

基于小波变换的无刷直流电机逆变器故障检测仿真研究*

贺昌权,包广清

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对无刷直流电动机逆变器功率管短路及开路故障,采用小波变换对电机转速信号进行时间-频率域分析,并结合傅里叶变换进行对比研究。仿真结果表明,小波变换能有效地实现逆变器的故障检测。

关键词: 无刷直流电机;逆变器;故障检测;小波变换;傅里叶变换

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Simulation research of brushless direct current motor inverter fault detection based on wavelet transform

HE Chang Quan, BAO Guang Qing

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the short-circuit and open-circuit fault of transistors in the inverter of brushless direct current motor, this paper uses wavelet transform to analyze the signal of the running speed of the motor in the time-frequency domain and combines with Fourier transform to carry out comparative study. The simulation results show that wavelet transform can effectively achieve the fault detection of inverter.

Key words: brushless direct current motor; inverter; fault detect; wavelet transform; Fourier transform

逆变器供电的无刷直流电机驱动系统具有运行性能优良、节能效果显著等优点,广泛应用于工业、商业、航空、军事等领域。然而在实际应用过程中,驱动系统的电动机、逆变器及其控制电路是最易发生故障的薄弱环节,其可靠性问题始终没有得到充分解决。其中,功率半导体器件是驱动系统中最易发生故障的薄弱环节,其故障率约占整个系统故障的 82.5%^[1]。

功率变换器故障将影响电机的供电质量,使电动机在非平衡电源状态下工作,不但降低电机使用寿命,还造成驱动系统整体工作性能恶化。这在一般场合会影响生产的正常进行,带来经济损失,而在航空、军事等重要场合,将造成灾难性后果。为了及时了解电动机工作状态并有效防止逆变器故障对电动机的损坏,对电动机驱动系统的故障检测显得至关重要。参考文献[1]中是通过卡尔曼滤波方法对变频调速系统基本正序对称分量的实时在线估计来实现逆变器故障的实时在线检测。但

是,卡尔曼滤波的不足是需要知道系统的状态模型、量测模型和噪声模型,且越精确越好。参考文献[2]中采用傅里叶变换来实现逆变器的故障检测,但是在实际信号采集中,很难实现整周期采样,以至在信号处理时容易出现谱泄露问题,从而影响傅里叶变换的准确性。本文采用小波变换对电机定子电流进行分析,实现逆变器的故障检测,克服了参考文献[1]需要建立精确数学模型和参考文献[2]需要整周期采样的缺陷,实验证明了小波变换能起到比较好的检测故障的作用。

1 小波理论及故障检测的原理

1.1 小波变换理论^[3]

小波(wavelet),即小区域的波,是一种特殊的长度有限、平均值为 0 的波形。

小波函数的确切定义为:设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数,即 $\psi(t) \in L^2(R)$,若其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件:

* 基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(3ZS061-A25-050)

$$C_{\psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数, 称式(1)为小波函数的可容许条件。将母函数 $\psi(t)$ 伸缩和平移之后得到的函数族称为分析小波, 其连续小波基函数形式为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (2)$$

式中, $a, \tau \in \mathbb{R}$, a 为伸缩因子 ($a > 0$), τ 为平移因子, $\psi_{a,\tau}(t)$ 为依赖于参数 a, τ 的小波基函数。

对任一函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 连续小波变换定义为:

$$WT_f(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt$$

连续小波逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} WT_f(a, \tau) \psi_{a,\tau}(t) d\tau$$

其离散小波基函数形式为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k)$$

离散小波变换定义为:

$$WT_f(j, k) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt$$

离散小波逆变换为(如果离散小波序列构成的一个框架上、下界分别为 A, B):

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(t)$$

1.2 小波故障检测的原理

在电机发生故障时, 信号中往往含有大量的时变、短时冲击、突发性质的成分, 传统的信号分析方法如傅里叶变换无能为力, 不能有效地提取出电机的故障特征。在电机测试领域, 也经常会遇到非平稳信号, 应用傅里叶变换则不能得到有效的结果。小波变换作为一种时频域分析方法, 它在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力, 特别适宜于非平稳信号的处理, 从而为最终实现电机在线故障诊断及电机参数的精确测试提供了良好的技术支持^[4]。

在对电机故障诊断的电流信号分析中, 通常比较关心其低频部分。因为在实际工程中, 有用信号基本包含在低频信号中, 所以只对低频部分进行逐步分解, 而对高频部分未予分解。如图 1 是小波对原始信号进行 3 层小波分解示意图。

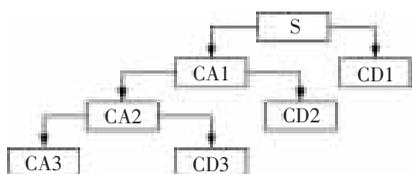


图 1 3 层小波分解示意图

小波变换对信号进行分析一般可归纳为以下 3 个步骤^[5]:

(1)分解。根据问题的性质, 决定信号小波分解的尺度, 也就是决定将信号分解到多少层, 然后选用一种合适的小波, 对信号进行分解。

(2)信号处理。如果是数据压缩和信号降噪, 则将分解后非显著的小波系数去掉; 如果是信号特征提取, 就保留相应频带上的小波系数。

(3)重构。利用经过处理后的小波系数进行信号的重构。如果是数据压缩, 则重构后的信号要保证高精度地再现原始信号; 如果是信号降噪, 则重构后的信号中应含有尽量少的噪声; 如果是特征提取, 就重构相应频带上的信号, 即获取特征信号。

2 逆变器故障模型及小波仿真分析

图 2 为无刷直流电动机逆变器驱动系统, 逆变器供电的电动机驱动系统的故障主要有以下几种情况: (1)功率开关元件短路故障; (2)功率开关元件开路故障; (3)逆变器一相桥臂 2 个开关元件同时开路故障; (4)电动机一相开路故障^[2]。

从电力电子电路的实际运行表明, 功率管工作在高频开关状态, 损耗较大, 发热严重, 发生故障的概率最大^[6], 并且以功率管的开路和短路最为常见。本文只针对前 2 种故障作具体仿真研究。可以证明在逆变器中, 任意一相或电子器件发生故障对逆变器的影响是对称的。所以在此仅讨论某一相故障和某一电子器件故障。

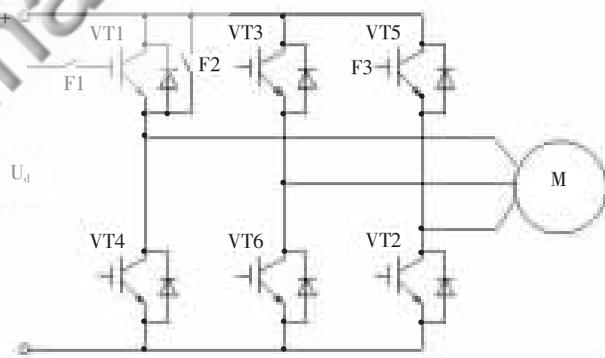


图 2 无刷直流电动机的逆变器驱动系统

系统的仿真实验在一个典型的无刷直流电机系统中进行, 电机参数如下: 额定转速 $n=365 \text{ r/min}$, 定子相绕组电阻 $R=0.388 \Omega$, 定子电感 $L=0.00284 \text{ H}$, 转动惯量 $J=0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 极对数 $p=1$, 直流电压为 300 V , $t=0.2 \text{ s}$ 时给定信号施加故障。

2.1 开关管短路故障及小波检测分析

VT1 发生短路故障后, 故障相(A 相)直接与负极相接, 所以该相电流不可能再为负值。为了与故障相电流平衡, B、C 两相出现了与之平衡的负向电流, 结果产生了很大的制动转矩, 且转矩波动很大, 同时电机的转速下降很快, 甚至可能出现停机。转速特性如图 3 所示。

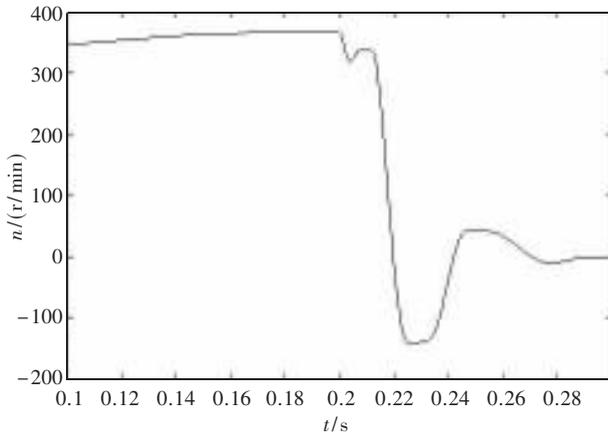


图3 开关管 VT1 短路故障下的电机转速波形

傅里叶变换用到的基本函数只有 \sin 、 \cos 或 \exp ，具有唯一性，小波分析所用的小波函数则不是唯一的，同一个工程用不同的小波函数进行分析有时结果相差甚远。小波函数的选用是小波分析应用到实际中的一个难点问题也是分析研究的一个热点问题。

小波基的选择要根据小波的形状、支撑长度和规则性。对于信号的奇异性检测问题是：当信号产生奇异点时，在突变点处含有高频成分，并且信号的形状还很不规则，如用 Daubechies 小波族的小波 $db1 \sim db10$ 进行变换可以发现： $db1$ 、 $db2$ 、 $db3$ 和 $db4$ 的检测结果要比 $db5$ 、 $db6$ 、 $db7$ 、 $db8$ 、 $db9$ 和 $db10$ 好。这是因为 $db1$ 、 $db2$ 、 $db3$ 和 $db4$ 的形状规则性要比 $db5$ 、 $db6$ 、 $db7$ 、 $db8$ 、 $db9$ 和 $db10$ 差，如表 1 所示。规则性系数越大，规则性越好，并且前面 4 个小波基的支撑长度要比后面 6 个短。

表 1 部分 db 系小波规则性系数表

小波名	db1=Haar	db2	db3	db4	db5	db7	db10
规则性系数	0	0.5	0.91	1.27	1.59	2.15	2.90

实验证明，在精确定位信号的不连续点方面，支撑范围小、规则性差的小波比支撑范围大、规则性好的小波具有较大的优势。

在 Matlab 中调用小波函数对开关管 VT1 短路故障下的电机转速波形进行仿真研究，通过上述理论分析，本文选用规则性差、支撑范围小的 Haar 小波对其进行 3 层分解，仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出，小波变换能很好地检测出逆变器在 0.2 s 时发生了故障。

2.2 开关管开路故障及小波检测分析

开关管发生开路故障后，故障相(A 相)由于不再与电源正极相接，因此该相相电流不再为正值。而另外(B、C 相)两相电流明显增大，同时输出一个波动很大的转矩，电动机的转速也很明显，并有逐渐降低的趋势。转速特性如图 5 所示。

在 Matlab 中调用小波函数对开关管 VT1 开路故障下的电机转速波形进行仿真分析，同样选用 Haar 小波

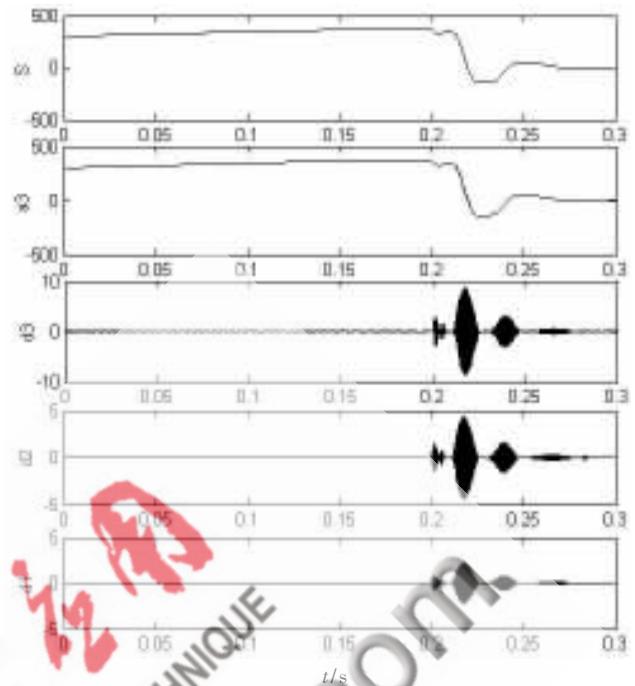


图4 小波分解 A 相 VT1 短路故障电机转速波形

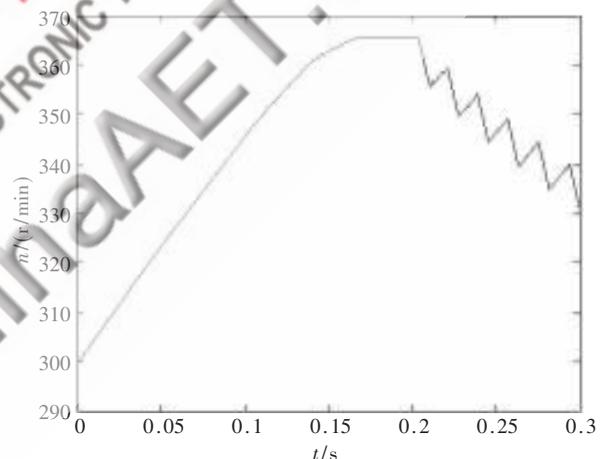


图5 开关管 VT1 开路故障下的电机转速波形

对其进行 3 层小波分解，仿真结果如图 6 所示。从图中可以清晰地看出，小波变换能很好地检测出逆变器在 0.2 s 时发生了故障。

3 FFT 对比研究

FFT 算法的成立要求被分析信号必须满足如下隐含条件：

(1) 满足采样定理，即采样频率 f_s 必须大于信号所含最高频率 f_m 的 2 倍。

(2) 信号平稳并以 NT_s 为周期作周期延拓。

(3) 信号所含频率分量为基波的整数倍，使被分析时窗内恰好含有各次谐波的整周期采样值。

由于逆变器故障状态下的基波频率是波动的，这样便难以保证采样频率为信号频率的整数倍关系。另外，

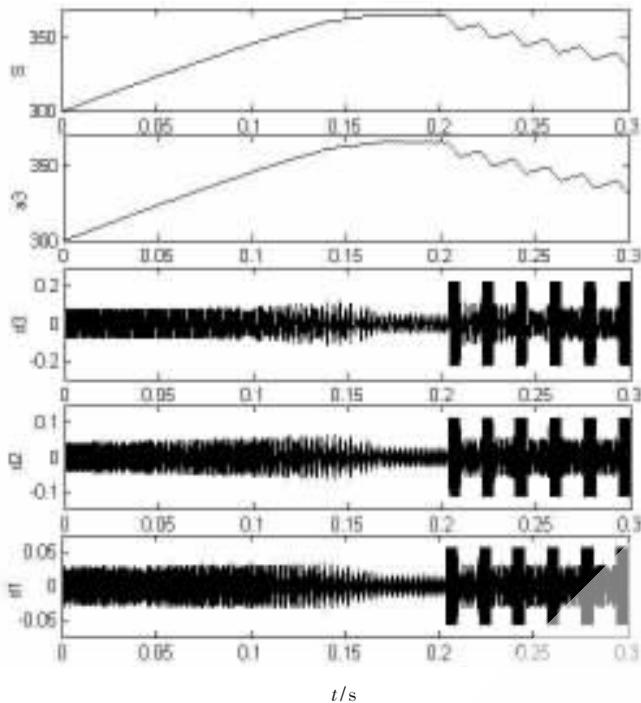


图6 小波分解 A 相 VT1 开路故障电机转速波形

即使基波频率保持不变,也未必能保证采样频率为信号频率的整数倍,这样会严重影响信号的傅里叶变换的准确性。

小波分析技术从理论上直接消除了 FFT 的缺陷:

(1)由于小波分析是按照频带而不是频点的方式处理频域信息,取消其整周期采样限制;(2)小波变换能根据信号频率的高低,通过尺度伸缩得到可调的“柔性窗”。这使其具备很强的奇异、突变信号的识别能力。鉴于此,本文选用小波变换作为电动机故障检测的工具。

傅里叶变换用于分析瞬态故障信号时,把瞬态奇异信号的频域信息分配给整个频域范围内的其他频率分量,即把反映故障信息的局部特性在整个频域内平均掉了,不能很准确地提取故障信息,从而使分析结果产生较大误差。如图 7 所示,对开关管 VT1 短路故障下电机转速信号进行 FFT 分析后,基本上看不出突变信号的频

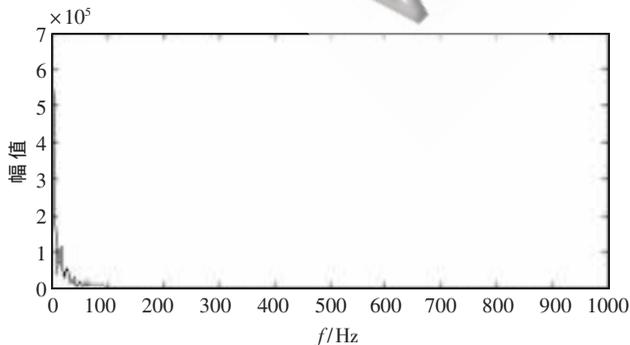


图7 开关管 VT1 短路故障下电机转速频谱图

率信息,也很难提取故障信息,更无法得知故障发生的时间点。

图 8 为开关管 VT1 开路故障下电机转速信号傅里叶变换频谱图,从图中看不出有任何异常的频率信号出现,同时也丢失了时间信息。因为傅里叶分析是将信号完全在频域范围中分析,它不能给出信号在某个时间点的变化情况。而小波分析由于能同时在时频域中对信号进行多尺度分析,在信号出现突变时,其小波变换后的系数具有模量极大值,因而可以通过对模量极大值点的检测来确定故障发生的时间点。

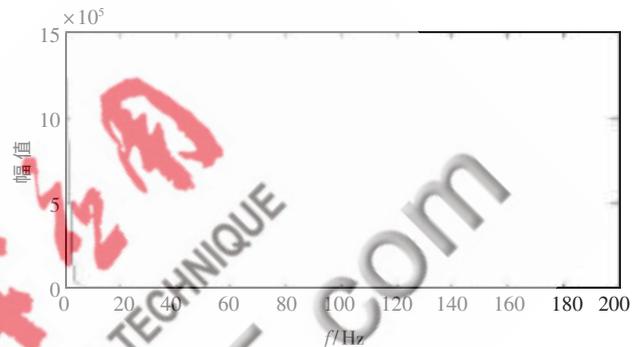


图8 开关管 VT1 开路故障下电机转速频谱图

本文对无刷直流电动机在故障状态下的运行过程进行仿真,采集电机在故障状态下运行的电机转速波形采用小波仿真分析并结合傅里叶分析进行对比研究。仿真结果表明,由于小波变换具有良好的时域频域特性,且对突变信号很敏感,所以小波分析方法能够有效实现逆变器故障的实时在线检测。

虽然仿真所得的有关数据对电机故障的预测和鉴别有重要的指导意义,但要进一步准确定位故障元件,进行系统自修复控制,还需借助模式识别、模糊推理等智能方法进行深入讨论。

参考文献

- [1] 崔博文,任章,陈剑.逆变器供电的电动机变频调速系统实时故障检测[J].电机与控制学报,2006,10(1):52-56.
- [2] 崔博文,任章.基于傅里叶变换和神经网络的逆变器故障检测与诊断[J].电工技术学报,2006,21(7):37-43.
- [3] 飞思科技产品研发中心.小波分析理论与 MATLAB 7 实现[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [4] 胡昌华.基于 Matlab 的系统分析与设计——小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [5] 杨建国.小波分析及其工程应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 汤清泉,颜世超,卢松升.三电平逆变器的功率管开路故障诊断[J].中国电机工程学报,2008,28(21):26-32.

(收稿日期:2009-03-09)