

Park矢量模平方函数与ESPRIT相结合的 异步电动机转子断条故障检测新方法

许伯强, 田士华

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要:为了能够在异步电动机转子断条故障初发时准确检测并适时安排维修计划,提出利用Park矢量模变换技术与旋转不变信号参数估计技术谱分析方法相结合的方法进行异步电动机转子断条故障检测。经过Park矢量模平方变换可以将工频分量转换为直流量,即可轻而易举的消除工频分量的影响,结合ESPRIT高频率分辨力技术可以在短时采样信号下准确地检测出故障特征频率,与以往检测方法相比计算量大为减少。对一台异步电机分别进行仿真与实验验证,仿真与实验结果同时显示,该方法能够准确提取到转子断条故障特征信号,计算快速,频率分辨力高。鉴于此,将Park矢量模平方函数与ESPRIT结合的异步电动机转子断条故障检测方法效果理想。

关键词:异步电机; 转子断条; Park矢量模平方函数; ESPRIT

New Detection Method for Broken Rotor Bar Fault in Asynchronous Motor Based on Park's Vector Modulus and ESPRIT

XU Boqiang, TIAN Shihua

(Electric Engineering School, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: For instant detection of broken rotor bar (BRB) fault in an asynchronous motor, a new method for detecting BRB fault was proposed based on Park's vector modulus and estimation of signal parameters via rotational invariance technique (ESPRIT). The power frequency can be easily filtered after the transformation of Park's vector modulus to transform the power frequency component into the DC component, thus the effect of the power frequency component will be eliminated. Using the algorithm of ESPRIT, the fault's characteristic frequency can be accurately calculated with the short-time sampling signals, and the computation amount can be greatly reduced. Simulation and experiment were carried out to validate the accuracy of the proposed method. Results show that the new method can fleetly extract the fault's characteristic frequencies with high frequency resolution.

Key words: asynchronous motor; broken rotor bar fault; Park's vector modulus; ESPRIT

0 引言

在笼型异步电动机转子各种故障中,转子断条故障占总故障的10%,对异步电机转子断条故障进行准确、有效的检测能够避免大部分的电机运转失效,减少维修的高价费用。因此,寻找合适的断条检测方法对众多领域都有重要意义。

文[1-2]已指出,异步电动机出现转子故障将引起定子电流中出现特征频率分量 $(1\pm2s)f_1$ (其中 f_1 为供电频率, s 为转差率)^[1-2]。习惯将定子电流中的特征分量称之为边频分量,文[3]通过理论知识详细地推导出了该边频分量产生的机理。

为了寻找到反映转子断条故障的这两个边频分量,在工程实际中傅里叶变换(FFT)谱分析技术一直受到广泛的关注。异步电动机在运行较为平稳并

收稿日期:2016-05-21; 修回日期:2016-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51277077)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51277077).

且转差率较高的运行情况下,FFT 可以作为较为有效的故障检测方法。

绝大多数的异步电机在实际运行过程中都会出现频繁的振动现象,而且转子故障出现后, f_1 分量的幅值远远大于边频分量的幅值。同时,在实际运行中,大多数电机在带负载运行时转差率 s 已降至 0.018 左右,在短时空载运行情况下转差率 s 甚至已接近 0.003。因而,此种情况已经满足不了 FFT 检测过程中需要波动平稳,信噪比和转差率高的要求。对采集到的定子电流作 FFT 频谱分析, f_1 频率分量的泄漏将严重影响 $(1\pm 2s)f_1$ 分量的获取,从而无法准确地对电机故障做出检测。

为了解决 FFT 检测过程中 $(1\pm 2s)f_1$ 故障分量被 f_1 分量的频谱泄漏所淹没的问题,文[4]提出利用自适应滤波技术对取样信号滤波,以达到抵消 f_1 分量,凸显边频分量的目的。抵消掉 f_1 分量后的信号中, $(1\pm 2s)f_1$ 频率分量就成为信号中的主分量,大大提高了检测的准确性。文[5]采用的自适应陷波滤波器同样能够削弱 f_1 分量的影响。文[6-8]分别针对瞬时功率信号、瞬时相位角信号、瞬时功率因数信号进行傅里叶频谱分析,上述此类方法都是在一定程度上改善了直接对定子电流信号作 FFT 频谱分析的不足。

前面所述的检测方法最终都要归结于 FFT 频谱估计,然而 FFT 的最大使用限制就是频率分辨力与采样时长和采样频率相矛盾的问题。要想得到高频率的分辨力就必须增加采样时长和采样频率,这样不可避免的会在检测过程中增加不必要的噪声污染、负荷波动等一系列的干扰源。最终导致在增加了频率分辨力的情况下也得不到准确的结果。

文[9-11]引入了多重信号分类(MUSIC)算法,初步解决了频率分辨力的问题。这一方法在频谱分析时不同于 FFT,它旨在对定子电流的全频信号进行频率搜索,理论上可以到达很高的频率分辨力。文[12]引入了旋转不变信号参数估计技术(ESPRIT),该算法同样具有很高的频率分辨力,相比于 MUSIC,其运算过程中不需要对目标频率循环搜索,计算时间大幅减小。但是,在噪声干扰和负荷波动的情况下,这些高频率算法在检测的过程中也不尽如人意。文[13-15]利用奇异值分解算法对采样信号进行处理,虽然一定程度上减弱了噪声,但是奇异值分解需要进行多次滤波才能达到较为满意的信号,这样就使计算量大大增加,最后使得软硬件消耗较大。因此,文中致力于找到在采样信号尽可能短的情况下尽可能准确地估计出故障边频分量频率值

的方法。

1 Park 矢量模平方函数的基本原理

Park 变换是分析在旋转电机数学模型的分析中是一种常用的方法,它的基本原理是将三相坐标系转变为两相坐标轴系。文[16-18]提出利用矢量变换将定子电流进行变换,通过分析矢量变换后轨迹圆的形状来判断电机是否故障,该类方法较为抽象,而且还需结合智能算法进行判别,有失实用性,并且结果收到噪声和负荷波动影响较大。文中采用的 Park 矢量模平方函数方法理论是基于 Park 变换,将三相定子电流 (i_A, i_B, i_C) 变换成二维坐标表示下的 i_d, i_q 。得到两相坐标轴系之后,需要经过转换,将其变为二维坐标下表示的一相信号。因此,对两对 $I_s=i_d+j i_q$ 取模平方,最终换算成以时间为横轴,模平方为纵轴的检测信号。Park 变换方程为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

在电机转子断条故障的检测历程中, $(1\pm 2s)f_1$ 的边频分量已经作为默认故障特征信号。采集到的故障电机三相定子电流信号可表示为:

$$i_A = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \theta_1) + I_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t - \theta_2] + I_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t - \theta_3]; \quad (2)$$

$$i_B = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \theta_1 - \frac{2\pi}{3}) + I_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t - \theta_2 - \frac{2\pi}{3}] - I_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t - \theta_3 - \frac{2\pi}{3}]; \quad (3)$$

$$i_C = I_1 \cos(2\pi f_1 t - \theta_1 + \frac{2\pi}{3}) + I_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t - \theta_2 + \frac{2\pi}{3}] + I_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t - \theta_3 + \frac{2\pi}{3}]. \quad (4)$$

式(2)-(4)中: f_1 为工频分量; I_1, I_2, I_3 分别为工频分量 f_1 、 $(1-2s)f_1$ 分量、 $(1+2s)f_1$ 分量的幅值; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为工频分量 f_1 、 $(1-2s)f_1$ 分量、 $(1+2s)f_1$ 分量的初相角。

对式(2)-(4)进行 Park 矢量变换得到 i_d, i_q 的表达式为:

$$i_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \{ I_1 \cos(2\pi f_1 t - \theta_1) + I_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t - \theta_2] + I_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t - \theta_3] \}; \quad (5)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{3}}{2} \{ I_1 \cos(2\pi f_1 t - \theta_1) + I_2 \sin[2\pi(1-2s)f_1 t - \theta_2] + I_3 \sin[2\pi(1+2s)f_1 t - \theta_3] \}. \quad (6)$$

对 Park 矢量 $I=i_d+j i_q$ 进行模平方运算,由式(5)、

(6) 经过整理可得

$$I_s = |i_d + ji_q|^2 = 3/2(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) + 3I_1I_2\cos(2s\omega t - \theta_1 - \theta_2) + 3I_1I_3\cos(2s\omega t - \theta_1 - \theta_3) + 3I_2I_3\cos(4s\omega t + \theta_2 - \theta_3)。(7)$$

式(7)中, $\omega = 2\pi f_1$ 。

由矢量模平方函数可得出, I_s 信号中仅含有直流分量, $2sf_1$ 和 $4sf_1$ 的边频分量。因此, 文中将 $2sf_1$ 和 $4sf_1$ 2 个频率分量称为“边频分量”。同时, 通过矢量模平方运算去除了信号中的工频分量 f_1 , 并且两个边频分量之间的相对频率间隔增加, 这样既可避免工频分量频谱泄漏的影响, 又可以提高检测时的频率分辨力。

为了消除直流分量对检测结果的影响, 也为了更为直观地观测检测结果中的边频分量, 需要对 I_s 做进一步处理。根据 I_s 表达式的特点, 对其进行求均值运算得到 $\text{mean}(I_s)$, 计算后的结果中只含有 I_s 中的直流分量, 然后利用式(8)即可得到去除直流分量的待检测信号 I_s^* 。

$$I_s^* = I_s - \text{mean}(I_s)。(8)$$

2 ESPRIT 频谱估计算法

旋转不变信号参数估计技术(ESPRIT)算法最早是由 Roy 等人于 1986 年提出的, 现已成为现代信号处理中的一种主要方法^[19]。ESPRIT 基于全局统计特性(如相关、特征值、特征/奇异分解)而实施频谱分析。该方法可以完全摆脱分辨力受采样频率与采样时长限制的问题, 基于全频段分析, 具有原信号外推的能力^[1], 可实现在保证高频率分辨力的前提下, 针对采集时间尽可能短的信号实施转子断条故障检测。

ESPRIT 算法如下:

1) 利用采集到的数据 $x(1), \dots, x(N)$ 构造自相关函数 $R_{xx}(0), R_{xx}(1), \dots, R_{xx}(m)$ 。

2) 有得到的自相关函数构造 $m \times m$ 阶自相关矩阵 R_{xx} 。

3) 对矩阵 R_{xx} 进行特征值分解, 利用最小特征值 σ^2 计算 $C_{xx} = R_{xx} - \sigma^2 I$ 和 $C_{xy} = R_{xy} - \sigma^2 Z^{[20]}$ 。

4) 求矩阵 C_{xx} 的奇异值分解, 确定其有效秩, 并存储与前 p 个主奇异值对应的 Σ_1, U_1, V_1 。

5) 计算 $U_1^H C_{xy} V_1$, 并求矩阵束 $\{\Sigma_1, U_1^H C_{xy}, V_1\}$ 的广义特征值分解, 根据广义特征值 λ_i 确定各个信号分量的频率值 $f_i = \frac{1}{2\pi} \arctan[\text{Im}(\lambda_i)/\text{Re}(\lambda_i)]$, $\text{Im}(\lambda_i)$ 和 $\text{Re}(\lambda_i)$ 分别为各特征值的实部与虚部。

3 异步电机转子断条故障仿真

文中将矢量模平方函数与 ESPRIT 算法巧妙结

合对异步电机转子断条故障进行检测。

异步电机发生转子断条故障后, 采集到的三相电流可用式(9)–(11)进行模拟, 以检测文中新方法在故障检测方面的可行性。

$$i_a = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + A_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t + \theta_2] + A_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t + \theta_3] + e(t); (9)$$

$$i_b = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \theta_1 - \frac{2\pi}{3}) + A_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t + \theta_2 - \frac{2\pi}{3}] + A_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t + \theta_3 - \frac{2\pi}{3}] + e(t); (10)$$

$$i_c = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \theta_1 + \frac{2\pi}{3}) + A_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t + \theta_2 + \frac{2\pi}{3}] + A_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t + \theta_3 + \frac{2\pi}{3}] + e(t)。 (11)$$

式(9)–(11)中: s 为电机运行转差率; $e(t)$ 为随机有色噪声, 以模拟电机运行中掺杂的噪声。噪声时域和频域波形见图 1。

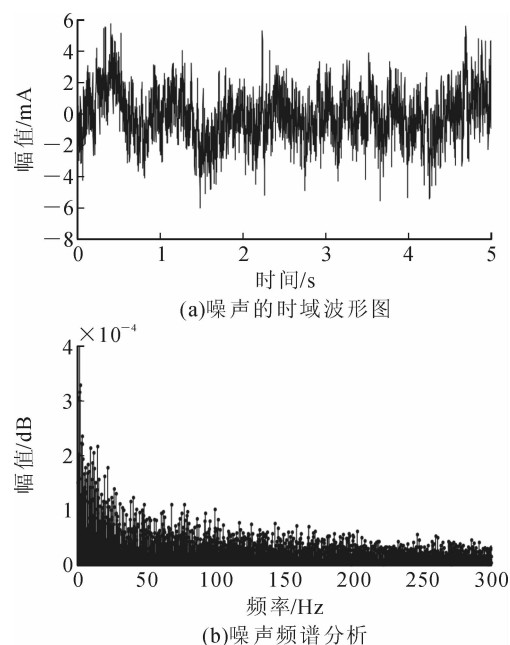


图 1 噪声信号波形

Fig. 1 The waveform of the random noise

根据电机实际运行中各参数的幅值对应关系, 对上述模拟信号作如下的赋值, 见表 1。

表 1 仿真参数幅值

Table 1 The simulation parameter assignment

参数	f_1/Hz	A_1/A	$\theta_1/(\circ)$	A_2/A	$\theta_2/(\circ)$	A_3/A	$\theta_3/(\circ)$
设定值	50.000	0.890	0.020	0.009	1.062	0.004 3	2.802

以采样频率 $f_s = 1\,000\text{ Hz}$ 进行仿真检测, Park 矢量模平方算法的主要作用就是去除故障电流信号中的工频分量, 同时减弱噪声对故障特征频率的影响。为了得到更为准确的计算结果, 考虑到实际电

机在负荷波动的影响情况下,文中将采样时间调整到 5 s,力求分析电机在噪声影响和可能的负荷波动下的检测结果。分别以转差率 $s=0.018$ (半载)和 $s=0.036$ (满载)方式对原仿真信号进行仿真,满载时去除工频分量后的矢量模平方函数波形及最终检测出的故障信号频谱图见图 2。半载时去除工频分量后的矢量模平方函数波形及最终检测出的故障信号频谱图见图 3。

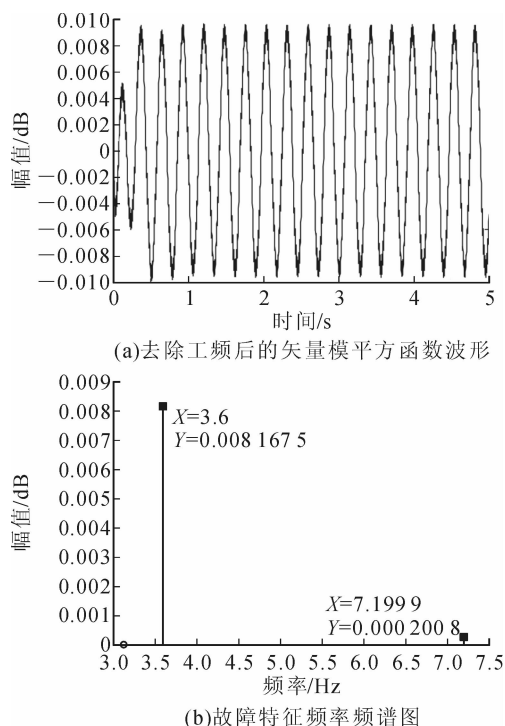


图 2 满载时仿真分析结果

Fig. 2 Analysis of the simulation result under the full-load condition

由仿真结果可看出,在满载与半载信号波形中,除掉工频分量的 Park 矢量模平方函数波形图较为平滑,噪声分量较小,这为后续的故障特征信号频率提取带来了很大的方便;最终特征频率的计算结果证明,文中提出的新方法能够准确模拟异步电机转子断条故障的检测,检测结果相当准确。

4 试验验证

在仿真条件下准确计算出异步电机转子断条故障的前提下,应用文中的新方法对故障电机进行实际的检测实验。

实验采用一台 Y100L-2 型、3 kW、380 V、6.12 A、50 Hz 的三相异步电动机,将一条故障转子替换正常转子用以检测断条故障。为了确保此故障转子确实达到了工程实际中的故障程度,实验过程中人为的将其中一根导条在距端环 10 mm 处钻孔,直径达

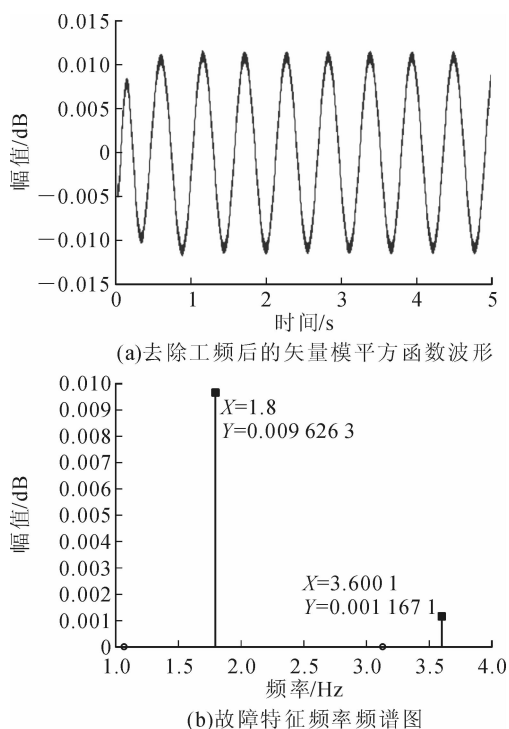


图 3 半载时仿真分析结果

Fig. 3 Analysis of the simulation result under the half-load condition

到 6 mm,深度达到 10 mm。

以一台直流电机作为负载,通过对直流电机的调整以使异步电动机分别运行在不同负荷状态,为了与仿真中的转差率相吻合以便进行结果对照,将实验电机转差率分别调整到满载(s 约为 0.036)和半载(s 约为 0.018)情况下运行,然后以 1 000 Hz 的采样频率分别采集两种情况下的定子电流,进行转子故障检测。文中将采集一相定子电流,然后经过 Hilbert 变换,将该相定子电流分别移位 120° 、 240° ,形成正序的三相电流用以文中的 Park 矢量模平方函数的计算,这样做的目的的一方面节省电机故障检测系统在硬件方面的开销;另一方面,只利用一相电流平移得到三相电流,避免了因为外界因素导致的三相电流不对称或噪声干扰不平衡而导致的计算误差。

为了能够得到更为准确的结果,对同一台故障电机经过多次试验,结果表明,利用一相电流移相得到的三相电流进行计算的结果远比利用采集到的三相电流直接计算得到的结果准确度高。实验电机满载与半载的实验结果分别见图 4、5。

实验分析:前述已经利用仿真信号对文中的方法进行仿真分析,仿真结果与实验结果见表 2。

对比仿真与实验结果,由于仿真信号属于理想的模拟情况,各方面条件都有利用算法的计算,因

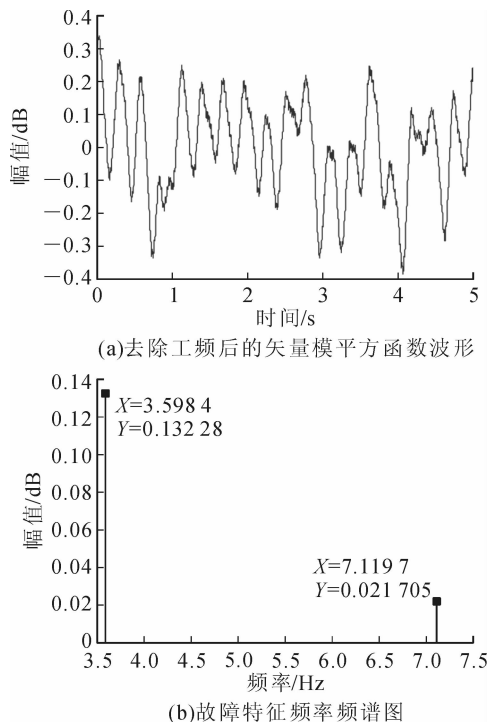


图4 满载时实验分析结果

Fig. 4 Analysis of the experimental result under the full-load condition

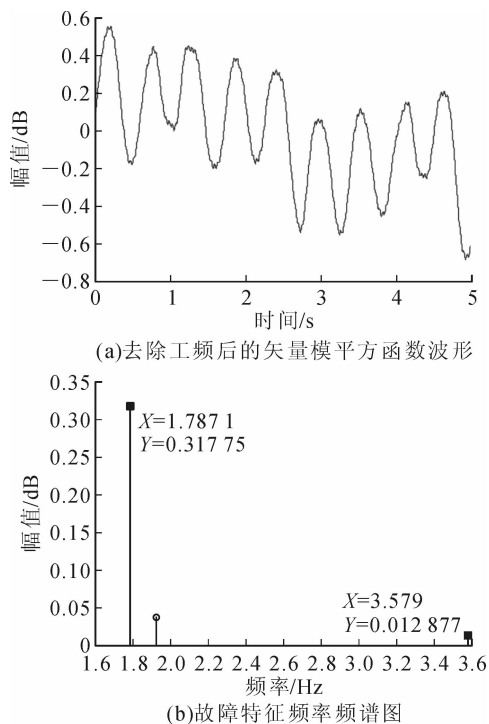


图5 半载时实验分析结果

Fig. 5 Analysis of the experimental result under the half-load condition

而频率的计算结果与实际结果基本达到吻合;实验电机运行过程中所采集到的定子电流信号不可能达到仿真信号的理想程度,虽然经过滤波过程的处理,但是其中必定还会含有很多很难消除的干扰因

表2 仿真与实验结果

Table 2 Results of the simulation and the experiment				
变量	满载($s=0.036$)		半载($s=0.018$)	
	仿真	实验	仿真	实验
$2sf_i/\text{Hz}$	3.600 0	3.598 4	1.800 0	1.787 1
$2sf_i$ 幅值/dB	0.008 175	0.132 280	0.009 630	0.317 750
$4sf_i/\text{Hz}$	7.199 9	7.119 7	3.600 1	3.579 0
$4sf_i$ 幅值/dB	0.000 70	0.021 70	0.001 17	0.012 88

素,因此实验数据频率的计算结果与仿真的计算结果稍有差距,不过误差完全在可以接受的范围。

对于边频分量幅值的求取,仿真信号设置参数的原则是根据实际电机定子电流中所含故障特征信号所占的比例设置,并且多次设置仿真参数以验证算法计算的准确度,因此仿真结果的幅值计算结果并不是与试验数据计算结果对应的,但 $2sf_i$ 幅值大于 $4sf_i$ 幅值的固定关系是没有改变的。

实验过程中同样是利用采集到的 5 s 的定子电流进行实际检测,通过结果可以看出,出现转子断条故障的电机在满载与半载运行情况下,利用文中的新方法准确地检测到了反映故障特征的 $2sf_i$ 、 $4sf_i$ 的频率值,该方法不仅成功避免了噪声和负荷波动的影响,而且计算准确、快速。

5 结论

文中将矢量模平方函数与 ESPRIT 算法结合起来提出一种新的异步电机故障检测方法,通过理论与实验验证得出以下结论:

1)将一相定子电流移相得到三相电流,利用 Park 矢量模平方函数进行变换,可有效去除工频分量,同时避免噪声和负荷波动的影响。

2)经过 Park 矢量模平方处理过的检测信号,其中的频率分量大为减少,利用 ESPRIT 算法对其进行频率计算,能够短小时内准确检测到故障特征频率,计算速度很快,相比于其他检测算法计算量大幅减少。

3)仿真与实验结果同时证明,文中提出的新方法应用于异步电机转子断条故障检测切实可行。

参考文献:

- [1] DELEROI W. Broken bar in squirrel cage rotor of an induction motor, Part 1: Description by superimposed fault currents[J]. Archive for Electrical Engineering, 1984(6):91-99.
- [2] 马宏忠, 胡虔生, 黄允凯, 等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 107-112.

- MA Hongzhong, HU Qiansheng, HUANG Yunkai, et al. Simulating and experiment studying on rotor winding fault of induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4):107-112.
- [3] 许伯强. 异步电动机绕组故障分析及其检测方法研究[D]. 保定:华北电力大学, 2002.
- XU Baiqiang. Asynchronous motor winding fault analysis and detection scheme research[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2002.
- [4] 姜建国, 汪庆生, 杨秉寿, 等. 用自适应方法提取鼠笼式异步电机转子断条的特征分量[J]. 电工技术学报 1990, 5(4):1-6.
- JIANG Jianguo, WANG Qingsheng, YANG Bingshou, et al. Applying the adaptive noise cancellatio to extract the features of squirrel cage induction motor with rotor defects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1990, 5(4):1-6.
- [5] 邱阿瑞. 自适应陷波滤波器在异步电动机故障诊断中的应用[J]. 大电机技术, 1995(5):14-17.
- QIU Arui. Using adaptive notch filter for diagnosing faults in induction motors[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Tubine, 1995(5):14-17.
- [6] 邱阿瑞. 用启动电流的时变频谱诊断鼠笼异步电机转子故障[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4):267-273.
- QIU Arui. Diagnosis of fault in squirrel-cage induction motors using time-varying frequency spectrum of starting stator current[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(4):267-273.
- [7] LIU Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction Motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 485-490.
- [8] MHAMED D, CARDOSO A J M. The use of the instantaneous-reactive-power signature analysis for rotor-cage-fault diagnostics in three-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11):4606-4614.
- [9] 卜乐平, 夏立. 基于 MUSIC 算法的异步电动机转子故障检测方法[J]. 中小型电机, 2005, 32(5):56-59.
- BU Leping, XIA Li. A method for detection rotor faults in synchronous motors based on MUSIC algorithm[J]. S & M Electric Machines, 2005, 32(5):56-59.
- [10] 孙丽玲, 许伯强, 李志远. 基于 MUSIC 与 SAA 的笼型异步电动机转子断条故障检测[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12):205-212.
- SUN Liling, XU Baiqiang, LI Zhiyuan. A MUSIC-SAA based detection method for broken rotor bar fault in induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):205-212.
- [11] 许伯强, 孙丽玲, 李和明. 基于高频率分辨率谱估计技术与优化算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3):140-148.
- XU Baiqiang, SUN Liling, LI Heming. A detection method for rotor fault in induction motors based on high frequency resolution spectrum estimation technique and optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3):140-148.
- [12] 孙丽玲, 许伯强, 李志远. 基于旋转不变信号参数估计技术与模式搜索算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13):89-95.
- SUN Liling, XU Baiqiang, LI Zhiyuan. New detection of rotor fault in induction motors by combining estimation of signal parameters via rotational invariance technique and pattern search algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 89-95.
- [13] 钱征文, 程礼, 李应红. 利用奇异值分解的信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4):459-463.
- QIAN Zhengwen, CHENG Li, LI Yinghong. Noise reduction method based on singular value decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 459-463.
- [14] 康春玉, 章新华. 一种基于奇异值分解的自适应降噪方法[J]. 声学技术, 2008, 27(3):455-458.
- KANG Chunyu, ZHANG Xinhua. An adaptive noise reduction method based on singularity value decompose[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3):455-458.
- [15] 曾作钦. 基于奇异值分解的信号处理方法及其在机械故障诊断中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- ZENG Zuoqin. Signal processing method based on singular value decomposition and its application to mechanical fault diagnosis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [16] 王鹏飞, 侯新国, 夏立. 基于定子电流 Park 矢量变换的感应电机故障诊断[J]. 有色设备, 2003(2):18-20.
- WANG Pengfei, HOU Xinguo, XIA Li. Fault diagnosis of induction motor based on stator current Park vector transformation[J]. Non-Ferrous Metallurgical, 2003(2):18-20.
- [17] 张强, 张建文, 张勇. Park 矢量变换在异步电机故障诊断中的应用[J]. 煤炭技术, 2006, 23(6):35-36.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jianwen, ZHANG Yong. Application of Park vector transformation in fault diagnosis of asynchronous machine [J]. Coal Technology, 2006, 23(6): 35-36.
- [18] 宋辉, 张立华, 李坤, 等. 基于扩展 Park 矢量的电机故障诊断系统设计[J]. 电气自动化, 2012, 34(3):58-59.
- SONG Hui, ZHANG Lihua, LI Kun, et al. Design of fault diagnosis system with extended Park's vecctor method[J]. Electrical Automation, 2012, 34(3):58-59.
- [19] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1995: 119-124.

- 率的优化研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 441-444.
- BAI Xiaoxu, WANG Zhangqi, DONG Ze. Based on particle swarm optimization of boiler thermal efficiency in power station[J]. Computer Simulation, 2014, 31(2): 441-444.
- [16] ZEINODDINI-MEYMAND H, AHIDI B, NAGHIZADEH R A, et al. Optimal surge arrester parameter estimation using a PSO-based multiobjective approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1758-1769.
- [17] 陈达波. 人工鱼群算法在金属氧化物避雷器在线监测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2016(3): 05-109.
- CHEN Dabo. On-line monitoring of metal oxide arrester using artificial fish swarm algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters. 2016(3): 105-109.
- [18] 罗彩建. 考虑谐波电压影响的金属氧化物避雷器在线监测算法研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(3): 53-57.
- LUO Caijian. On-line monitoring of metal oxide arrester using glowworm swarm optimization[J]. Insulators and Surge Arresters. 2016(3): 53-57.
- [19] BAYADI A. Parameter Identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1204-1209.
- [20] 杨仲江, 曹洪亮, 李鹏飞, 等. 基于遗传算法的金属氧化物避雷器在线监测[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3104-3109.
- YANG Zhongjiang, CAO Hongliang, LI Pengfei, et al. On-line monitoring of metal oxide arrester using genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering. 2015, 41(9): 3104-3109.
- 左迎芝(1971—), 女, 工程师, 研究方向为大气电学。
- 曹洪亮(1990—), 男, 助理工程师, 研究方向为电涌保护器研发与设计、雷电危险性分析(通讯作者)。

(上接第 112 页)

- ZHANG Xianda. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 119-124.
- [20] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 188-191.
- WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, et al. The methods and algorithm of spatial spectrum estimation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 188-191.
- 许伯强(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。
- 田士华(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。