

文章编号:1000-582X(2005)01-0049-04

# 基于 MCSA 的异步电动机状态监测与故障诊断综述\*

周 锋,王明渝,杜彦巍  
(重庆大学电气工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**异步电动机的典型故障包括轴承故障、转子气隙偏心、断条故障等。对异步电动机主要常见故障的成因和表现特征进行分析和总结。针对上述各种故障,对基于 MCSA(Motor Current Signature Analysis)的故障监测和诊断方法作了全面的介绍,较为详细地介绍了各种方法的原理,并讨论了其优缺点。并指出了今后的发展趋势及工作重点。

**关键词:**异步电动机;在线监测;故障诊断;MCSA

**中图分类号:**TM307

**文献标识码:**A

异步电动机在交流传动领域中得到了广泛的应用。通过在线监测技术,能够及时并准确地发现电机故障,从而采取相应的维修策略,避免因电机的故障而导致事故的发生和对生产造成严重的影响。国内外的许多学者在异步电动机状态监测和故障诊断领域作了不少研究,提出了多种监测方法,包括:振动监测、MCSA(Motor Current Signature Analysis,电机电流频谱分析)、局部放电监测、工况性能监测和基于转子参数辨识的监测等<sup>[1]</sup>。基于 MCSA 监测方法由于电流信号容易取得,可制成非侵入式,因此,大部分的研究集中在电机电流监测中。文中对电流监测和诊断方法作一个比较全面的介绍。

## 1 异步电动机常见故障

### 1.1 轴承故障

轴承故障的产生往往和电机安装过程中的措施不当有关<sup>[2]</sup>。对于该类故障电流检测方法,相应的研究并不多见。轴承故障和转子不对称一样都是和偏心相关的故障,文献[3]给出了轴承故障的特征频率:

$$f_{bng} = f \pm n_b f_{i.o} \quad (1)$$

$$f_{i.o} = \frac{n}{2} \left[ 1 \pm \frac{R_{BD}}{R_{PD}} \cos\beta \right] \quad (2)$$

其中, $n_b$ 为滚珠数, $f_r$ 为转子机械角速度, $R_{PD}$ 为轴承直径, $R_{BD}$ 为滚珠直径, $\beta$ 为滚珠和滚道之间的角度。

### 1.2 定子和电枢故障

约30%~40%的电机故障与此相关。相关的模型和实验表明,这些故障导致电机阻抗不对称,从而引起电机相电流的不对称<sup>[2]</sup>。

### 1.3 转子断条和滑环故障

转子故障在电机故障总量中占5%~10%左右。通过定子电流信号来监测转子绕组故障是最常用的,也是研究的最多的一种方法。分析和试验表明,当异步电动机的转子绕组出现故障时,定子绕组电流中会出现基频周围的边频带,其特征频率为<sup>[4]</sup>。

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_1 \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

其中, $f_1$ 为供电频率; $s$ 为转差率;“+”表示对应频率为转速振荡所引起;“-”表示对应频率为转子断条所引起。在实际工作中,当电机正常工作时,基频周围也会出现边频带。

### 1.4 偏心相关故障

当径向最小气隙长度在空间位置固定时,称为静态偏心。这可能是由于转子中心椭圆或在既定阶段转子和定子位置不正确引起的。在动态偏心时,转子的中心并不在旋转中心,因此,气隙最小长度的位置随着转子旋转。导致的原因有:转轴弯曲,轴承磨损或未对准,在某一转速下机械共振等。静态偏心和动态偏心在实际中共同存在。当气隙存在偏心时,气隙磁导沿圆周方向出现不均匀,从而在定子电流中感应谐波分

\* 收稿日期:2004-09-21

作者简介:周锋(1980-),男,江苏苏州人,重庆大学硕士研究生,主要研究方向为电机控制。

量。理论和实验表明,这些特征谐波分量的频率为:

$$f_{ecc} = f_1 [(R \pm n_d)(1 - S)/p \pm n_w] \quad (4)$$

式中:  $f_1$  为外加电源频率;  $R$  为鼠笼式异步电动机的转子导条数;  $p$  为电机的极对数;  $s$  为转差率; 静态偏心时,  $n_d = 0$ ; 动态偏心时,  $n_d = 1$ ;  $n_w = 1, 3, 5 \dots$ 。

## 2 基于单相定子电流频谱的故障监测和诊断

### 2.1 常规单相定子电流频谱分析方法

常规的定子电流检测系统包括 4 个部分, 见图 1。采样器的目的是采样电动机的一相电流。它包含 2 个步骤, 一是通过低通滤波器将工频激励成分去除, 另一个是采样滤波后的电流。电机的相电流首先通过电流传感器送至工频阈值滤波器, 从而将基波成分去除, 然后再通过低通滤波将不需要的高频成分滤除。预处理程序通过 FFT 算法将采样的时域电流信号转换到频域。由该变换产生的电流频谱仅包含每一频率成分的量值信息。通过滤波后的电流频谱经过故障诊断算法处理后, 可以确定相应的故障类型。当诊断系统确定了电机故障的类型后, 后处理程序可以警告用户存在的故障和潜在的危险, 从而帮助用户采取相应的对策和措施, 并且可以记录电机相应的信息。

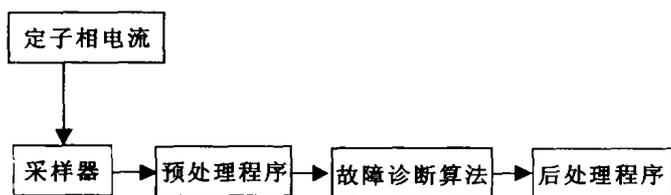


图1 定子电流检测系统

### 2.2 基于瞬时功率信号频谱分析的诊断方法

由于异步电动机额定运行时转差率比较小, 在轻载和空载状态时更小, 使故障特征难以突出, 特别是转子断条在基频成分周围的边频容易被基波淹没。文献[2,5]提出了基于瞬时功率信号频谱分析的诊断方法。根据瞬态功率的定义, 可以导出异步电动机在断条、偏心以及两种故障共同存在时, 瞬态功率的表达式。当两种故障同时存在时:

$$\begin{aligned}
 p(t) = & \frac{\sqrt{3}}{2} \{ U_{m1} I_{m1} [\cos(2\omega_1 t - \varphi) + \cos\varphi] + \\
 & U_{m1} I_{bp1} [\cos((2 - 2s)\omega_1 t - \varphi_{bp1}) + \\
 & \cos(2s\omega_1 t + \varphi_{bp1})] + U_{m1} I_{bn1} [\cos((2 + \\
 & 2s)\omega_1 t - \varphi_{bn1}) + \cos(2s\omega_1 t - \varphi_{bn1})] + \\
 & U_{m1} I_{ecp1} [\cos((2\omega_1 - \omega_r)t - \varphi_{ecp1}) + \cos(\omega_r t + \varphi_{ecp1})] + \\
 & U_{m1} I_{ecn1} [\cos((2\omega_1 + \omega_r)t - \varphi_{ecn1}) +
 \end{aligned}$$

$$\cos(\omega_r t - \varphi_{ecn1}) \} \quad (5)$$

式中,  $\omega_1$  为基波电压角频率;  $U_{m1}$  为基波线电压幅值;  $I_{m1}, I_{bp1}, I_{bn1}, I_{ecp1}, I_{ecn1}$  分别为基波电流、断条故障对应的 2 个特征电流分量、偏心故障对应的 2 个基本特征电流分量的幅值;  $\varphi$  为基波电流落后于基波电压的相位角;  $\omega_r$  为转子角频率;  $s$  为转差率。

由上述推导可以得知: 线电流中的基波成分与瞬时功率中的恒定成分和两倍频分量相对应; 线电流中频率为  $(1 \pm 2ks)f_1$  的断条故障特征频率分量与瞬时功率中的频率为  $2ksf_1, 2f_1 - 2ksf_1$  的分量相对应; 线电流中频率为  $f_1 \pm mf_r$  ( $f_r$  为转子频率) 的偏心故障特征频率分量与瞬时功率中的频率为  $mf_r, 2f_1 \pm mf_r$  的分量对应。因此由瞬时功率中的  $2ksf_1$  与  $mf_r$  的成分构成转子断条和偏心的有效诊断标志量, 可以克服线电流频谱中断条特征频率成分容易被基波淹没的缺点。然而, 在瞬态功率的频谱中仍然包含着大量的噪声信号, 与使用电流频谱相比并没有十分重大的改进, 因此, 定子电流仍然是诊断的主要手段<sup>[2]</sup>。

对于单向定子电流频谱分析, 国内外学者作了大量的研究工作, 提出了基于 Hilbert 模量分析<sup>[6]</sup>、人工神经网络<sup>[7]</sup>和小波分析<sup>[8]</sup>等方法。这些都大大提高了故障检测的精度和准确性, 但同时也增加了算法的复杂度和硬件开销<sup>[9]</sup>。

## 3 基于三相定子电流频谱的故障监测和诊断

由于采样单相电流信号进行频谱分析的方法存在着故障特征频率容易被基波淹没, 相电流频率成分丰富, 特征不明确, 识别困难和对波动性负载容易误诊的缺点, 近年来, 国内外的研究重点转向了基于定子三相电流频谱分析, 提出了新颖的监测和诊断方法。

### 3.1 Park 矢量方法和 Extended Park 矢量方法

20 世纪 90 年代中期, Cardoso A J M 等国外学者提出了基于 Park 矢量方法的故障在线监测和诊断方法<sup>[10-14]</sup>。该方法的基本原理是: 同时采样定子三相电流, 转换到静止的定子两相坐标系中, 形成  $i_\alpha, i_\beta$  分量。当电机正常工作时,  $i_\alpha, i_\beta$  构成的矢量轨迹为圆(在实际中, 由于制造、安装、材料的原因, 矢量轨迹只能接近为圆)。当电机发生故障时, 矢量轨迹会发生偏离, 变成椭圆。椭圆长轴和短轴的变化和故障类型有关, 由此可以进行故障诊断。该方法可以对气隙偏心、定子绕组匝间短路和转子绕组故障进行监测。但该方法对早期故障监测和诊断比较困难。

文献[15]提出了基于 Extended Park 矢量方法。该方法将三相电流信号转换成  $i_\alpha, i_\beta$ , 然后对  $i_\alpha^2 + i_\beta^2$  进

行频谱分析。该方法将基波分量转换成直流分量,且直流分量很容易被滤除,是一种有效的故障信号提取方法。但当存在复合型故障时,各种特征频率成分互相作用,产生新的频率成分,使频谱变复杂,识别难度变大。

### 3.2 基于矢量控制原理思想的在线监测和诊断方法<sup>[16-17]</sup>

假定异步电动机同时存在定子绕组匝间短路、转子断条和偏心故障,将定子三相电流转换至同步旋转坐标轴系  $M-T$  中, $M$  轴指向转子磁链方向,并且设  $M$  轴与定子  $a$  相绕组轴线夹角为  $\theta = \omega_1 t + \theta_0$ 。 $\theta$  为  $t = 0$  时, $M$  轴与  $a$  轴的初始夹角,求得:

$$i_M = I_{p1} \cos(\alpha_p + \theta_0) + I_{n1} \cos(4\pi f_1 t - \alpha_n + \theta_0) + \sum_{k=1}^{\infty} [I_{bpk} \cos(4ks\pi f_1 t + \beta_{bpk} + \theta_0) + I_{bnk} \cos(4ks\pi f_1 t - \beta_{bnk} - \theta_0)] + \sum_{k=1}^{\infty} [I_{ecpm} \cos(2\pi n f_r t + \beta_{ecpm} + \theta_0) + I_{ecpm} \cos(2\pi m f_r t - \beta_{ecnm} - \theta_0)] \quad (6)$$

$$i_T = -I_{p1} \sin(\alpha_p + \theta_0) + I_{n1} \sin(4\pi f_1 t - \alpha_n + \theta_0) - \sum_{k=1}^{\infty} [I_{bpk} \sin(4ks\pi f_1 t + \beta_{bpk} + \theta_0) + I_{bnk} \sin(4ks\pi f_1 t - \beta_{bnk} - \theta_0)] - \sum_{k=1}^{\infty} [I_{ecpm} \sin(2\pi n f_r t + \beta_{ecpm} + \theta_0) + I_{ecpm} \sin(2\pi m f_r t - \beta_{ecnm} - \theta_0)] \quad (7)$$

经过坐标转换,相电流中的正序基波分量转换成了  $i_M$  和  $i_T$  中的直流分量,负序基波分量转换成了  $2f_1$  分量,断条特征分量的频率由  $(1 \pm 2ks)f_1$  变成了  $2ksf_1$ ,偏心特征分量的频率由  $f_{1\pm} \pm nf$  变成了  $mf_r$ 。因此实现了特征频率的分离,避免了 Extended Park 矢量方法中各频率成分交叉作用使频谱复杂化。

在该方法中,将  $M$  轴指向转子磁链方向,这样做,首先使该轴具有确定性,便于量化诊断结果;其次,对励磁电流  $i_M$  的监测可以减小负载波动的影响,提高了诊断系统的鲁棒性。

然而,该方法也存在着不足之处。为得到  $i_M, i_T$ , 实现其精确解耦,需要精确计算转子磁链矢量和定子  $a$  相绕组之间的角度。然而当电机出现故障时,电机参数会发生变化,从而  $i_M, i_T$  会出现某种程度的耦合,对于早期故障,其耦合程度不大,对参数影响轻微,对故障诊断影响不大。但当参数变化较大时,如何有效地解决耦合问题,需要进一步的研究。

## 4 结束语

基于 MCSA 的故障监测和诊断方法,由于定子电流信号易于取得,可制成非侵入式检测系统等优点,是异步电动机故障监测和诊断的主要手段。常规的监测方法多集中于采样电机单相电流频谱分析,目前,基于三相电流的监测方法是一个新的趋势。随着计算机技术和信息处理技术的发展,人工神经网络(ANN),小波分析(Wavelet Analysis),专家系统等技术应用于监测和诊断系统,大大提高了系统监测的精度和实时性,对工业生产的安全性和经济性有着重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 刘振兴,张哲,尹项根. 异步电动机状态监测和故障诊断技术综述[J]. 武汉科技大学学报, 2001, 24(3): 285-289.
- [2] OAMED EI HACHEMI BENBOUZID. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2000, 47(5): 986-988.
- [3] BENBOUZID M E H, NEJJARI H, VIEIRA M. Induction Motor Asymmetrical Fault Detection Using Advanced Signal Processing Technique [J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 1999, 14(2): 147-152.
- [4] NANDI S, TOLIYAT H A, Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines - A Review[Z]. IEEE Industry Applications Conference 1999. Thirty - Fourth IAS Annual Meeting, 1999.
- [5] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于瞬时功率信号频谱分析的鼠笼式异步电动机转子故障在线诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, (10): 148-150.
- [6] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于 Hilbert 模量频谱分析的鼠笼异步电动机转子故障在线诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, (7): 159-161.
- [7] 吴国沛,任震,管霖,等. 鼠笼异步电动机常见故障的分析与诊断[J]. 华南理工大学学报, 1999, (10): 54-56.
- [8] ABBASZADEH K, MILIMONFARED J, HAJI M, et al. Broken Bar Detection in Induction Motor via Wavelet Transformation [Z]. Industrial Electronics Society, 2001 IECON The 27<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vlumc, 2001.
- [9] 曹志彤,何国光,陈宏平,等. 电机故障特征值的倍频小波分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, (7): 112-116.
- [10] CARDOSO A J M, SARAIVA E S. On - line Diagnostics of Three - phase Induction Motors by Park's Vector [Z]. Proceeding s of the International Conference On Electrical Machines, held in Pisa, italy, 1998.

- [11] CARDOSO A J M, CRUZ S M A, FONSECA D S B. Inter - turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three - phase Induction Motors, by Park's Vector Approach[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 1999, 14(3): 595 - 598.
- [12] CARDOSO A J M, SARAIVA E S. Computer - aided Detection of Airgap Eccentricity in Operating Three - phase Induction Motors by Park's Vector Approach [J]. IEEE Transactions On Industrial Applications, 1993, 29(5) 897 - 901.
- [13] CARDOSO A J M, CRUZ S M A, CARVALHO J F S, et al. Rotor Cage Fault Diagnosis in Three - phase Induction Motors by Park's Vector Approach [C]. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, held in Orland, Florida, USA, 1995.
- [14] MEJJARI H, BENBOUZID M E H. Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park's Vector Pattern Learning Approach [J]. IEEE Transactions On Industrial Applications, 2000, 36(3): 730 - 735.
- [15] CRUZ S M A, CARDOSO A J M. Rotor Cage Fault Diagnosis in Three - phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach [J]. Electric Machines And Power System, 2000, 28(5): 289 - 299.
- [16] 刘振兴, 张哲, 尹项根, 等. 用矢量控制原理的异步电动机在线监测和故障诊断方法—原理分析[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 15 - 18.
- [17] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 基于矢量控制思想的鼠笼式异步电动机故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 116 - 121.

## Summary of On-line Monitoring and Fault Diagnosis Technique for Induction Motor Basede on Mcsa

ZHOU Feng, WANG Ming-yu, DU Yan-wei

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Induction motor is widely used in industrial field. On - line condition monitoring and fault diagnosis are the basis of equipments' state maintenance (ESM). Induction motor's typical faults include bearing fault, rotor air gap eccentricity and broken bar, etc. A general introduction to the faults in 3 - phase induction motor, the ways of on - line condition monitoring and diagnosis in 3 - phase induction motor is presented. This paper introduces the on - line condition monitoring and fault diagnosis methods based on MCSA (Motor Current Signature Analysis), and analyses their theory, advantages and disadvantages. The researching pivot and trend in the future are also discussed.

**Key words:** induction motor; on - line monitoring; fault diagnosis; MCSA

(编辑 陈移峰)