

文章编号:1671-251X(2014)12-0069-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.12.018

许允之,方磊,史丽萍,等.基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断[J].工矿自动化,2014,40(12):69-73.

基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断

许允之, 方磊, 史丽萍, 严家明, 唐轶, 苗长新

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:从采集的鼠笼异步电动机定子电流出发,建立了流方的概念,通过故障电流的自乘方放大并转移故障特征频率。根据瞬时功率的概念提出了基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断方法,通过理论推导分别提取了转子断条故障和转子偏心故障在流方中的特征频率分量,有效地克服了转子断条故障特征频率容易被基频淹没的缺点,实现了对转子断条、偏心、复合等故障的辨别诊断。该方法与传统瞬时功率法相比,采集的数据量减半,避免了电压波动和采样误差对瞬时功率的影响。

关键词:电动机;故障诊断;瞬时功率法;转子断条故障;转子偏心故障

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Fault diagnosis of motor based on improved instantaneous power method

XU Yunzhi, FANG Lei, SHI Liping, YAN Jiaming, TANG Yi, MIAO Changxin

(School of Information and Electrical Engineering, China University of

Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The concept of voltaic involution was established starting from collected stator current of squirrel cage induction motor, and the voltaic involution was used to enlarge and transfer fault characteristic frequency. The fault diagnosis method of motor based on improved instantaneous power method was proposed according to concept of instantaneous power. The characteristic frequency components of rotor bar breaking fault and rotor eccentricity fault were extracted by theoretical analysis, which can effectively overcome the shortcomings that characteristic frequency of rotor bar breaking fault is likely to be flooded by fundamental frequency, and realize distinguishing and diagnosis of rotor bar breaking fault, eccentricity fault and complex fault. The data need to collect was cut by half and influence of voltage fluctuation and sampling error to instantaneous power was avoided compared with the traditional instantaneous power diagnosis method.

Key words: motor; fault diagnosis; instantaneous power method; rotor bar breaking fault; rotor eccentricity fault

0 引言

三相交流异步电动机是应用最为广泛的电气设备之一,异步电动机的用电量占整个电力系统用电量的60%以上。电动机是整个机电能量转换的核心,对电动机早期进行必要的监测,提前发现电动机故障征兆,及时采取有效措施,对降低事故发生率和

严重程度具有重要意义。目前基于定子信号检测的电动机故障诊断是应用最为广泛的方法,具体包括基于快速傅里叶变换(FFT)、频域分析^[1]、派克矢量法^[2,3]、小波变换^[4]、人工智能^[5]的电动机故障诊断方法。

根据频谱特点的变化辨识电动机故障是研究较早的信号处理方法。当电动机发生断条故障时,可

收稿日期:2014-04-03;修回日期:2014-09-26;责任编辑:胡娴。

作者简介:许允之(1961—),男,北京人,高级工程师,从事高电压技术与电机故障诊断方面的教学与研究工作,E-mail:xyzh1962@163.com。

以在电动机定子绕组的电流频谱中产生 $(1 \pm 2ks)f_1$ (k 为正整数, s 为转差率, f_1 为基波频率) 的故障特征量, 但直接对采集的定子电流值进行快速傅里叶变换效果不好, 原因是故障频率 $(1 \pm 2ks)f_1$ 很容易被基波频率 f_1 淹没。利用连续细化的傅里叶变换分析方法, 可以获得原采样信号中某一主频率分量的精确的分析表达式, 即精确的幅值、频率、初相位等信息, 从而避免了故障频率容易被淹没的问题^[6]。另一种改进方法是对采集的定子电流信号进行计算处理, 使故障频率 $(1 \pm 2ks)f_1$ 转化并放大为更易检测和分离的其他故障特征频率^[7-9]。参考文献[10]通过采集的定子电压和电流相乘得到的单相瞬时功率提取出转子断条故障时瞬时功率故障频率 $2ksf_1$ 和 $(2 \pm 2ks)f_1$, 以故障频率 $2ksf_1$ 为断条故障特征频率来诊断转子断条故障。参考文献[11]从三相平均瞬时功率中提取故障频率 $2ksf_1$, 由于三相平均瞬时功率只含有唯一特征频率 $2ksf_1$, 故其特征频率幅值更为集中, 检测效果更好。参考文献[12-13]利用两相坐标系中瞬时无功功率的概念, 从定子瞬时无功功率中提取转子断条故障特征频率 $2ksf_1$, 从而取得和三相瞬时功率故障诊断相当的效果。

本文首先避免电压的影响, 对瞬时功率法进行改进, 提出了流方的概念和基于流方的故障诊断方法, 提取了转子断条故障特征频率 $2ksf_1$ 和转子偏心故障特征频率 mf_r (m 为正整数, f_r 为转子转动频率); 与基于瞬时功率的诊断方法相比, 基于流方的故障诊断方法无需采集定子电压数据, 只需检测定子电流数据即可, 硬件开销更小, 接线更简单, 更利于在线故障诊断。其次, 根据瞬时功率的概念提出了基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断方法, 将给定电压与采集到的定子电流相乘, 得到类似瞬时功率的量, 并以此提取出故障信号; 该方法与基于瞬时功率的诊断方法相比, 需采集的数据量减半, 且由于避免了电压波动和采样误差对瞬时功率的影响, 诊断效果更好。

1 基于三相总流方的转子断条和偏心故障诊断

1.1 故障频率提取

1.1.1 转子断条故障频率的提取

转子断条故障边频分量 $(1 \pm 2ks)f_1$ 容易被基波频率 f_1 淹没, 且故障发生的初始阶段故障信号偏弱, 故直接分析电动机定子电流频谱很难提取故障特征信号。通过研究发现, 电动机定子电流自平方后, 可以放大故障频率信号, 将故障信号和基波频率

分离出来。类比瞬时功率, 定义一个新的物理量流方, 其表示 n 个电流自相乘, 用字母 q 表示, $n=2$ 时的三相总流方为

$$q(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t) \quad (1)$$

式中: i_a, i_b, i_c 分别为三相电流。

电动机无故障状态下的总流方为

$$q(t) = \frac{3}{2} I^2 \quad (2)$$

式中: I 为电流幅值。

无故障状态下电动机定子三相总流方是单一的, 直流分量发生故障时, 定子三相电流可表示为

$$i_a = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi) + I_{wp1} \cos[(1 + 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wp1}] + I_{wn1} \cos[(1 - 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wn1}] \quad (3)$$

$$i_b = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi - 2\pi/3) + I_{wp1} \cos[(1 + 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wp1} - 2\pi/3] + I_{wn1} \cos[(1 - 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wn1} - 2\pi/3] \quad (4)$$

$$i_c = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi + 2\pi/3) + I_{wp1} \cos[(1 + 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wp1} + 2\pi/3] + I_{wn1} \cos[(1 - 2ks)2\pi f_1 t - \varphi_{wn1} + 2\pi/3] \quad (5)$$

式中: I_1, φ 分别为 A 相电流的幅值和初始相位; I_{wp1}, φ_{wp1} 分别为故障频率为 $(1 + 2ks)f_1$ 时的幅值和初相位; I_{wn1}, φ_{wn1} 分别为故障频率为 $(1 - 2ks)f_1$ 时的幅值和初相位。

将式(3)一式(5)代入式(1)并化简, 可得电动机转子发生断条故障时的总流方:

$$q(t) = \frac{3}{2} [(I_1^2 + I_{wp1}^2 + I_{wn1}^2) + I_1 I_{wp1} \cos(2ks\omega_1 t + \varphi - \varphi_{wp1}) + I_1 I_{wn1} \cos(2ks\omega_1 t - \varphi + \varphi_{wn1}) + I_{wp1} I_{wn1} \cos(4ks\omega_1 t + \varphi_{wn1} - \varphi_{wp1})] \quad (6)$$

同频率合并可得

$$q(t) = q_0(t) \cos \varphi_0 + q_{2s}(t) \cos(2ks\omega t + \varphi_{2s}) + q_{4s}(t) \cos(4ks\omega t + \varphi_{4s}) \quad (7)$$

式中: ω_1, ω 同为转子角频率; q_0, q_{2s}, q_{4s} 分别为基频、2 倍基频、4 倍基频的流方值, 对应的相位差分别为 $\varphi_0, \varphi_{2s}, \varphi_{4s}$ 。

由式(7)可知, 故障流方频谱中既包含直流分量, 又包含定子电流边频分量引起的故障分量 $2ksf_1$ 和 $4ksf_1$, 即 $(1 \pm 2ks)f_1 \rightarrow 2ksf_1, 4ksf_1$ 。

1.1.2 转子偏心故障频率的提取

当感应电动机的转子发生偏心故障时, 定子电流中会产生故障成分:

$$f_{ecc} = f_1 \pm mf_r \quad (8)$$

式中: f_{ecc} 为合成特别频率。

转子出现偏心故障时, 定子三相电流可表示为

$$i_a = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{ecpm} \cos[(\omega_1 + m f_r) t - \varphi_{ecpm}] + \sum_{m=1}^{\infty} I_{ecnm} \cos[(\omega_1 - m f_r) t - \varphi_{ecnm}] \} \quad (9)$$

$$i_b = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi - 2\pi/3) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{ecpm} \cos[(\omega_1 + m f_r) t - \varphi_{ecpm} - 2\pi/3] + \sum_{m=1}^{\infty} I_{ecnm} \cos[(\omega_1 - m f_r) t - \varphi_{ecnm} - 2\pi/3] \} \quad (10)$$

$$i_c = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi + 2\pi/3) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{ecpm} \cos[(\omega_1 + m f_r) t - \varphi_{ecpm} + 2\pi/3] + \sum_{m=1}^{\infty} I_{ecnm} \cos[(\omega_1 - m f_r) t - \varphi_{ecnm} + 2\pi/3] \} \quad (11)$$

式中: I_{ecpm} 、 φ_{ecpm} 是频率为 $f_1 + m f_r$ 的信号幅值和初相位; I_{ecnm} 、 φ_{ecnm} 是频率为 $f_1 - m f_r$ 的信号幅值和初相位。

将式(9)一式(11)代入式(1)可得偏心故障下的总流方:

$$q(t) = \frac{3}{2} [(I_1 + I_{ecpm}^2 + I_{ecnm}^2) + I_1 I_{ecpm} \cos(k\omega_r t + \varphi - \varphi_{ecpm}) + I_1 I_{ecnm} \cos(k\omega_r t + \varphi - \varphi_{ecnm}) + I_{ecpm} I_{ecnm} \cos(2k\omega_r t + \varphi_{ecnm} - \varphi_{ecpm})] \quad (12)$$

同频率合并可得

$$q(t) = q_0(t) \cos \varphi_0 + q_{m\omega_r}(t) \cos(m\omega_r t + \varphi - \varphi_{m\omega_r}) + q_{2m\omega_r}(t) \cos(2m\omega_r t + \varphi - \varphi_{2m\omega_r}) \quad (13)$$

式中: ω_r 为偏心时刻的转子角频率; q_0 、 $q_{m\omega_r}$ 、 $q_{2m\omega_r}$ 分别表示正常、1 倍偏心、2 倍偏心时的流方值,对应的相位差分别为 φ_0 、 $\varphi_{m\omega_r}$ 、 $\varphi_{2m\omega_r}$ 。

由式(13)可知,故障流方频谱既包含直流分量,又包含定子电流故障分量引起的总流方故障分量 $m f_r$ 和 $2 m f_r$,即 $(f_1 \pm m f_r) \rightarrow m f_r, 2 m f_r$ 。

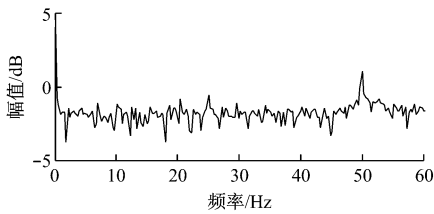
1.2 实验分析

1.2.1 断条故障实验结果及分析

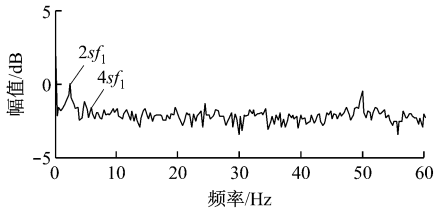
本实验采用的异步电动机型号为 Y132M-4,额定功率为 7.5 kW,额定电压为 380 V,额定电流为 15.4 A,额定转速为 1 440 r/min,采样频率为 5 kHz,采样点数为 20 056。为了保证信号分析的准确性,进行快速傅里叶变换频谱分析时,采用的数据量应当是 2 的整次方数,故采用数据量为 16 384。

图 1 是无故障状态和转子断条故障下,三相总流方的频谱图。其中,单电动机无故障时主要包含直流分量,而有 3 根断条时,则包含了故障频率

$2 k s f_1$ 和 $4 k s f_1$ 。因此,从图 1 可得以下结论:



(a) 无故障状态



(b) 3 根断条故障状态

图 1 2 种状态下的三相总流方频谱

(1) 基于三相总流方可以提取故障特征频率分量 $2 s f_1$,以此识别转子断条故障,有效放大故障信号,同时避免故障频率被基波频率淹没。

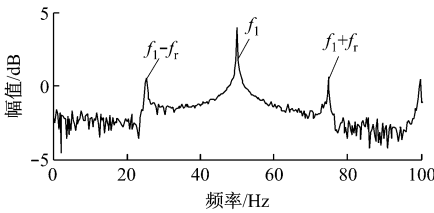
(2) 与单相流方技术相比,基于三相总流方的故障诊断方法,在有无故障 2 种状态下的表达式更为简洁,特征故障信号更为集中,特征信号 $2 s f_1$ 幅值更大,故辨识精度更高,诊断效果更好。

1.2.2 偏心故障实验结果及分析

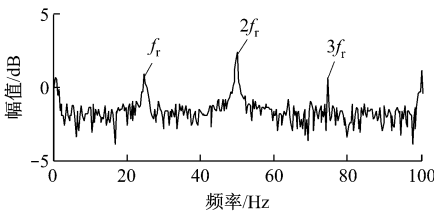
图 2 是发生转子偏心故障时定子电流频谱图和三相总流方频谱图。从图 2 可得以下结论:

(1) 基于三相总流方可以提取故障特征频率分量 $m f_r$,以此辨识转子偏心故障,故障分量幅值明显,故诊断效果较好。

(2) 定子电流中频率 $f_1 \pm m f_r$ 与三相总流方的故障分量 $m f_r$ 一一对应。



(a) 偏心故障时定子电流频谱



(b) 偏心故障时三相总流方频谱

图 2 偏心故障频谱

1.2.3 混合故障分析

复合故障的流方频谱如图 3 所示。由图 3 可知,电动机转子同时发生断条和偏心故障时,由于 2 种故障的特征频率 $2ksf_1$ 和 mf_r 相距较远,基于三相总流方的故障诊断方法可以有效地辨识转子断条和偏心的混合故障。

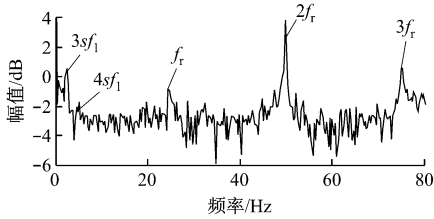


图 3 复合故障的流方频谱

2 基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断

在获取瞬时功率阶段用给定电压代替实验监测的电压,这种方法称为基于改进瞬时功率法的电动机故障诊断。利用该方法求得的电压与电流的乘积不再代表瞬时功率的物理概念,因为瞬时电压与瞬时电流在时域里不是一一对应的关系。其优点是不影响监测的精度,减少了电压采集误差对瞬时功率的影响,检测线路更简单,更有利于在线监测和诊断。该方法的本质是利用理想状态下的正弦信号电压代替实际工作电压,利用给定电压的方法,纯粹地将定子电流信号转化为易检测和分辨的瞬时功率信号,减少了电压波动等带来的噪声影响(避免了电压环节的影响,而电压波动对定子电流的影响仍未减少)。

2.1 原理推导

为了简化推论过程,假设给定电压频率即电网额定频率为 f_1 ,则给定三相电压分别为

$$\begin{cases} u'_a(t) = U \cos \omega t \\ u'_b(t) = U \cos(\omega t - \alpha) \\ u'_c(t) = U \cos(\omega t - \beta) \end{cases} \quad (14)$$

式中: U 为电压幅值; α, β 分别为 B 相、C 相电压落后于 A 相电压的相位。

将电压与电流相乘,得到类似瞬时功率的物理量:

$$p'(t) = u'_a(t)i_a(t) + u'_b(t)i_b(t) + u'_c(t)i_c(t) \quad (15)$$

将式(7)、式(13)、式(14)代入式(15),并同频率合并化简,得

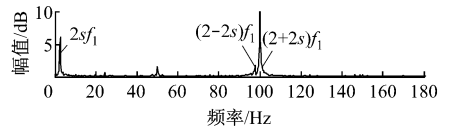
$$p'(t) = p'_0(t) \cos \varphi_0 + p'_2(t) \cos(2\omega t + \varphi_2) + p'_{2+2s}(t) \cos[(2+2s)\omega t + \varphi_{2+2s}] +$$

$$p'_{2-2s}(t) \cos[(2-2s)\omega t + \varphi_{2-2s}] + p'_{2s}(t) \cos(2s\omega t + \varphi_{2s}) \quad (16)$$

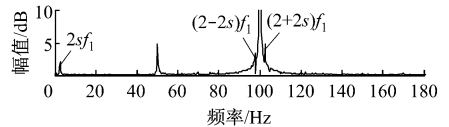
式中: $p'_0(t), p'_2(t), p'_{2+2s}(t), p'_{2-2s}(t), p'_{2s}(t)$ 和 $\varphi_0, \varphi_2, \varphi_{2+2s}, \varphi_{2-2s}, \varphi_{2s}$ 分别为频率为 0(直流分量), $2f_1, (2+2s)f_1, (2-2s)f_1, 2sf_1$ 时的信号幅值分量和初始相位。

2.2 实验验证与结果分析

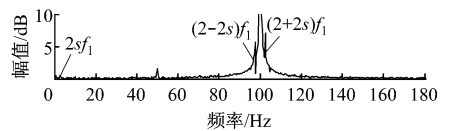
由式(14)可知,当初始相位不同时, $(2+2s)f_1, (2-2s)f_1, 2sf_1$ 的幅值大小也不同。为了提高故障诊断效果,应尽可能提高频率为 $2sf_1$ 的故障分量的幅值。如果给定电压是三相负序电压形式,即 $\alpha = -2\pi/3, \beta = 2\pi/3$,代入式(14)得 $p'_{2s}(t) = 0$,即无频率为 $2sf_1$ 的分量,而频率为 $(2 \pm 2s)f_1$ 的分量达到最大值。当转差率很小时,通过负序给定电压辨识故障效果不明显。图 4 给出了电压峰值为 220 V, 初始相位 (α, β) 分别取 $(2\pi/3, -2\pi/3), (-\pi/3, \pi/3), (-2\pi/3, 2\pi/3)$ 时的频谱图。由图 4 可知,给定电压为正序电压时 $2sf_1$ 分量更大, $(2 \pm 2s)f_1$ 分量幅值为零;而给定电压为负序电压时 $2sf_1$ 分量为零, $(2 \pm 2s)f_1$ 分量幅值很大,但不易检测出来;当初相位为 $(-\pi/3, \pi/3)$ 时, $2sf_1$ 分量和 $(2 \pm 2s)f_1$ 分量幅值处在正序电压幅值与负序电压幅值的中间位置。



(a) 初始相位为 $(2\pi/3, -2\pi/3)$, 即正序电压



(b) 初始相位为 $(-\pi/3, \pi/3)$



(c) 初始相位为 $(-2\pi/3, 2\pi/3)$, 即负序电压

图 4 给定电压相位不同对瞬时功率各故障分量的影响

$2sf_1$ 幅值分量与给定电压两初始相位的关系如图 5 所示。 $2sf_1$ 幅值分量最大值处 $\alpha = 2\pi/3, \beta = -2\pi/3$; $2sf_1$ 幅值分量最小值有 2 处, 一处 $\alpha = -2\pi/3$, 另一处 $\beta = 2\pi/3$ 。 $2sf_1$ 幅值分量越大, 故障辨识情况越好。在给定电压为正序电压时, $2sf_1$ 幅值分量达到最大值。

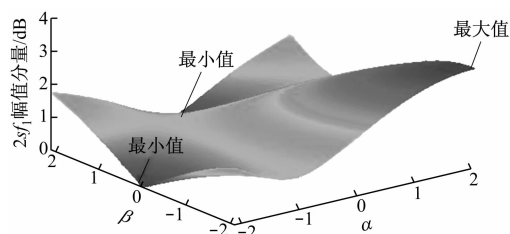


图5 $2sf_1$ 幅值分量与给定电压2个初相位的关系

3 结语

从自定义的流方概念出发,推导出了鼠笼异步电动机转子断条和偏心故障在三相总流方中的表现形式,提取出故障特征频率。理论分析和实验结果表明,转子断条故障在三相总流方中产生频率为 $2sf_1$ 的故障分量,转子偏心故障在三相总流方中产生频率为 mf_r 的故障分量,利用三相总流方可以有效地辨识转子断条和偏心故障。此外,鼠笼异步电动机同时出现转子断条和偏心故障时,由于2种故障特征频率不同,使得该诊断方法可以同时有效诊断两者混合故障。基于流方的电动机故障诊断方法可以有效地避免故障频率被基波频率淹没的缺点。用给定电压构造瞬时功率,利用故障特征频率 $2sf_1$ 可以有效诊断电动机转子断条故障;当 $\alpha = 2\pi/3$, $\beta = -2\pi/3$ 时,故障特征频率 $2sf_1$ 幅值分量达到最大值,即正序电压是最佳给定电压形式。基于流方和给定电压法的故障诊断与瞬时功率诊断技术相比,只需采集定子电流数据而不需采集定子电压数据,信号采集更简单,同时避免了电压波动和采样误

差对瞬时功率的影响,更适合在线诊断。

参考文献:

- [1] 王金福,李富才. 机械故障诊断的信号处理方法:频域分析[J]. 噪声与振动控制, 2013(1):173-180.
- [2] 侯新国,吴正国,夏立,等. 基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(14):115-119.
- [3] 方芳,杨士元,侯新国,等. 派克矢量旋转变换在感应电机定子故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(12):99-103.
- [4] 罗忠辉,薛晓宁,王筱珍,等. 小波变换及经验模式分解方法在电机轴承早期故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(14):125-129.
- [5] 刘冬生,赵辉,王红君,等. 基于小波分析和神经网络的电机故障诊断方法研究[J]. 天津理工大学学报, 2009,25(1):11-14.
- [6] 张雄希,刘振兴. 基于分数阶傅里叶变换的变频调速异步电机故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(4):59-62.
- [7] 侯新国,吴正国,夏立,等. 瞬时功率分解算法在感应电机定子故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(5):112-117.
- [8] 刘振兴,张哲,伊项根. 异步电动机的状态监测与故障诊断技术综述[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2001,24(3):285-289.
- [9] 刘振兴,伊项根,张哲,等. 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, 2003,23(10):148-152.