

文章编号: 1005-0523(2026)04-0037-09



基于拍频坐标系的轨道交通牵引系统 拍频抑制策略研究

章勇高, 邓兆飞, 刘 鹏

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 在轨道交通牵引系统中, 四象限脉冲整流器运行时, 会在直流母线电压中引入二倍频脉动。该脉动电压与逆变器的基频电压相互作用, 导致电机定子电压和电流出现拍频现象; 当电机运行频率接近二倍电网频率时, 拍频现象尤为显著。文章详细阐述了拍频现象的产生原因, 分析了电机定子电流中各谐波分量的旋转方向和频率。针对拍频问题, 提出了一种拍频旋转坐标系, 用于提取引发拍频现象的谐波电流, 在拍频坐标系中将其转换为直流量, 并通过比例积分控制器生成拍频抑制补偿电压。在 MATLAB/Simulink 中搭建电机仿真模型, 在 3 种不同的电机工况下开展仿真验证。仿真结果表明, 文章所提方法在电机频率接近二倍电网频率的宽频率范围内均可有效抑制拍频现象。

关键词: 牵引传动系统; 直流母线电压波动; 拍频现象; 旋转坐标系; 永磁同步电机

中图分类号: TM351

文献标志码: A

本文引用格式: 章勇高, 邓兆飞, 刘鹏. 基于拍频坐标系的轨道交通牵引系统拍频抑制策略研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(4): 37-45.

Research on Beat Frequency Suppression Strategy of Rail Transit Traction System Based on Beat Frequency Coordinate System

Zhang Yonggao, Deng Zhaoifei, Liu Peng

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the rail transit traction system, the operation of the four-quadrant pulse rectifier introduces double grid frequency ripple into the DC bus voltage. This ripple voltage interacts with the fundamental frequency voltage of the inverter, leading to beat-frequency phenomena in the motor stator voltage and current. This phenomenon is particularly pronounced when the motor operating frequency is close to twice the grid frequency. This paper elaborates on the generation mechanism of the beat-frequency phenomenon, and analyzes the rotation direction and frequency of each harmonic component in the motor stator current. To address the beat-frequency problem, a beat-frequency rotating coordinate system is proposed to extract the harmonic currents causing the beat-frequency phenomenon, which are converted into DC quantities in the beat-frequency coordinate system, and the compensation voltage for beat-frequency suppression is generated by a proportional-integral controller. A motor simulation model is built in MATLAB/Simulink, and simulation verification is carried out under three different motor operating conditions. The simulation results show that the proposed method can effectively sup-

收稿日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52267015)

press the beat-frequency phenomenon in a wide frequency range where the motor frequency is close to the double grid frequency.

Key words: traction drive system; DC bus voltage fluctuation; beat frequency phenomenon; rotating coordinate system; permanent magnet synchronous motor

Citation format: Zhang Yonggao, Deng Zhaoifei, Liu Peng. Research on beat frequency suppression strategy of rail transit traction system based on beat frequency coordinate system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 37-45.

在轨道交通牵引系统中,牵引变流器是重要组成部分,其核心结构由四象限脉冲整流器、直流母线电容和三相脉宽调制(PWM)逆变器3部分构成。在四象限脉冲整流器运行过程中,其输入输出功率均含有二倍频脉动分量,这一特性直接导致牵引变流器直流侧电压出现100 Hz的脉动。该脉动电压会在电机定子电压和电流中引发明显的拍频现象,特别是当电机运行频率接近二倍电网频率时,该现象尤为显著。此时电机功率损耗增加,温度急剧升高,产生严重的机械抖动及难以忍受的噪声污染,严重影响列车运行稳定性和旅客乘坐舒适度,甚至可能导致列车故障^[1]。

为解决直流母线电压脉动引发的拍频问题,目前主要采用硬件方法和软件方法两大类进行抑制。硬件方法主要通过特定的硬件电路设计,直接抑制直流侧脉动电压。在轨道交通牵引系统中,一种常见措施是在四象限脉冲整流器直流侧并联LC谐振电路,但该方案增加了额外硬件成本,且系统体积大、功率密度大幅降低。其他硬件解决方案包括增大直流母线电容容量或采用改进型电路拓扑。文献[2]提出了一种带直流分相电容的有源功率解耦电路,由两个变换器组成,其中升压变换器作为主变换器,降压-升压变换器作为辅助变换器。当主变换器的电容电压发生波动时,辅助变换器在另一个电容上产生互补电压。文献[3]提出了一种适用于小直流侧电容系统的直流侧并联补偿器,但该方案增加了开关管和电容,控制复杂且不具备通用性。

总体而言,硬件方法需要增加额外元器件,不仅提升了成本,还需对新增元器件进行控制,导致系统控制复杂度显著增加。相比之下,软件方法更侧重于采用先进的控制算法优化手段,以有效抑制电机侧定子电流中的谐波分量。目前已有多种成熟的软

件方法得到广泛应用,如前馈补偿^[4-5]、反馈补偿^[6]、单周期控制^[7-8]和频率补偿^[9-10]等。文献[4-5]通过实时测量直流母线电压修正调制比,采用前馈补偿方法抑制拍频现象。文献[6]通过实时采集电机电流与指令电流作为反馈修正调制比,其原理是将系统输出值送回输入端,与参考值比较,利用偏差进行控制,最终实现输出值与参考值一致。文献[7-8]将单周期控制算法作为逆变器的调制方案,但该方法需获取母线电压波动分量的频率、幅值和初始相位等信息;而在实际系统中,直流母线电压的波动量并非恒定值,会随电机转速和负载变化而改变,其初始相位角也不固定。文献[9]通过对系统建模,得到了转子磁场定向条件下电机电流和转矩关于直流母线电压的传递函数,进而提出了通过修正电机转差频率的拍频抑制策略,但该方法不适用于同步电机。文献[10]提出通过改进的闭环频率补偿策略消除磁场定向控制系统中的 q 轴电流脉动分量,进而抑制转矩脉动,但该方法同样仅适用于异步电机。除从电机电压、电流、转矩角度进行分析外,文献[11-12]从阻抗角度分析了拍频电流中的谐波,通过重塑永磁同步电机(PMSM)驱动系统在主要次谐波下的阻抗,提出了一种拍频抑制策略。文献[13]通过数学推导得到定子电流的包络特征,提出一种电压重构策略,利用重建的直流母线电压计算PWM占空比,可显著削弱拍频现象。上述方法的分析均基于电机基频旋转坐标系。文献[14-18]引入了创新的多参考坐标系设计,可有效提取和控制电机定子电流中非基频的5次和7次谐波。文献[19]指出,发生拍频现象时,电机定子电流中会包含角频率为 $2\omega_s \pm \omega_c$ 的非基频谐波电流,可采用类似的多参考坐标系抑制拍频现象。其中 ω_s 为电网电压角频率, ω_c 为电机运行频率。

本文首先分析拍频现象的产生原因,详细探讨轨道交通牵引传动系统电机定子电流中各谐波分量的旋转方向和频率;随后提出一种基于拍频坐标系的电压补偿策略,通过提取定子电流中的谐波电流,在拍频坐标系中进行控制,以消除谐波电流为目标,通过电压反馈环得到补偿电压;最后搭建仿真模型,验证所提方法的有效性。

1 轨道交通牵引系统的拍频现象

轨道交通牵引变流器一般由四象限脉冲整流器、直流母线电容和逆变器3部分组成,如图1所示。四象限脉冲整流器为H桥结构,由开关管 $S_7 \sim S_{10}$ 构成,交流电源、电阻 R 与电感 L 串联后作为输入接至H桥桥臂;三相逆变器由开关管 $S_1 \sim S_6$ 构成,PMSM的A、B、C三相输入端分别接至逆变器桥臂; U_{dc} 为直流母线电压。

以A相电流为例,当电机运行频率为99 Hz时,电机定子电流波形如图2所示。从图2可以看出,定子电流中存在非常明显的1 Hz谐波分量,电流波动幅值达94.3 A。为更直观地分析各频率的谐波含量,对A相电流进行傅里叶变换,结果如图3所示。由图3可知,A相电流中1 Hz谐波含量为

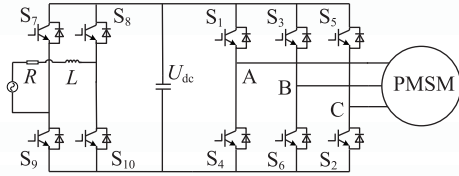


图1 轨道交通牵引变流器
Fig. 1 Traction converter for rail transit

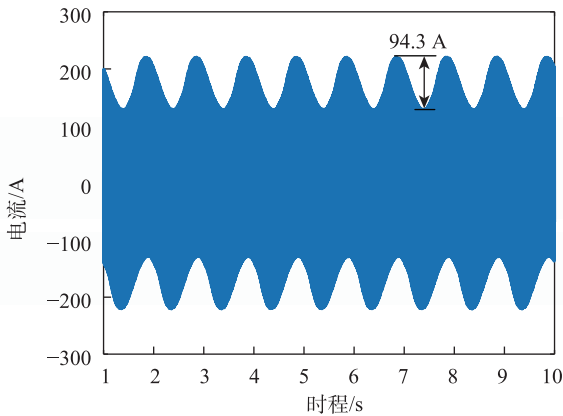


图2 电机A相电流波形
Fig. 2 Waveform of phase A current of the motor

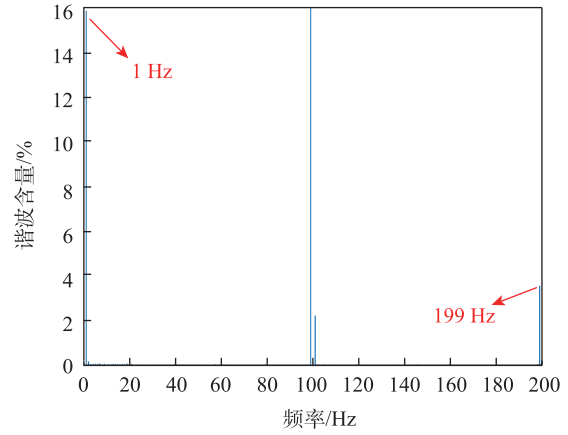


图3 A相电流傅里叶分析
Fig. 3 Fourier analysis result of phase A current

15.85%, 199 Hz谐波含量为3.58%, A相电流的总谐波畸变率(THD)为15.90%。假设电网电压和电流为正弦信号,且四象限脉冲整流器两侧功率守恒。

四象限脉冲整流器工作时,其输入功率与输出功率均存在二倍频脉动特性,该脉动传递至直流母线,导致直流母线电压中包含二倍频脉动分量,可表示为

$$U_{dc}(t) = U_{dc} + \Delta U_{dc} \sin(2\omega_s t + \varphi) \quad (1)$$

式中: t 为时间变量; φ 为电网功率因数角; ΔU_{dc} 为直流母线电压脉动分量的幅值,表达式为

$$\Delta U_{dc} = \frac{I_{dc}}{2\omega_s C \cos\varphi}$$

式中: I_{dc} 为母线电流平均值; C 为母线电容。

理想状态下,直流母线电压 U_{dc} 为恒定值,此时逆变器基频开关函数 S_a 、 S_b 、 S_c 为

$$\begin{cases} S_a = m \sin \omega_c t \\ S_b = m \sin \left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ S_c = m \sin \left(\omega_c t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为正弦脉宽调制度, $m = \frac{U_m}{U_{dc}}$; U_m 为逆变器输出电压的有效值。

将 U_{dc} 替换为实际带脉动的直流母线电压,以A相为例^[19],逆变器输出电压 $u_a(t)$ 表达式为

$$\begin{aligned} u_a(t) &= m \sin \omega_c t [U_{dc} + \Delta U_{dc} \sin(2\omega_s t + \varphi)] = \\ &= U_m \sin \omega_c t + \frac{1}{2} m \Delta U_{dc} \cos[(2\omega_s - \omega_c)t + \varphi] - \\ &\quad \frac{1}{2} m \Delta U_{dc} \cos[(2\omega_s + \omega_c)t + \varphi] \end{aligned} \quad (3)$$

当直流侧电压存在脉动时,逆变器输出电压中

会包含高频 $u_{a1}(t)$ 和低频 $u_{a2}(t)$ 两个谐波分量,且二者的幅值随直流侧脉动电压分量的增大而升高。当电机运行频率逐渐接近二倍电网频率时,电机相电压与相电流中会产生频率逐渐降低的谐波分量。表达式为

$$\begin{cases} u_{a1}(t) = \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos[(2\omega_s - \omega_e)t + \varphi] \\ u_{a2}(t) = \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos[(2\omega_s + \omega_e)t + \varphi] \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)~式(4)可得

$$\begin{aligned} u_b(t) &= U_m \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &\quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos\left[(2\omega_s - \omega_e)t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right] - \\ &\quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos\left[(2\omega_s + \omega_e)t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_c(t) &= U_m \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &\quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos\left[(2\omega_s - \omega_e)t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right] - \\ &\quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos\left[(2\omega_s + \omega_e)t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right] \end{aligned} \quad (6)$$

三相电压 $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$ 经 Park 变换(一种坐标变换,将静止坐标系变换到同步旋转坐标系)到两相同步旋转坐标系,结果为

$$\begin{cases} u_d = U_m + \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos(2\omega_s t + \varphi) + \\ \quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \sin(2\omega_s t + \varphi) \\ u_q = U_m - \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \sin(2\omega_s t + \varphi) - \\ \quad \frac{1}{2}m\Delta U_{dc} \cos(2\omega_s t + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

上述分析表明,在角频率为 ω_e 的旋转坐标系下,无法采用比例积分(PI)控制器对轨道交通牵引系统中引发拍频现象的低频谐波分量进行无静差控制。文献[19]采用准谐振控制器实现交流信号的无静差控制,但在不同运行频率下,需重新整定准谐振控制器的参数,该方法不具备通用性。

2 基于拍频坐标系的电压补偿

基于上述分析,针对轨道交通牵引传动系统中的拍频现象,为解决 PI 控制器处理拍频问题的局限性以及准谐振控制器通用性不足的问题,本文提出一种拍频旋转坐标系设计方案,并基于该坐标系计算拍频抑制所需的补偿电压,以实现对拍频现象的有效抑制。永磁同步电机定子侧三相电压如式(6)所示,定子侧三相电流也会产生对应频率的分量 i_a 、 i_b 、 i_c 。表达式为

$$\begin{cases} i_a = i_{a1} \sin \omega_e t + i_{a2} \cos[(2\omega_s - \omega_e)t + \varphi_1] + \\ \quad i_{a3} \cos[(2\omega_s + \omega_e)t + \varphi_2] \\ i_b = i_{b1} \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{b2} \cos\left[(2\omega_s - \omega_e)t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right] + \\ \quad i_{b3} \cos\left[(2\omega_s + \omega_e)t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_2\right] \\ i_c = i_{c1} \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{c2} \cos\left[(2\omega_s - \omega_e)t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right] + \\ \quad i_{c3} \cos\left[(2\omega_s + \omega_e)t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_2\right] \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 为三相静止坐标系下三相定子电流中角频率为 ω_e 分量的幅值; i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 为三相电流中角频率为 $2\omega_s - \omega_e$ 分量的幅值; i_{a3} 、 i_{b3} 、 i_{c3} 为三相电流中角频率为 $2\omega_s + \omega_e$ 分量的幅值; φ_1 、 φ_2 分别为角频率为 $2\omega_s - \omega_e$ 、 $2\omega_s + \omega_e$ 分量的相位角。

将 i_a 、 i_b 、 i_c 的各频率分量及相序表示在平面坐标系中,如图4所示。图4中横轴为实轴,纵轴为虚轴。电流 i_a 、 i_b 、 i_c 中,角频率为 ω_e 和 $2\omega_s + \omega_e$ 的分量为正序,角频率为 $2\omega_s - \omega_e$ 的分量为负序。

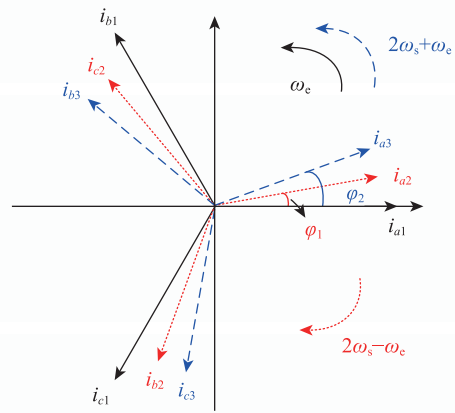


图4 各频率电流分量及相序

Fig. 4 Current components and phase sequences at different frequencies

因此,为将角频率为 $2\omega_s - \omega_e$ 的负序低频谐波分量变换为直流量,不仅需要重新设计旋转坐标系的旋转频率,还需要采用负序 Park 变换矩阵,将三相静止坐标系下的三相电流变换到新的两相旋转坐标系下。

上述设计的新坐标系称为拍频坐标系,三相电流经过负序 Park 变换得到 i'_d 、 i'_q , 即

$$\begin{cases} i'_d = -i_{a1} \cos(2\omega_s t) - i_{a2} \sin \varphi_1 + i_{a3} \sin(4\omega_s t + \varphi_2) \\ i'_q = i_{a1} \sin(2\omega_s t) + i_{a2} \cos \varphi_1 + i_{a3} \cos(4\omega_s t + \varphi_2) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,在拍频坐标系中,角频率为 $2\omega_s - \omega_c$ 的电流分量被变换为直流分量;角频率为 ω_c 的分量被变换为角频率为 $2\omega_s$ 的交流分量;角频率为 $2\omega_s + \omega_c$ 的分量被变换为角频率为 $4\omega_s$ 的交流分量。

通过对电机阻抗特性的分析^[15],频率为 $2\omega_s - \omega_c$ 的谐波对应的阻抗值远小于频率为 $2\omega_s + \omega_c$ 的谐波对应的阻抗值;因此频率为 $2\omega_s - \omega_c$ 的谐波电流是引发电机拍频现象的最主要因素, $2\omega_s + \omega_c$ 分量通常可忽略^[16]。

忽略 $2\omega_s + \omega_c$ 谐波分量的影响,在拍频坐标系中,为实现对电流 i_{bd} 和 i_{bq} 分量的无静差控制,将PI控制器的参考值设为0;当 i_{bd} 和 i_{bq} 分量被调节至0时,即可抑制直流母线电压二次脉动引发的拍频现象。PI控制器的输出为拍频坐标系下的电压分量 U_{bd} 、 U_{bq} ,通过负序反Park变换将其变换为三相静止坐标系下的三相补偿电压 U_{ba} 、 U_{bb} 、 U_{bc} 。

永磁同步电机矢量控制系统采用直轴(d轴)参考电流 $i_{dref}=0$ 的控制方法。由于未对网侧进行控制,将四象限脉冲整流器用单相全桥不可控整流器代替。拍频抑制模块通过锁相环(PLL)模块输出的电网相位与电机角频率构造拍频坐标系的旋转角度。交轴(q轴)参考电流 i_{qref} 经过低通滤波器,确保 i_{qref}^* 中仅包含基频分量。经上述拍频抑制控制算法,得到用于抑制拍频电流的三相补偿电压 U_{ba} 、 U_{bb} 、 U_{bc} ,将其注入三相调制波 U'_{ba} 、 U'_{bb} 、 U'_{bc} 中,可恰好抵消直流母线脉动电压引发的谐波电压,通过反馈回路实现精确控制。

3 仿真验证

本文仿真采用的电机参数如表1所示。当电机运行频率接近二倍电网频率时,拍频现象最为严重,因此选取的仿真工况为:电机运行频率99 Hz,电机负载转矩100 N·m。通过观测电机电流波形及谐波含量、电机转矩及电机运行频率波形,验证所提控制算法的有效性。

表1 电机仿真参数

Tab.1 Motor simulation parameters

PMSM 参数	数值	PMSM 参数	数值
定子电阻/ Ω	0.048 5	永磁体磁链/Wb	0.4
d轴电感/mH	8.5	q轴电感/mH	8.5
极对数	1	额定转矩/(N·m)	100

当电机运行频率为99 Hz、负载转矩为100 N·m时,在 $t=5$ s时投入拍频抑制算法。以A相为例,其电流波形如图5所示。

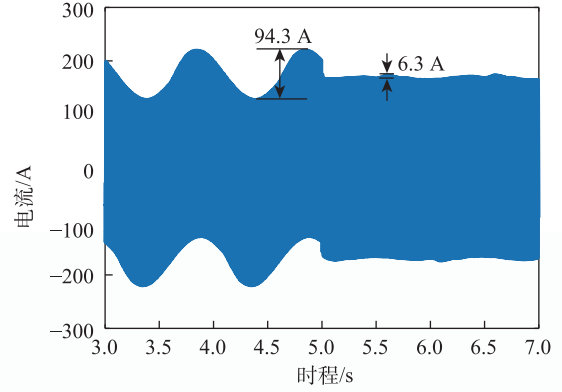


图5 A相电流变化波形(工况1)

Fig. 5 Waveform of phase A current (case 1)

未投入拍频抑制算法时,电流中存在明显的1 Hz波动,最大波动幅值达94.3 A;投入拍频抑制算法后,电流的最大波动幅值减小至6.3 A,抑制率为93.30%。为分析投入算法前后A相电流中1 Hz和199 Hz分量的含量,对A相电流进行傅里叶变换分析。投入拍频抑制算法前后的A相电流傅里叶分析结果分别如图3和图6所示。

由图3和图6可知,投入拍频抑制算法前,A相电流中1 Hz谐波含量为15.85%,199 Hz谐波含量为3.58%,A相电流的总谐波畸变率(THD)为15.90%;投入拍频抑制算法后,A相电流中1 Hz谐

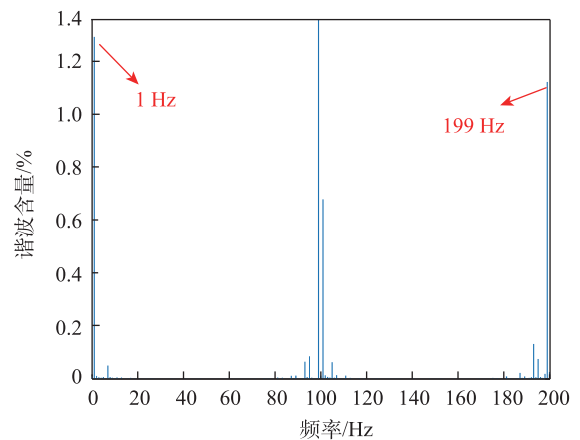


图6 补偿后各频率电流含量(工况1)

Fig. 6 Current content of each frequency after compensation (case 1)

波含量降至1.96%,199 Hz谐波含量为1.12%,A相电流的THD降至2.17%,表明引发拍频现象的低频谐波电流得到了显著抑制。

电机转矩波形如图7所示。未投入拍频抑制算法时,电机转矩波动幅值达 $57.7\text{ N}\cdot\text{m}$;投入拍频抑制算法后,转矩波动幅值减小至 $7.6\text{ N}\cdot\text{m}$,电机转矩波动大幅降低。

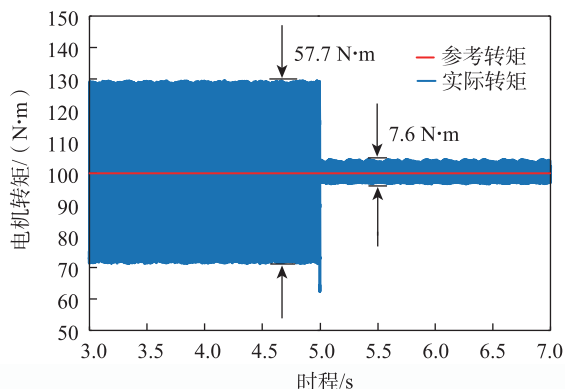


图7 电机转矩变化波形(工况1)
Fig. 7 Waveform of motor torque (case 1)

电机运行频率波形如图8所示。未投入拍频抑制算法时,电机运行频率波动为5.25 Hz;投入拍频抑制算法后,电机运行频率波动减小至0.41 Hz。

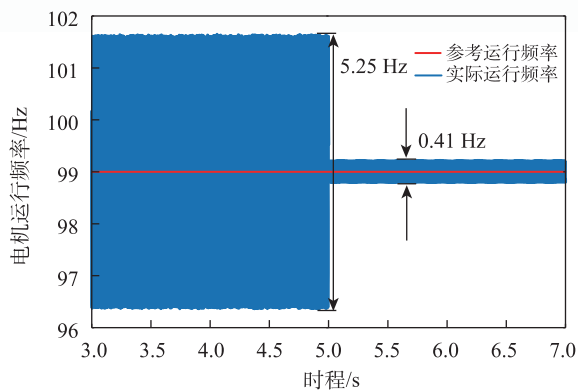


图8 电机运行频率变化波形(工况1)
Fig. 8 Waveform of motor operating frequency (case 1)

上述仿真中,电机运行频率设定为99 Hz。通过分析电机电流波形及其谐波含量、补偿电压波形、转矩波形和电机运行频率波形,验证了所提拍频抑制算法的有效性。从电机电流抑制效果来看,该算法的抑制率达到了93.30%。为进一步验证该算法在不同电机转速下的适用性,在运行频率为95 Hz的工况下开展了算法验证。

工况2:电机运行频率为95 Hz,负载转矩为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$,在 $t=5\text{ s}$ 时投入拍频抑制算法。以A相为例,其电流波形如图9所示。

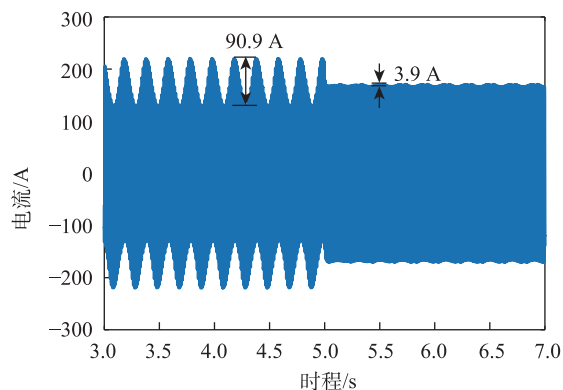


图9 A相电流变化波形(工况2)
Fig. 9 Waveform of phase A current (case 2)

由图9可见,未投入拍频抑制算法时,电流中存在明显的5 Hz波动,最大波动幅值达90.9 A;投入拍频抑制算法后,电流的最大波动幅值减小至3.9 A,抑制率为95.70%。

为分析投入算法前后A相电流中5 Hz和195 Hz分量的含量,对A相电流进行傅里叶变换分析。投入拍频抑制算法前后的A相电流傅里叶变换分析结果分别如图10和图11所示。

由图10和图11可知,投入拍频抑制算法前,A相电流中5 Hz谐波含量为13.55%,195 Hz谐波含量为3.52%,A相电流的THD为14.87%;投入拍频抑制算法后,5 Hz谐波含量降至0.73%。

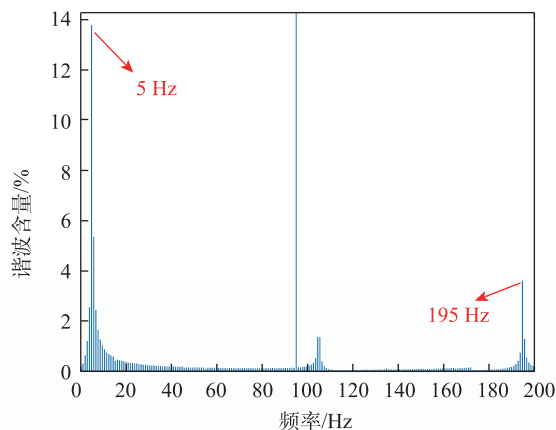


图10 补偿前A相电流傅里叶变换分析结果(工况2)
Fig. 10 Fourier transform analysis result of phase A current before compensation (case 2)

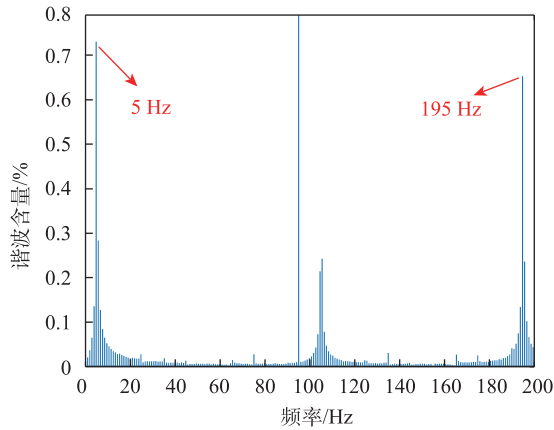


图11 补偿后A相电流傅里叶变换分析结果(工况2)

Fig. 11 Fourier transform analysis result of phase A current after compensation (case 2)

工况2下电机转矩波形如图12所示。未投入拍频抑制算法时,电机转矩波动幅值达 $57.8\text{ N}\cdot\text{m}$;投入拍频抑制算法后,转矩波动幅值减小至 $5.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

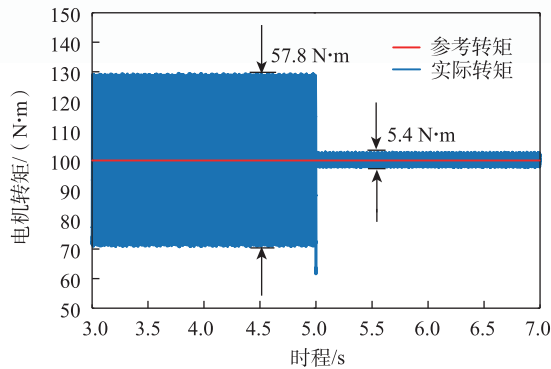


图12 电机转矩变化波形(工况2)

Fig. 12 Waveform of motor torque (case 2)

工况2下电机运行频率波形如图13所示。未投入拍频抑制算法时,电机运行频率波动为 5.25 Hz ;投入拍频抑制算法后,电机的运行频率波动减小至 0.24 Hz 。

上述工况1与工况2仅分析了电机在稳态运行频率下的拍频抑制效果。为进一步验证所设计算法在电机制动工况下的有效性,设计了工况3开展仿真分析。工况3:4~6 s内,电机运行频率为 101 Hz 且未投入拍频抑制算法;6 s时投入拍频抑制算法,同时控制电机运行频率分阶段降至 $99, 97, 95\text{ Hz}$ 。通过观测A相电流、电机转矩波形和电机运行频率波形,评估算法的谐波抑制效果和动态响应性能。

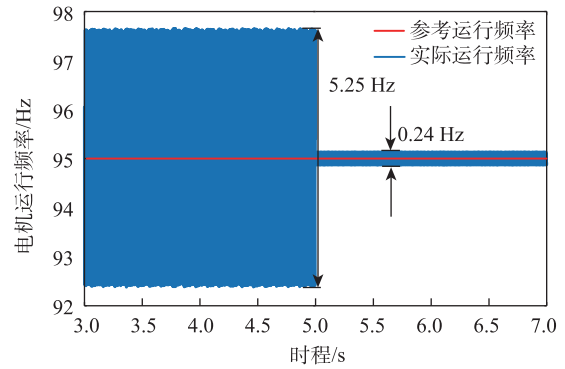


图13 电机运行频率变化波形(工况2)

Fig. 13 Waveform of motor operating frequency (case 2)

图14为制动工况下电机A相电流的动态变化波形。首先在 101 Hz 运行频率下启动电机,此时未投入拍频抑制算法,电流波形中存在明显的 1 Hz 低频谐波分量; $t=6\text{ s}$ 时投入拍频抑制算法后,该 1 Hz 谐波被快速抑制,展现出优异的初始响应特性; $t=7\text{ s}$ 时,电机运行频率阶梯式降至 99 Hz ; $t=8\text{ s}$ 时,电机运行频率降至 97 Hz ; $t=9\text{ s}$ 时,电机运行频率降至 95 Hz ,整个制动过程中算法均保持良好的抑制效果。

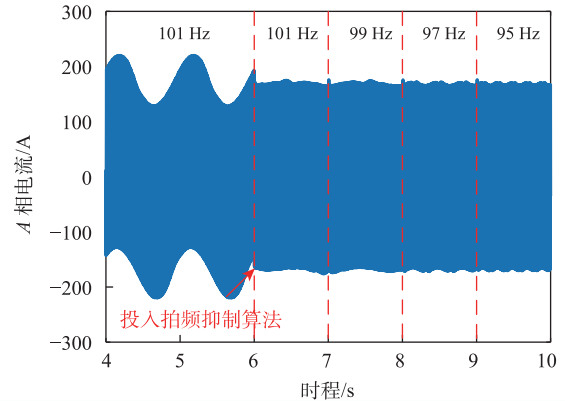


图14 A相电流变化波形(工况3)

Fig. 14 Waveform of phase A current (case 3)

图15为制动工况下电机转矩的变化波形。系统在 101 Hz 初始频率运行时,未投入拍频抑制算法,电机转矩波动幅值为 $57.8\text{ N}\cdot\text{m}$; $t=6\text{ s}$ 投入拍频抑制算法后,转矩波动迅速降至 $12.7\text{ N}\cdot\text{m}$ 。随着电机运行频率阶梯式降至 95 Hz ,各频率下电机转矩波动均得到有效抑制。

图16为制动工况下电机运行频率的动态响应特性。投入本文所提拍频抑制策略后,频率稳定性得到显著改善。当电机运行频率从初始值逐步降

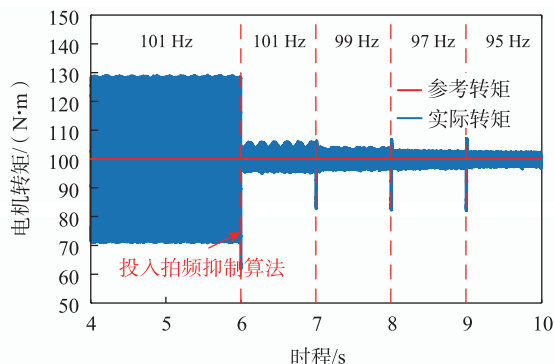


图15 电机转矩变化波形(工况3)

Fig. 15 Waveform of motor torque (case 3)

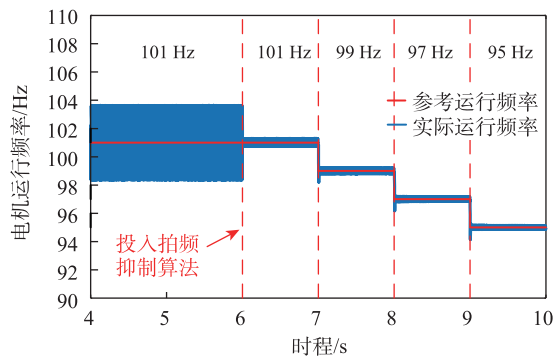


图16 运行频率变化波形(工况3)

Fig. 16 Waveform of motor operating frequency (case 3)

至95 Hz的过程中,控制系统展现出优异的动态性能:不仅频率波动幅值被显著抑制,且整个制动过程中频率稳定性均保持较高水平。

通过对3种工况的仿真验证可知,本文提出的基于拍频坐标系的电压补偿方法能够有效抑制直流母线电压二次脉动引发的拍频现象。由于该方法无需调整逆变器的运行频率,因此在宽频率范围内均能实现有效的拍频抑制。

4 结论

本文针对轨道交通牵引系统中直流母线电压脉动引发的拍频现象,通过分析电机电流中各频率的谐波含量,设计了基于拍频坐标系的电压补偿方法,可大幅抑制引发拍频现象的谐波电流,所得结论如下。

1) 当轨道交通牵引系统发生拍频现象时,电机定子电流中包含角频率为 ω_c 、 $2\omega_s + \omega_c$ 、 $2\omega_s - \omega_c$ 的3种分量,其中角频率为 ω_c 和 $2\omega_s + \omega_c$ 的分量为正序,角频率为 $2\omega_s - \omega_c$ 的分量为负序。

2) 通过建立仿真模型,对本文所提补偿方法进行了系统性验证。对3种不同电机运行工况下的仿真验证结果表明,该方法对轨道交通牵引系统中引发拍频现象的低频谐波电流抑制效果显著,抑制率均达93%以上,充分证明了所提方法的高效性和可靠性。

3) 本文所提方法无需改变逆变器的工作频率,在电机运行频率接近二倍电网频率的宽范围内均具有良好的抑制效果,与其他需改变逆变器工作频率的方法相比,适用性更强。

参考文献:

- [1] 张佳聶,孙文静,王嘉豪,等. 牵引传动系统对地铁车辆车内噪声影响研究[J]. 华东交通大学学报,2024,41(5):84-93.
Zhang Jianie, Sun Wenjing, Wang Jiahao, et al. Influence of traction transmission system on interior noise of metro trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 84-93.
- [2] Zhang Chao, Xu Lei, Zhu Xiaoyong, et al. Elimination of DC-link voltage ripple in PMSM drives with a DC-split-capacitor converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8141-8154.
- [3] Shin H, Chae Y H, Son Y, et al. Single-phase grid-connected motor drive system with DC-link shunt compensator and small DC-link capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1268-1278.
- [4] 欧阳晖,张凯,张鹏举,等. 牵引变流器直流母线电压脉动下的无拍频电流控制方法[J]. 电工技术学报,2011, 26(8): 14-23.
Ouyang Hui, Zhang Kai, Zhang Pengju, et al. Repetitive prediction of fluctuating DC link voltage for traction drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 14-23.
- [5] Kouro S, Lezana P, Angulo M, et al. Multicarrier PWM with DC-link ripple feedforward compensation for multi-level inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 52-59.
- [6] 霍军亚,王高林,赵楠楠,等. 无电解电容电机驱动系统谐振抑制控制策略[J]. 电工技术学报,2018, 33(24): 5641-5648.
Huo Junya, Wang Gaolin, Zhao Nannan, et al. Resonance suppression control strategy of electrolytic capacitor-less motor drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5641-5648.
- [7] 宋文胜,孙晓,江才. 单周期控制在牵引传动系统拍频抑制中的应用[J]. 电机与控制学报,2017, 21(3): 10-16.

- Song Wensheng, Sun Xiao, Jiang Cai. One-cycle control for beat-less frequency control application of traction drive system[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(3):10-16.
- [8] 宋玉明,宋文胜,余彬. 基于单周期控制的牵引电机拍频抑制算法数字化实现[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10):3007-3016.
- Song Yuming, Song Wensheng, Yu Bin. Digitized implementation of beat-frequency suppression algorithm based on one-cycle control for traction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10):3007-3016.
- [9] 董侃,刁利军,陈奕舟,等. 基于频域分析的无拍频控制策略研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(4):17-23.
- Dong Kan, Diao Lijun, Chen Yizhou, et al. Research on beat-less control strategy based on frequency domain analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(4):17-23.
- [10] Lei Yanxiao, Wang Ke, Zhao Lu, et al. An improved torque and current pulsation suppression method for railway traction drives under fluctuating DC-link voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10):8565-8577.
- [11] Ding Dawei, Gao Runfeng, Wang Qiwei, et al. Beatless control strategy based on impedance reshaping for PMSM drives with small DC-link capacitors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7):6829-6840.
- [12] Ren Zekun, Ding Dawei, Wang Gaolin, et al. Adaptive virtual admittance reshaping-based resonance suppression strategy for PMSM drives with small DC-link capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(3):3109-3121.
- [13] Ding Dawei, Zhao Nannan, Wang Gaolin, et al. Suppression of beat phenomenon for electrolytic capacitorless motor drives accounting for sampling delay of DC-link voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2):1167-1176.
- [14] Wu Lijian, Lyu Zekai. Harmonic injection-based torque ripple reduction of PMSM with improved DC-link voltage utilization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7):7976-7981.
- [15] Lyu Zekai, Wu Lijian, Song Pingyue. A novel harmonic current control method for torque ripple reduction of SPMSM considering DC-link voltage limit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2):2558-2568.
- [16] 荀斌,冯晓云,宋文胜,等. 牵引变流器-电机拍频现象及其抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9):55-63.
- Gou Bin, Feng Xiaoyun, Song Wensheng, et al. Analysis and suppression of beat phenomenon for railway traction converters and motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9):55-63.
- [17] Yang Jian, Zhou Jingyang, Zhou Hanbin, et al. High-precision harmonic current extraction for PMSM based on multiple reference frames considering speed harmonics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10):9764-9776.
- [18] Wang Xiaosheng, Jiang Chaoqiang, Zhuang Feifei, et al. A harmonic injection method equivalent to the resonant controller for speed ripple reduction of PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10):9793-9803.
- [19] 周明磊,王震,董士帆,等. 牵引逆变器直流电压二次脉动导致的永磁电机输出转矩脉动的抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21):8468-8477.
- Zhou Minglei, Wang Zhen, Dong Shifan, et al. Elimination strategy of torque ripple of PMSM caused by secondary pulsation of DC voltage in traction inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21):8468-8477.



第一作者:章勇高(1975—),男,教授,博士,硕士生导师,研究方向为分布式发电系统、光伏微逆变器、电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail:z.y.gao_1@163.com。



通信作者:刘鹏(1984—),男,讲师,博士,研究方向为新能源发电、电机控制。E-mail:qtc521@163.com。