

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.023

负载振动与气隙偏心下电机电流调制机理分析*

孙 昱 谷立臣

(西安建筑科技大学 西安 710055)

摘 要:分别分析了感应电机负载转矩振动和气隙偏心对定子电流的调制机理,同时针对转矩振动频率与电机转子转频一致时,两者对定子电流调制结果在频域上难以区分开的特点,利用 Wigner 时频域分析方法,计算了负载转矩振动和气隙偏心时电流边频分量的相位差,指出二者时频分布特征的区别,为有效、准确地进行电机气隙偏心故障诊断提供理论依据。

关键词:电机;定子电流;负载转矩振动;气隙偏心;Wigner 时频分析

中图分类号: TM307; TN06 **文献标识码:** J **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Stator current modulation mechanism analysis of induction motor under load torque vibration and gap eccentricity

Sun Yu Gu Lichen

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The modulation on stator current signal of induction motor under the situation of load torque vibration and gap eccentricity is analyzed respectively. In view of that the modulation results in these two cases are difficult to be distinguished in frequency domain while the vibration frequency and rotor frequency are consistent, the Wigner time-frequency domain analysis method is used to calculate the phase difference of side-frequency current. The work in this paper points out the difference of modulation effects between load torque vibration and gap eccentricity in time-frequency domain, which provides theoretical basis for motor air-gap eccentric fault diagnosis.

Keywords: induction motor; stator current; load torque vibration; gap eccentricity; Wigner time-frequency domain analysis

1 引 言

气隙偏心是感应电机常发故障之一,气隙偏心发生后,电机轻则性能指标劣化,重则烧毁,需要即时对偏心故障进行有效、准确地诊断,因此电机气隙偏心故障诊断方法一直受到国内外学者的普遍关注^[1]。此外,随着电力拖动设备的大型化,工况复杂化,在实际应用与实验中发现,负载特性的变化对与偏心相关的谐波电流幅值造成影响^[2],从而使电机偏心故障的诊断出现失误和误差。

在电机气隙偏心故障诊断方法的研究中,定子电流检测方法以其获取方式简单、干扰小等优点作为主要的故障诊断手段被广泛使用,Cameron 等人^[3,4]利用磁动势

和磁导波方法推导出在基本偏心类别下,定子绕组电流中会形成特定的故障频率,为基于电流的检测研究奠定了基础;在之后的研究中,利用交流电机多回路理论^[5-8]及有限元法^[9-11]通过对不同偏心模式的机理建模或磁场饱和、槽效应分析,研究偏心故障时电流信号的频谱规律;Joksimovic' 等人^[12]在前述基础上发现偏心故障可描述为 $f_s \pm f_r$ (其中 f_s 为工作频率, f_r 为转频)。上述基于电流的气隙偏心诊断方法研究中,重点以考虑气隙偏心模式及电机结构所产生的信号特征为主,忽视了诊断过程中负载变化对电机电流信号的影响,从而制约了诊断方法的实际应用效果。

本文对负载转矩振动和气隙偏心所引起的电流变化机理进行分析,分别讨论了两种情况下定子电流的分布

规律,并利用 Wigner 时频分布算法 (WTF) 对电机的电流信号进行时频分析,计算了边频分量的相位差,并提取了定子电流的时频特征,为基于电流的气隙偏心诊断方法提供了理论依据。

2 电机电流机理分析

2.1 负载转矩振动对电机电流影响

当负载转矩发生振动时,可被定义为稳态转矩 T_c 与暂态转矩 T_0 之和,忽略暂态转矩振动频率成分中的高次项,仅考虑基波情况,其频率记为 f_0 ,则负载转矩可表示为:

$$T_L = T_c + T_0 \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

则电机转速 ω_r 可表示为:

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int (T_E(t) - T_L(t)) dt \quad (2)$$

式中: T_E 为电磁转矩,电机稳态运行时, $T_E = T_c$ 。

$$\omega_r(t) = -\frac{T_0}{2\pi f_0 J} \sin(2\pi f_0 t) + \omega_{rc} \quad (3)$$

由式(3)可知,电机转速为暂态转速与稳态转速 ω_{rc} 之和,可得出转子、定子磁动势间的电角度为:

$$\theta_{rs}(t) = \int \omega_r(t) dt = -\frac{T_0}{4\pi^2 f_0^2 J} \cos(2\pi f_0 t) + \omega_{rc} t \quad (4)$$

由式(4)可知,当无负载振动时,电机 $\theta_{rs}(t) = \omega_{rc} t$,而在发生振动情况下,会对电机电角度产生影响,从而使转子磁动势发生变化。在一般情况下(图1),转子磁动势在转子坐标系下可表示为:

$$F_r^R(\theta', t) = F_r \cos(2\pi f_s t - p\theta') \quad (5)$$

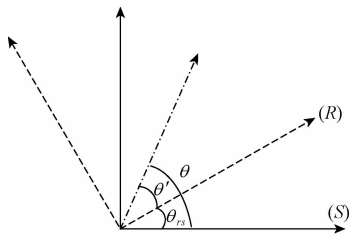


图1 定子、转子坐标系

Fig.1 Coordinate system of stator (S) and rotor (R)

式中: p 为极对数, s 为转差率。则转子磁动势在定子坐标下可表示为:

$$F_r(\theta, t) = F_r \cos[2\pi f_s t - p\theta + A \cos(2\pi f_0 t)] \quad (6)$$

式中: $A = p \frac{T_0}{J4\pi^2 f_0^2}$ 。从式(6)中可知,振动频率 f_0 对转子磁动势的相位产生调制作用;而暂态转矩 T_0 一般较小,则 $A \ll 1$ 。在负载振动过程中,不考虑气隙处磁场的变化。则定子磁动势可表示为:

$$F_s(\theta, t) = F_s \cos(2\pi f_s t - p\theta + \phi) \quad (7)$$

式中: ϕ 为定子与转子间初始相位角。

通过式(6)、(7)可求得,气隙处磁场强度为:

$$B(\theta, t) = \Lambda [F_s(\theta, t) + F_r(\theta, t)] \quad (8)$$

式中: Λ 为磁导。

因此,气隙中任意相位处的磁通量可表示为:

$$\Phi(t) = \Phi_s \cos(2\pi f_s t + \phi) + \Phi_r \cos[2\pi f_s t + A \cos(2\pi f_0 t)] \quad (9)$$

为求得定子电流,对式(9)进行求导,得:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = -2\pi f_s \Phi_s \sin(2\pi f_s t + \phi) - 2\pi f_s \Phi_r \sin[2\pi f_s t + A \cos(2\pi f_0 t)] \quad (10)$$

电机定子回路方程为:

$$V(t) = R_s I(t) + \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (11)$$

式中: $V(t)$ 为电源电压;将式(10)代入式(11)得定子电流为:

$$I_{pm}(t) = i_{st}(t) + i_{rt}(t) = I_{st} \sin(2\pi f_s t + \phi) + I_{rt} \sin[2\pi f_s t + A \cos(2\pi f_0 t)] \quad (12)$$

如式(12)所示, i_{st} 、 i_{rt} 分别为非调制信号与调制信号, I_{st} 和 I_{rt} 分别为电机定子和转子磁场产生的定子电流分量,由此可见当负载转矩振动时,其振动频率的大小将对转子磁场产生的电流相位产生影响,当负载平稳无振动时 $A = 0$ 。

对 $I_{pm}(t)$ 进行傅里叶—贝塞尔变换,并忽略其二阶及高阶项,得到其幅值表达式^[13]:

$$|I_{pm}(f)| = [I_{st} + I_{rt} J_0(A)] \delta(f - f_s) + I_{rt} J_1(A) \delta[f - (f_s \pm f_0)] \quad (13)$$

式中: J_0 、 J_1 分别是0,1阶 Bessel 函数, $\delta(f)$ 为狄拉克函数。

从式(13)可知,当电机驱动负载由于某种原因振动时,根据振动程度的不同,不仅会影响电机定子电流的基频幅值,且边频分量亦与负载振动频率相关,为 $(f_s \pm f_0)$ 。

2.2 气隙偏心对电机电流影响

同时考虑静态偏心和动态偏心,以定、转子气隙最小方向为 X 轴方向(图2),则径向气隙长度计算如式(14)。

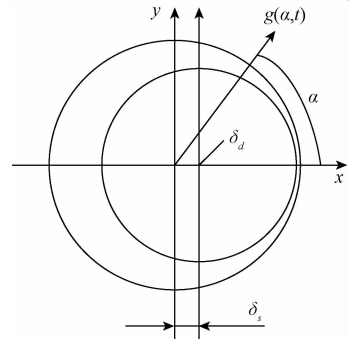


图2 电机气隙偏心

Fig.2 Gap eccentricity of motor

$$g(\alpha, t) = g_0 [1 - \delta_s \cos \alpha - \delta_d \cos(2\pi f_r t - \alpha)] \quad (14)$$

式中: g_0 为平均气隙, δ_s 为相对静偏心值, δ_d 为相对动偏心值, α 为用于标定气隙圆周位置的机械角度。

气隙处磁导 $\Lambda(\alpha, t)$ 与径向气隙长度成反比, 可表示为 $\Lambda(\alpha, t) = \mu/g(\alpha, t)$, 其中 μ 为磁导率。气隙偏心较小, 忽略高次项, 通过傅里叶变化将气隙磁导展开为

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 - \Lambda_s \cos \alpha - \Lambda_d \cos(2\pi f_r t - \alpha) \quad (15)$$

其总体磁动势为:

$$F_i(\alpha, t) = F_0 \cos(2\pi f_s t + \phi - p\alpha) \quad (16)$$

从而可得气隙处磁场强度为:

$$B_i(\alpha, t) = F_i(\alpha, t) \Lambda(\alpha, t) = F_0 \cos(2\pi f_s t + \phi - p\alpha)$$

$$[\Lambda_0 - \Lambda_s \cos \alpha - \Lambda_d \cos(2\pi f_r t - \alpha)] \quad (17)$$

气隙偏心时电机电流可表示为:

$$I_{am}(t) =$$

$$I_0 [1 - \cos \alpha - \cos(2\pi f_r t - \alpha)] \sin(2\pi f_s t + \phi) \quad (18)$$

式中: I_0 为基波分量幅值。

从式(18)可以看出, 气隙偏心时, 任意位置处的定子电流, 其幅值大小决定于 f_r 和 α , 从而形成对定子电流幅值的调制。

对 $I_{am}(t)$ 进行傅里叶变换, 并忽略其高阶项, 得到其幅值表达式为:

$$|I_{am}(f)| = I_0 (1 - \cos \alpha) \delta(f - f_s) + \frac{1}{2} I_0 (\sin \alpha + \cos \alpha) \delta[f - (f_s \pm f_r)] \quad (19)$$

从式(19)知, 在发生气隙偏心时, 定子电流基频幅值不变, 边频分量分布与转子转频相关, 为 $f_s \pm f_r$, 当 $f_0 = f_r$ 时, 与负载振动情况下边频分量频率分布一致, 在频域内两种状态无法有效区分。

3 电机定子电流的 Wigner 时频分析

对负载转矩振动及气隙偏心对定子电流影响的机理可以看出, 单一从频率角度出发, 可能无法准确分辨偏心故障, 将负载的振动效应判别为电机气隙偏心故障, 从而导致误判。从上述电流机理研究, 可知负载振动时, 会对电机定子电流产生调相作用, 气隙偏心时, 会对电机定子电流产生调幅作用, 为了进一步分析其特征, 本文通过 Wigner 时频分布算法对两种信号进行分析, Wigner 分布可由下式表示^[14-15]:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (20)$$

式中: x^* 为 x 的共轭信号。

从式(20)可知, Wigner 分布算法是对核函数 $K(t, \tau) = x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2})$ 进行傅里叶变换。

对负载振动引起的电流信号 i_{pm} 式(12), 进行 Wigner 分析, i_{pm} 核函数为:

$$K_{i_{pm}}(t, \tau) = i_{pm}(t + \frac{\tau}{2}) i_{pm}^*(t - \frac{\tau}{2}) = I_{st}^2 \exp j 2\pi f_s \tau + I_{rn}^2 \exp j [2\pi f_s \tau - 2A \sin(2\pi f_0 \tau) \sin(\pi f_0 \tau)] + C(i_{st} i_{rn}) \quad (21)$$

式中: $C(i_{st} i_{rn})$ 为 i_{st} 与 i_{rn} 的交叉项, 因其值较小, 可忽略不计。则 Wigner 分布式为:

$$W_{i_{pm}}(t, f) \approx FT_{\tau \rightarrow f} \{K_{i_{pm}}(t, \tau)\} = (I_{rn}^2 + I_{st}^2) \delta(f - f_s) - I_{rn}^2 A \sin(2\pi f_0 t) \delta(f - f_s - \frac{f_0}{2}) + I_{rn}^2 A \sin(2\pi f_0 t) \delta(f - f_s + \frac{f_0}{2}) \quad (22)$$

此时 Wigner 分布中存在 $f_s + \frac{f_0}{2}$ 和 $f_s - \frac{f_0}{2}$ 两个边频分量, 且其幅值以 f_0 为频率随时间变化。同一时刻, 下边频分量与上边频分量异号, 即二边频分量间相移 180° 。

将电机气隙偏心电流信号 i_{am} 式(19), 进行 Wigner 分析, i_{am} 核函数为:

$$K_{i_{am}}(t, \tau) = i_{am}(t + \frac{\tau}{2}) i_{am}^*(t - \frac{\tau}{2}) = I_0^2 (1 - \cos \alpha)^2 \exp j 2\pi f_s \tau - I_0^2 (1 - \cos \alpha) \exp j (2\pi f_s \tau - 2\pi f_r t - \pi f_r \tau - \alpha) - I_0^2 (1 - \cos \alpha) \exp j (2\pi f_s \tau - 2\pi f_r t - \pi f_r \tau - \alpha) + I_0^2 \exp j (2\pi f_s \tau + 2\pi f_r t) \quad (23)$$

则 Wigner 分布式为:

$$W_{i_{am}}(t, f) \approx FT_{\tau \rightarrow f} \{K_{i_{am}}(t, \tau)\} = I_0^2 (1 - \cos \alpha)^2 \delta(f - f_s) + I_0^2 (1 - \cos \alpha) \delta(f - f_s \pm \frac{f_r}{2}) + \text{Re}(f_s, f_r) \quad (24)$$

忽略交叉项 Re , 此时 WD 分布中存在 $f_s \pm f_r/2$, 同一时刻, 下边频分量与上边频分量同号, 即二边频分量同相。

可见, 通过 Wigner 时频分析方法所提取的电流时频特征值, 可有效区分负载振动和电机气隙偏心在定子电流中的不同, 为电机气隙偏心的准确检测提供理论依据和方法。

4 实验及分析

4.1 实验方案

实验室环境下, 以型号 YVP100L1-50-B 电机及 CBK1004-AIFL 齿轮泵所组成的液压系统动力单元为实验对象, 其中齿轮泵因某种故障, 可在压力 10 MPa 及以下稳定工作, 同时使得电机负载转矩发生频率为 $f_r \approx 25$ Hz 的振动; 并通过一同型号轴承磨损电机对气隙偏心

故障进行实验。

电机基本参数:其额定功率 $P_N = 2.2 \text{ kW}$;额定频率 50 Hz ;额定电压为 380 V ,额定电流 $I_N = 5 \text{ A}$;转动惯量 $J_N = 0.02 \text{ kg/m}^2$;额定转速 $n_N = 1460 \text{ r/min}$ 。齿轮泵基本参数为额定压力 $P_N = 25 \text{ Mpa}$;额定转速 $n_N = 3500 \text{ r/min}$ 。

将两台电机分别与齿轮泵组成的动力单元,转速恒定为电机额定转速,在压力 10 MPa 下恒压运行,采集定子电流信号(图3)。

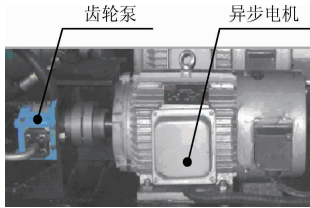
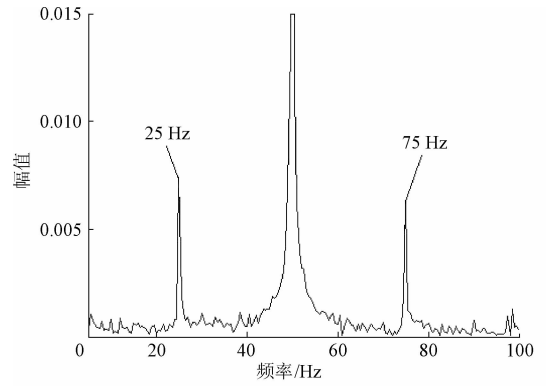


图3 实验装置
Fig.3 Experimental device

4.2 实验结果及分析

图4所示,为 10 MPa 压力时,负载转矩振动与电机气隙偏心的电流频谱分析,可见两种情况下,电流信号的特征频率都为 $f_s \pm f_r$,无法分辨。当两种信号同时存在时,其幅值进行叠加,而频率没有发生改变。

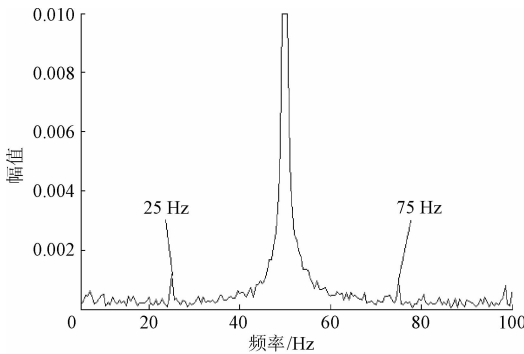


(c) 负载转矩振动与气隙偏心同时存在
(c) Load torque vibration and gap eccentricity existed at the same time

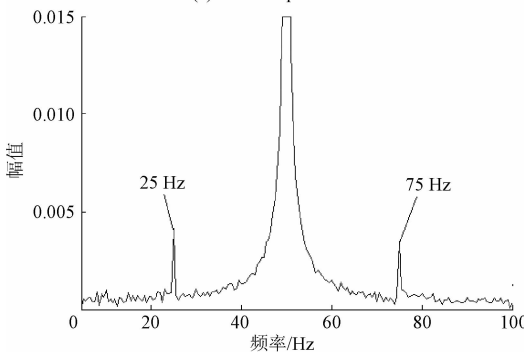
图4 10 MPa 定子电流信号频谱

Fig.4 Spectrum of stator current signal under 10 MPa

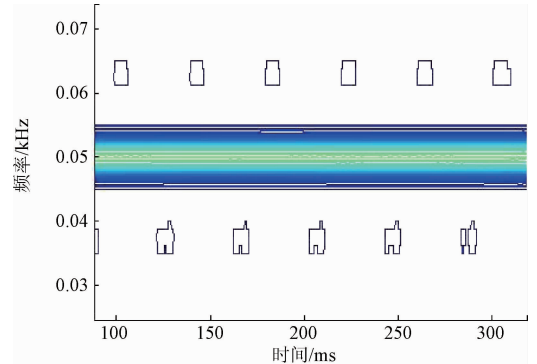
以压力 10 Mpa 时的振动信号与气隙偏心信号进行对比,两种电流信号的WD分布如图5所示,在时频图内,中间为主频带,上、下分别为两个边频带,由图5(a)可以看到,当负载发生振动时,上下边频带交错出现,相位互差 180° 。气隙偏心故障时(图5(b))上下边频带同时出现,为同相。



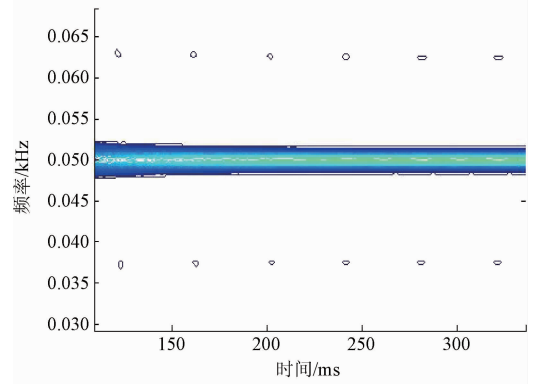
(a) 负载转矩振动
(a) Load torque vibration



(b) 气隙偏心
(b) Gap eccentricity



(a) 负载转矩振动
(a) Load torque vibration



(b) 气隙偏心
(b) Gap eccentricity

图5 10 Mpa 下定子电流信号WD时频图

Fig.5 WD time-frequency diagrams of stator current signal under 10 MPa

为了进一步研究边频分量的相位分布情况,将 WD 分析结果中的上、下边频分量放入复平面中,如图 6 所示,图中“*”代表上边频分量,“。”代表下边频分量,可以看出,若是负载振动时,其变频分量上下频带分别分布在正、负两个平面内靠近横轴的位置,相位差 180°,气隙偏心故障上下边频带基本分布在负平面内靠近横轴的地方,其相位差约为 0°。

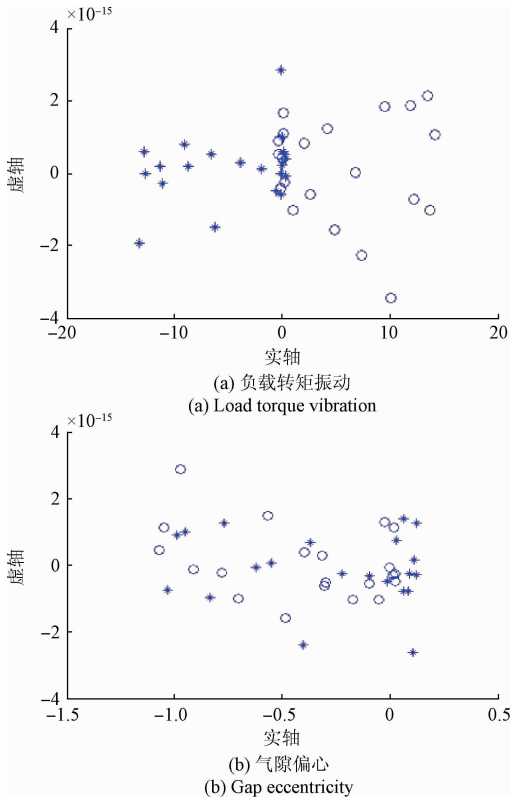


图 6 10 Mpa 下特征分量复平面分布
Fig. 6 The distribution of characteristic components in complex plane under 10 MPa

如图 7 所示,当负载转矩振动与气隙偏心同时存在时,其上、下边频分量依然发生相位偏移,且相位差依然为 180°。因此,当 $f_0 = f_r$ 时,电机偏心故障信号边频分量的相位差若为 180°,则定子电流信号中混入了负载转矩振动信号。

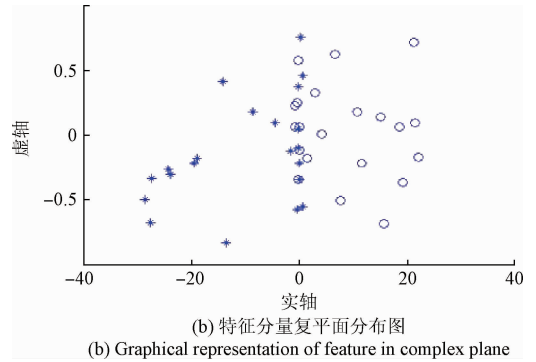
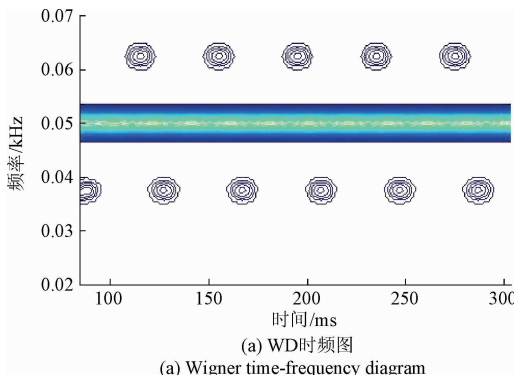


图 7 10 Mpa 下负载转矩振动与气隙偏心并存情况
Fig. 7 Load torque vibration and gap eccentricity existed at the same time under 10 MPa

5 总 结

本文分析了感应电机负载转矩振动和气隙偏心对定子电流的调制机理,基于 Wigner 时频分布算法分析了电机定子电流信号时频分布特征,结论如下:

- 1) 负载转矩振动与电机偏心故障均会对电机定子电流产生影响,负载转矩振动对定子电流调相,气隙偏心对定子电流调幅;
- 2) 负载转矩振动时电机定子电流的频谱特征为 $(f_s \pm f_0)$, 当 $f_0 = f_r$, 即负载振动频率与转子转频相等时,负载转矩振动与电机偏心故障的频谱特征会产生混淆,对气隙偏心故障诊断带来误差;
- 3) 通过 Wigner 时频分布算法对电机定子电流的分析,得出其上、下边频分量的相位差在负载转矩振动时为 180°,在气隙偏心故障时为同相,可以有效区分负载转矩振动对气隙偏心故障诊断的影响,为有效、准确地进行电机气隙偏心故障诊断提供理论依据。

参考文献

[1] 鲍晓华,吕强. 感应电机气隙偏心故障研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(6) :93-100,14. BAO X H, LV Q. Review and prospect of air-gap eccentricity faults in induction machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(6) :93-100,14.

[2] DORRELL D G, THOMSON W T, ROACH S. Analysis of airgap flux current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1) :24-34.

[3] CAMERON J R, THOMSON W T, DOW A B. Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors[J]. IEEE Proceedings B, Electric Power Applications, 1986, 133(3) :155-163.

- [4] CAMERON J R. Vibration and current monitoring for on-line detection of airgap eccentricity in induction motors [D]. Aberdeen: Robert Gordon University, 1987.
- [5] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
GAO J D, Wang X H, Li F H. Analysis of AC machines and their Systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [6] 胡文彪, 夏立, 向东阳, 等. 基于逆变器直流侧电流的异步电机转子断条和偏心混合故障诊断 [J]. 电机与控制应用, 2010, 37(9): 57-61.
HU W B, XIA L, XIANG D Y, et al. Diagnosis of broken bars and eccentricities faults in asynchronous motors based on DC-side current of DC-AC converts [J]. Electric Machines and Control Application, 2010, 37(9): 57-61.
- [7] GRIEGER J, SUPANGAT R, ERTUGRUL N, et al. Induction motor static eccentricity severity estimation using evidence theory [C]. IEEE International Conference on Electric Machines & Drives, 2007: 190-195.
- [8] 肖丽, 范书瑞, 刘卫朋, 等. 基于电流分析的四相开关磁阻电机气隙偏心故障综合检测方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 122-132.
XIAO L, FAN Sh R, LIU W P, et al. Fault detection method of air gap eccentricity for switched reluctance motors based on analysis of current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 122-132.
- [9] LI X D, WU Q, NANDI S. Performance analysis of a three-phase induction machine with inclined static eccentricity [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2): 531-541.
- [10] 鲍晓华, 李福英, 方勇, 等. 大型潜水电机混合偏心时转子副临界振动的研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 142-149.
BAO X H, LI F Y, FANG Y, et al. Sub-critical speed vibration of rotors for largesubmersible motors with mixed eccentricity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 142-149.
- [11] FAIZ J, EBRAHIMI B M, AKIN B, et al. Finite-element transient analysis of induction motors under mixed eccentricity fault [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(1): 66-74.
- [12] JOKSIMOVIC G M, DUROVIC M D, PENMAN J, et al. Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines—winding function approach [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(2): 143-148.
- [13] BLODT M, CHABERT M, REGNIER J, et al. Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(6): 1454-1463.
- [14] 梁华东, 韩江洪. 基于维格纳分布特征的雷达信号分选 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 218-225.
LIANG H D, HAN J H. Sorting radar signal based on Wigner-Ville distribution features [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2): 218-225.
- [15] 王霄. 基于时频分析的线性调频信号检测 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1245-1246 + 1258.
WANG X. Detection of LFM signals based on time-frequency analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1245-1246, 1258.

作者简介



孙昱, 1986 年出生, 2008 年于西安建筑科技大学获得学士学位, 2012 年于西安建筑科技大学获得硕士学位, 现为西安建筑科技大学讲师、在读博士, 主要研究方向为机电一体化研究。

E-mail: s343574357@126.com

Sun Yu was born in 1986, received B. Sc. and M. Sc. both from Xi'an University of Architecture and Technology in 2008 and 2012, respectively. He is a lecturer and Ph. D. candidate in Xi'an University of Architecture and Technology now. His main research interest is electromechanical integration technology.