

基于谐波小波的变频机转子断条故障诊断

王莉, 王润孝

(西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 变频机转子发生断条故障时, 定子电流中将产生相应特征频率的电流分量。对这种特征信号的提取与监控, 能够实现转子短条故障的检测。研究利用谐波小波的分频特性实现转子断条故障特征信号的提取方法。仿真结果和实际应用表明, 这种方法能够准确地提取转子导条断裂故障的特征信号, 是变频机转子导条断裂故障诊断的一种可靠的方法。

关键词: 谐波小波; 故障诊断; 变频机; 转子断条

中图分类号: TM344.6; TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)22-0009-03

0 引言

变频机是将 50 Hz 的工频电源变换为 400 Hz 中频电源的主要设备。某型武器电源装备中的变频机, 由一部能产生 400 Hz 频率电源的感应式三相同步发电机和一部鼠笼式三相异步电动机所组成。在实际使用中, 转子导条断裂是常见的导致变频机故障的重要因素之一, 统计表明, 大约有 10% 的故障是由转子断条与端环断裂引起的。准确检测转子断条所表现出来的故障特征, 是这种故障诊断的关键。有关方法报道很多^[1,2], 利用小波分析对定子电流中所产生的谐波分量进行提取、实现实时、非接触性检测, 是一种有效的手段。但使用中, 小波函数形式的选取起着决定性的作用。研究表明, 各种小波函数性质差异甚大, 同一信号经不同小波分解表现的结果也不同。谐波小波作为一种复小波, 在频域具有严格的盒形谱紧支特性和简单的解析形式, 与其它小波函数相比, 具有极强的时频分解能力。本文正是利用谐波小波的这些鲜明的性质, 提出一种新的对定子电流中特征频率为 $(1 \pm 2s)f_1$ (f_1 为基频, s 为滑差率) 的分量的提取方法, 以实现变频机转子断条故障更为可靠的诊断。

1 谐波小波的时频特性

谐波小波具有简单的傅里叶变换形式^[3]:

$$W_{m,n}(t) = \begin{cases} 1/[(n-m)(2)], & m(2) < t < n(2) \\ 0, & t < m(2), t > n(2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 和 n 是正实数。式 (1) 表明, 在频带 $[2m, 2n]$ 内, $W_{m,n}$ 具有常数值 $1/[(n-m)(2)]$, 其相

应的小波表达式为

$$W_{m,n}(t) = \frac{e^{-j2\pi nt} - e^{-j2\pi mt}}{j2(n-m)t} \quad (2)$$

用称作水平的 m, n ($n > m$) 来标识频带为 $m(2)$ 到 $n(2)$ 的不同尺度小波, 就形成一系列频带相邻的小波集。令 $a_{m,n,k}$ 表示在水平 m, n 处进一步下移 k 步的小波幅值, 则其表达式为

$$a_{m,n,k} = (n-m) \int_{t-\frac{k}{n-m}}^t f(t) W_{m,n}^{-1} dt \quad (3)$$

上式表明, 该小波具有互成 90 相差的实部偶函数和虚部奇函数, 这一性质使其具有相位锁定的功能, 可构成零相移滤波器。为说明这一点, 设有频率为 f , 初相为 θ 的信号

$$g(t) = \cos(2\pi ft + \theta) \quad (4)$$

则其谐波小波变换结果为

$$h(t) = FT^{-1} \{ G(\omega) W_{m,n}(\omega) \} = e^{j(2\pi f + \theta)t} / [4(n-m)] \quad (5)$$

可见, 式 (4) 所表示的信号经变换后, 相位角保持不变, 这说明从谐波小波变换中仍可获得原始信号的相位信息; 此外由式 (5), 对不同频率 f_k , 适当选取 m, n 的数值, 以使 f_k 恰好落在频带 $[2m_k, 2n_k]$ 之内, 达到对其他信号成分的屏蔽, 从而可针对特定的频段进行信号提取。

2 对变频机转子断条故障诊断的应用

理论与实验研究表明^[4], 电机正常运转时, 定子电流中仅含基波分量, 设其频率为 f_1 , 则转子中感应的三相对称电流的频率为 sf_1 , 其中 s 为转差率。若有断条等故障出现, 转子磁场则会表现出不对称

性,此时,定子绕组中会感应频率为 $(1 \pm 2s)f_1$ 的电流分量,叠加在基频为 f_1 的定子电流上。在相同转差率下,其大小主要由转子不对称的程度来决定。所以在实际中可以通过检测这一信号来判断转子断条故障。

本文利用谐波小波所具有的选频特点,适当选取 m, n 的数值,使频率为 $(1 \pm 2s)f_1$ 的故障特征信号控制地落在确定的频带 $[2m_k, 2n_k]$ 之内,有效地屏蔽其他信号成分的影响,提高检测的灵敏性和可靠性,以实现转子断条故障的实时可靠诊断。

为此,我们根据异步电动机的数学模型方程^[5,6]建模^[7],并利用 Matlab 中的 Simulink 技术,对变频机的异步电动机的正常运行和故障运行情况进行了计算机仿真^[8]。仿真所用采样时间为 0.5 ms,其它仿真参数分别为:额定输出功率 4 kW,额定电压 220 V/380 V,额定电流 14.2 A/8.2 A,额定频率 50 Hz,额定转速 1460 rpm,电机的磁极对数 2,定子槽数 24,转子导条数 30,定子内径 75.4 mm,气隙径向长度 0.35 mm,转子半径 37.35 mm,定子线圈匝数 124匝,定子每相电阻 1.595 Ω ,定子每相漏感 0.004 H,转子导条电阻 3.04 E - 04 Ω ,转子导条漏感 5.16E - 07 H,转子每段端环漏感 1.59E - 09 H,转子每段端环电阻 8.75 E - 07 Ω ,转动惯量为 0.045 kg · m²,转矩损耗系数 0.003 8 kg · m² / s。选用定子基波频率为 50 Hz,则 $(1 - 2s)f_1$ 的数值在 46 ~ 49 Hz 范围内,与基波频率非常接近,很难通过一般的滤波方法实现其信号提取。用谐波小波则能可靠地实现这一信号的提取。下面介绍其结果。

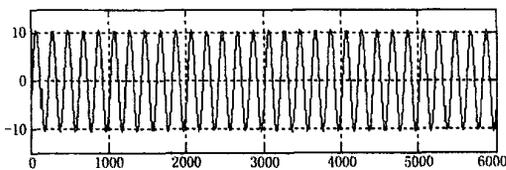


图 1 1根导条断裂时定子 A 相电流

Fig 1 Current of phase A of the stator while one of the rotor bar is broken

图 1 为计算机仿真所得到的变频机转子导条断裂一根时的定子 A 相电流波形,可以看出,故障的特征信号在时域图上难以识别。图 2 给出在上述情况下,谐波小波分析边频 $(1 - 2s)f_1$ 所得到的结果。其中 $m = 46, n = 49$ 。(a)图是谐波系数的实部,(b)图是对其进一步进行快速离散傅里叶变换得到的结果,其尖锐峰值出现在 47.5 Hz ($(1 - 2s)f_1$) 附近处。

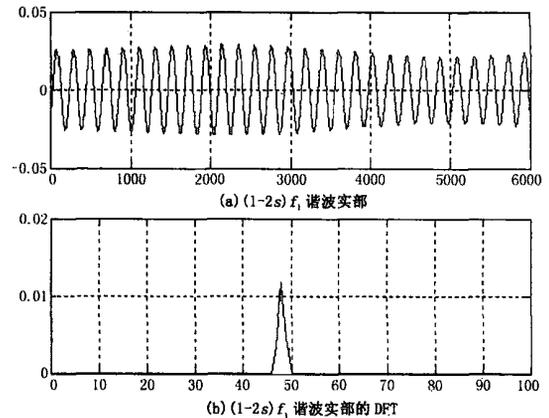


图 2 1根导条断裂时的小波变换结果

Fig 2 The wavelet spectra of the phase A current of the stator when one of the rotor bar is broken

图 3 给出了同样情况下,谐波小波分析边频 $(1 + 2s)f_1$ 所得到的结果,图中所选数值 $m = 51, n = 54$ 。所提取的信号谐波小波变换在频率空间表现为尖锐的函数形式,为检测仪的识别和提取信号提供了极大的可靠保障。

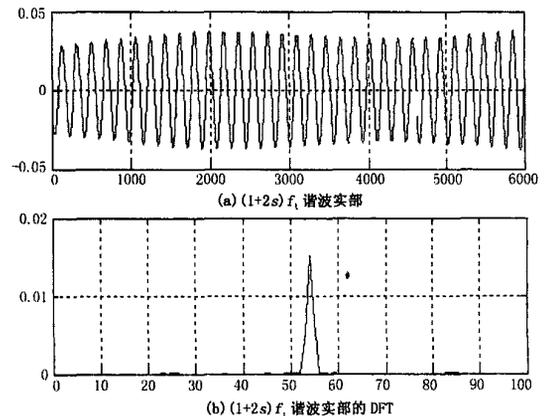


图 3 1根导条断裂时小波变换的结果

Fig 3 The wavelet transform of phase A current when one of the rotor bar is broken

图 4 给出了导条断裂两根时的结果,比较图 2 (b)和图 4 的数值结果可见,转子导条断裂两根时的边频特征信号的幅值比一根转子导条断裂时的幅值更大。

以上研究表明,利用谐波小波变换的分频特性,不仅可以方便地实现断条特征信号的提取,而且通过对边频特征信号的幅值分析,也可对故障出现的程度进行正确估计。

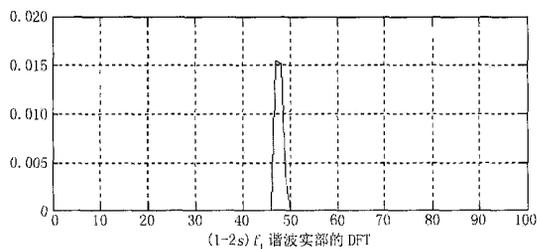


图 4 2根导条断裂时的小波变换结果

Fig 4 The wavelet spectra of the phase A current of the stator when two of the rotor bar is broken

3 实际应用

为了试验检测这种故障信号提取方法的正确性、可靠性,笔者在某导弹部队对两台相同变频机组(BP-50)进行了试验,其中一台运行正常,另一台处于断条故障状态。变频器参数为:输入电压 220/380 V (/Y),输入频率 50 Hz,输入功率 64 kW,额定转速 2 910 转 /分。试验中,两台变频器均处于空载状态,所选采样频率为 800 Hz,采样长度为 8 100。经计算变频机的转差率 $s=0.025$,利用上述谐波小波进行分析,其中处于故障状态的变频器明显地表现出断条的故障特征,结果如图 5 所示。

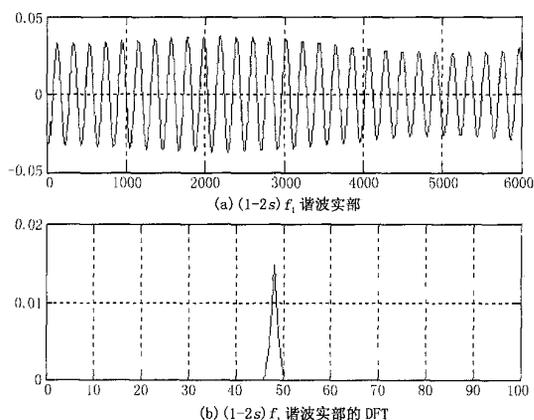


图 5 某导弹营变频器定子电流的小波变换结果

Fig 5 The wavelet spectra of the stator current tested in a frequency converter of a missile system

当取 $m=46, n=49$ 时,从图 5 可以看出,边频约为 $47.5 \text{ Hz}((1-2s)f_1)$;取 $m=51, n=54$ 时,边频约为 $52.5 \text{ Hz}((1 \pm 2s)f_1)$ (限于篇幅,相应的小波分析图略),且边频特征信号的幅值也较大。

4 结论

谐波小波在频域具有严格的盒形谱紧支特性,

因而表现出很好的分频能力。利用谐波小波变换,能够将信号正交地分解到相互独立的不同频带,对转子导条断裂故障特征信号的提取,显示出较好的灵敏性和可操作性,因而具有广阔的应用前景。仿真计算和实际应用表明,利用谐波小波变换实现变频器转子导条断裂故障信号检测,能够准确地提取到转子导条断裂故障的特征信号,为变频器转子导条断裂故障诊断提供了一种可实际应用的方法。

参考文献:

- [1] 侯新国,夏立,吴正国,等. 基于小波和神经网络的异步电机转子故障诊断方法研究 [J]. 数据采集与处理, 2004, 19(1): 32-36
HOU Xin-guo, XIA Li, WU Zheng-guo, et al Fault Diagnosis Method for Induction Motor Based on Wavelet Transformation and Neural Network [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(1): 32-36
- [2] 任震,张征平,黄雯莹,等. 异步电动机早期故障检测技术发展评述 [J]. 华南理工大学学报, 2001, 29(11): 67-70
REN Zhen, ZHANG Zheng-ping, HUANG Wen-ying, et al Review on the Development of Detection Techniques of Motor Incipient Faults [J]. Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition, 2001, 29(11): 67-70
- [3] 李宏亮,黄润华,韩国明,等. 谐波小波的时频特性分析及其在故障诊断中的应用 [J]. 机械强度, 2000, 22(2): 81-85.
LI Hong-liang, HUANG Run-hua, HAN Guo-ming, et al Analysis of Time-Frequency Characteristics of Harmonic Wavelet and Its Application in Fault Diagnosis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2000, 22(2): 81-85.
- [4] 许伯强,李和明,孙苓生,等. 笼型异步电动机转子断条故障检测新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 115-119.
XU Bo-qiang, LI He-ming, SUN Li-ling, et al A Novel Detection Method for Broken Rotor Bars in Induction Motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 115-119.
- [5] Kliman GB, Præmerlani W J, Koegl R A, et al Sensitive On-line Turn-to-turn Fault Detection in AC motors [J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28: 915-927.

(下转第 31 页 continued on page 31)

Time Series Analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998: 903-995.

[4] Flandrin P, Goncalves P. Empirical Mode Decompositions as Data-driven Wavelet-like Expansions[J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2004, 2(4): 477-496

[5] Hayes M H. Statistical Digital Signal Processing and Modeling [M]. John Wiley and Sons, Inc, 1996

[6] 徐剑, 黄成军, 邵震宇, 等. 基于小波集合的局部放电信息提取算法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 36-40

XU Jian, HUANG Cheng-jun, SHAO Zhen-yu, et al Research on a Wavelet-based Algorithm for Extracting PD

Cluster of Diversiform Features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 36-40.

收稿日期: 2006-05-31; 修回日期: 2006-06-22

作者简介:

钱勇(1977-),男,博士研究生,研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断; E-mail: qian_yong@sjtu.edu.cn

黄成军(1970-),男,博士,副教授,研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断技术;

戚伟(1983-),女,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统在在线监测系统中的应用。

Application of adaptive filtering algorithm

based on empirical mode decomposition to suppress DSI in PD detection

QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, QI Wei

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Adaptive filter is an effective method for suppressing Discrete Spectrum Interference (DSI). For DSI with single frequency, it is easy to set the parameters of the filter. However, it will become difficult when faces with DSI of multi-frequency, which often occurs in partial discharge monitoring systems. Based on the frequency splitting characteristics of Empirical Mode Decomposition (EMD), this paper incorporates it into the adaptive filtering algorithm and a novel algorithm was proposed. After EMD of the noisy signals, DSIs of different main frequency could be decomposed into different Intrinsic Mode Functions (IMF), and then multi-frequency DSI would turn to some single-frequency DSIs. Based on this transformation, problems about settings of adaptive filter can be solved. Results obtained from simulation signals and on-site data confirm its validity.

Key words: empirical mode decomposition; intrinsic mode function; adaptive filter; partial discharge; discrete spectrum interference

(上接第 11 页 continued from page 11)

[6] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A, 1993, 443(10): 203-225.

[7] 常鲜戎, 樊尚, 科康波, 等. 三相异步电机新模型及其仿真与实验 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 140-145.

CHANG Xian-rong, FAN Shang, Cocquemot V, et al The New Three Phase Asynchronous Machine Model and Simulation Experiment [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 140-145.

[8] 徐小来, 王莉, 谢一静. 基于 MATLAB 的异步电动机定

子绕组故障仿真 [J]. 电气应用, 2005, (9): 23-24, 45.

XU Xiao-lai, WANG Li, XIE Yi-jing. Simulating on Stator Winding Fault of A synchronous Motor Based on Matlab [J]. Electro Technical Application, 2005, (9): 23-24, 45.

收稿日期: 2006-05-24

作者简介:

王莉(1958-),女,教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化、故障诊断。E-mail: kjgcdxw1@sina.com

The rotor bar broken fault diagnosis of an asynchronous motor based on harmonic wavelet

WANG Li, WANG Run-xiao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: When a fault of the rotor bar of an frequency converter has taken place, the characteristic signal components of the currents will be added into the stator current. In this paper, the transform of the harmonic wavelet method is applied to detect the characteristic signal components of the rotor bar broken fault. The result shows that not only it can be used to detect the characteristic signal of the rotor bar broken fault with great sensitivity but also be used to evaluate the severity of the fault.

Key words: harmonic wavelet; fault diagnosis; frequency converter; rotor bar broken