

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.02.037

# 基于频率补偿的牵引逆变器拍频抑制仿真分析

纪铁生,王乃福,张戟

(中车大连电力牵引研发中心有限公司,辽宁 大连 116000)

**摘要:**针对动车组牵引逆变器工作频率接近二次脉动频率时会产生拍频现象,影响牵引电机稳定运行的问题,基于国内外研究现状,阐述动车组电传动系统直流侧二次脉动电压引起牵引电机产生拍频电流的原理,分析电机参数对拍频电流的影响;分析频率补偿法在工程应用中存在的计算失真问题,提出一种频率补偿优化方案,设计基于频率补偿无拍频控制的方波区矢量控制系统,在 dSPACE 半实物仿真平台上进行了仿真验证。研究表明:电机电流的低频脉动分量从 64% 降为 6%,拍频抑制效果显著。鉴于该方案的有效性,可为动车组逆变器拍频抑制策略提供参考。

**关键词:**动车组;牵引逆变器;二次脉动;拍频;频率补偿法

**中图分类号:** TM464    **文献标志码:** B    **文章编号:** 1671-5276(2022)02-0138-04

## Simulation Analysis of Beat Frequency Suppression of Traction Inverter Based on Frequency Compensation

JI Tiesheng, WANG Naifu, ZHANG Ji

(CRRC Dalian R &amp; D Co., Ltd., Dalian 116000, China)

**Abstract:** With regard to the beat frequency phenomenon affecting the stable operation of traction motor when the working frequency of EMU traction inverter is close to the secondary pulsation frequency, the principle of beat current of traction motor caused by secondary pulsating voltage on DC side of EMU electric drive system is elaborated based on the research status at home and abroad, and the influence of motor parameters on beat current is analyzed. The calculation distortion of frequency compensation method in engineering application is analyzed, and a frequency compensation optimization scheme is proposed. A square wave area vector control system based on frequency compensation non-beat frequency control is designed and verified by dSPACE hardware on loop simulation platform. The research shows that the low-frequency pulsation component of motor current is reduced from 64% to 6% with remarkable beat frequency suppression effect, which provides a reference for the beat frequency suppression strategy of EMU inverter.

**Keywords:** EMU; traction inverter; secondary pulsation; beat frequency; frequency compensation method

## 0 引言

逆变器广泛应用于新型交直动车组,但现有逆变器故障率较高,高温天气、负载水平、运行控制策略等均会缩短逆变器寿命,影响动车组运行安全。拍频现象是 CRH 动车组牵引逆变器常见故障,当逆变器的二次脉动频率和工作频率合拍时,就会引起牵引电机脉动,增加功率损耗,并造成电机温度急剧上升,甚至导致设备振动并产生强烈噪声,危害行车安全<sup>[1]</sup>。陈奕舟<sup>[1]</sup>、苟斌<sup>[2]</sup>、黄金<sup>[3]</sup>等通过将直流电加到 LC 谐振网络、扩大中间支撑电容、硬短路保护电路等策略,削弱次脉动频率和工作频率合拍的可能性,降低拍频现象的出现频次。运行过程中发现,这些方法会增加整流柜和逆变柜的质量和体积,增加车辆负载,亟待提出一种动车组逆变器拍频抑制策略。在此基础上,一些学者通过研究电压补偿法和频率补偿法等控制技术实现了对拍频现象的抑制。陈奕舟<sup>[1]</sup>对比研究了两种

电压补偿法对拍频现象的影响,然而由于 CRH 动车组运行电压、电流较大,牵引逆变器开关频率较低,逆变器的二次脉动频率已经落到方波调制区,电压补偿法对输出电压基本无调节能力;苟斌等<sup>[2]</sup>采用频率补偿法对拍频现象进行控制,提出了动车组逆变器频率补偿系数,略为遗憾的是该研究并未考虑计算延迟,导致响应速度较慢。基于国内外研究现状,本文以 CRH 动车组牵引逆变器为研究对象,首先分析了拍频现象的产生原理,研究了励磁电感、励磁电阻、励磁电流等参数拍频电流的影响,通过优化动车组逆变器频率补偿方案,对解决了计算延迟问题,并设计了一套基于频率补偿的无拍频控制方波区矢量控制系统,研究结果可为 CRH 动车组牵引逆变器拍频抑制相关研究提供参考。

## 1 拍频现象产生原理

CRH 动车组牵引电机一般采用单相整流器,网侧整

第一作者简介:纪铁生(1985—),男,河北衡水人,高级工程师,硕士,研究方向为牵引逆变器控制。

流器输入电压和电流的频率均为电网工频 50 Hz,在直流侧除了会产生稳态电压  $U_{dc}$  外,还会产生脉动电压  $\Delta U_{dc}$ ,直流侧电压  $u_{dc}$  表示为<sup>[3]</sup>

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

若不考虑功率开关器件的开关动作延迟等因素,牵引逆变器 PWM 开关函数可简化为<sup>[4]</sup>

$$S_v(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} A_{ik} \cos(k\omega_s t + \varphi_v), v = a, b, c \quad (2)$$

式中:  $\omega_s$  为牵引逆变器输出电压的角频率;  $\varphi_a = 0$ ,  $\varphi_b = -2\pi/3$ ,  $\varphi_c = 2\pi/3$ ;  $k$  为奇数;  $A_{ik}$  为幅值系数,  $A_{ik}$  与  $k\omega_s$  成反比。

忽略谐波影响情况下,牵引逆变器的输出相电压  $u_{vo}$  可以表示为<sup>[5]</sup>

$$u_{vo} = u_{dc} \left( S_v - \frac{1}{2} \right) = U_{dc} A_v \cos(\omega_s t + \varphi_v) + \frac{\Delta U_{dc} A_v}{2} \left\{ \sin[(2\omega_{net} + \omega_s)t + \varphi + \varphi_v] + \sin[(2\omega_{net} - \omega_s)t + \varphi - \varphi_v] \right\}, v = a, b, c \quad (3)$$

从式(3)可以看出,在忽略谐波影响情况下,牵引逆变器输出的相电压只包含  $\omega_s$ 、 $2\omega_{net} + \omega_s$ 、 $2\omega_{net} - \omega_s$  三个角频率分量。

牵引异步电机等效阻抗电路如图 1 所示,由牵引异步电机的阻抗特性可知,牵引异步电机的阻抗值随着输入电压频率的增大而增大<sup>[6]</sup>。当输出电压频率接近 100 Hz 时,  $2\omega_{net} - \omega_s$  分量的频率接近 0 Hz,对应的牵引异步电机等效阻抗最低,直流侧二次脉动电压造成的影响最大,产生拍频现象。

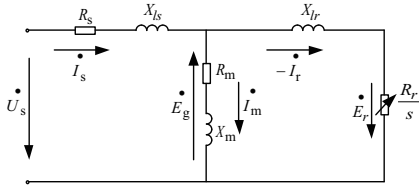


图 1 牵引异步电机等效阻抗电路

## 2 电机参数对拍频电流的影响

励磁电感和励磁电阻数值较大,励磁电流  $I_m$  较转子电流  $I_r$  小很多,在进行牵引异步电机等效阻抗计算时可以忽略,简化后的牵引异步电机等效阻抗电路图如图 2 所示。

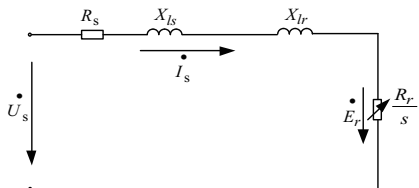


图 2 牵引异步电机简化等效阻抗电路

$2\omega_{net} - \omega_s$  分量对应的牵引异步电机等效阻抗可表示为

$$Z = \left( R_s + \frac{R_r}{s} \right) + j(2\omega_{net} - \omega_s)(L_{ls} + L_{lr}) \quad (4)$$

当输出电压频率接近 100 Hz 时,  $2\omega_{net} - \omega_s$  分量的频率接近 0 Hz,此时转差率  $s \propto \infty$ ,因此转子电阻等效阻抗  $R_r/s \approx 0$ ,因此  $2\omega_{net} - \omega_s$  分量对应的牵引异步电机等效阻抗为

$$Z = R_s + j(2\omega_{net} - \omega_s)(L_{ls} + L_{lr}) \quad (5)$$

由式(5)可进一步绘出  $2\omega_{net} - \omega_s$  分量的牵引异步电机阻抗特性曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,由于  $2\omega_{net} - \omega_s \approx 0$ ,  $2\omega_{net} - \omega_s$  分量的等效阻抗  $Z \approx R_s$ ,可知二次脉动电压引起的拍频电流的大小主要由定子电阻决定,同样的二次脉动电压,定子电阻越小的牵引异步电机,其拍频电流的幅值将会越大。

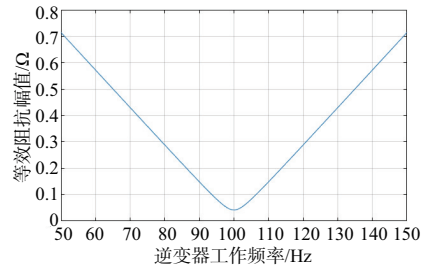


图 3 牵引异步电机阻抗特性曲线

## 3 基于频率补偿的拍频抑制算法

### 3.1 频率补偿原理

频率补偿的作用机理是通过补偿逆变器的输出频率调控直流侧二次脉动产生的拍频电流<sup>[6]</sup>。补偿后的逆变器瞬时工作频率:

$$f_i = F_s + F_{com} = F_s + \Delta F_r \cos(2\omega_{net}t + \varphi) \quad (6)$$

式中:  $F_{com}$  为频率补偿系数;  $\Delta F_r$  为频率补偿系数的幅值。

在忽略高频次脉动电压分量影响的基础上,文献[2]得出:

$$\Delta F_r = \frac{2\omega_{net}}{2\pi} \cdot \frac{\Delta U_{dc}}{U_{dc}} \quad (7)$$

频率补偿系数为<sup>[7]</sup>

$$F_{com} = \frac{2\omega_{net}}{2\pi} \cdot \frac{\Delta U_{dc}}{U_{dc}} \cos(2\omega_{net}t + \varphi) \quad (8)$$

### 3.2 频率补偿法工程应用存在的问题

由频率补偿系数  $F_{com}$  的表达式(8)可知,  $F_{com}$  不仅要幅值计算精确,电角度计算同样要求精确。  $F_{com}$  的幅值计算取决于直流侧脉动电压分量  $\Delta U_{dc}$  幅值,目前数字控制器的采样值精度比较高,  $\Delta U_{dc}$  幅值采样误差非常小,影响可以忽略,而反映电角度脉冲宽度的计算偏差可能会很大。在工程应用中,生成 PWM 控制信号的数字控制器通常采用增减计数模式,在计数器计数的零点和周期值产生中断,如图 4 的 A 点和 B 点所示。当牵引逆变器工作于方波区时,一个载波周期 =  $\pi/3$  电角度,  $\pi/3$  电角度的延迟使得频率补偿系数计算出现失真,严重影响着基于频率补偿无拍频控制的精度。

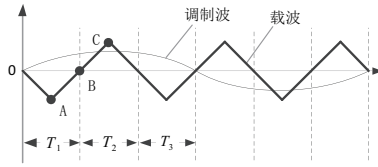


图4 方波区脉宽调制示意图

### 3.3 频率补偿法的优化

由于传统的方波区脉冲宽度计算会造成频率补偿系数的计算出现严重失真<sup>[8]</sup>,本文提出一种频率补偿方案,如图5所示。本频率补偿方案可以在A点提前预测计算

出C点二次脉动电压 $\Delta u_{dc}$ 的电角度。通过当前的定子频率计算 $T_2$ ,由 $T_1$ 和 $T_2$ 计算出二次脉动电压在A点和C点间的电角度 $\varphi_{AC}$ ;然后将直流侧电压信号 $u_{dc}$ 通过带通滤波器处理得到二次脉动电压信号 $\Delta u_{dc}$ ,提取 $\Delta u_{dc}$ 的相位得到A点的电角度 $\varphi_A$ ;由 $\varphi_A$ 和 $\varphi_{AC}$ 计算得到二次脉动电压在C点的电角度 $\varphi_C$ ,进一步得到 $\varphi_{AC}$ 的余弦值 $\varphi_2$ 。

通过对中间电压信号 $u_{dc}$ 平均值计算得到直流分量 $U_{dc}$ ,进一步得到频率补偿系数幅值 $\Delta F_r$ ,结合 $\Delta F_r$ 和 $\varphi_2$ 得到C点的频率补偿系数 $F_{com}$ 。图6为基于频率补偿无拍频控制的方波区矢量原理图,图中的频率补偿模型如图5所示,补偿系数 $F_{com}$ 转换为补偿角速度 $\omega_{com}$ ,和转子角速度 $\omega_r$ 、转差 $\omega_{sl}$ 相加得到最终的牵引电机定子输出频率 $\omega_i$ 。

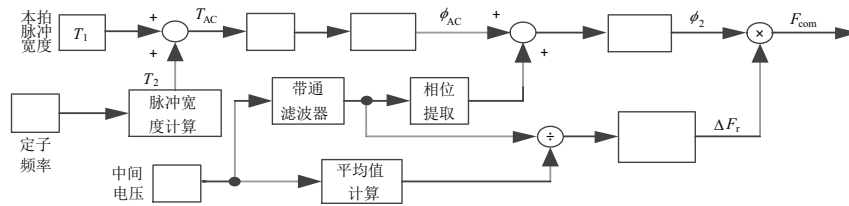


图5 频率补偿模型

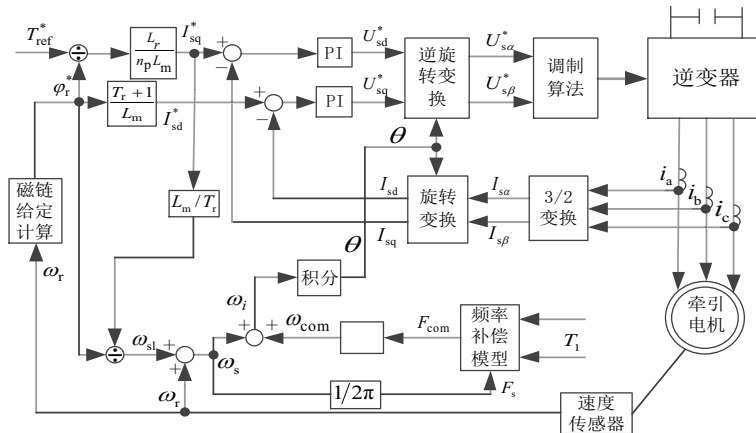


图6 基于频率补偿无拍频控制的方波区矢量控制系统原理图

## 4 仿真验证

为了验证基于本文频率补偿方案的无拍频控制的有效性,在dSPACE半实物仿真平台上搭建了仿真模型,半实物硬件为CR200J型动力集中动车组牵引控制单元(TCU),逆变器控制采用基于频率补偿无拍频控制的方波区矢量控制系统,电机模型参数设置如表1所示<sup>[9]</sup>。

表1 牵引电机参数

参数	数值	参数	数值
定子电阻/ $\Omega$	0.041 95	额定转差频率/Hz	0.5
转子电阻/ $\Omega$	0.032 96	额定转速/(r/min)	2 180
定子漏感/mH	0.829 6	额定功率/kW	1 430
转子漏感/mH	1.439 8	额定线电压/V	2 800
励磁电感/mH	38.648 3	额定转矩/(Nm)	7 155
励磁电阻/ $\Omega$	0.15	极对数	2

直流侧中间电压直接给定,直流电压量为3 500 V,扰

动量为幅值200 V、频率100 Hz的交流电压,以模拟直流侧二次脉动电压,牵引工况下转差频率为0.5 Hz,定子频率从95 Hz升至105 Hz,分别给出了未采用频率补偿无拍频控制、未优化的频率补偿无拍频控制和优化的频率补偿无拍频控制的试验结果。未采用频率补偿无拍频控制的仿真波形如图7所示,可以看到U相电流振荡剧烈,畸变严重。对应的电流频谱特性分析如图8所示,电机电流的低频脉动分量约为64%,低频拍频电流分量很大。

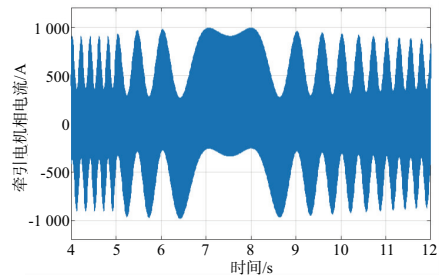


图7 未采用频率补偿无拍频控制的电机相电流波形

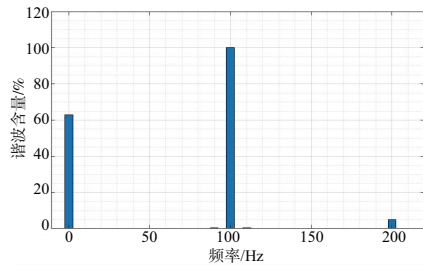


图 8 未采用频率补偿无拍频控制的电机相电流频谱特性

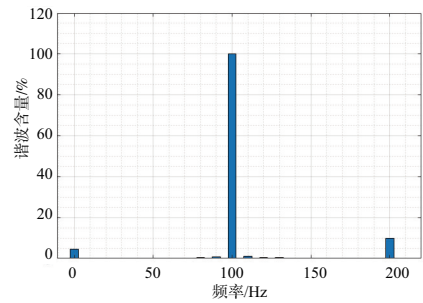


图 12 优化的频率补偿无拍频控制的电机相电流频谱特性

未优化的频率补偿无拍频控制的仿真波形如图 9 所示,可以看到 U 相电流畸变改善明显;对应的电流频谱特性分析如图 10 所示,电机电流的低频脉动分量降为 17%;优化的频率补偿无拍频控制的仿真波形如图 11 所示,可以看到 U 相电流畸变进一步改善;对应的电流频谱特性分析如图 12 所示,电机电流的低频脉动分量进一步降为 6%,拍频抑制效果显著。

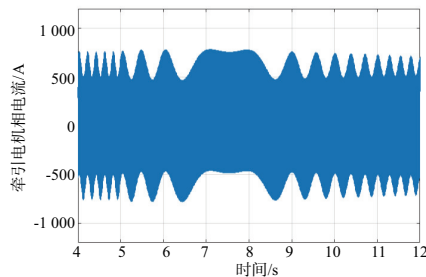


图 9 未优化的频率补偿无拍频控制的电机相电流波形

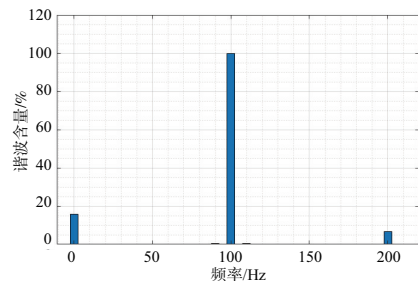


图 10 未优化的频率补偿无拍频控制的电机相电流频谱特性

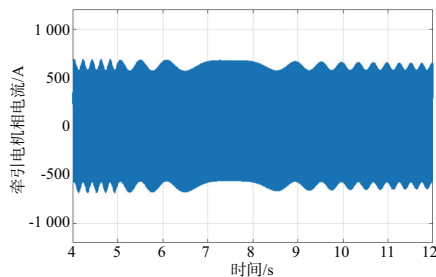


图 11 优化的频率补偿无拍频控制的电机相电流波形

### 5 结语

本文以 CRH 动车组牵引逆变器为研究对象,首先分析了拍频现象的产生原理,研究了励磁电感、励磁电阻、励磁电流等参数对拍频电流的影响,通过优化动车组逆变器频率补偿方案,解决了计算延迟问题。研究表明:1)二次脉动电压相同时,定子电阻越小,拍频电流幅值越大;2)数字控制器的工作方式会导致频率补偿系数计算产生  $\pi/3$  电角度的延迟,严重影响着基于频率补偿无拍频控制的精度;3)提出一种频率补偿方案,通过提前计算二次脉动电压  $\Delta u_{dc}$  的电角度,可以消除频率补偿系数的计算延迟,提高频率补偿系数的计算精度。

#### 参考文献:

- [1] 陈奕舟. 动车组无拍频控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [2] 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.
- [3] 黄金,陆阳,高翔. 动车组、电力机车拍频现象研究[J]. 铁道机车车辆,2013,33(3):10-12.
- [4] KLIMA J, CHOMAT M, SCHREIER L. Analytical closed-form investigation of PWM inverter induction motor drive performance under DC bus voltage pulsation [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(6):341-352.
- [5] 周明磊. 电力机车牵引电机在全速度范围的控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [6] SMITH K M, LAI Z, SMEDLEY K M. A new PWM controller with one-cycle response [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(1):142-150.
- [7] 刘勇,梅文庆,胡亮,等. 高速动车组无拍频控制方法研究[J]. 机车电传动,2020(2):48-52,57.
- [8] 徐连杰,田正山,刘瑞,等. 嵌入式开关逆变器漏电流抑制策略研究[J]. 电测与仪表,2019,56(20):97-102.
- [9] 郝振洋,甘渊,浦程,等. 隔离型离网逆变器控制策略研究[J]. 电力电子技术,2019,53(6):68-71.

收稿日期:2021-11-05