高速磁浮多重整流电路仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of high-speed maglev multiple rectifier circuit

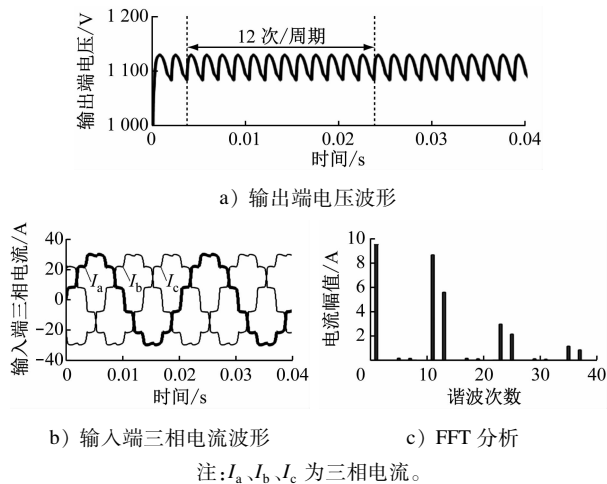


图4 高速磁浮多重整流电路谐波仿真波形

Fig. 4 Harmonic simulation waveform of high-speed maglev multiple rectifier circuit

输出端电压波形一周脉动次数为12次,这是由于该模型采用的是双三相12脉冲整流电路并联连接,其特性与12脉冲多重整流电路的特性相似。对输入端三相电流波形进行FFT分析,可以获得双三相12脉冲多重整流电路谐波成分及谐波畸变率。畸变电流中的主要谐波次数为11、13、23、25、35、37次,这些高次谐波幅值在基波幅值中的占比分别为8.727%、5.633%、2.987%、2.161%、1.161%、0.858%,谐波畸变率为11.16%。

3.2 谐波检测与抑制仿真

为验证所提基于Adaline算法的高速磁浮谐波检测及抑制方法的准确性,基于高速磁浮牵引供电系统多重整流电路原理和Adaline神经网络谐波检测原理,在MATLAB/Simulink软件中建立了检测及抑制谐波的仿真模型,其软件截图如图5所示。其中:高速磁浮模块主要用于产生谐波并馈入到牵引网中;Adaline谐波检测模块是基于Adaline神经

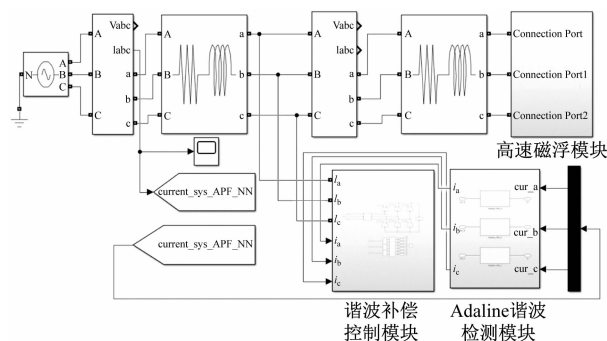


图5 谐波检测与抑制仿真图软件截图

Fig. 5 Screenshot of harmonic detection and suppression simulation diagram software

网络原理和Adaline神经网络谐波检测模型搭建的,主要用于检测牵引供电系统的谐波;谐波补偿控制模块主要根据Adaline谐波检测模块检测出的谐波情况,采取相应的谐波补偿控制策略并产生补偿信号,以实现牵引供电系统中谐波的抑制。

基于Adaline算法的高速磁浮谐波检测及抑制方法,首先经过Adaline谐波检测模块检测谐波,然后根据谐波情况,由谐波补偿控制模块产生补偿电流,对牵引供电系统进行谐波抑制。采用高速磁浮谐波检测和抑制方法后的谐波仿真波形如图6所示。由图6可知,该电路中的11、13、23、25、35、37次的谐波幅值在基波幅值中的占比分别为0.370%、0.287%、0.201%、0.168%、0.127%、0.076%,谐波畸变率为1.41%。

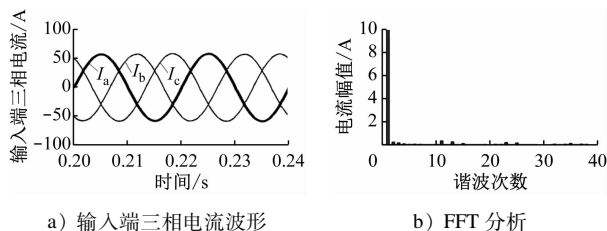


图6 采用高速磁浮谐波检测和抑制方法后的谐波仿真波形
Fig. 6 Harmonic simulation waveform after adopting high-speed maglev harmonic detection and suppression method

综上所述,采用高速磁浮谐波检测及抑制方法可以明显改善牵引供电系统中的网侧电流波形,减少各次谐波含量,降低谐波畸变率。此外,采用高速磁浮谐波检测及抑制方法后,网侧电流的各次谐波含量均有较大幅度的降低,谐波畸变率从11.16%降至1.41%。由此可知,所提方法可以有效减少谐波畸变,提高牵引供电系统的稳定性和工作效率。

4 结语

对双三相半控12脉冲多重整流电路及其谐波进行了理论和仿真分析,高速磁浮畸变电流中的主要谐波为11、13、23、25、35、37次等 $12k \pm 1$ 次谐波,其谐波含量较高且畸变率严重。为补偿上述谐波带来的影响,采用基于Adaline算法的谐波检测及抑制方法。利用Adaline算法检测出畸变电流中的高次谐波分量,然后根据检测结果产生与高次谐波方向相反、大小相等的电流,并将其作为补偿信号馈入牵引供电网,对其进行谐波抑制。仿真结果表

明,所提方法可以大大降低系统谐波畸变率,在谐波抑制方面取得了较好的效果。本文研究仅论证了离线的 MATLAB 软件仿真方法的理论效果,建议后续研究进一步开展试验验证。

参考文献

- [1] 毛中亚,郭其一. 基于小波变换的高速磁悬浮列车牵引供电系统谐波分析[J]. 交通与计算机, 2006, 24(5): 61.
MAO Zhongya, GUO Qiyi. Wavelet transform-based harmonic analysis of traction power system of high-speed maglev[J]. Computer and Communications, 2006, 24(5): 61.
- [2] 郭其一,李春. 高速磁悬浮列车用混合滤波器设计的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1312.
GUO Qiyi, LI Chun. Study on simulation of design of hybrid filter used in high speed maglev system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5): 1312.
- [3] 吕千云,程浩忠,何维国,等. 高速磁悬浮列车系统的谐波分析[J]. 华东电力, 2004, 32(8): 22.
LYU Qianyun, CHENG Haozhong, HE Weiguo, et al. Harmonic analysis of high speed maglev system[J]. East China Electric Power, 2004, 32(8): 22.
- [4] 朱进权,葛琼璇,孙鹏琨,等. 基于自抗扰的高速磁悬浮列车牵引控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1065.
ZHU Jinqun, GE Qiongxuan, SUN Pengkun, et al. Traction-system research of high-speed maglev based on active disturbance re-

jection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1065.

- [5] 高泽宇,张兴,洪剑峰. 基于 ADALINE 算法的三相并网逆变器模型预测控制[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 125.
GAO Zeyu, ZHANG Xing, HONG Jianfeng. Model predictive control of three-phase grid-connected inverter based on ADALINE algorithm[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 125.
- [6] DEHINI R, BASSOU A, FERDI B. The harmonics detection method based on neural network applied to harmonics compensation[J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(5): 258.
- [7] 杨桢,孟亨,仝泽仁,等. 基于改进动量因子 Adaline 算法的 SAPF 谐波检测方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9): 135.
YANG Zhen, MENG Heng, TONG Zeren, et al. SAPF harmonic detection method based on improved factor of momentum Adaline algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(9): 135.

· 收稿日期:2021-07-23 修回日期:2021-09-17 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-23 Revised:2021-09-17 Published:2024-02-10
· 通信作者:毛中亚,副教授,maozhongya@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 6 页)

- [2] 姚世峰,张涛,谢湘,等. 2021 年度城市轨道交通企业数字化转型发展调研报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2022.
YAO Shifeng, ZHANG Tao, XIE Xiang, et al. 2021 annual research report on the digital transformation and development of urban rail transit enterprises[R]. Beijing: China Association of Metros, 2022.
- [3] 北京市基础设施投资有限公司. 京投公司“十四五”信息化与数字化转型的探索与实践[R]. 北京:北京市基础设施投资有限公司,2023.
Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd. Exploration and practice of informationization and digital transformation of Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd. in the 14th Five-Year Plan[R]. Beijing: Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd., 2023.
- [4] 陈倩慈. 广州地铁集团数字化转型探索与思考[J]. 城市轨道交通, 2023(4): 50.
CHEN Qianci. Exploration and reflection on the digital transformation of Guangzhou Metro Group[J]. China Metros, 2023

(4): 50.

- [5] 施仲衡,丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 城市轨道交通, 2022(9): 14.
SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. China Metros, 2022(9): 14.
- [6] 郑兰英,金涛,杨旭,等. 新基建时代,如何推动城轨行业数字化转型?[J]. 轨道交通, 2021(1): 28.
ZHENG Lanying, JIN Tao, YANG Xu, et al. How to promote the digital transformation of urban rail industry in the era of new infrastructure? [J]. Rail Transit, 2021(1): 28.
- 收稿日期:2023-10-26 修回日期:2023-11-28 出版日期:2024-02-10
Received:2023-10-26 Revised:2023-11-28 Published:2024-02-10
· 通信作者:余才高,正高级工程师,404136215@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn