

小波变换在变频机组定子故障诊断中的仿真研究

马超, 王莉

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 710038)

摘要: 在变频机组运行过程中, 定子突然出现故障是变频机常见故障之一, 严重时会造成重大的经济损失和恶劣的社会影响。定子突然出现故障时, 无论是外部故障还是内部匝间短路故障, 它们的共同特征就是定子电流会产生突变信号。小波变换模的极值点常对应于信号突变点。利用 Matlab/Simulink 模块建立了变频机组定子的外部故障和内部故障模型。利用小波变换模极大值方法对两种故障模型进行了诊断, 不但能够检测出故障, 而且还能对故障发生的时刻进行准确的定位, 实现了变频机组的实时诊断。

关键词: 变频机组; 突变点; 小波模极大值; 故障诊断

Research on the fault diagnosis method of frequency converter sets

MA Chao, WANG Li

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 710038, China)

Abstract: Abrupt stator fault when the frequency converter sets under steady running state is one of ordinary faults of frequency converter sets which will bring big economic loss and bad society effort. Usually, wavelet transform module maximum accords with saltation points. Distortion in stator current will be caused by abrupt stator fault when the frequency converter sets under steady running state. Usually, wavelet transform module maximum accord with saltation points. Inner fault and external fault module of frequency converter sets stator are established by Matlab/Simulink. The two modules are detected by Wavelet transform module maximum method, which not only can detect stator fault but also can time it, which realize the diagnosis of frequency converter sets.

Key words: frequency converter sets; saltation point; wavelet module maximum; fault diagnosis

中图分类号: TM76 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2008)01-0073-04

0 引言

定子故障是变频机组常见的一种故障, 对于变频机而言, 定子的绝缘系统是其最薄弱的环节之一。变频机长期运行在高电压、大电流的工作状态下, 而且需要频繁地起动、停止, 加上各种电、热、机械、振动、乃至化学的多种因素的共同作用下, 导致定子会出现一些早期故障如匝间短路等。这些故障持续发展, 将逐渐劣化电动机的工作性能, 形成更为严重的对地或相间短路等故障, 并最终导致整个电动机的烧坏^[1]。

Fourier 变换是变频组常用的一种有效的故障信号分析方法, 它是时域到频域相互转化的工具, 其实质是把对原信号的研究转化为对其 Fourier 变换的研究。但是, 对频域中的某一信息不知道这个频率是在哪一时刻产生的。另外, Fourier 变换是基于频点的信号分析方法, 受信号频率波动的影响较

大。

小波分析具有良好的时频分析能力, 尤其对信号的突变点很敏感。本文根据信号突变点的检测可以通过跟踪小波变换在细尺度下的模极大值曲线来实现的特点, 利用小波模极大值提取了变频组定子故障特征, 从而实现了变频组定子故障的实时诊断。

1 小波变换模极大值与信号突变点的定位

设 $\theta(t)$ 是一个适当光滑函数, 则 $\theta(t)$ 应满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = 1, \lim_{|t| \rightarrow \infty} \theta(t) = 0 \quad (1)$$

假设 $\theta(t)$ 二阶可导, 则其一阶导数和二阶导数分别为:

$$\psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad \psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (2)$$

由小波函数的容许条件可知, $\psi^{(1)}(t)$, $\psi^{(2)}(t)$

都是小波函数。

设尺度平滑度 a 下的平滑函数为:

$$\theta_a(t) = \frac{1}{a} \theta\left(\frac{t}{a}\right), \quad a > 0 \quad (3)$$

对应于 $\psi^{(1)}(t)$, $\psi^{(2)}(t)$ 则有:

$$\psi_a^{(1)}(t) = \frac{1}{a} \psi^{(1)}\left(\frac{t}{a}\right), \quad a > 0 \quad (4)$$

$$\psi_a^{(2)}(t) = \frac{1}{a} \psi^{(2)}\left(\frac{t}{a}\right), \quad a > 0 \quad (5)$$

对于检测和分析信号的奇异性, 可以用卷积的形式来定义小波变换。

设分析信号为 $f(t)$, 则其小波变换可以表示为:

$$W_a^{(1)}f(t) = f * \psi_a^{(1)}(t) = \quad (6)$$

$$\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi^{(1)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau$$

$$W_a^{(2)}f(t) = f * \psi_a^{(2)}(t) = \quad (7)$$

$$\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi^{(2)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau$$

定义: 在某一尺度 x_0 下, 如果存在一点 (x_0, y_0) 使得 $\partial W(x_0, y_0) / \partial y = 0$, 则点 (x_0, y_0) 是局部极大值点, 且 $\partial W(x_0, y_0) / \partial y$ 在 $y = y_0$ 上有一个模极大值点。如果对 y_0 的某一领域内的任意点 y , 有 $|W(x_0, y)| \leq |W(x_0, y_0)|$, 则称 (x_0, y_0) 为小波变换模极大值点。尺度空间中所有的模极大值点的连线称为模极大值线。

将式(2)分别代入式(6)和式(7), 可得:

$$W_a^{(1)}f(t) = f * \psi_a^{(1)}(t) = \quad (8)$$

$$f * \frac{d}{dt} \theta\left(\frac{t}{a}\right) = a \frac{d}{dt} [f * \theta_a(t)]$$

$$W_a^{(2)}f(t) = f * \psi_a^{(2)}(t) = \quad (9)$$

$$f * \frac{d^2}{dt^2} \theta\left(\frac{t}{a}\right) = a^2 \frac{d^2}{dt^2} [f * \theta_a(t)]$$

由上式可以看出, $W_a^{(1)}f(t)$ 和 $W_a^{(2)}f(t)$ 分别是光滑函数 $\theta_a(t)$ 在尺度 a 下对 $f(t)$ 进行平滑后再取一阶和二阶导数。

$W_a^{(1)}f(t)$ 的极大值对应 $f(t)$ 的快变部分, 而其极小值对应 $f(t)$ 的慢变部分。 $W_a^{(2)}f(t)$ 的过零点既对应了 $W_a^{(1)}f(t)$ 的极大值又对应了其极小值, 所以不利于检测突变信号。因此, 可以利用

$W_a^{(1)}f(t)$ 的极大值来检测突变信号。

对变频机组定子故障的实时诊断不仅要求检测出信号发生了突变, 而且还要能准确定位出故障发生的时刻, 以便对变频机组进行相应的保护操作。小波变换具有柔性可调的时频窗口, 因此, 可以对发生故障时的信号突变时刻进行定位^[2]。但是, 不同的光滑函数和不同的尺度会产生不同的定位偏差。文献[1]已经证明: 尺度越小, $\theta(t)$ 光滑区域越小, 小波系数模极大值与突变点的对应就越准确。前面已经提到, 变频机组运行环境比较恶劣, 检测到的信号中存在很多噪声干扰, 而小尺度下小波系数受噪声干扰影响非常大, 会产生很多伪极值点。但是, 在大尺度下, 对噪声有一定的平滑, 极值点相对稳定, 可平滑作用又会使定位产生偏差。

综上所述, 只有在适当尺度下各突变点引起的小波变换才能避免邻近突变点的极大值之间产生的交迭干扰。所以, 用小波模极大值来定位信号突变点时, 要把多个尺度的分析结果结合起来综合分析。

2 小波函数的选取

Gauss 函数为一光滑函数, 选择 Gauss 函数的一阶导数为分析小波函数。尺度 a 下的 Gauss 函数及其一阶导数的表达式为:

$$\theta(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} e^{-t^2/2a^2} \quad (10)$$

$$\psi^{(1)}(t) = \frac{-1}{\sqrt{2\pi a^2}} t e^{-t^2/2a^2} \quad (11)$$

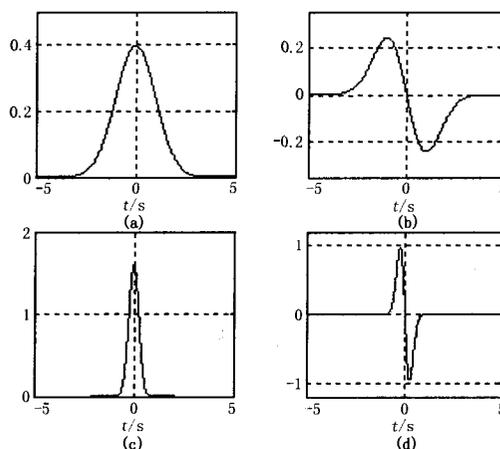


图 1 不同尺度下的 $\theta(t)$ 和 $\psi^{(1)}(t)$ 时域波形

Fig.1 Shapes of $\theta(t)$ and $\psi^{(1)}(t)$ in time domain under different scale

图 1(a) 和图 1(b) 分别是 $a=1$ 时的 Gauss 函数和其第一阶导数的时域波形, 图 1(c) 和 1(d) 分别是

$a = 0.5$ 时的 Gauss 函数和其一阶导数的时域波形, 可以看出, 函数随着尺度 a 的增大而变宽, 随着尺度 a 的减小而变窄。

3 变频机组定子故障的实时诊断

3.1 定子外部故障诊断

利用 Matlab/Simulink 模块对变频机组定子故障进行仿真。变频机组中的同步发电机模型各参数为^[3]:

仿真步长为 $\Delta t = 0.5 \text{ ms}$, $r_a = 1.9845 \Omega$, $r_f = 0.057 \Omega$, $r_d = 0.076 \Omega$, $r_q = 0.032 \Omega$, $L_a = 0.2632 \text{ H}$, $M_{fd} = 1.33 \text{ H}$, $L_f = 1.3765 \text{ H}$, $L_d = 1.345 \text{ H}$, $L_q = 1.3571 \text{ H}$, $M_{af} = 0.76 \text{ H}$, $M_{ad} = M_{aq} = 1.33 \text{ H}$

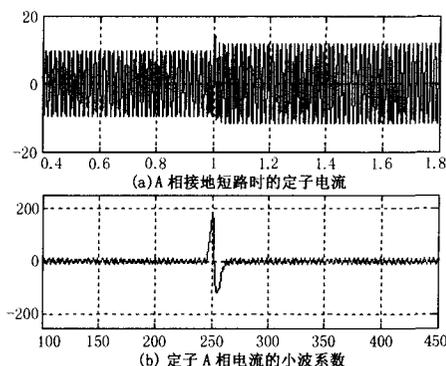


图2 单相接地短路故障特征提取
Fig.2 Fault characteristic extract under one-winding-short-circuit fault

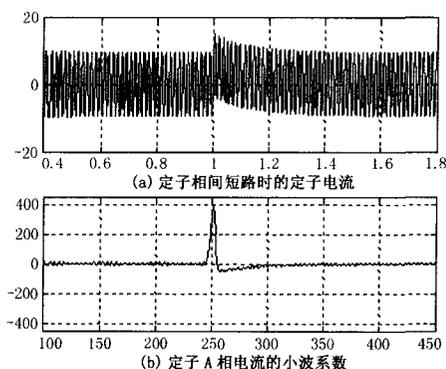


图3 相间短路故障特征提取
Fig.3 Fault characteristic extract under phase-short-circuit fault

图2是变频机组运行到1s发生单相接地短路故障时A相电流及其相应的小波系数的波形。从图中可以看出, 当变频机组定子A相发生接地短路故

障时, 定子电流突然增加, 但是幅度不大。小波变换的极大值出现在1秒的位置, 这与故障发生时间一致。

图3和图4分别是变频机组运行到1秒发生相间短路故障和三相短路故障时A相电流及其相应的小波脊线的波形。从图中可以看出小波系数的极大值对故障发生时刻进行了准确的定位。随着故障程度的增加, 电流的突变幅度会增加, 从图中可以看出小波变换模的极大值也随之增加。因此小波变换模的极大值大小的纵向比较可以作为故障严重程度的定性参考指标。

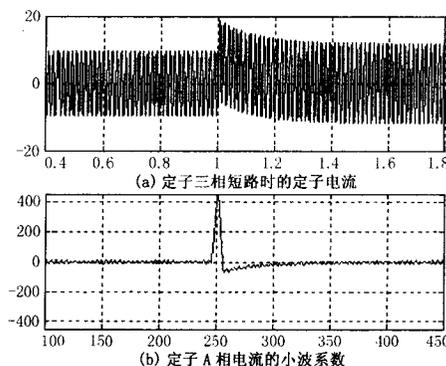


图4 三相短路故障特征提取
Fig.4 Fault characteristic extract under three-phase-short-circuit fault

3.2 定子内部故障诊断

利用 Matlab/Simulink 模块对变频机组定子内部故障进行仿真。变频机组中的同步发电机模型各参数为^[4]:

$r_s = 2.15 \Omega$, $r_r = 2.33 \Omega$, $L_m = 0.2025 \text{ H}$, $L_{\sigma s} = 0.0075 \text{ H}$, $L_{\sigma r} = 0.0075 \text{ H}$, $J_m = 0.008 \text{ kg} \times \text{m}^2$, $I_r = 7.1 \text{ A}$, $P = 1$, $N = 40$ 。

图5(a)是变频机运行到1s发生定子匝间短路故障时定子A相电流的波形; 图5(b)是定子A相电流的小波系数波形图; 图5(c)是定子A相电流瞬时相位的小波系数波形图。从图5(a)中可以看出, 定子电流发生匝间短路时, 电流幅值突然增加, 但是幅度不大; 从图5(b)中可以看出, 定子A相电流的小波系数在1s时出现极大值, 对故障进行了准确的定位; 从图5(c)中可以看出定子A相电流瞬时相位的小波系数也在1s中出现了极大值, 也对故障进行了准确定位, 这样就大大提高了故障检测的准确性。

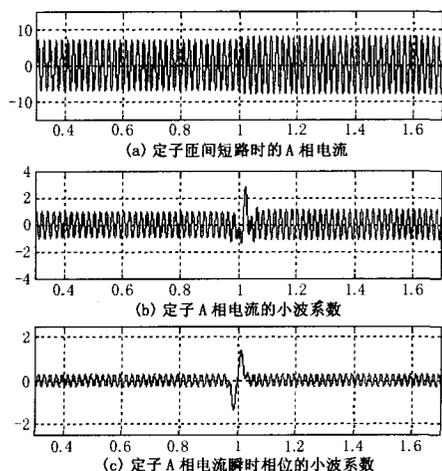


图5 定子内部故障的特征提取

Fig.5 Fault characteristic extract under inner stator fault

4 结论

在变频机组运行的过程中,定子突然出现故障时,定子电流中就会产生突变信号。由于传统 Fourier 变换对时频分析的局限性,本文采用了小波分析的方法,利用小波模极大值对定子故障进行了诊断,不仅能够检测出定子故障,而且对故障发生的时刻进行了准确的定位,还可以把小波模极大值大小的纵向比较作为故障严重程度的定性参考指标。所以小波变换模极大值方法可以较好地应用于变频机组定子故障的实时检测和诊断,具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 张征平.异步电动机早期故障检测的小波方法研究(博士论文)[D].广州:华南理工大学,2005.
ZHANG Zheng-ping.Wavelet Analysis Based Study of

Detection of Incipient Faults of Asynchronous Motor,Doctoral Dissertation[D].Guangzhou:South China University of Technology,2005.

- [2] 胡铭,陈衍.基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J].电网技术,2001,25(3):12-16.
HU Ming,CHEN Yan.Quality Fluctuation Detection and Orientation of Electricity Based on Wavelet Module Maximum[J].Power System Technology,2001,25(3):12-16.
- [3] Subramaniam P, Malik O P. Digital Simulation of a Synchronous Generator in Direct-phase Quantities[J].Proc IEE,1971,118(1):153-160.
- [4] 王俊柳,王敏,王颖.基于 MATLAB 的异步电动机仿真实验平台[J].计算机仿真,2002,19(3):109-115.
WANG Jun-liu,WANG Min,WANG Ying.Asynchronous Motor Simulation Test Platform Based on Matlab[J].Computer Simulation,2002,19(3):109-115.
- [5] 孙岩奎.小波分析及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
SUN Yan-kui,Wavelet Analysis and Application[M].Beijing:China Press,2005.
- [6] 陈迎霞.基于小波变换的电力系统故障分析(硕士论文)[D].武汉:武汉理工大学,2005.
CHEN Ying-xia.Fault Analysis in Power System Based on Wavelet Transfer,Thesis[D].Wuhan:Science and Engineering University of Technology,2005.

收稿日期:2007-04-16;

修回日期:2007-07-20

作者简介:

马超(1983-),男,研究生,研究方向为地空导弹电力系统的检测与故障诊断;E-mail:frontnema@yahoo.com.cn

王莉(1958-),女,教授,博士,研究方向为地空导弹武器系统电力系统故障检测与诊断、可靠性研究、继电保护等。

许继集团中标四川-上海±800 kV 特高压直流输电示范工程

新年即将来临之际,许继在特高压输电工程领域再传捷报。12月17日下午,举世瞩目的四川-上海±800 kV 特高压直流输电示范工程主设备合同签订仪式在北京隆重举行。经过竞争性谈判,许继集团与国家电网公司签订了总金额 9.64 亿元的上海奉贤换流站换流阀与控制保护设备供货合同。这是继中标贵广二回、高岭、黑河、云广等重大直流工程后,许继集团在重大直流输电工程领域取得的又一丰硕成果。中标该工程,标志着许继已经攀登世界直流输电技术和装备制造的顶峰!

四川-上海±800 kV 特高压直流示范工程是目前规划建设的世界电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远的直流输电工程,也是世界上首次采用 6 英寸晶闸管换流阀、额定电流大、可靠性指标高的直流输电工程,代表了世界高压直流输电技术的最高水平。示范工程承担着西南水电送出任务,是我国能源输送的重要通道。将建设两座±800 kV 换流站,一回±800 kV 直流输电线路,额定输送功率 640 万 kW,最大输送功率 700 万 kW,途经四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏、上海 8 省市,全长约 2000 km。工程动态投资约 180 亿元。根据计划,该工程将于 2010 年全部建成投运,工程建成后将创造 18 项世界纪录。