

基于 HHT 方法的异步电动机运行模式识别

刘振兴, 张文蓉

(武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081)

摘要: 针对变频调速异步电动机运行模式的多样性导致在检测和故障诊断前需要进行运行模式识别的问题, 在 Hilbert-Huang 变换的基础上提出了一种异步电动机运行模式识别的方法。该方法通过经验模式分解自适应得到本征模函数分量, 结合 Hilbert 谱分析提取信号的瞬时频率, 获取频率随时间的变化规律, 确定运行模式, 为变频调速异步电动机的故障诊断提供了基础。在 Matlab 环境下, 对变频调速异步电动机的定子电压信号进行仿真, 仿真结果表明了该方法的有效性和快速性。

关键词: Hilbert-Huang 变换; 经验模式分解; Hilbert 变换; 异步电动机; 运行模式

中图分类号: TM 343; TP 206⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0055-03

0 引言

目前, 对异步电动机故障诊断技术的研究主要集中在正弦波供电的恒速条件下, 通过采集振动、电流等信号, 经频谱分析等信号处理手段, 提取相应故障的特征频率成分, 达到故障诊断的目的。变频调速技术的广泛应用, 不仅导致电源谐波含量增加, 而且调速过程中电动机供电电源的频率随时间变化, 原有的诊断规则已经难以满足要求^[1]。

变频调速异步电动机系统既可运行在恒频恒速状态, 也可以运行在恒加速、恒减速和其他状态下, 由于运行模式的多样性, 在检测和故障诊断过程中, 需要针对不同的运行模式采用不同的方法来提取故障特征, 因此需要事先进行运行模式的识别。

希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang Transform)方法在信号分析与处理领域得到广泛的应用。与现有的信号处理方法相比, HHT 方法能够对非线性、非平稳信号进行处理, 不需要事先确定基函数, 是一种更具适应性的时频局部化分析方法^[2-3]。其经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)得到的本征模函数 IMF(Intrinsic Mode Function)能够反映原始信号的固有特性, 通常具有实际物理意义; Hilbert 能量谱能够清晰地表明能量随时频的具体分布, 大部分能量都集中在有限的能量谱线上; 另外, HHT 方法中时间分辨率不变, 而且精度很高, 其频率分辨率则可随信号内在的特性进行自适应调节^[4-5]。

本文将 HHT 方法用于电机运行模式的判别, 通过提取信号的瞬时频率变化规律, 达到识别运行模式的目的, 为深入的故障诊断打下基础。

1 HHT 方法简介

HHT 方法通常包括 EMD 和 Hilbert 谱分析 2 个步骤^[6]。设一个时间序列信号为 $X(t)$, 找出 $X(t)$ 所有的极大值点和极小值点并得到原数据序列的上、下包络线, 得到上、下包络的平均曲线为 $m_1(t)$ 。将 $X(t)$ 减去该平均包络后, 得到 $h_1(t)$:

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (1)$$

一般情况下, 所得到的 $h_1(t)$ 不是一个平稳数据序列, 把 $h_1(t)$ 作为原始数据, 重复上述过程。如此循环处理 K 次, 直到所得到的平均包络值趋于零为止。

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \\ C_1(t) = h_{1k}(t) \quad (2)$$

$C_1(t)$ 即为第 1 个 IMF 分量, 代表原始数据序列中最高频的组成成分。将 $X(t)$ 减去 $C_1(t)$, 得到一个去掉高频组成成分的差值数据序列 $r_1(t)$:

$$r_1(t) = X(t) - C_1(t) \quad (3)$$

将 $r_1(t)$ 作为原始数据, 循环重复上述步骤, 得到 n 个 IMF, 直到最后一个差值序列 $r_n(t)$ 不可再被分解为止。循环结束, 由式(1)~(3)得:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

可见原始信号 $X(t)$ 被分解为了 n 个 IMF 和 1 个残余分量之和。分量 $C_i(t)$ 分别包含了信号从高到低的不同频率成分, 即高频信号总是最先被分离出来^[6-7]。

对每个 IMF 进行 Hilbert 变换:

$$x_i(t) = C_i(t) \\ y_i(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

其中, P 表示柯西主分量。

$x_i(t)$ 与 $y_i(t)$ 可以合成为解析信号 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = x_i(t) + jy_i(t) = a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (6)$$

其中, $a_i(t)$ 、 $\theta_i(t)$ 分别为时变的幅值和相位。

$$a_i(t) = \sqrt{x_i^2(t) + y_i^2(t)} \quad (7)$$

$$\theta_i(t) = \arctan[y_i(t)/x_i(t)] \quad (8)$$

进一步可以定义瞬时频率 $\omega_i(t)$:

$$\omega_i(t) = d\theta_i(t)/dt \quad (9)$$

忽略残余项,由式(5)~(8)可以得出:

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\theta_i(t)} = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \quad (10)$$

式(10)被定义为 Hilbert 幅值谱,简称 Hilbert 谱^[7]:

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \quad (11)$$

同样,可以得到 Hilbert 边际谱 $h(\omega)$ 如下:

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega, t) dt \quad (12)$$

由此,EMD 和与之相应的 Hilbert 谱信号分析方法统称为 HHT 方法。

2 基于 HHT 方法的电机运行模式的确定

现有的变频调速系统,均可设定斜坡函数的相关参数来改变运行模式。按照电源基波频率的变化规律,可以分为恒速(如图 1 中直线 1 所示)、恒加速(如图 1 中直线 2 所示,频率随时间线性增加)、恒减速(类似于恒加速,频率随时间线性减小)以及其他规律等运行模式^[8-10]。

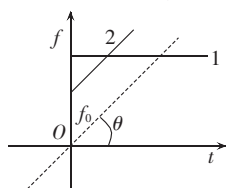


图 1 频率变化规律示意图

Fig.1 Schematic diagram of frequency variation law

显然,当恒速运行时,电源基波频率为一恒定值,不随时间的变化而变化,此时在时间-频率平面上所得的是一条与时间坐标平行的直线,即倾斜角度为 0;在恒加速过程中,基波频率随时间按线性规律增加,在时间-频率平面上所得的应是一条随时间递增变化的直线,与时间坐标的夹角是恒定的锐角,即 $\tan \theta > 0$;同样,当电机处于恒减速运行模式时,在时间-频率平面上所得的应是一条随时间递减变化的直线,与时间坐标的夹角是恒定的钝角,即 $\tan \theta < 0$;在其他运行模式下,基波频率按照其他规律变化。

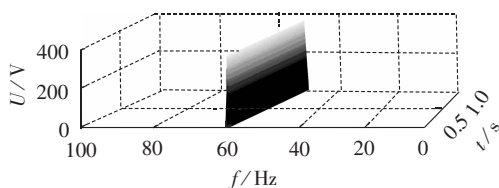
按照对异步电机运行模式的分类可以看出,为了识别运行方式,需要有效提取瞬时频率随时间的变化规律。很明显,HHT 方法的 Hilbert 能量谱能充分反映信号的瞬时频率特性。为此在 Matlab 环境下设定相应的运行模式下的电压基波信号,通过仿真可以检验其有效性。

2.1 恒频、恒压模式仿真

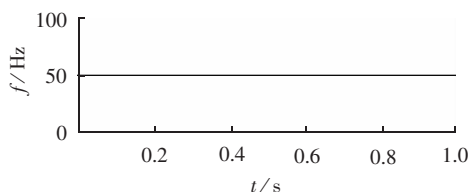
恒频、恒压模式下,以额定运行状态为例,设变频器输出电压基波表达式为

$$u = 380\sqrt{2} \cos(2\pi 50t) \quad (13)$$

通过 HHT 方法得到如图 2 所示的仿真结果。三维时-频谱图显示出了恒定的基波分量,时频图上平行于时间轴的直线表明 $\tan \theta = 0$,与假定运行模式完全一致。



(a) 三维谱图



(b) 时频图

图 2 恒速模式仿真

Fig.2 Simulation of constant speed mode

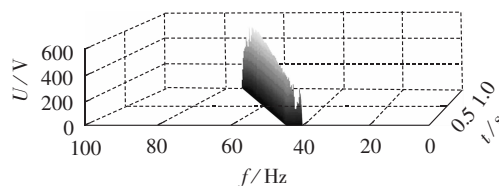
2.2 恒加速模式仿真

按照近似恒磁通控制要求,变频器基波电压与频率之比为常数。假设电源基波频率在 1 s 内由 30 Hz 线性上升到 50 Hz,当频率为 50 Hz 时,对应电压为 380 V,又由于电压和频率的比值为一常数,即 $380/50$,所以当频率随时间线性增加的时候,变频器输出电压的基波表达式为

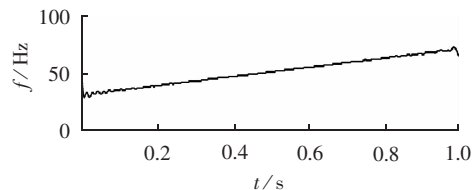
$$u = (228 + 152t)\sqrt{2} \cos[2\pi(30 + 20t)t] \quad (14)$$

通过 HHT 方法得到的仿真结果如图 3 所示,三维时-频谱图显示出了电压幅值和频率随时间的变化趋势,时频图上的上升直线直观地表明频率随时间的变化规律,可以用于运行模式的判定。与假定运行模式完全一致。

恒减速和其他运行方式可以得到同样的结果。据此可以认为使用 HHT 方法完全可以快速识别变频调速异步电动机系统的运行模式。



(a) 三维谱图



(b) 时频图

图 3 恒加速模式仿真

Fig.3 Simulation of the constant acceleration mode

3 结语

在变频调速异步电动机系统的故障诊断中,由于电源成分和运行模式的复杂性,不能使用单一的信号处理方法来提取故障特征,因此得事先确定运行模式。本文在忽略电源谐波的理想状态下,利用HHT方法对恒频和线性变频情况下的运行模式进行识别,仿真效果良好。对于实际系统中,如何在有电源谐波的情况下提取变频的基波主分量,将在以后的工作中进行深入探讨。

参考文献:

- [1] 刘振兴,张哲,尹项根. 异步电动机的状态监测与故障诊断综述[J]. 武汉科技大学学报,2001,24(3):285-289.
LIU Zhenxing,ZHANG Zhe,YIN Xianggen. A summary of on-line condition monitoring and fault diagnostics for 3-phase induction motors[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology,2001,24(3):285-289.
- [2] HUANG N E,SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A,1998,454(3):903-995.
- [3] 苏玉香,刘志刚,李东敏,等. 一种改善HHT端点效应的新方法及其在电能质量中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):40-45.
SU Yuxiang,LIU Zhigang,LI Dongmin, et al. End effect restraint of Hilbert-Huang transform and its application in power quality monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):40-45.
- [4] 向玲,朱永利,唐贵基. HHT方法在转子振动故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(35):84-89.
XIANG Ling,ZHU Yongli,TANG Guiji. Application of Hilbert-Huang transform method in vibration faults diagnosis for rotor system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(35):84-89.
- [5] 胡劲松,杨世锡. 基于HHT的旋转机械故障诊断方法研究[J].

动力工程,2004,24(6):845-851.

HU Jinsong,YANG Shixi. Research on HHT-based fault diagnosis method for rotating machinery[J]. Power Engineering,2004,24(6):845-851.

- [6] 陈一贤. HHT方法分析[D]. 杭州:浙江大学理学院,2007.
CHEN Yixian. Analysis of the HHT method[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [7] 孙晖. 经验模态分解理论与应用研究[D]. 杭州:浙江大学信息学院,2005.
SUN Hui. EMD theory and application[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2005.
- [8] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):158-161.
LIU Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe. On-line monitoring and diagnosis way based on spectrum analysis of Hilbert modulus in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):158-161.
- [9] 黄琼玲. 分数阶 Fourier 变换在变频调速异步电动机故障诊断中的应用[D]. 武汉:武汉科技大学信息科学与工程学院,2008.
HUANG Qionglin. Application of fractional Fourier transform method in fault diagnosis for variable frequency speed control induction machine system[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology,2008.
- [10] 胡国胜,涂用军. 基于 HHT 变换的电动机故障信号频率分析[J]. 电气应用,2005,24(10):107-110.
HU Guosheng,TU Yongjun. The study of motor fault signal frequency pursuing based on Hilbert-Huang transform[J]. Electrotechnical Application,2005,24(10):107-110.

(编辑:柏英武)

作者简介:

刘振兴(1965-),男,湖南桃江人,副院长,教授,博士研究生导师,研究方向为电机状态监测、电力系统继电保护(E-mail:zhenxingliu@wust.edu.cn);

张文蓉(1984-),女,湖北洪湖人,硕士研究生,研究方向为检测技术与自动化装置(E-mail:wenrong0929@163.com)。

Operation mode identification for induction motors based on HHT method

LIU Zhenxing,ZHANG Wenrong

(Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Detection Technique,Ministry of Education,Wuhan University of Science and Technology,Wuhan 430081,China)

Abstract: Because of its variety,the operation mode identification is necessary during the detection and fault diagnosis of variable-frequency induction motor. An operation mode identification method is proposed based on HHT(Hilbert-Huang Transform),which obtains adaptively the components of IMF(Intrinsic Mode Function) by EMD(Empirical Mode Decomposition) and extracts the instantaneous frequency of signal by Hilbert spectral analysis to achieve the frequency variation law in time domain and determine the operation mode. Simulation of the stator voltage based on Matlab shows the validity and rapidity of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(60874109).

Key words: Hilbert-Huang transform; EMD; Hilbert transform; induction motor; operation mode