

基于间谐波的双馈风力发电系统故障诊断^①

闵 浩^② 刘惠康 唐 超

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 以双馈风力发电系统为研究对象,深入分析系统发生电气故障时,定子电流的故障特性,并据此提出了一种基于间谐波特征频率的故障诊断方法。该方法通过检测双馈风力发电系统在不同工作状态下的定子电流,并使用希尔伯特黄变换(HHT)分析电子三相电流,找出系统在不同工作状态下的间谐波特征频率。出现故障时,根据哪一相产生的间谐波特征频率就可以判断系统故障类型和故障位置。基于 Matlab/Simulink 对双馈风力发电系统进行仿真研究以验证所提出方法的可行性。仿真结果表明,系统工作在异常工作状况时,根据分析定子电流产生的间谐波特征频率,可以判断系统的故障类型和故障位置。相比于快速傅里叶变换(FFT)、经验模态分解(EMD)与快速傅里叶变换结合等方法,HHT 可以更加准确快速地寻找到特征频率。

关键词 双馈风力发电系统,间谐波,希尔伯特黄变换(HHT),故障诊断

0 引 言

随着全球经济快速增长,人类对能源的需求加剧,风能、氢能和海洋能等新能源的开发利用受到了全球关注。风能作为一种开发成熟的新能源,在我国陆地储量预计为 32.26 亿 kW·h,实际可开发的风能资源约为 2.53 亿 kW·h,而中国近海的风能资源约为陆地的 3 倍^[1]。然而在风能开发时,因系统未能及时检修发生故障,陆上风电的维修成本一般占到风电场总收益的 15% ~ 20%,海上风电的维修成本更可占到总收益的 25% ~ 35%^[2]。因此如能及时掌握风电机组的运行状态,及早发现系统的故障原因,降低故障风险,减少运维成本,则可大幅度降低风力发电机组的运行维护成本。

目前,对双馈风力发电系统进行信息采集分析时,采集的信息主要有振动信号^[3]、声发射信号(acoustic emission signal, AE)^[4]、温度信号^[5]、润滑油

信号^[6]、电信号^[7]和 SCADA(supervisory control and data acquisition)信号^[8]等。振动信号现已成熟地应用于风机发电机组中,但振动信号依赖于传感器的灵敏度,信噪比低,不利于发现潜在故障。AE 信号信噪比高,有更高的频率,可以有效地诊断出潜在的故障,但 AE 方法较为复杂,每一个 AE 传感器需要匹配一个专用的信号采集系统。温度信号在风机系统出现故障时,变化明显,容易判断系统异常,但引起温度变化的因素较多,无法准确地判断故障原因。润滑油液信号判断基准较多,可以多方面确定系统的工作状态,但由于采样困难,且主要基于离线,不能及时发现故障。SCADA 系统广泛应用于风机系统,可以实现故障的预测和状态监测,但 SCADA 系统中数据多,挖掘出所需要的信息是一个比较困难的问题。电信号相对于其他的信号,不依赖任何传感器,在线采样方便快捷,对风力发电系统故障反应灵敏,能够迅速地根据电信号的变化判断风力系统的故障原因,方便及时检修,从而避免造成较大的事

① 国家重点研发计划(2017YFC085104)和教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放课题(MADT201602)资助项目。
② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:双馈风力发电系统的故障诊断,图像处理;联系人,E-mail: minhao8023@forsmail.com
(收稿日期:2018-07-28)

故和减少维护成本。

随着计算机快速的发展,智能故障诊断方法也进入了人们的视野,如人工神经网络、模糊逻辑、灰色理论和专家系统等故障诊断方法。智能诊断方法虽然可以取得比较好的效果,但它们的缺陷也非常明显。智能在线故障诊断方法要想形成有效的生产力,还需要进一步的发展^[9]。

本文将希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)算法用于分析采集的双馈风力发电系统的定子电流,经仿真数据测试,取得了较好的效果。

1 变速恒频双馈风力发电系统原理

双馈风力发电(double-fed induction generator, DFIG)系统采用两个背靠背、通过直流环节连接的网侧脉冲宽度调制(pulse-width modulation, PWM)变换器和转子侧 PWM 变换器进行交流励磁,以实现变速恒频运行和最大风能追踪控制。双馈风力发电系统原理图如图 1 所示^[10]。

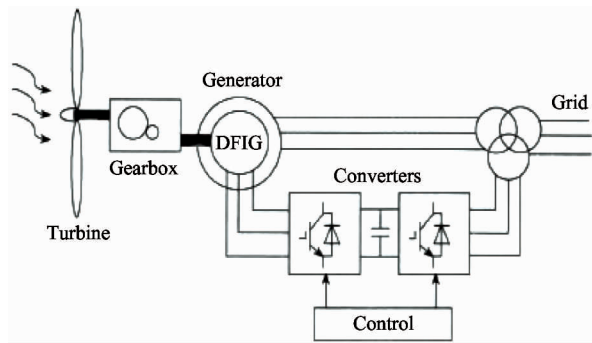


图 1 双馈风力发电系统原理图

网侧 PWM 变换器实际上就是通常的三相电压型 PWM 变换器。当双 PWM 变换器进入稳定工作状态时,母线上的直流电压恒定,网侧变换器的三相桥臂按正弦脉宽调制规律驱动。

网侧 PWM 变换器的控制目标是:(1)保证输出直流电压恒定且有良好的动态响应能力;(2)确保交流侧输入电流正弦,功率因数为 1。

转子侧变换器控制策略通常是采用定子磁链定向的矢量控制。控制目标主要是:(1)在变速恒频前提下实现最大风能追踪,关键是双馈发电机转速

或有功功率的控制;(2)双馈发电机输出无功功率的控制,以保证所并电网的运行稳定。

2 希尔伯特黄变换

间谐波特征频率作为判断风力发电系统工作状态的基准,有着现象明显,能够实现简单的定量分析,判断故障原因精确等优点。

传统的间谐波检测方法有傅里叶变换,小波变换,短时傅里叶变换等方法。相比于希尔伯特黄变换,傅里叶变换更加适应于平稳信号和谐波的检测,对于非平稳信号和间谐波的检测,处理效果较差;小波变换需要事先确定小波基和小波分解层数,无法自适应分析,处理效果往往取决于选取的小波基和小波分解层数;短时傅里叶变换是一种非自适应处理方法,时间窗函数固定,在分析的过程中容易造成能量泄露问题。HHT 不受线性和平稳性的约束,适用于非线性非平稳信号;不受 Heisenberg 测不准原理制约,适合突变信号;不依赖于基函数,是一种很好的自适应分析方法。

希尔伯特黄变换主要分为 2 部分:(1)对原始信号进行经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),得到若干固有模态函数(intrinsic mode function, IMF);(2)对得到的每个 IMF 进行希尔伯特变换,得到瞬时频率和幅值。

2.1 EMD

EMD 分解是 Huang 于 1998 年提出的。用 EMD 分解从原始信号中提取若干阶固有模态函数,突出了原始信号的局部特征信息。IMF 必须满足如下特点。

- (1) 其极值点和过零点的数目应该相等或者最多差 1。
- (2) 分别连接其局部极大值和局部极小值所形成的两条包络线的均值在任一点处为 0。

EMD 分解的具体过程如下^[11]。

设原始信号为 $f(t)$, 上下包络线的均值为 $m(t)$ 。

- (1) 确定原始信号 $f(t)$ 所有局部极大值点和局部极小值点的数据序列,用三次样条插值函数拟

合原始数据形成上下包络线。

(2) 上下包络的平均值记为 m_1 , 可以得到:

$$h_1 = f(t) - m_1 \tag{1}$$

如果 h_1 满足成为 IMF 的两个条件, 则 h_1 为第一个 IMF。

(3) 如果 h_1 不满足上述条件, 将 h_1 作为原始信号继续步骤(1)和(2), 可以得到新的上下包络平均值为 m_{11} , 可以得到:

$$h_{11} = h_1 - m_{11} \tag{2}$$

判断 h_{11} 是否满足以上成为 IMF 的两个条件, 如果满足, 则 h_{11} 是一个 IMF 分量, 否则循环以下步骤:

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \tag{3}$$

直到 h_{1k} 满足成为 IMF 的条件。令 $c_1 = h_{1k}$, c_1 就是原始信号中第一个 IMF。

(4) 将 c_1 从原始信号中分离出来:

$$r_1 = f(t) - c_1 \tag{4}$$

令 r_1 成为新的原始信号, 重复以上步骤(1)~(3)可以得到 n 个 IMF 和一个残余成分 r_n 。

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \tag{5}$$

2.2 间谐波参数的计算

对采集的定子电流信号 $f(t)$ 采用希尔伯特黄变换进行时频分析:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \tag{6}$$

式中, c_i 为固态模态函数 (IMF), r_n 为残余成分。

IMF 函数模型可表示为^[12]

$$c_i = A_0 \cos \theta(2\pi\omega_d t + \phi_0) \tag{7}$$

A_0 、 ω_d 和 ϕ_0 分别为第 i 个谐波或间谐波分量的幅值、频率和相位。为了获取 3 个参数的值, 对得到的 c_i 分别进行希尔伯特 (Hilbert) 变换:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i}{t - \tau} d\tau \tag{8}$$

其 Hilbert 反变换为 y 和 c_i 在上式中互换得到, 得到解析信号:

$$z(t) = c_i(t) + jy(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \tag{9}$$

式中, $A(t) = \sqrt{c_i^2(t) + y^2(t)}$, $\theta(t) = \arctan(\frac{y(t)}{c_i(t)})$ 。

则谐波或间谐波信号的幅值 $A_0 = A(t)$, $\omega_d = \frac{1}{2\pi}$

$$\frac{d\theta(t)}{dt}。$$

3 仿真分析

本文以 Matlab/Simulink 中的 Power System 下的额定功率为 9 MW, 工作频率为 60 Hz 的双馈风力发电系统为例进行仿真分析^[13]。

3.1 DFIG 系统正常工作

当系统处于正常工作时, 用 HHT 方法对采集的定子三相电流进行分析, 提取原始信号中含有的间谐波分量。当系统正常运行时, 得到信号的边际谱如图 2 所示。

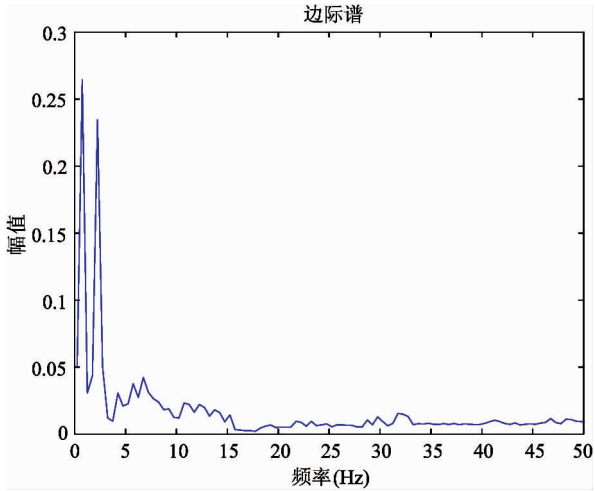


图 2 系统正常运行时的边际谱

由图 2 可知, 当系统处于正常工作时, 在较低的频率会产生 2 个比较明显的间谐波, 其他间谐波含量不明显。

3.2 DFIG 系统定子接地短路故障

当系统发生单相接地时, 由于带电体与处于地电位的铁芯间有电容存在, 发生一相接地时, 接地点就会有电容电流流过。当机端发生金属性接地, 接地电流最大, 而接地点越靠近中性点, 接地电流越小, 故障点有电流流过, 就可能产生电弧, 即可能有间谐波产生。

通过将定子 A、B、C 三相分别接地来模拟系统处于定子接地短路故障, 分别用 HHT、快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 和 EMD 与 FFT 结合的方法对采集的定子电流进行分析 (图 3 ~ 图 5)。

与系统正常运行进行对比,当系统处于定子接地短路故障时,FFT 分析可以很好地得到谐波分量;EMD + FFT 的 IMF3 的间谐波频率为 51.27 Hz,HHT 会产生新的间谐波频率在 52.26 Hz 左右。相比于 HHT,FFT 和 EMD + FFT 的方法得到的间谐波干扰量过多,不好准确判断产生的间谐波特征频率。

表 1 是在定子三相分别接地的情况下,判断哪一相产生了间谐波特征频率。

当系统运行时,对定子三相电流进行分析,当检测到间谐波特征频率在 52.26 Hz 时,即可判断系统处于定子接地短路故障。哪一相检测到该间谐波特征频率,即可判断那一相故障。

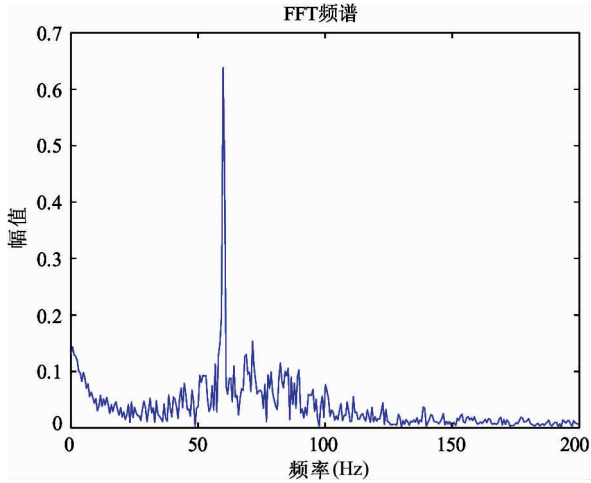


图 3 定子电流的 FFT 分析

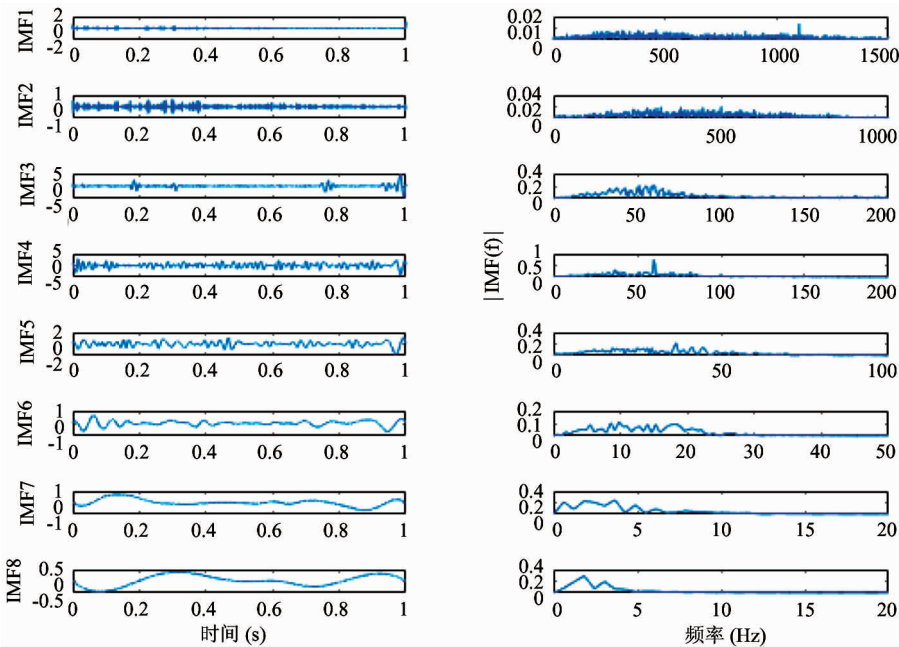


图 4 定子电流信号的 EMD + FFT 分析

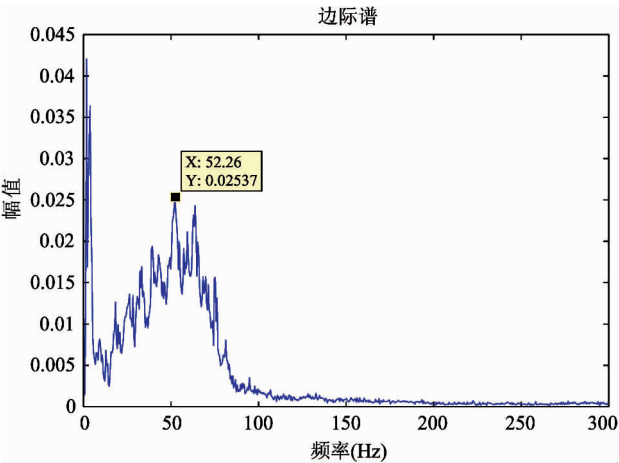


图 5 定子电流信号的 HHT 分析

表 1 是否产生 52.26 Hz 左右的间谐波			
	A 相接地	B 相接地	C 相接地
A 相电流	是	否	否
B 相电流	否	是	否
C 相电流	否	否	是

3.3 DFIG 系统定子匝间短路

当系统定子匝间短路的时候,短路的相间产生很大的环流,定子三相电流不平衡。当电流波动较大时,容易产生间谐波。

在定子 A 和 B 相或 B 和 C 相或 C 和 A 相间连

接一个阻值为 0.01Ω 的电阻来模拟仿真系统处于定子匝间短路故障。得到的分析定子电流如图 6 ~ 图 8 所示。

与系统正常运行进行对比,当系统处于定子匝间短路故障时,EMD + FFT 的方法会产生一个间谐波在 IMF5 频率为 11.6 Hz;HHT 会产生新的间谐波频率为 11.75 Hz。

表 2 是在定子两两相互匝间短路的情况下,判断哪一相产生了间谐波特征频率。

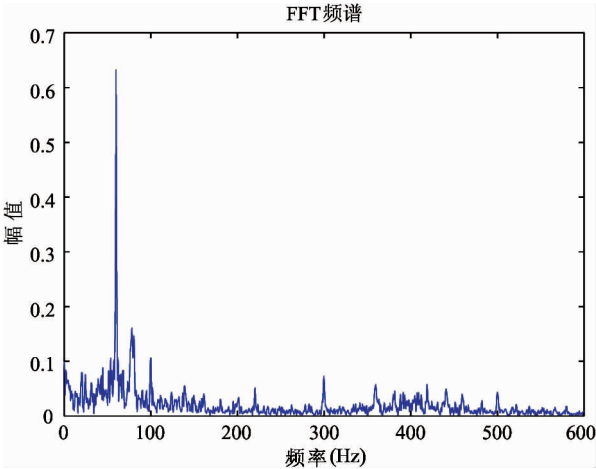


图 6 定子电流的 FFT 分析

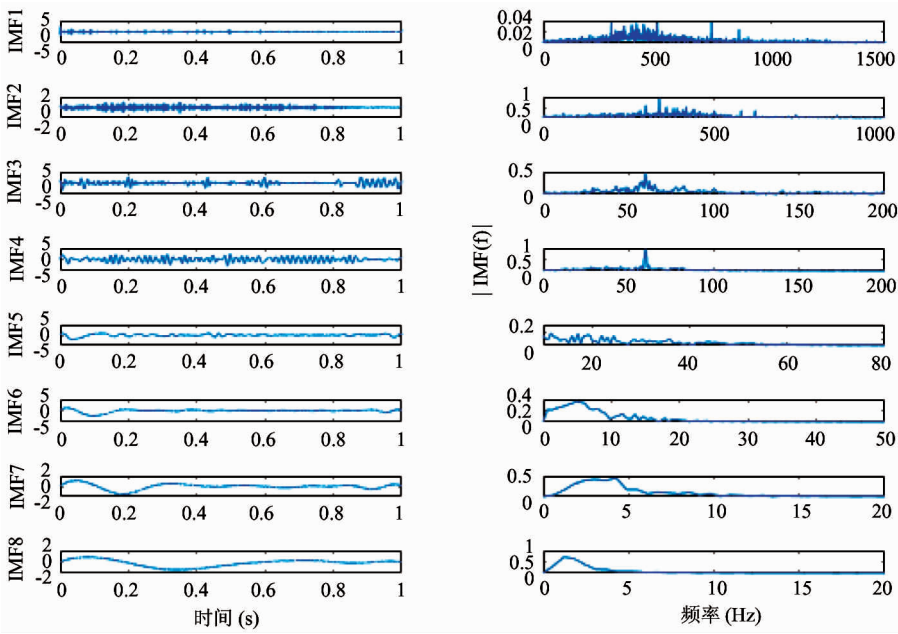


图 7 定子电流信号的 EMD + FFT 分析

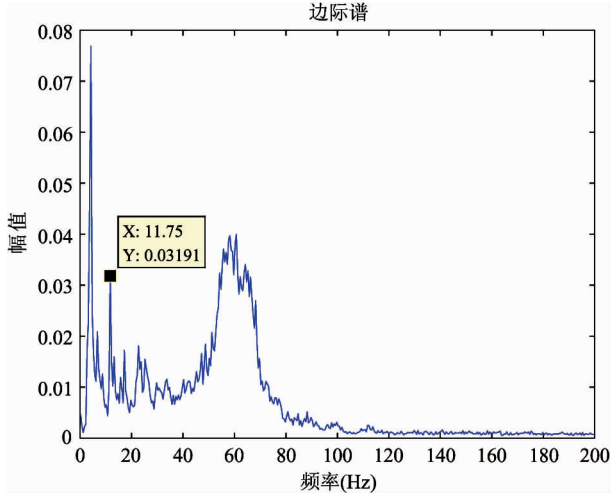


图 8 定子电流信号的 HHT 分析

在系统运行时,对定子三相电流进行分析,当检测到间谐波特征频率为 11.75 Hz 时,即可判断系统处于定子匝间短路故障。从哪一相检测到该间谐波特征频率,即可判断那一相故障。

表 2 是否产生 11.75 Hz 左右的间谐波

	A 和 B 匝间 短路	B 和 C 匝间 短路	C 和 A 匝间 短路
A 相电流	是	否	是
B 相电流	是	是	否
C 相电流	否	是	是

3.4 DFIG 系统转子匝间短路

转子匝间短路时有点类似于定子的匝间短路,转子电流显著增大,通过磁场耦合,定子的电流也急剧增大,即可能产生间谐波。

转子匝间短路的仿真实现有点类似于定子匝间短路,分别在转子 a 和 b 相或 b 和 c 相或 c 和 a 相间连接一个阻值为 0.01Ω 的电阻。图 9 ~ 图 11 是对采集的定子电流分析。

与系统正常运行进行对比,当系统处于转子匝间短路故障时,EMD + FFT 在 IMF5 会产生一个特征频率为 32.96 Hz 的间谐波;HHT 会产生一个新的间谐波频率为 32.75 Hz。

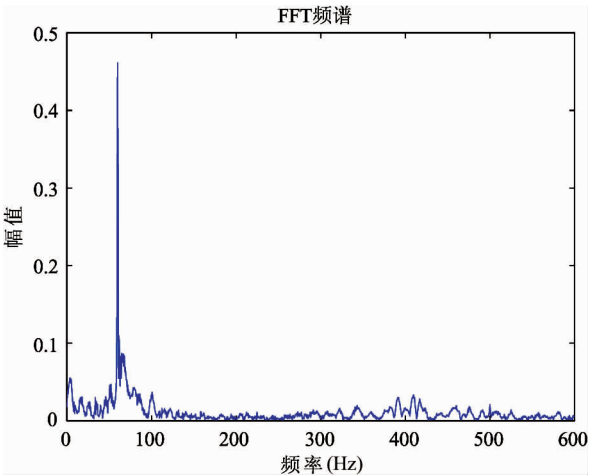


图 9 定子电流信号的 FFT 分析 B

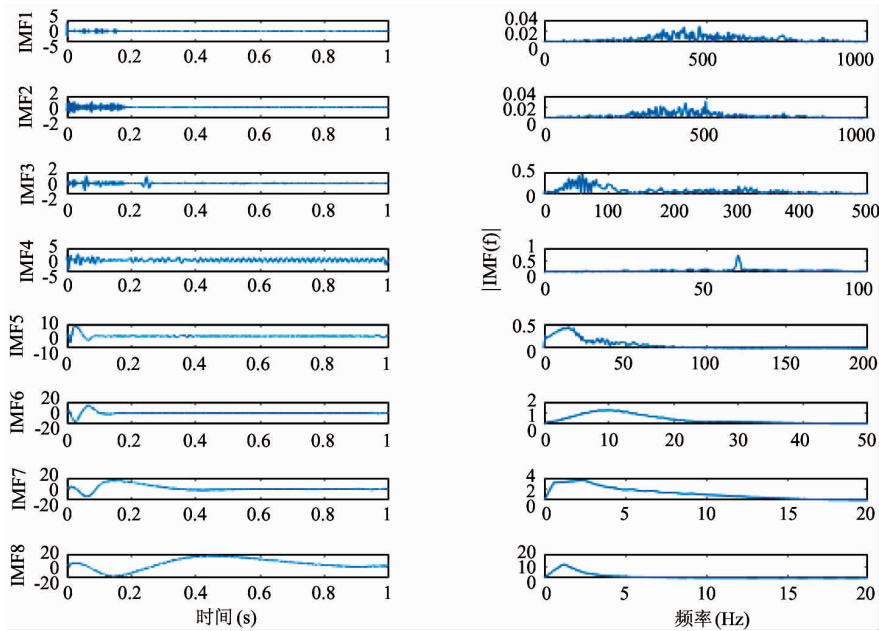


图 10 定子电流信号的 EMD + FFT 分析

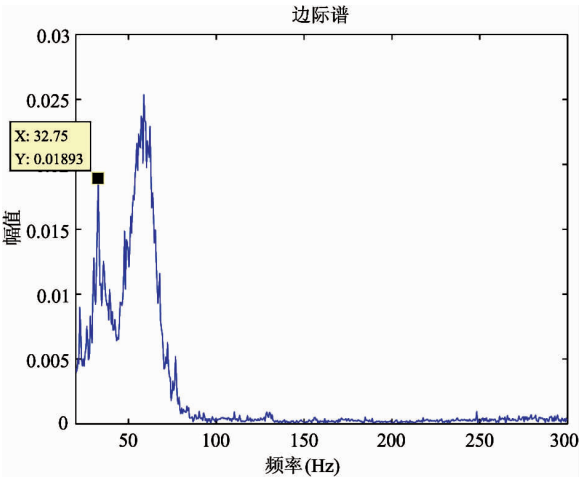


图 11 定子电流信号的 HHT 分析

表 3 是在转子两两相互匝间短路的情况下,判断哪一相产生了间谐波特征频率。

表 3 是否产生 32.75 Hz 左右的间谐波

	a 和 b 匝间	b 和 c 匝间	c 和 a 匝间
	短路	短路	短路
A 相电流	是	否	是
B 相电流	是	是	否
C 相电流	否	是	是

在系统运行时,对定子三相电流进行分析,当检测到间谐波特征频率为 32.75 Hz 时,即可判断系统

处于转子匝间短路故障。从哪一相检测到该间谐波特征频率,即可判断那一相出现故障。

4 结 论

由于双馈风力发电系统故障早期检测的重要性,许多研究已被用于诊断系统状态,但本文主要关注定量检测故障类型和故障位置。所提出的技术基于对定子电流的统计分析。运用 HHT 方法对采集的定子电流进行分析,可以准确快速地得到间谐波特征频率,根据产生的间谐波特征频率使判断故障可以定量地进行;故障产生的位置可根据产生间谐波特征频率的来源即可判断故障所在的位置。虽然本文提出的方法可以准确快速地判断系统的故障和故障产生的位置,但是对于间谐波的测量和将该方法适用于双馈风力发电所有的故障诊断上,还需要进一步的研究。

参考文献

[1] 李岚. 双馈电机控制技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2014. 1-2

[2] 何祚庥, 王亦楠. 风力发电是我国能源和电力可持续发展战略的最现实选[J]. 上海电力, 2005(1) :8-18

[3] 于辉, 邓英. 变速风力发电机变流器故障诊断方法[J]. 可再生能源, 2010(3) :89-92

[4] Jia H L, Wu X, Liu X Q, et al. Analysis and research of acoustic emission signal of rolling element bearing fatigue [C]. In: Word Conference on Acoustic Emission, Shanghai, China, 2013. 157-166

[5] Qiu Y N, Feng Y H, Sun J. Applying thermos physics for wind turbine drivetrain fault diagnosis using SCADA data [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10 (5) : 661-668

[6] Femandes C M C G, Martins R C, Seabra J H O. Friction torque of thrust ball bearings lubricated with wind turbine gear oils[J]. *Tribology International*, 2013, 58(2) : 47-54

[7] 沈艳霞, 李帆. 风力发电系统故障诊断方法综述[J]. 控制工程, 2013, 20(5) :790-795

[8] 郭鹏, 徐明, 白楠. 基于 SCADA 运行数据的风电机组搭架振动建模与检测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5) :128-135

[9] 曾军, 陈艳峰, 杨萍. 大型风力发电机组故障诊断综述[J]. 电网技术, 2018, 42(3) :849-860

[10] 刘海营, 管萍. 双馈风力发电系统优化控制[J]. 电气技术, 2016, 17(3) :13-17

[11] Zhang G L. Rotor break-bar fault diagnosis of asynchronous motor based on empirical mode decomposition [C]. In: Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, China, 2012. 1-4

[12] 喻敏, 王斌. 基于 SST 的间谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11) :2944-2951

[13] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2016a 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社, 2016. 574-578

Fault diagnosis of doubly fed wind power generation system based on interharmonic

Min Hao, Liu Huikang, Tang Chao

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

By analyzing fault characteristics of stator current in doubly-fed wind power generation system when electrical fault is occurred, a fault diagnosis method is proposed based on inter-harmonics feature frequency. The method can obtain inter-harmonics feature frequency in different working condition by detecting stator current and analyzing three-phase current transformed by Hilbert-Huang transform (HHT). In fault condition, the fault type and location can be judged by inter-harmonics feature frequency which is produced by different phase. And a doubly-fed wind power generation system is simulated based on Matlab/Simulink to verify feasibility of the proposed method. The simulation result shows that in abnormal working conditions, the fault type and location can be determined based on the inter-harmonic feature frequency and HHT method can find feature frequency more accurately and quickly compared with the fast Fourier transform (FFT), empirical mode decomposition (EMD) and fast Fourier transform.

Key words: doubly-fed wind power generation system, interharmonic, Hilbert-Huang transform (HHT), fault diagnosis