

一种改进型的高铁牵引网谐波检测算法

毛远斌¹
MAO Yuanbin

摘要

为精准模拟高铁牵引网实际谐波特性,文章基于 MATLAB/SIMULINK 平台,采用模块化设计方法构建高铁牵引网谐波模型。在此模型基础上,对 IHDA(改进谐波检测算法)与 IRPT(瞬时无功功率理论)两种谐波检测算法的特性展开对比分析。研究结果表明,相较于 IRPT 算法,IHDA 算法具备更快的响应速度与更高的检测精度,但存在低次谐波残留问题,难以完全满足高铁牵引系统对谐波检测的严格要求。为解决这一关键问题,进一步提出了一种适用于高铁谐波检测场景的改进型算法(AHD)。通过仿真实验验证,AHD 算法可以有效弥补 IHDA 算法的不足,进一步提高高铁牵引网谐波检测的精度,为高铁牵引系统的稳定运行提供更可靠的技术支撑。

关键词

高铁;牵引网;谐波;提取器

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.09.016

0 引言

随着现代科学技术的日新月异,新的技术驱动了现代交通运输业的迅速发展。尤其在轨道交通领域,无论是普速列车还是高速动车组都为人们提供了便捷、高效、舒适的出行体验。而高速动车在现代交通运输体系中扮演着极其重要的角色,同时也为国民经济的发展做出了重要贡献。新一代高速动车组凭借其智能化、绿色化以及舒适化的技术优势,再次改变了人们的出行方式,不仅实现了时空距离的显著缩短,更成为推动区域经济深度融合的重要纽带。而牵引供电系统作为高铁运行的“心脏”,其可靠性、稳定性直接决定着轨道交通的能效极限与安全边界,同时也为交流传动列车提供优质电能。高铁采用交-直-交传动系统,首先将 27.5 kV 的单相交流电整流成直流电,然后再将直流电逆变成对称三相交流电,为牵引电机提供优质电能。由于交-直-交传动系统存在大量的非线性元件,在实际运行过程中,总会给供电系统产生谐波^[1]。注入供电系统的谐波电流穿越牵引网,可能引发系统电压畸变,影响其他电力机车安全运行,甚至还会造成通信干扰等一系列问题,严重威胁到高速列车正常运行^[2]。因此,高速铁路牵引网谐波抑制技术一直备受铁路部门和相关学者高度重视。

1 高铁牵引网谐波特性及模型

高速铁路运行的电力机车采用交-直-交传动方式,此传动模式在电能转换、控制环节展现出优良特性。其变流器

输入端配置了 PWM(脉冲宽度调制)四象限整流电路,该电路凭借先进的控制策略与高效转换能力,能有效抑制低次谐波的产生,使得注入系统的低次谐波含量相较于直流传动的电力机车大幅减少。但非线性电力电子器件会增加牵引网高频谐波含量,对电力机车的运行产生了严重的影响。

根据实测,动车组典型谐波频谱较宽,除了低奇次(如频率 150、250、550 Hz)谐波外,高次谐波也大量存在^[3]。高铁型号较多,且在不同的牵引工况下其频谱分布略有差异,但频谱分布以频率为 100、150、250、1 150、1 250、1 750 Hz 附近为主^[4]。根据高速铁路运行的电力机车运行工况以及牵引网谐波特性,在 MATLAB/Simulink₇ 中搭建牵引网谐波特性模型,通过仿真,其牵引网谐波特性的波形图及其傅里叶分析图如图 1 所示。

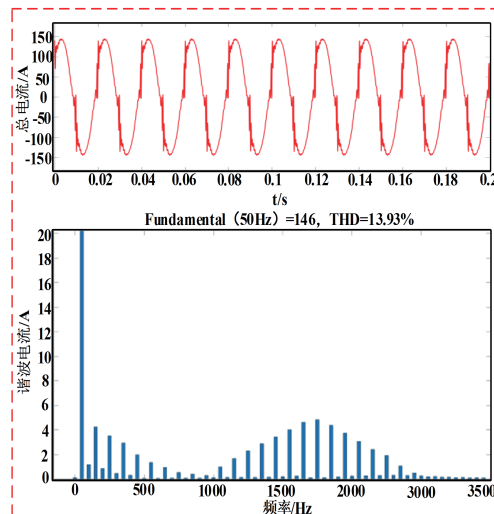


图1 高铁牵引网谐波特性傅里叶分析图

1. 湖南铁路科技职业技术学院 湖南株洲 412000

[基金项目] 2023 年度湖南省教育厅科学研究项目(23C0820)

在图1中,波形展示了高速牵引网电流在MATLAB/Simulink₇环境下的仿真结果,图中直观地呈现出显著的波形畸变现象,这主要由电力机车大量的非线性电子器件的应用所致,反映了实际运行中复杂的电磁环境。与之对应的图1下图柱状图则呈现了该波形的傅里叶频谱分析结果,清晰揭示了高次谐波主要部分在1750 Hz频段附近,经计算该频点的总谐波失真度THD=13.93%。

2 适用于高铁牵引网谐波检测算法

当前,谐波治理的方法大致可分为3类。一是采用成本低廉的无源滤波器(passive power filter, PPF),但滤波效果一般,滤波器容易与系统发生谐振;二是成本更高的有源滤波器(active power filter, APF),但滤波效果更好;三是混合式滤波器(hybrid filter, HF),其兼顾了PPF和APF的优势,滤波效果和经济性较好。有源滤波器要实现高效、可靠的滤波性能,离不开精准、快速的谐波电流检测技术。常用的检测算法有基于瞬时无功功率理论算法,但存在相位延迟缺点;小波变换算法计算量大,存在对函数选取有一定要求等缺陷。希尔伯特-黄变换算法可用于谐波与间谐波检测,文献[5]采用自适应波形延拓的改进型希尔伯特-黄变换谐波检测技术,验证表明该算法精度高,符合电力系统谐波和间谐波分析的要求,但该算法存在计算难度高、噪声敏感等缺陷。而正序基波提取器算法在提取谐波时,能较好地兼顾精度和响应速度,特别适用于牵引网这类负载变化较大的系统,其提取原理简单概括为:

当输入信号 $i(t)=A\sin(\omega t+\varphi)$ 存在 $\Delta\omega$ 时,其幅值积分可变为:

$$y(t) = A \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \frac{\sin \frac{\Delta\omega}{2} t}{\frac{\Delta\omega}{2}} \quad (1)$$

当 $\Delta\omega$ 相对较大时,根据拉斯变换可得:

$$Y(s) \approx \frac{s}{s^2 + \omega^2} \cdot I_1(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cdot R_1(s) = 0 \quad (2)$$

由(2)式可知,其可以提取基波,且具有选频特性。考虑到 $\Delta\omega$ 的大小会影响到所提取基波总谐波畸变率(THD),即在有低次谐波的系统中比例系数 k 越大,虽然提取速度越快,但会使提取的基波THD值变大,但如果该系统只含有高次谐波,比例系数 k 越大,提取的基波THD值也很小^[6]。

根据高铁牵引网谐波特性,在MATLAB/Simulink₇中搭建谐波特性模型。采用基于瞬时无功功率理论谐波检测算法(instantaneous reactive power theory harmonic detection algorithm, IRPT)与改进型正序基波提取器检测算法(improved

harmonic detection algorithm, IHDA)对比分析,其仿真波形图及其傅里叶分析结果如图2所示。

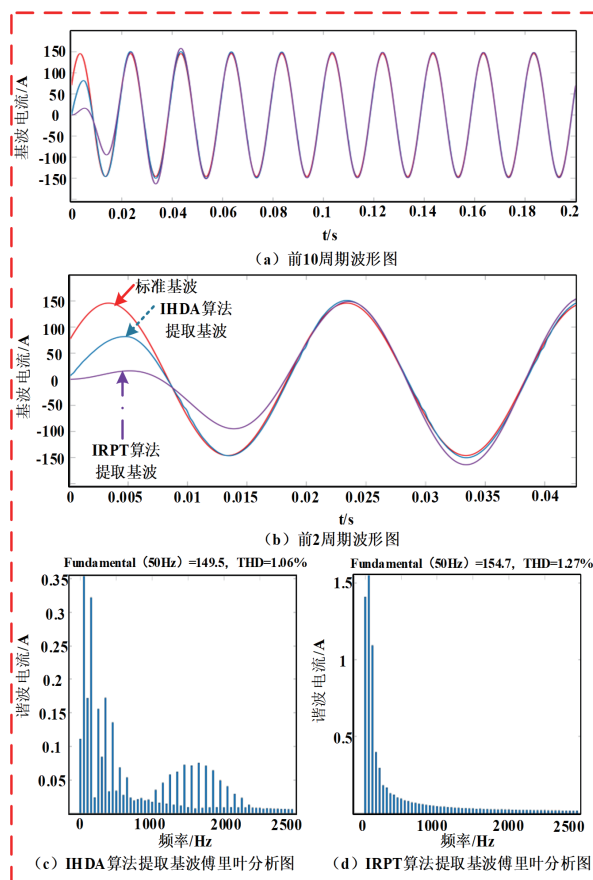


图2 IRPT算法与IHDA算法提取基波对比图

图(a)中的三条曲线分别为系统标准基波、IRPT算法与IHDA算法所提取的基波曲线图。图(b)为图(a)前2周期放大图,其中标准基波曲线为图(b)中实线箭头所指曲线, IHDA算法所提取的基波曲线为图(b)中虚线箭头所指曲线, IRPT算法所提取的基波曲线为图(b)中划线点箭头所指曲线。从放大图(b)可以清晰地看出,采用IHDA算法所提取的基波较IRPT算法提取基波先与标准基波重合,说明IHDA算法具有更好的收敛性,响应速度更快。从二者的傅里叶分析图(c)和(d)可知,虽然采用IHDA算法所提取的基波THD值更小($THD_{IHDA}=1.06\% < THD_{IRPT}=1.27\%$),精度稍高,但该算法依然存在少部分低次谐波。为进一步提高基波提取精度,根据高铁牵引网谐波特性可知,其低次谐波的主要频谱集中在150、250、550 Hz等附近,高频主要集中在1750 Hz附近。通过设计具有选频特性的幅值积分器模块,采用阶梯式低次谐波消除策略,即依次搭建针对150、250、350、450、550 Hz频谱的前段谐波消除通道,同时又搭建150、250 Hz频谱的后段谐波消除通道,构建一种适用于高铁牵引网的谐波检测算法(algorithm for harmonic detection in high-speed rail traction networks,

AHD)。这样在确保快速响应的同时，进一步实现提取精度的提升，满足高铁谐波检测算法要求。该技术方案能够在 MATLAB/Simulink₇ 中有效模拟高铁牵引网复杂工况下的谐波检测需求，确保检测系统在高速运行环境中仍具备可靠的实时性与准确性，其 AHD 算法策略如图 3 所示。

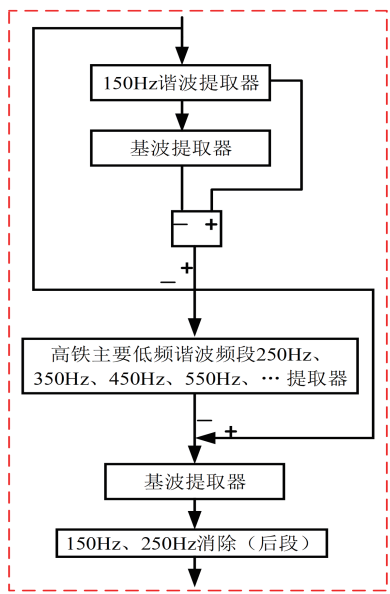


图 3 AHD 算法策略图

根据图 3 阶梯式低次谐波消除策略，在 MATLAB/Simulink₇ 中搭建 AHD 算法，其提取的基波傅里叶分析如图 4 所示。

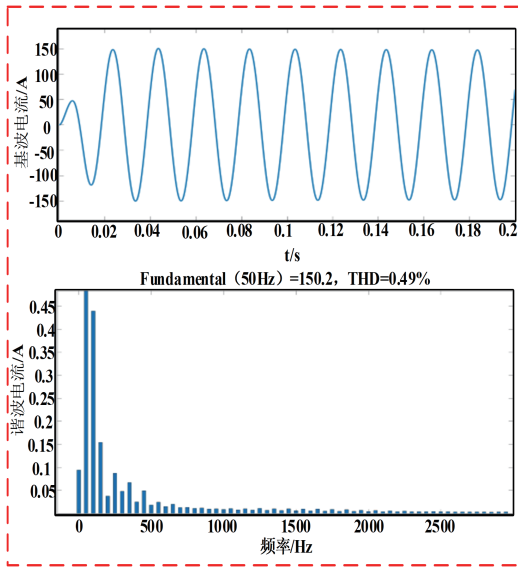


图 4 AHD 算法提取基波傅里叶分析图

结合图 3~4 可知，采用 AHD 算法所提取基波的 THD 值比采用 IHDA 算法所提取基波的 THD 值小了一半（ $THD_{AHD}=0.49\% < THD_{IHDA}=1.06\%$ ），精度提升了一倍。这表明 AHD 算法在谐波抑制方面表现更优，能够更精准地分离基波与谐波成分。THD 值的显著降低直接反映了信号纯度

的提高，对于高铁牵引网这类具有复杂电力电子设备的系统来说，AHD 算法更适合用于该系统谐波的提取。

3 总结

本文根据高速铁路牵引网谐波特性，在 MATLAB/Simulink₇ 中搭建谐波特性模型。通过对比 IHDA 算法与 IRPT 算法的滤波特性可知，IHDA 算法具有更快的响应速度和更高的精度，但 IHDA 算法在提取的基波中仍存在少量的低次谐波，为进一步提高检测精度，满足高铁牵引网谐波检测要求，构建了 AHD 算法。该算法通过后段增加低次谐波消除通道，有效解决了低次谐波残留问题。经过仿真对比分析，在相同工况下，采用 AHD 算法所提取的基波的 THD 值较 IHDA 降低约 50%，而响应时间基本不变。仿真结果验证了 AHD 算法在检测谐波过程中精度的显著提升，因此，该算法更契合高速铁路牵引供电系统对谐波检测高精度的要求。

参考文献：

[1] 吴敬兵, 罗安, 马伏军, 等. 无功和谐波补偿装置的控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2011(5):43-48.

[2] 曹阳. 基于同步检测法的高速铁路牵引网谐波抑制研究 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2015, 11(2):141-145.

[3] 邵洋, 陈丽华, 胡海涛, 等. 基于 C 型与单调谐滤波器组合的高铁牵引供电系统谐波治理方法 [J]. 铁道学报, 2018, 40(4): 52-59.

[4] 周胜军, 谈萌. 基于监测数据的高铁动车组谐波特性分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3):128-133.

[5] 张敢, 施火泉, 饶琨. 基于 HHT 谐波与间谐波检测研究 [J]. 电源学报, 2019, 17(4):155-161.

[6] 毛远斌, 冯江华, 周方圆, 等. 基于正序基波提取器的改进型单相谐波检测算法研究 [J]. 大功率变流术, 2017(3):36-41.

[7] 张岩, 祁霖舫, 张志刚, 等. 基于宽频带滤波器的牵引供电系统谐波治理 [J]. 电气工程学报, 2024, 19(4):434-440.

【作者简介】

毛远斌 (1989—), 男, 湖南武冈人, 硕士研究生, 讲师、工程师, 研究方向: 电气工程领域电力系统电能质量、电力拖动等。

(收稿日期: 2025-05-08 修回日期: 2025-09-16)