

基于Simulink模型的高频轴电流影响因素研究

陈 威

上海理工大学, 上海

收稿日期: 2022年11月16日; 录用日期: 2023年1月3日; 发布日期: 2023年1月11日

摘 要

变频调速系统产生的轴电流问题已经成为主要轴承故障, 由于轴电流的产生, 严重影响到了电驱动系统的稳定性和安全性, 因此本文通过Matlab/simulink建立轴向三段式高频轴电流预测模型, 研究SPWM控制策略中的载波频率, 基础波频率和直流母线电压对轴电流的影响, 根据仿真得到的轴电流波形, 在单位时间内, 对轴电流的发生的次数和轴电流值进行对比研究, 结果表明, 随着载波频率的增加, 在相同时间内, 轴电流产生的频率增加, 轴电流增长幅度不大, 变化平稳。因此载波频率的改变影响单位时间内轴电流产生的次数, 对于轴电流值影响不大。随着直流母线电压的升高, 轴电流波形和产生次数几乎不变, 轴电流随着母线电压的增大而增大基础波频率对于轴电流的发生次数影响不大, 随着基础波频率的增大, 产生的轴电流值几乎不变, 轴承等效电容的变化, 轴电流值不断升高, 轴电流波形变化不大。

关键词

轴电流, 载波频率, 基础波频率, 直流母线电压, 轴承等效电容, 影响因素

Research on Influencing Factors of High Frequency Axial Current Based on Simulink Model

Wei Chen

University of Shanghai for Science and Technology, shanghai

Received: Nov. 16th, 2022; accepted: Jan. 3rd, 2023; published: Jan. 11th, 2023

Abstract

The shaft current caused by the variable frequency speed regulating system has become the main bearing fault. Because of the shaft current, it seriously affects the stability and safety of the electric

drive system. The three-stage axial high frequency axial current prediction model was established by Matlab/simulink to study the influence of carrier frequency, base wave frequency and DC bus voltage on axial current in SPWM control strategy. According to the simulation waveform, the frequency of axial current occurrence and axial current value were compared in unit time. With the increase of the carrier frequency, the frequency generated by the axial current increases in the same time, and the axial current increases slightly and changes steadily. Therefore, the change of carrier frequency affects the number of axial current generation in unit time, but has little influence on axial current value. With the increase of the DC bus voltage, the axial current waveform and the frequency of generation are almost unchanged. With the increase of DC bus voltage, the waveform and number of axial currents generated are almost constant. The frequency of the fundamental waveform has little effect on the number of times the axial current occurs. With the increase of the basic wave frequency, the generated axial current value is almost unchanged, with the change of bearing equivalent capacitance, the shaft current value keeps increasing, and the shaft current waveform changes little.

Keywords

Axial Current, Carrier Frequency, Base Wave Frequency, DC Bus Voltage, Bearing Equivalent Capacitance, Influencing Factors

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 由于脉宽调频技术的广泛应用, 交流电机的快速发展, 使其成为使用最多的电机, 由于交流电机结构简单, 制造简易, 方便耐用的特点, 广泛应用到生产生活的各个方面, 而且由于交流电机具有高转速, 高转矩, 必定带来高电压和高电流, 电机多采用 IGBT 来控制脉冲, 但是 IGBT 开关时间只有几百纳秒, 导致输出端产生高频电压, 而且 SPWM 脉宽调频技术会使任意时刻的三相电压之和不为零, 将使电机产生高频共模电压, 从而产生高频轴电流, 导致电腐蚀情况出现。通过文献得出轴承电腐蚀故障占轴承总的故障 40%~50% [1], 因此, 轴承电腐蚀故障可以认为如今最常见的故障。

目前, 国内外很多学者对于高频轴电流进行了研究。严欣平[2]等人通过 JMAG-Designer 软件建立电机模型, 研究了直流母线电压和死区电压对于轴承损伤程度的研究, Chen Shaotang [3]等人根据轴电流产生的机理, 提出产生轴电流主要原因是高频共模电压和交流电机中耦合电容的存在。Park [4]等人提出将电机中各项绕组对于地和转子的等效电容平均的分布在绕组周围, 王禹[5]通过将耦合电容采用分段式的分布参数模型, 平均分为三段进行研究。任雪娇[6]通过研究发现将分布参数分成六段时, 高频共模电压产生的轴电流最为稳定。

轴电流形成原因主要包括三点:

- 1) 通过静电反应产生电流, 在电机的运转过程中, 电机内部零件会相互产生摩擦, 从而导致电荷逐渐累积, 产生静电场, 导致出现电势差, 产生静电放电现象[7]。
- 2) 电机安装制造过程中产生不稳定的电压, 导致磁路不对称, 造成电机轴周围产生磁通量, 转轴运动时, 切割磁感线产生感应电动势, 继而形成感应电流[8]。
- 3) 脉宽调频技术的应用, 绝缘栅双极型晶体管控制开关时间只有几百纳秒, 从而使得输出端产生高

频的共模电压，通过电缆传送到轴承内外滚道产生轴电压，当轴电压超过油膜阈值电压，导致轴承内外滚道间发生电火花放电，产生 EDM 型电流[9]。

而且伴随着轴电流的产生，当轴承电压超过滚珠与滚道之间的润滑油膜的阈值电压时候，高频轴承电流会进一步进行电火花放电，产生 EDM 型电流，导致轴承表面产生腐蚀坑和搓衣板状凹槽。所以本文主要以高频轴电流为研究对象，通过 Matlab/simulink 建立分布参数等效分析各个参数对于轴电流和轴电压的影响，对于今后抑制轴承电腐蚀具有深远意义。

2. 三相分布参数模型的建立

2.1. SPWM 控制策略

目前，SPWM 控制策略是一种比较成熟，应用比较广泛的 PWM 法，通过在 PWM 基础上改变调制脉冲方式，让脉冲宽度的时间占空比按照正弦的规律分布，通过将脉冲宽度按照正弦规律进行变化和正弦波等效的 PWM 波形，从而使得其输出端输出的脉冲电压的面积跟我们所希望输出的标准正弦波形的面积相等，从而可以改变调制波的频率和幅值则可调节逆变电路输出电压的频率和幅值，从而使得输出的波形更为稳定，其中基础波为三个频率为 50 Hz 的正弦波，角度两两相差 120° ，载波采用频率为 5 kHz 的三角波，建立如图 1 模型。

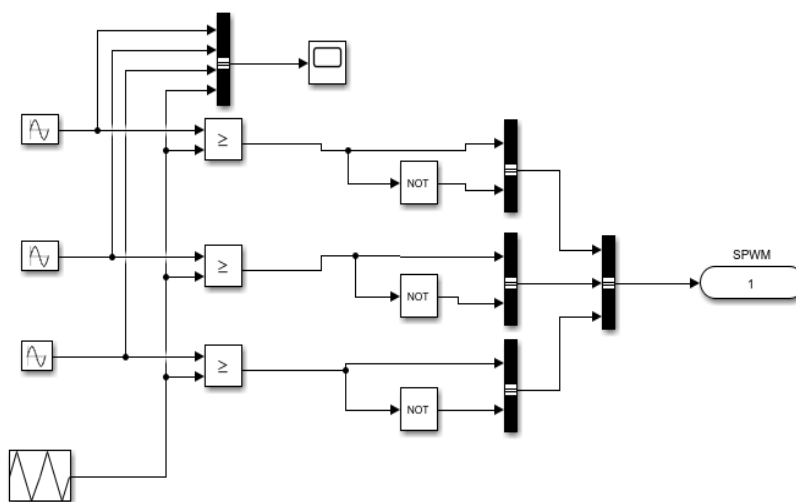


Figure 1. SPWM control policy
图 1. SPWM 控制策略

2.2. 电机耦合电容的建立

在轴向分布参数模型中，主要思路是将电机内部各个组成部分看成两两之间的组合，将其当作电容器的两个极板，大大简化了电机内部复杂的构造，通过建立电机等效电路，来清晰的研究轴电流的变化。其中电机杂散耦合电容主要包括转子与机壳之间的等效耦合电容 C_{rf} ，定子绕组与转子之间的等效耦合电容 C_{wr} ，电机定子绕组与机壳之间等效耦合电容 C_{wf} ，轴承等效电容 C_b ，电机定子绕组等效成电阻 R 与电感串联 L ，采用 DC-AC 变频器，建立模型如图 2 所示，其中三相分布参数模型主要思路是将定子绕组等效电容平均分为两部分，定子绕组与转子之间耦合电容和定子绕组与机壳之间等效电容平均分为三部分。

其中主要研究的是轴承产生的轴承高频电流，在电气方面，由于滚珠与内外滚道之间有润滑油膜进行

隔离，具有一定的绝缘性，将润滑油膜看成绝缘介质，轴承滚珠与内外滚道看成电容的两个极板，因此将轴承等效成一个电容器件。

与集中参数耦合电容分布对比可以发现，三相分布参数模型主要是将电机内部定子，定子绕组，转子之间相互耦合产生的电容按照三项均匀的分布在电机绕组周围，这样分布更符合实际生产生活的电机构造，其中电机各个部分耦合电容采用文献[10]中测量出的值如表 1。

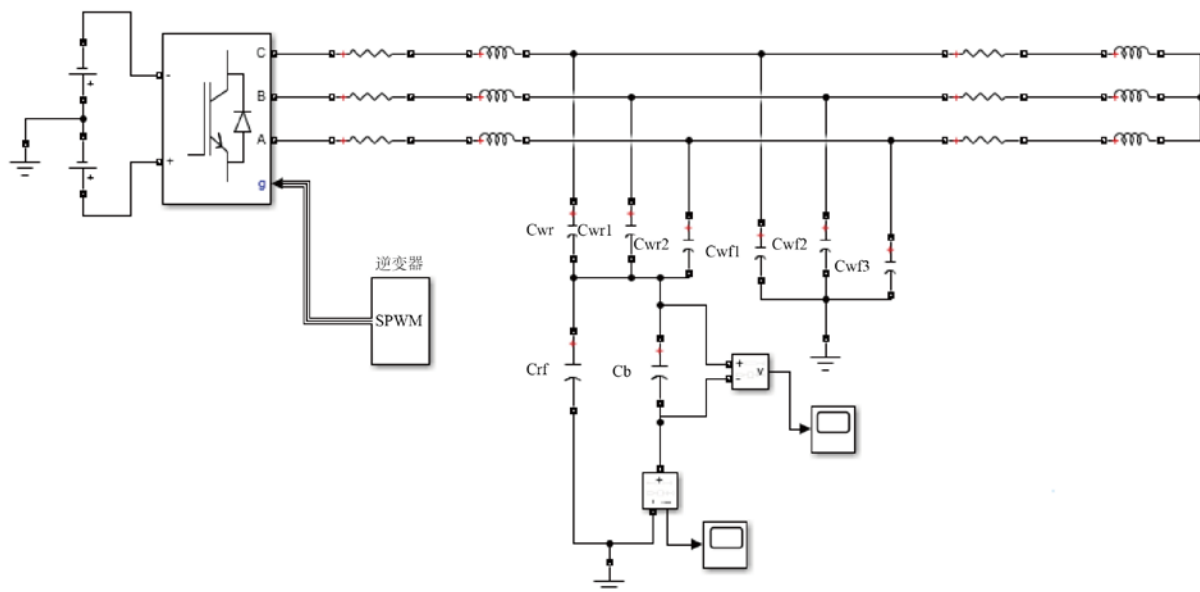


Figure 2. Simulation model of motor coupling capacitance

图 2. 电机耦合电容仿真模型

Table 1. Motor coupling capacitance parameters

表 1. 电机耦合电容参数

| 耦合电容参数 | 数值 |
|-------------|--------|
| R/ Ω | 20 |
| L/mH | 0.046 |
| Cwf/pF | 35.8 |
| Cwr/pF | 5098.4 |
| Crf/pF | 782.7 |
| Cb/pF | 120 |

2.3. 高频轴电流

其中高频轴电流产生的主要原因电机输出端共模电压的产生，从而使得轴承两端产生轴电压，是电机在运转过程中随时随地存在的电流，其电流的实质是将轴承等效成电容的充电电流，幅值不大，多数是几 mA，一般情况下，高频轴承电流对轴承损害不大，当轴承在恶劣环境下长时间运转的时候，当给轴承电容进行充电达到轴承电容的阈值的时候，轴承电容就会进行放电，往往这种情况会导致轴承润滑脂的特性得到改变，从而导致更严重的 EDM 型电流的产生，高频轴承电流产生的路径是，电流从电机绕组的输出端出发，经过定子铁心，然后流向转子，通过电机轴流向轴承，在通过轴承外圈重新

流回机壳。

3. 高频轴电流影响因素的仿真实验分析

3.1. 逆变器载波频率对轴电流影响

载波频率主要控制负载对象,通过载波频率的改变从而使得输出端输出的电流改变,当载波频率较高时候,输出的电流波形平滑,谐波很少,反之谐波很多。但是当载波频率较小时,导致电机转矩小,温度高,损耗高,保持母线电压 500 v 不变,基础波频率为 50 Hz,仿真时间为 4 ms,载波频率从 1 kHz~4 kHz 变化如图 3 所示,观察轴电流波形变化和幅值变化。

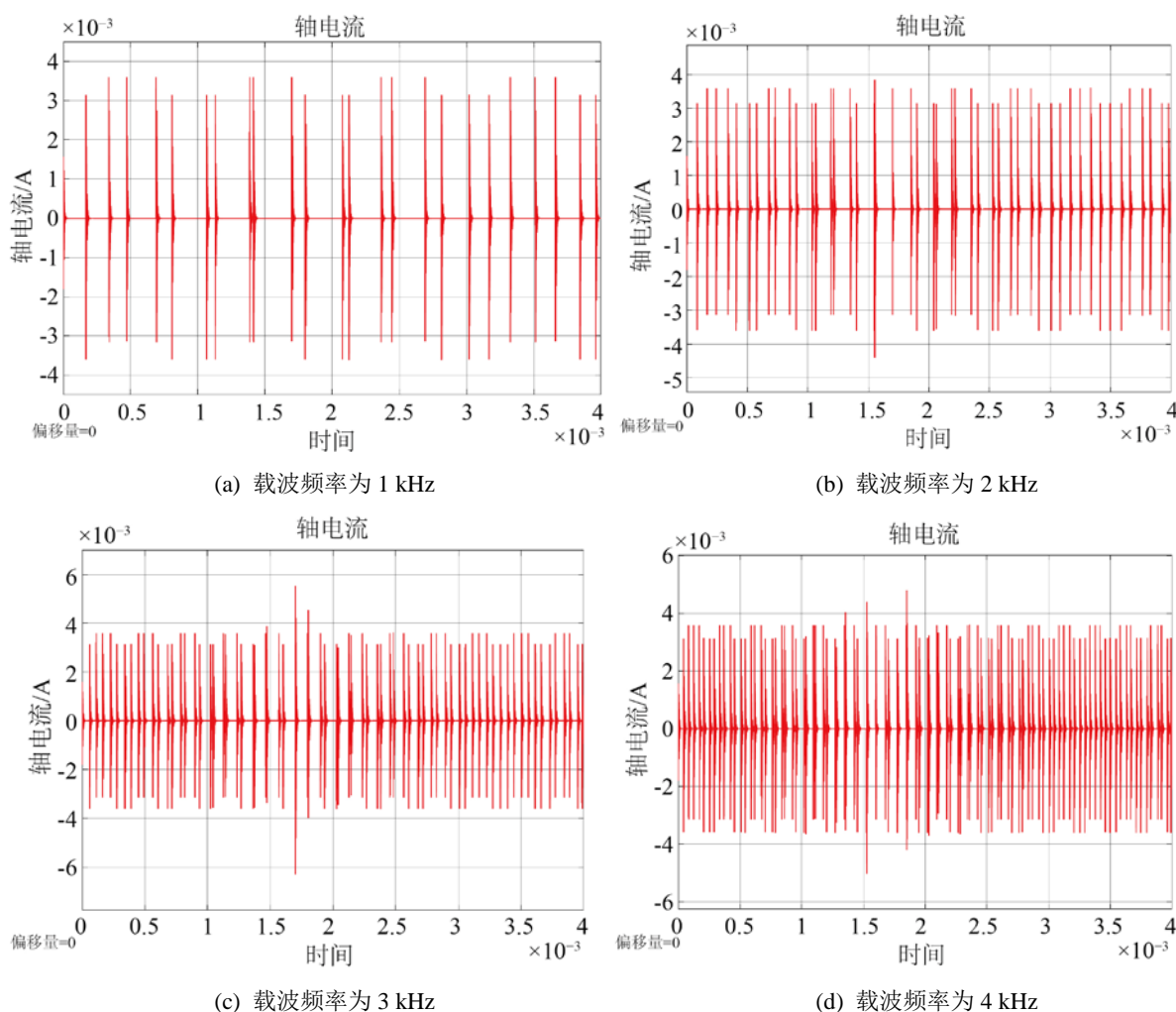


Figure 3. Influence of carrier frequency on axial current

图 3. 载波频率对于轴电流影响

根据上述仿真得到的波形,对轴电流产生的幅值进行统计得出如表 2 所示参数。

通过将逆变器载波频率从 1 kHz~4 kHz 均匀变化,根据图 3 轴电流波形可以看出,随着载波频率的增加,在相同时间内,轴电流产生的频率增加,根据表 2 可知,轴电流增长幅度不大,变化平稳。因此载波频率的改变影响单位时间内轴电流产生的次数,对于轴电流值影响不大,但是产生轴电流次数增加,

导致轴承油膜击穿概率变大，从而产生电腐蚀概率变大，所以为了减少电腐蚀产生的概率，逆变器的载波频率不宜过大。

Table 2. Axial current values at different carrier frequencies

表 2. 不同载波频率下轴电流数值

| 载波频率/kHz | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| 轴电流/mA | 3.5 | 3.6 | 3.8 | 3.9 |

3.2. 直流母线电压对轴电流影响

母线电压主要是电机中共模电压产生的主要原因之一，主要通过逆变器将直流电源转变成交流电源，从而得到质量较高，能够满足负载对于电压和频率的要求。为了能够使得高频轴电流在仿真过程中比较明显，因此保持载波频率为 4 kHz，基础波频率为 50 Hz，通过将母线电压从 200 v~800 v 变化，观察轴电流波形的变化和轴电流数值的变化如图 4 所示。

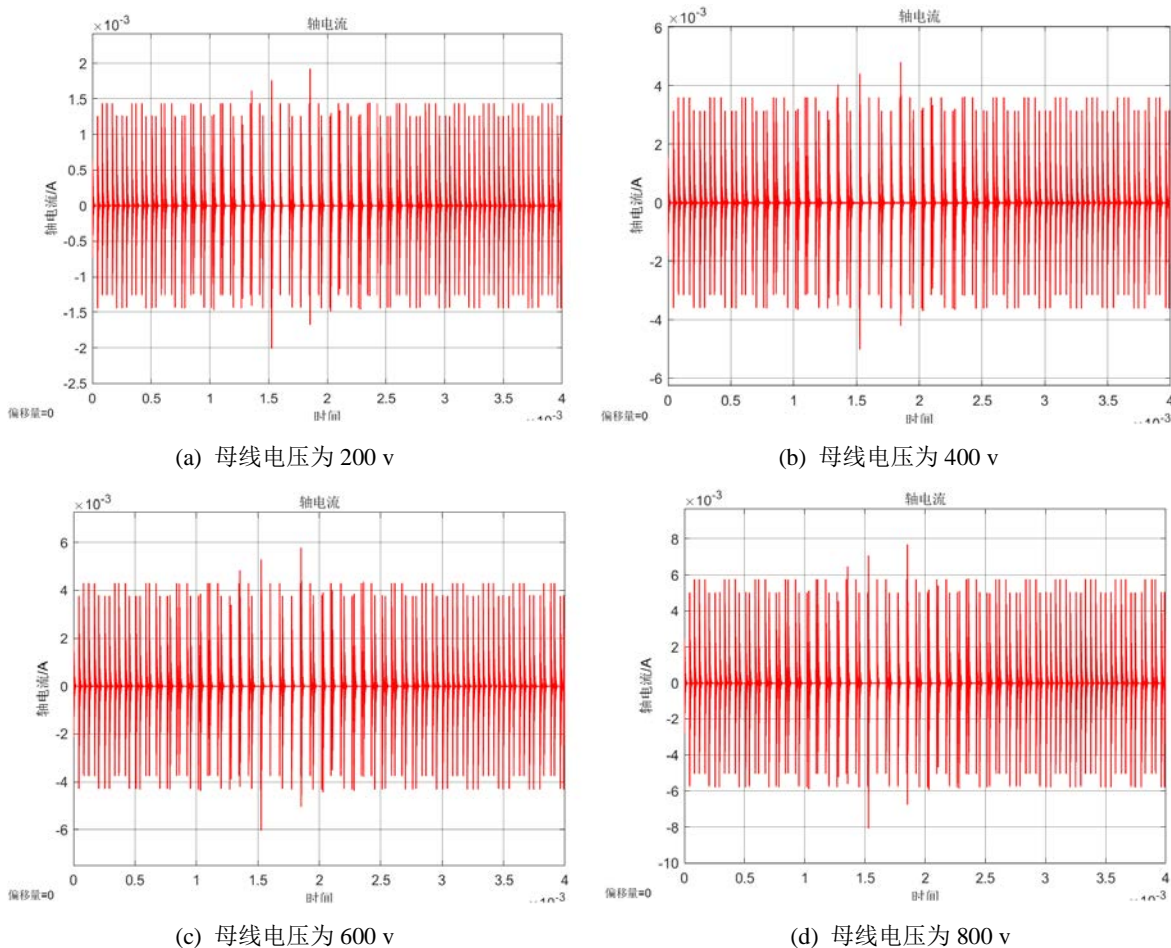


Figure 4. Influence of busbar voltage on shaft current

图 4. 母线电压对轴电流影响

根据上述仿真得到的波形，提取其中的轴电流值进行统计如表 3 所示。

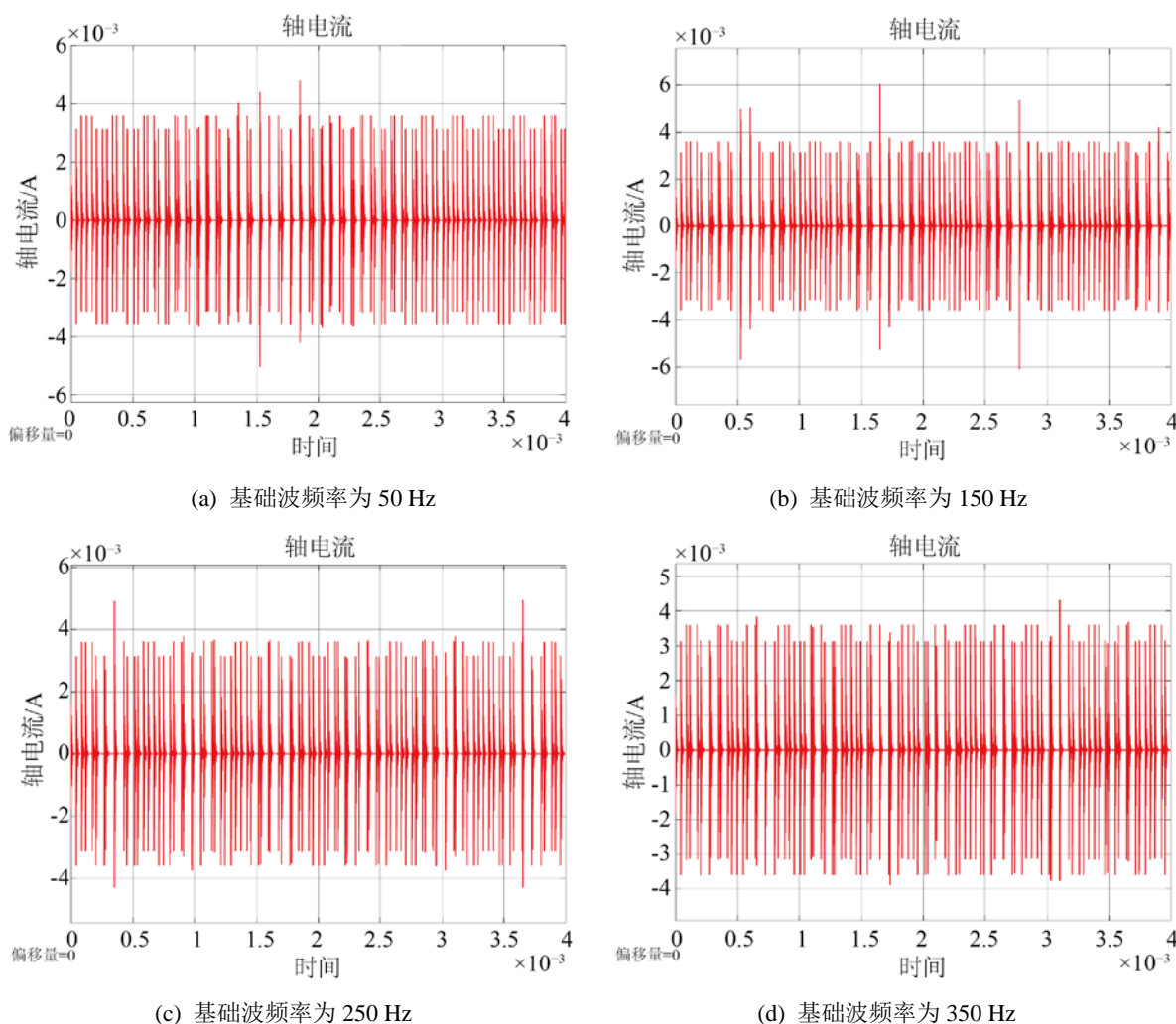
Table 3. Axial current values at different bus voltages**表 3.** 不同母线电压下轴电流数值

| 母线电压/v | 200 | 400 | 600 | 800 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 轴电流/mA | 1.4 | 3.8 | 5.8 | 7.7 |

通过将直流母线电压从 200 v~800 v 均匀变化, 根据仿真得到图 4 波形可以看出, 轴电流产生的过程中有正有负, 这是由于电机实际运转主要通过正负扭矩来驱动转动, 在单位时间内, 随着直流母线电压的升高, 轴电流波形和产生次数几乎不变, 但是通过通知不同母线电压下的轴电流的值可以发现, 轴电流随着母线电压的增大而增大, 较高母线电压下, 轴承发生电腐蚀的可能性变大。

3.3. 逆变器基础波频率对轴电流影响

基础波主要控制电机转速, 其中保持母线电压为 500 v, 载波频率为 4 kHz, 将基础波频率从 50 Hz 到 200 Hz 变化, 得到仿真轴电流波形如图 5 所示, 根据仿真得出轴电流的值如表 4 所示。

**Figure 5.** Influence of base wave frequency on axial current**图 5.** 基础波频率对轴电流影响

根据上述仿真得到的波形，提取其中的轴电流值进行统计如表 4 所示。

Table 4. Axial current values at different base wave frequencies
表 4. 不同基础波频率下轴电流数值

| 基础波频率/Hz | 50 | 150 | 250 | 350 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| 轴电流/mA | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.9 |

通过将基础波频率从 50 Hz~350 Hz 进行变化，根据图 5 仿真得出的轴电流波形可以看出基础波频率对于轴电流的发生次数影响不大，随着基础波频率的增大，产生的轴电流值几乎不变，可以看出基础波对于轴电流的影响较小。

3.4. 轴承等效电容对轴电流影响

由于轴承在运转过程中，滚珠与内外滚道之间的油膜厚度不断变化，从而导致轴承电容不断变化，当电机运行速度一定时，轴承等效电容随着温度的升高而逐渐变大，当外界温度不变时，随着转速的增大而增大，当转速大到一定程度时，轴承等效电容会逐渐变小。将轴承等效电容进行变化带入仿真模型来观察变化如图 6 所示。

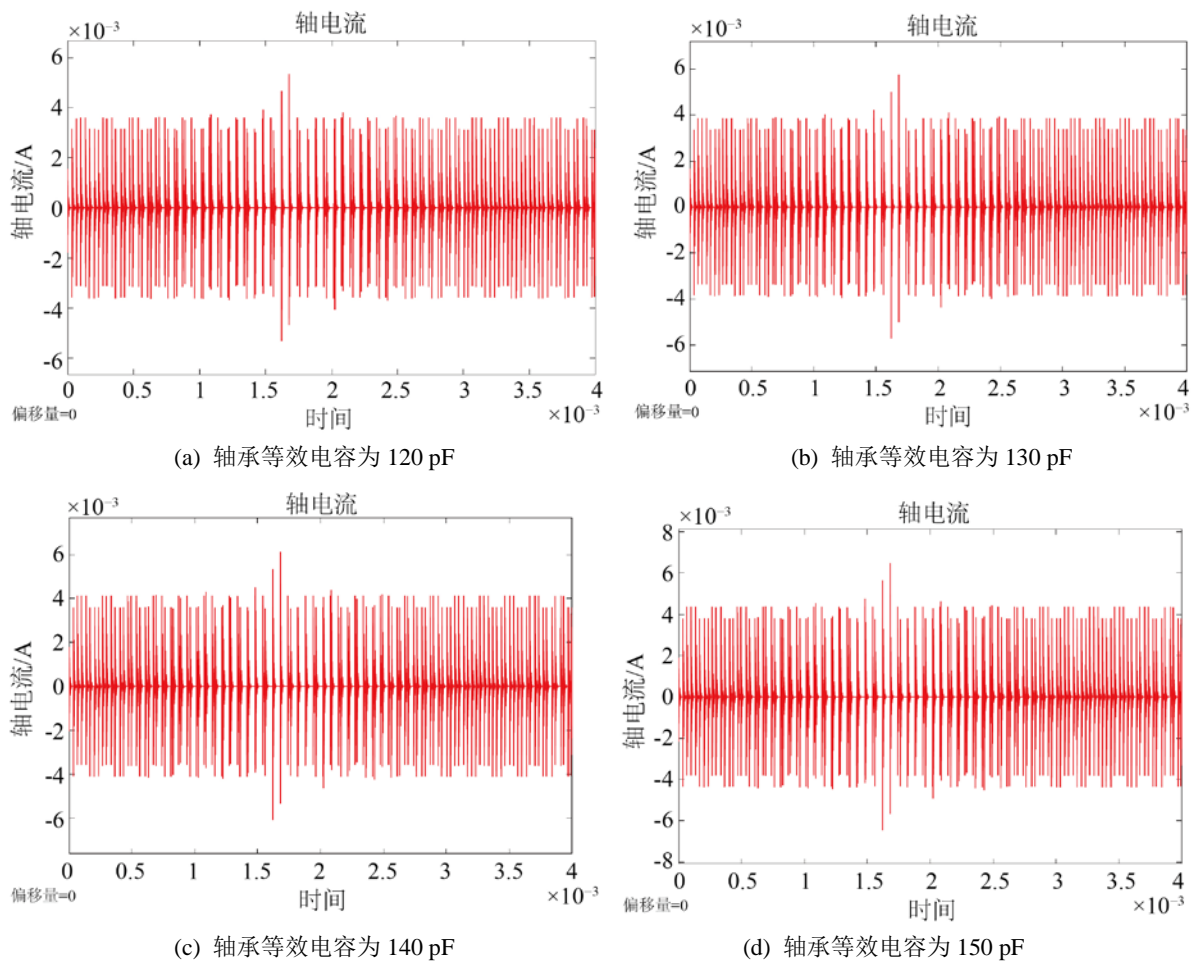


Figure 6. Effect of bearing equivalent capacitance on shaft current
图 6. 轴承等效电容对轴电流的影响

通过对上述改变轴承等效电容得到的轴电流仿真波形的轴电流值进行提取如表 5 所示。

Table 5. Shaft current value under different bearing equivalent capacitance

表 5. 不同轴承等效电容下轴电流值

| | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 轴承等效电容/pF | 120 | 130 | 140 | 150 |
| 轴电流/mA | 3.8 | 3.9 | 4.1 | 4.3 |

根据上述仿真得到的波形进行分析可以发现,随着轴承等效电容的变化,轴电流值不断升高,轴电流波形变化不大,因此,轴承等效电容对轴电流的值影响较大,根据之前轴承等效电容随温度的增大而增大,随转速增大而增大,我们应该避免轴承在高温、高转速下运行过长时间,防止润滑油膜被击穿,产生电腐蚀坑。

4. 结论

本文主要通过 Matlab/simulink 建立轴向三段分布高频轴电流预测模型,将电机各个部分看成耦合电容,改变 SPWM 的载波频率,基础波频率和直流母线电压,来研究其轴电流的波形影响和轴电流值的影响,得出如下结论:

- 1) 载波频率的改变影响输出端共模电压,从而使轴电流变化,在相同时间内,随着载波频率的增加,轴电流产生的次数增加,轴电流增长幅度不大,变化平稳。
- 2) 直流母线电压是整流滤波后输出的电压,通过逆变器从而使共模电压改变,改变输出轴电流的改变,在单位时间内,随着直流母线电压的升高,轴电流波形和产生次数几乎不变,轴电流随着母线电压的增大而增大。
- 3) 改变 SPWM 的基础波频率得到的仿真波形可知,基础波频率对于轴电流的发生次数影响不大,随着基础波频率的增大,产生的轴电流值几乎不变,可以看出基础波对于轴电流的影响较小。
- 4) 轴承等效电容在电机运作的各个时刻是变化的,主要由于油膜厚度的改变,从而改变其值,从而使轴承等效电容两端电流变化,轴承等效电容的变化对于轴电流在单位时间内发生的次数影响不大,但对于轴电流的值影响大。

参考文献

- [1] 郑海波. 风电机组振动监测案例分析[J]. 风能, 2014(7): 88-92.
- [2] 艾波, 严欣平, 黄嵩, 胡光伟, 刘涛. SPWM 逆变器共模电压研究[J]. 微电机, 2014, 47(10): 47-50+57.
- [3] Chen, S. and Lipo, T.A. (1996) Modelling of Motor Bearing Currents in PWM Inverter Drives. *IEEE Trans Industry Applications*, **32**, 1365-1370. <https://doi.org/10.1109/28.556640>
- [4] Park, J.-K., Wellawatta, T. and Randima, U. (2015) New Equivalent Circuit of the IPM-Type BLDC Motor for Calculation of Shaft Voltage by Considering Electric and Magnetic Fields. 2015 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, 20-24 September 2015, 1872-1877. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7309923>
- [5] 王禹, 白保东, 刘威峰, 等. 分布参数共模等效电路关键参数确定及轴承电流计算[J]. 电工技术学报, 2014(S1): 124-131.
- [6] 任雪娇. 交流电机高频轴电流模型及轴承放电击穿机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [7] 任旭彬. 地铁车辆电机牵引系统故障及应对研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(17): 4349.
- [8] Ong, R. (1999) An Investigation of Shaft Current in a Large Sleeve Bearing Induction Machine. Doctoral's Thesis. McMaster University, Hamilton.
- [9] Chen, S., Lipo, T.A. and Fitzgerald, D. (1996) Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **11**, 25-32. <https://doi.org/10.1109/60.486572>
- [10] 桑秉谦. 变频供电交流电机轴电流的分析与测量[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2016.