

电流残差谐波谱幅值调制的双馈感应发电机 匝间短路诊断方法

赵寿旺¹, 陈玉¹, 张思超¹, Nadeem SHAHBAZ¹, 梁锋¹,

王双¹, 马勇², 邓巍², 赵勇², 成永红¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 为解决双馈感应发电机(DFIG)定子或转子绕组绝缘劣化引发匝间短路,导致其三相定子电流频谱基频及谐波附近产生的边带谐波因噪声干扰易被主频谐波淹没,从而难以有效区分故障特征频率与干扰分量的问题,提出了一种基于电流残差谐波谱幅值调制的DFIG匝间短路故障诊断方法。首先,通过对DFIG零序电流进行S变换,获取其时频域相位和幅值,对相位进行校正,并对幅值进行不同程度的调制;然后,计算得到调制后的电流残差谐波谱;最后,在100 kW双馈感应发电机绕组短路故障模拟平台上进行实验验证。结果表明:所提方法能够有效提取故障特征频率,转子绕组匝间短路故障时提取的定子电流故障特征频率 $(1-2s)f_s$ 和 $(1+2s)f_s$ 与真实值的特征频率误差分别是0.083%和0.117%,得到的故障特征频率分量具有更高的精度;该方法能够更好地检测DFIG匝间短路的特征频率,有效提取并区分故障特征分量与干扰分量。

关键词: 匝间短路;零序电流;残差谐波;谱幅值调制;故障诊断

中图分类号: TM306; TM351; TM501 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503013 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0135-12

Diagnosis Method for Inter-Turn Short Circuit Faults in Doubly Fed Induction Generators Based on Spectral Amplitude Modulation of the Residual Current Harmonic Analysis

ZHAO Shouwang¹, CHEN Yu¹, ZHANG Sichao¹, Nadeem SHAHBAZ¹, LIANG Feng¹,

WANG Shuang¹, MA Yong², DENG Wei², ZHAO Yong², CHENG Yonghong¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the issue of inter-turn short circuits in the stator or rotor windings of doubly fed induction generators (DFIG), which are caused by insulation degradation and result in the generation of sideband harmonics near the fundamental frequency and harmonics that are easily submerged by noise interference, making it difficult to effectively distinguish between fault characteristic frequencies and interference components, a method for diagnosing DFIG inter-turn short circuit faults based on current residual harmonic spectrum amplitude modulation is proposed. Firstly, by performing an S-transform on the zero-sequence current of the DFIG to obtain its time-

收稿日期: 2024-05-18。 作者简介: 赵寿旺(1991—),男,博士生;陈玉(通信作者),男,教授,博士生导师。
基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-116);陕西省科技创新引领计划资助项目(2022KXJ-68);中国华能集团总部科技资助项目(HNKJ20-H72-02)。

网络出版时间: 2024-10-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241012.1157.002>

frequency domain phase and amplitude, the phase is corrected and the amplitude is modulated to different degrees. Subsequently, the modulated current residual harmonic spectrum is calculated. Finally, experimental verification is conducted on a 100 kW doubly fed induction generator winding short circuit fault simulation platform. The results demonstrate that the proposed method can effectively extract fault characteristic frequencies, with errors of 0.083% and 0.117% for the extracted stator current fault characteristic frequencies $(1 - 2s)f_s$ and $(1 + 2s)f_s$ during rotor winding inter-turn short circuit faults, respectively, exhibiting higher accuracy in the extracted fault characteristic frequency components. This method can better detect the characteristic frequencies of DFIG inter-turn short circuits, effectively extracting and distinguishing between fault characteristic components and interference components.

Keywords: interturn short circuit; zero sequence current; residual harmonic analysis; spectral amplitude modulation; fault diagnosis

近年来,我国风力发电产业发展迅速,装机容量不断攀升^[1]。风力发电机组的可靠性调查普遍显示,与传统的涡轮发电机或水力发电机相比,风力发电机的故障率更高,成为系统故障和停机的主要原因^[2]。现服役和新近安装的风力发电机组中,双馈感应发电机(DFIG)占有较大比例^[3],这归功于DFIG相比其他类型的风电机能直接连接定子至电网,并具有较低的变流器额定功率^[4]。DFIG中易发生故障的部件失效率会因设计、额定功率和制造商的不同而异,其中发电机的转子和定子绕组或核心绝缘损坏问题是导致风机强制停机的最常见原因^[5-6]。导致DFIG绕组匝间缺陷的因素包括绕组绝缘系统内的过压、欠压、不平衡电压、过低频、过频、波动、过载、锁转子状态、污染、磨损以及局部放电,并且匝间绕组故障是渐进演变的。如果不能及时发现并遏止匝间缺陷,匝间绕组故障会随着时间的推移而升级,并在相绕组中引发更严重的短路故障^[5-7]。

风力发电机的有效维护需要复杂的监控系统,以便在正确的时间做出正确的决策,以避免故障造成计划外的停产^[1]。目前,诊断风力发电机故障主要基于对定子电流、扭矩、振动、泄漏磁通^[8-10]、速度、功率等各种信号进行频谱分析^[1],通过观察频谱中新谐波谱线分量的出现,或已存在谐波谱线分量幅值的改变^[1,8-10]进行判断。电机电流特征分析(MCSA)是电机故障诊断中应用最广泛的故障诊断技术之一^[11],这种方法在诊断DFIG故障时受转子滑移和工况不平稳性影响,有明显的局限性,特别对于轻微缺陷或故障容易误报^[1,11]。文献[12]给出了一种新的电机平方电流特征分析方法,与传统MCSA方法相比,这种方法能够从具有转子故障类似的电机中提供更多特征信息。此外,研究人员通

过提取负序电流^[13]、三相电流 Park 矢量轨迹^[14]、电流平均瞬时功率谱^[15]等方法进行风力发电机的短路故障诊断,取得了一定效果。但早期低匝数绝缘问题特征量变化不明显,并且特征变化率受工况不平稳性的影响,使得早期匝间故障较难被检测。

针对 DFIG 早期匝间短路故障诊断问题,文献[16]提出了扩展 Park 矢量法,通过选择 Park 矢量模平方的 2 倍基频分量的幅值作为新的故障特征,实现了匝间短路故障的早期检测,并分析了扩展 Park 矢量法与定子负序电流之间的关系,应用 Fryze-Buchholz-Dpenbrock 算法和非线性最小二乘法来估计定子不平衡电压、负载变化和定子负序电流之间的数学关系,消除了对不平衡定子电压和负载变化的影响^[16-17]。文献[18]提出了电机电流归一化残余谐波分析方法,通过检测精确频率的残余谐波的出现,实现了转子断条故障和定子绕组匝间短路故障的诊断。除此之外,短时傅里叶变换(STFT)、Wigner-Ville 变换、小波变换(WT)、经验模态分解(EMD)、变分模态分解(VMD)、同步压缩变换(ST)等先进的时频域信号分析方法,能够提取非平稳信号的特征,获得 DFIG 更加全面的时频信息^[1,8-10,19-20]。然而,大多数现有的自适应模式分解提取特征相关分量的算法,如小波变换、小波包变换、奇异值分解、经验模态分解、经验小波变换、变分模式分解等方法,本质上是自适应带通滤波器组^[21],不能将特征相关分量与相同频段的干扰成分分开^[22],尤其对于 DFIG 匝间短路故障会在三相定子电流信号频谱中基频及其谐波周围出现边带谐波。由于电流信号受到噪声干扰,边带谐波往往被主频谐波所淹没,因此很难将故障特征频率与相同频段的干扰分量区分开,限制了匝间短路边带谐波特征频率的提取。

谱幅值调制(SAM)是一种有效的方法,通过幅值调节因子来增强频谱特征,同时保持频谱相位不变,这为特征频率的提取和增强提供了新的思路^[19, 23-25]。SAM作为一种经验性的非线性滤波技术,能够在复杂工况下有效提取机电设备中的故障特征频率,并在强噪声环境中展现出较强的适应性和稳定性,特别适用于机电设备故障信号分析^[19]。为了进一步提升SAM方法在复杂环境中的性能,文献[23]提出了增强谱幅值调制(eSAM)方法,该方法通过修正信号平方包络的无偏自相关来代替传统的平方包络,从而减少了非线性滤波过程中产生的随机噪声干扰,显著提高了故障特征频率的提取精度,仿真和实验结果验证了eSAM方法在故障诊断中的优越性。文献[24]提出了一种局部谱幅值调制方法,该方法通过在频谱上扫频并构造零相位滤波器,选择包含丰富故障信息的频带,结合谱幅值调制算法计算各分量的修正信号,此方法在自适应增强频带中的故障特征提取方面表现突出,能够更加准确和有效地实现故障特征的提取,比Autogram和时频谱幅值调制方法具有显著的优势。文献[25]介绍了一种参数化谱幅值调制(PSSAM)方法,PSSAM通过参数化S变换将信号转换到时频域,并获取更为准确和全面的幅值信息,与传统的SAM方法相比,PSSAM在强噪声环境中表现出更高的鲁棒性,并能够同时提取多种故障分量^[24-27]。然而,SAM方法受限于傅里叶变换提取谐波幅值和相位,以及幅值调制因子选择的影响,导致在强噪声干扰环境下,故障特征频率与相同频段的干扰分量难以区分,且不同频段的幅值也易受非平稳工况的影响^[25-28]。虽然文献[25]在谱幅值调制的基础上提出了参数化S谱幅值调制PSSAM方法,避免了傅里叶变换过程的平均效应,但该方法仍未能有效解决强噪声干扰环境下故障特征频率与干扰分量难以区分的问题,主要适用于机电设备滚动轴承类的故障诊断。

基于目前研究存在的问题,本文提出了一种电机电流残差谐波谱幅值调制(RHSAM)的双馈感应发电机匝间短路故障诊断方法。首先,对双馈感应发电机零序电流进行S变换获得零序电流的时频域相位和幅值。然后,对相位进行相位差校正,对幅值进行不同调制因子的调制。接着,对调制后时频域相位和幅值进行S逆变换获得调制后的零序电流修正信号,对调制后的信号计算电流残差谐波谱,通过检测残余谐波进行DFIG匝间短路故障诊断。最后,通

过100 kW双馈感应发电机故障模拟平台的匝间短路故障验证实验数据。

1 电机电流谐波检测理论

1.1 定子电流谐波

双馈感应发电机(DFIG)的气隙磁场由基频的正弦波以及不同频率的空间谐波组成。气隙磁通中的谐波是由气隙磁导和谐波磁动势(MMF)之间的相互作用引起的,其中由转子槽引起的谐波称为转子槽谐波(RSHs)^[18, 29]。对于健康的电机,转子槽谐波会以特定的频率出现在定子电流中。转子槽谐波计算公式^[18, 29]如下

$$f_{\text{RSHs}}(k, s) = \left(1 + \frac{kN_r}{p}(1-s)f_s\right) \quad (1)$$

式中: f_s 为基本频率; k 为正整数, $k=1$ 时 f_1 为基谐波; s 为转差率; N_r 为转子槽数; p 为极对数。

双馈感应发电机DFIG通常设计为三相平衡的电力设备,三相定子绕组由相同规格的线圈构成,以确保其电磁结构的对称性。已有研究表明,当谐波的阶数为奇数且不为3的倍数时,定子能够感应到相应的电流分量^[18],因此特定阶次的转子槽谐波更容易满足检测条件,并具有较高的可识别性。根据谐波传播理论,计算和验证^[18]符合上述条件的转子槽谐波阶次的公式为

$$G(k, v) = \left\{ \left(\left(\frac{kN_r}{p} \pm 1 \right) \right)_{k=1,2,3,\dots} \cap (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\} \quad (2)$$

式中: v 表示谐波的阶数(或谐波的次数),是一个正整数; $G(k, v)$ 为检测到的谐波。

实际DFIG设计中,三相定子绕组并不完全对称,DFIG谐波频谱中会出现3的倍数阶数外的其他谐波。

对于正常运行的DFIG,三相定子电流中通常由如下谐波^[18]组成

$$\begin{cases} f_{\text{TH}}(h) = hf_s \\ f_{\text{RSHs}}(h, k, s) = \left(h \pm \frac{kN_r}{p}(1-s)\right)f_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 表示谐波的奇数次阶数(或奇数谐波次数); $f_{\text{TH}}(h)$ 表示为三相定子电流中检测到的奇数次谐波; $f_{\text{RSHs}}(h, k, s)$ 表示三相定子电流中检测到的转子槽谐波。

DFIG发生匝间短路的边带频率,即原始频率与转子槽谐波频率之间的总和或差,通常表明由异常(如短路)引发的调制^[18, 29]。由于DFIG的双馈特

性,定子直接与电网连接,转子通过双馈变流器与电网进行交互,使得定子电流频谱中存在转子转速频率分量。转子转速相关的频率分量在故障发生时可能变得更加显著,这种显著性进一步揭示了定子和转子之间在故障条件下的复杂交互作用,为匝间短路故障的识别和诊断提供重要的特征依据^[18,29]。已有研究表明,DFIG 发生定子绕组匝间短路,往往会导致三相定子电流谐波的增加,这些谐波可能是基频 f_1 的奇数或偶数倍,并且会破坏 DFIG 内部磁场的对称性^[1,8,29]。同时,受 DFIG 运行工况、负载变化及转差率 s 的影响,或 DFIG 转子发生异常或短路故障,定子电流信号会展现出新的故障特征频率成分 $(1 \pm 2ks) - f_s$ ^[8,18,28-29]。鉴于 DFIG 在平稳运行条件下的 s 较小,导致最显著的故障特征频率成分 $(1 \pm 2s)f_s$ (此时 $k = 1$) 与基频 f_1 极为接近,同时其谐波幅值相比于基频幅值 f_1 明显较低,易被基频的频谱泄漏或周围噪声和扰动信号所覆盖^[1,8,18,28-29],这是 DFIG 匝间短路故障谐波检测面临的长期挑战,影响着故障检测和故障诊断过程的精确性与可信度^[1,18,28]。

1.2 电机电流残差谐波分析

DFIG 定子电流谐波的频谱分析,依赖于检测的 DFIG 三相定子电流信号是平稳的。此外,与故障相关的频率分量与 DFIG 转差率 s 相关,并随着工作条件变化而变化^[1,8,30]。文献[21]和[22]提出了加权归一化傅里叶谱/包络谱的优化权重谱方法,通过优化权重谱的正负号及幅值变化增强故障检测灵敏度,正权重强调与故障相关的频谱特征,而负权重则衰减正常工作频率,以便于区分正常和故障分量。通过考虑优化权重的正负符号权重,频谱分析变得更具辨别力,能够更清晰地区分健康和故障的机器运行状态^[21-22]。因此,可以通过归一化傅里叶谱/包络谱进行电机电流残差谐波分析,以残差谐波谱区分健康和故障状态的 DFIG 的故障特征分量。

利用电机电流残差信号处理来计算归一化平方包络谱的谐波差,能够在谐波频谱中提供 DFIG 健康状态和故障状态之间产生的谐波频谱差异,有利于区分健康和故障特征分量^[8,18,21-22,30]。电机电流残差谐波计算公式如下

$$\begin{cases} A_{\text{NSES},\text{H}}(f) = A_{\text{H}}(f) / \max(A_{\text{H}}(f)) \\ A_{\text{NSES},\text{F}}(f) = A_{\text{F}}(f) / \max(A_{\text{F}}(f)) \\ \Delta A_{\text{NSES}}(f) = A_{\text{NSES},\text{F}}(f) - A_{\text{NSES},\text{H}}(f) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_{\text{NSES},\text{H}}(f)$ 、 $A_{\text{NSES},\text{F}}(f)$ 分别表示 DFIG 健康状态 H、故障状态 F 时电流信号的归一化平方包络谱

(NSES); $A_{\text{H}}(f)$ 、 $A_{\text{F}}(f)$ 分别为健康状态 H、故障状态 F 时电流信号归一化平方包络谱的频谱幅值,可以通过傅里叶变换或时频变换获得归一化平方包络谱的频谱幅值; $\max(\)$ 表示求频谱的最大值,用于频谱归一化; $\Delta A_{\text{NSES}}(f)$ 表示归一化平方包络谱的残差谐波。

2 电机电流残差谐波谱幅值调制方法

理想情况下,双馈感应发电机 DFIG 是对称的机电结构,三相电流的幅值相等,相位相差 120° 。然而,当 DFIG 固有属性或电机绕组发生故障时,会引起 DFIG 内部物理特性的波动,如负载、阻抗、磁通量等变化,因此三相定子电流的不对称性成为检测 DFIG 故障的主要表现形式^[1,8,31]。DFIG 三相电流可以分解为正序分量、负序分量和零序分量,理论上在理想情况下健康的 DFIG,由于三相对称性,负序分量和零序分量的幅值都是 0,只有正序列分量存在,故障会引起 DFIG 三相定子电流不平衡和不对称。实际上,几乎不可能使 DFIG 达到完全对称的结构,此外由于噪声和测量误差的影响,负序和零序电流始终是客观存在的和非 0 的,零序电流和负序电流也反映了 DFIG 的健康状态,因此负序和零序分量中蕴含着丰富的故障信息^[31]。文献[31]利用电流负序分量来表示电流轨迹变化,实现了有效诊断和定位故障,对负载变化具有较高的鲁棒性,可以量化评估 DFIG 匝间短路故障的严重程度。

同样,零序电流为三相电流的矢量和,反映故障的微弱特征,因此本文进一步结合 DFIG 的零序电流,提出一种电机电流残差谐波谱幅值调制(RHSAM)的双馈感应发电机匝间短路故障诊断方法。通过调制零序电流信号增强故障特征频率的可检测性,特别是在高噪声环境下,可以更有效地提取和放大故障相关的特征频率,避免其被主频谐波所掩盖。

电机电流残差谐波谱幅值调制 RHSAM 方法流程图如图 1 所示。通过对双馈感应发电机零序电流进行 S 变换获得零序电流的时频域相位和幅值,保持相位不变,再对幅值进行不同程度调制因子的调制,对调制后时频域相位和幅值进行 S 逆变换获得调制后的零序电流修正信号,然后对调制后的信号计算电流残差谐波谱,通过监测零序电流残余谐波进行 DFIG 匝间短路故障诊断。RHSAM 方法的具体步骤如下。

(1)采集不同健康状态的 DFIG 三相定子电流,采用复数分量矢量变换^[31],将原始瞬时三相电流变为正序、负序和零序的电流分量。将长度为 L 的 DFIG 三相电流信号时间序列 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 通过复数分量矢量变换公式变换为正序 $i_1(t)$ 、负序 $i_2(t)$ 和零序 $i_0(t)$ 的电流分量。复数分量矢量变换公式如下

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5)$$

(2)进一步对零序电流 i_0 进行 S 变换^[26-27,32],获得零序电流 i_0 的时频域的相位和幅值,公式为

$$\begin{cases} S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} i_0(t) g(t - \tau, f) e^{-j2\pi ft} dt \\ g(t, f) = \exp(-t^2/2\sigma^2) / (\sigma \sqrt{2\pi}) \\ r_{ST} = \text{abs}(\text{ST.dost}(i_0(t))) \\ \phi_{ST} = \text{angle}(\text{ST.dost}(i_0(t))) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S(\tau, f)$ 表示 S 变换函数; $g(t, f)$ 表示高斯窗函数; t 为时间; σ 为方差; $\text{abs}()$ 表示绝对值函数,用于计算某个复数或实数的大小; $\text{angle}()$ 表示取相位角函数,用于计算复数的相位角; $\text{ST.dost}()$ 表示离散标准正交 S 变换 dost 函数^[26-27],用来求取零序电流 S 变换频域的幅值 r_{ST} 和相位 ϕ_{ST} 。

(3)对 DFIG 零序电流进行 S 变换获得零序电流时频域的幅值 r_{ST} 和相位 ϕ_{ST} ,对 S 变换时频域的相位进行相位校正获得 φ_{ST} ,对幅值 r_{ST} 进行不同权重的调制因子 (M) 调制 R_{ST} 。由于 DFIG 在运行过程中易受到各种干扰因素的影响,因此零序电流信号的相位可能会出现偏移,影响故障特征的准确提取。通过相位校正能够提高调制后信号的准确性,从而提高故障诊断的精度^[28]。在实际应用频谱分析时,由于时域信号截断会导致能量泄漏,进而造成谱峰值降低和精度下降^[28],因此本文采用相位差校正技术对频谱中的各个分量进行校正,从而获得更为精确的幅值和相位^[28]。

(4)对通过调制后的幅值和相位进行 S 时频逆变换获得调制后的修正信号,如下所示

$$\begin{cases} R_{ST} = (r_{ST} + c)^M \\ i_m = \text{ST.idost}((\text{real}(R_{ST}))) \exp(\varphi_{ST}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{ST.idost}()$ 表示离散标准正交 S 逆变换函数; i_m 表示经过调制后的修正信号; c 为非常小的常数,目的是防止计算过程中出现数值不稳定性或避免除以 0 等问题,通常取 $c = 10^{-15}$; 调制因子 M 的推荐取

值范围为 $[-0.5, 1.5]$ ^[19,23]。

(5)使用希尔伯特变换 (HT) 计算调制后信号 i_m 的归一化平方包络谱,并根据式 (4) 计算电机电流残差谐波 $\Delta A_{NSES}(f)$,进而得到残差谐波谱,提取故障特征频率。

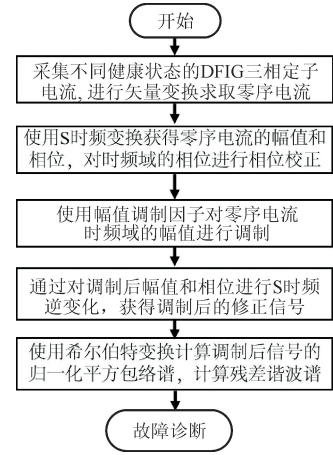


图1 PHSAM 方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the PHSAM method

3 仿真信号分析

与其他感应电机类似,DFIG 正常运行时,定子和转子绕组结构三相对称,产生对称的三相定子电流,三相定子电流主要的频率成分为工频 f_s ,转子电流主要含有 sf_s 的电流成分。为了验证所提方法的有效性,构造 DFIG 转子绕组匝间短路故障时一相定子电流仿真信号^[28],表示为

$$\begin{aligned} i = & 10\cos(2\pi \times 49.72t + 32\pi/180) + \\ & 0.15\cos(2\pi \times 48.08t + 73\pi/180) + \\ & 0.11\cos(2\pi \times 51.36t - 13\pi/180) \end{aligned} \quad (8)$$

DFIG 的基波频率 f_s 为 49.72 Hz; $2sf_s$ 为 1.64 Hz, DFIG 发生转子故障时边频带 $(1-2s)f_s$ 为 48.08 Hz, $(1+2s)f_s$ 为 51.36 Hz,该仿真信号能够模拟 DFIG 稳态运行时转差率很小情况,此时转子匝间短路故障特征频率分量 $(1\pm 2s)f_s$ 与基波频率 f_s 分量很接近, $(1\pm 2s)f_s$ 故障特征频率幅值远小于 f_s ,很容易被 f_s 分量的泄漏及环境噪声所淹没,使故障特征频率检测的准确性和可靠性降低^[28]。

图 2 展示了 DFIG 转子匝间短路时一相定子电流仿真信号的频域频谱图,可以看出故障特征频率分量 $(1\pm 2s)f_s$ 与基波频率 f_s 分量很接近,由于边频带特征频率幅值较小,基本已被基波频率所掩盖,因此给故障特征频率的提取和分离带来一定的困难。

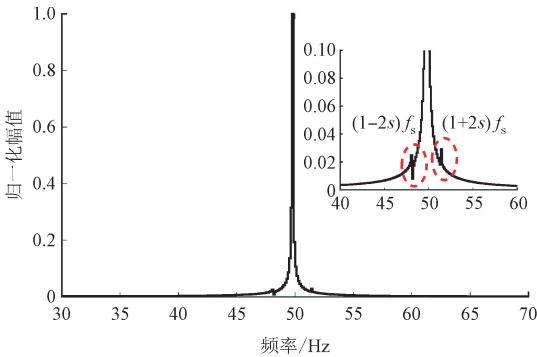
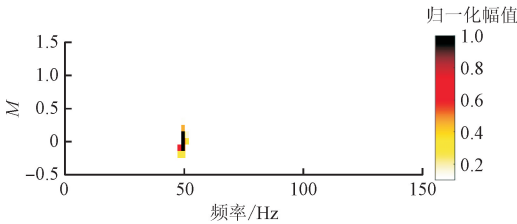


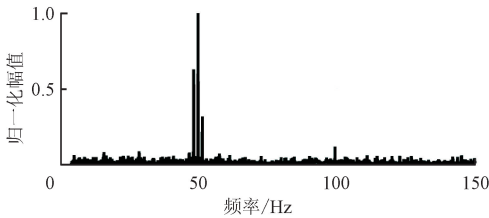
图 2 仿真信号电流频谱

Fig. 2 Current spectrum of simulated signal

图 3 为 S 谱幅值调制方法对 DFIG 定子电流仿真信号的处理结果。由图 3(a) 可见,当 M 在 $[-0.5, 0.5]$ 范围内,可以观察到明显的特征频率,而从图 3(b)中可以看出,S 谱幅值调制方法放大了故障特征频率分量 $(1 \pm 2s)f_s$ 成分,可以明显看出特征频率和基频,可见该方法不仅没有从频谱图中分离出故障特征频率,还放大了噪声和干扰成分。



(a)幅值调制因子-频谱二维图



(b)归一化幅值频谱图

图 3 S 谱幅值调制谱图

Fig. 3 Current spectrum of S-spectrum amplitude modulation

图 4 展示了本文所提出的残差谐波谱幅值调制 RHSAM 方法对 DFIG 定子电流仿真信号处理结果。由图可以看出,RHSAM 不仅可以增强故障特征频率分量 $(1 \pm 2s)f_s$ 成分,而且可以从残差谐波频谱图中分离出故障特征频率,可以明显区别出特征频率和基频;而对于三相对称健康状态的 DFIG 频谱图主要含有基波频率,通过考虑残差谐波谱谱线正负符号,能够更清晰地区分健康和故障的机器状态,正谱线为新增的故障特征频率,负谱线为基频及固有谱线,同时抑制了噪声和干扰成分,使频谱分析变得更具辨别力。

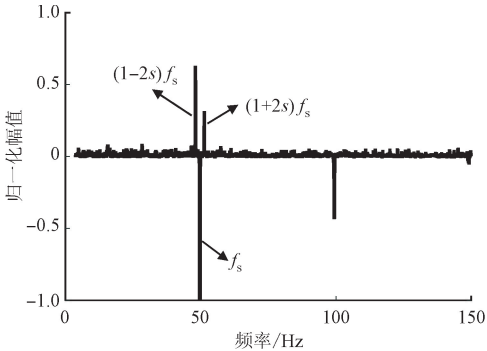


图 4 残差谐波谱幅值调制谱图

Fig. 4 Current spectrum of residual harmonic spectrum amplitude modulation

表 1 为 DFIG 转子绕组匝间短路故障时提取的定子电流仿真信号故障特征频率及其特征频率误差。通过与 SSAM 方法对比分析可以看出,所提 RHSAM 方法所提取的故障特征频率更接近仿真信号真实值,具有更低的故障特征频率提取误差, $(1 - 2s)f_s$ 与 $(1 + 2s)f_s$ 特征频率误差分别为 0.083%、0.117%。通过对仿真信号的分析及故障特征频率误差分析可知,本文提出的 RHSAM 方法在提取故障特征频率以及区分故障特征频率与相同频段的干扰分量时更具优势。

表 1 转子绕组短路故障时提取的定子电流仿真信号故障特征频率及特征频率误差

Table 1 Fault characteristic frequency and characteristic frequency error of stator current simulation signal extracted when rotor winding interturn short circuit fault

方法	$(1 - 2s)f_s$ /Hz	f_s /Hz	$(1 + 2s)f_s$ /Hz	特征频率误差/%	
				$(1 - 2s)f_s$	$(1 + 2s)f_s$
真实值	48.08	49.72	51.36		
SSAM	48.00	49.5	51.25	0.166	0.214
RHSAM	48.12	49.63	51.3	0.083	0.117

4 实验验证

4.1 测试样机与实验平台

本文利用 100 kW 双馈感应发电机绕组短路故障模拟实验平台采集三相定子电流数据。实验平台由双馈感应发电机、变频电动机、双馈变流器、短路开关柜及控制台等装置构成,如图 5 所示。发电机选用 YSF315S-4M 型三相绕线式双馈感应发电机,其定子绕组采用三角形 Δ 接法,转子绕组采用星形 Y 接法,额定功率为 100 kW,以便更真实地模拟风力发电机的运行工况,其主要技术参数如表 2 所示^[33-34]。



图 5 100 kW 双馈感应发电机匝间短路故障实验台及部分设备

Fig.5 Inter-turn short-circuit fault test bench and partial equipment for 100 kW DFIG

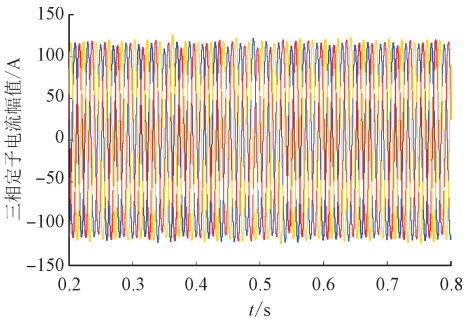
表 2 实验平台双馈发电机主要技术参数

Table 2 Main parameters of DFIG used in experimental platform

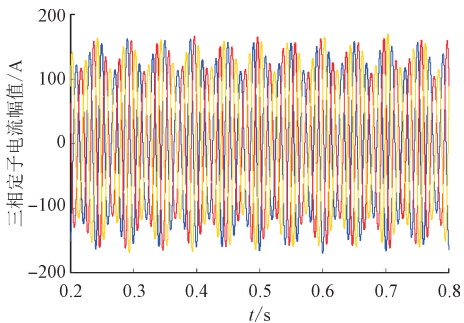
参数	数值
额定功率/kW	100
额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 800
极对数	2
转速/(r·min ⁻¹)	1 000~2 000
转子开路电压/V	1 092

对双馈感应发电机 DFIG 三相电流信号进行采样,采样率为 50 000 Hz,采样点数为 100 000,每次实验采集 2 s 的三相定子电流数据,其中短路开关控制台控制短路时间持续 1 s^[33-34],设置 2 匝、8 匝定子匝间短路,2 匝、5 匝转子匝间短路故障模拟,以获得低匝数匝间短路实验数据。

图 6 给出了在额定功率为 100 kW 和额定负载为 100 kW 并网条件下,DFIG 发生定子 2 匝绕组匝间短路和转子 2 匝匝间短路的三相定子电流波形。可以看出,在正常情况下,三相电流是对称的,当发生不同程度定子匝间短路时,在故障状态下三相定子电流不再具有幅相对称性。



(a)定子绕组 2 匝匝间短路时三相定子电流实测波形



(b)转子绕组 2 匝匝间短路时三相定子电流实测波形

图 6 实测定子和转子 2 匝匝间短路时三相定子电流波形

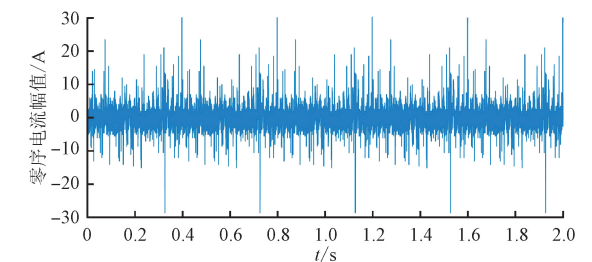
Fig.6 Experimental three-phase stator current waveform during 2-turn inter-turn short circuit between stator and rotor

4.2 DFIG 定子匝间短路 RHSAM 分析

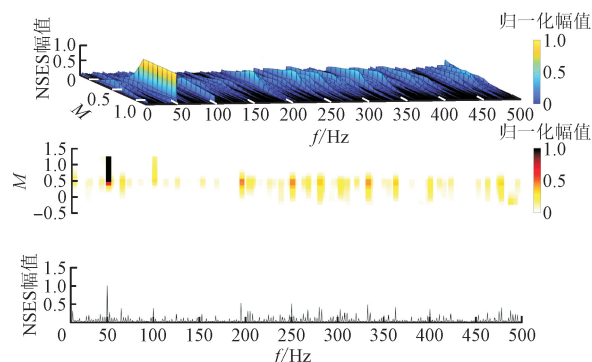
DFIG 定子绕组发生匝间短路故障时,DFIG 的定子绕组失衡将导致气隙中产生反向旋转磁场,在转子绕组中产生磁场,在三相定子电流中分别产生 $k f_s(k = 1, 3, 5, \cdots)$ 倍频电流谐波分量,该谐波电流分量将反映在零序电流中。

图 7~9 所示为不同程度定子匝间短路时零序电流波形及其残差谐波谱幅值调制 RHSAM 结果。图 7(a)、图 8(a)、图 9(a)分别是健康状态、定子 2 匝短路、定子 8 匝短路的零序电流波形图。可以看出,

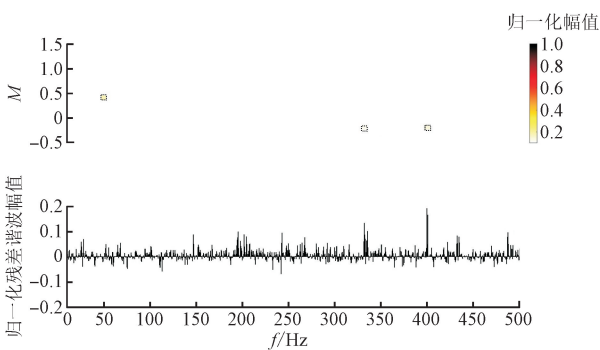
无论健康状态还是不同程度的定子匝间短路故障状态,零序电流都存在强噪声信号干扰,零序电流中微弱的故障特征被强噪声信号所淹没,无法直接从零序电流波形图获取有效的定子匝间短路故障特征。



(a) 零序电流



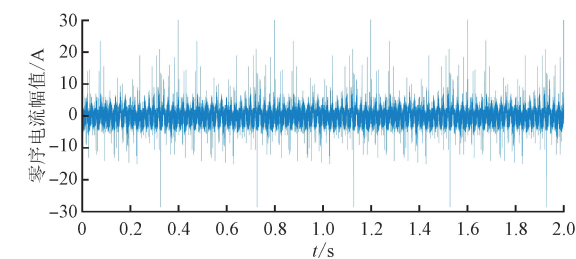
(b) S 谱幅值调制



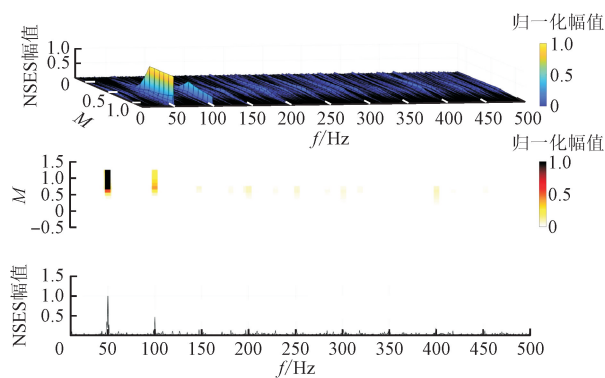
(c) 残差谐波谱幅值调制

图 7 健康状态时零序电流及其残差谐波谱幅值调制结果

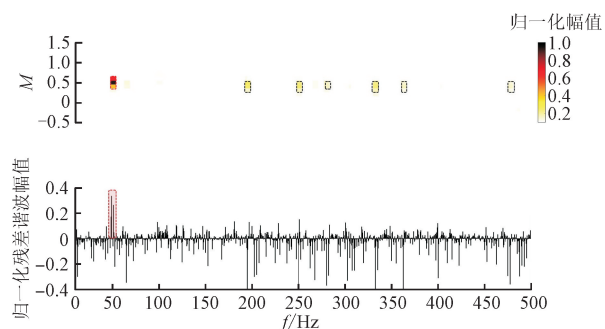
Fig. 7 Zero-sequence current and residual harmonic spectrum amplitude modulation in health condition



(a) 零序电流



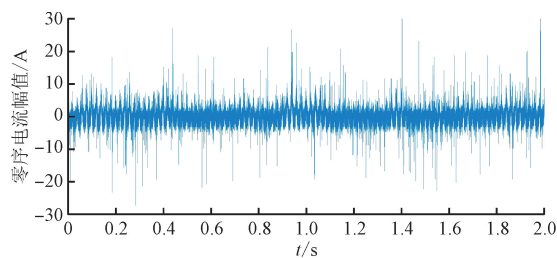
(b) S 谱幅值调制



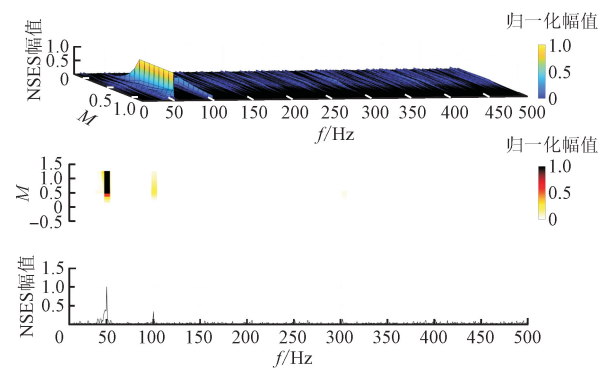
(c) 残差谐波谱幅值调制

图 8 定子 2 匝匝间短路零序电流及残差谐波谱幅值调制结果

Fig. 8 Zero-sequence current and residual harmonic spectrum amplitude modulation in short circuit between 2 turns of stator



(a) 零序电流



(b) S 谱幅值调制

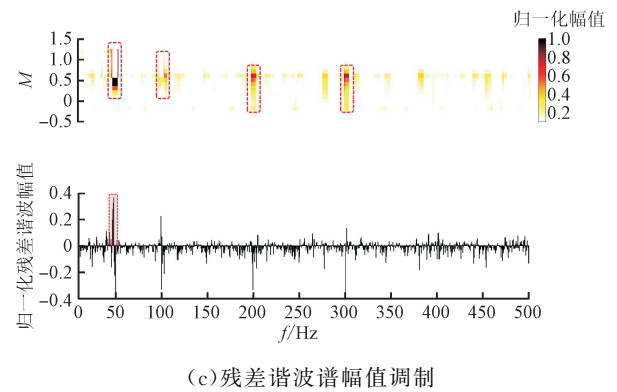


图 9 定子 8 匝匝间短路零序电流及残差谐波谱幅值调制结果

Fig. 9 Zero-sequence current and residual harmonic spectrum amplitude modulation in short circuit between 8 turns of stator

图 7(b)、图 8(b)、图 9(b)分别为健康状态、定子 2 匝短路、定子 8 匝短路的零序电流 S 谱幅值调制方法的处理结果。从图中可以看出,幅值调制因子 $M > 0.5$ 时,三维图中明显可见零序电流的基频谐波和倍频谐波, $M < 0.5$ 时零序电流的谱图中出现了很多干扰噪声成分,从零序电流的归一化平方包络谱 NSES 的谱线中可以观察到零序电流的特征谐波成分。尽管采用 S 谱幅值调制方法在零序电流的平方包络谱观察到清晰和明显的谐波谱线,同时零序电流中含有的强噪声干扰信号也在一定程度上被削弱,但依旧无法有效实现故障特征频率与相同频段的干扰分量区分开。

图 7(c)、图 8(c)、图 9(c)为健康状态、定子 2 匝短路、定子 8 匝短路的零序电流残差谐波谱幅值调制 RHSAM 分析的结果。通过对比图 7(c)、图 8(c)、图 9(c)零序电流的归一化残差谐波幅值谱,从虚框标识中可以明显看出,健康状态和不同程度定子匝间短路故障状态谐波谱线差异,图 7(c)中归一化残差谐波幅值谱低频谐波谱线基本削弱,主要以干扰信号的谱线为主,图 8(c)和图 9(c)发生一定程度定子匝间短路,归一化残差谐波幅值谱低频谐波谱线出现明显的低频谐波,且正负谐波谱线较健康状态差异明显。

图 7(c)健康状态的幅值调制因子-频率图中,背景板中存在少许的电流残差谐波谱线,健康状态归一化残差谐波谱中基波和倍频谐波被消除;不同程度的定子匝间短路状态时,如图 8(c)、图 9(c)所示,幅值调制因子-频率图中存在明显的基波和倍频谐

波,归一化残差谐波谱中存在明显特征频率和边带谱线。通过幅值调制因子的调制,归一化残差谐波谱中正负号及幅值变化增强故障检测灵敏度,正谱线为故障相关频谱特征,通过零序电流 RHSAM 能够区分正常和故障分量,将故障特征频率与相同频段的干扰分量区分开。

4.3 DFIG 转子匝间短路 RHSAM 分析

图 10 和图 11 所示为不同程度转子匝间短路时零序电流波形及其残差谐波谱幅值调制 RHSAM 结果。图 7(a)、图 10(a)、图 11(a)分别是健康状态、转子 2 匝短路、转子 5 匝短路的零序电流波形图,同样可见,从不同程度的转子匝间短路故障状态波形图无法获取有效的转子匝间短路故障特征。

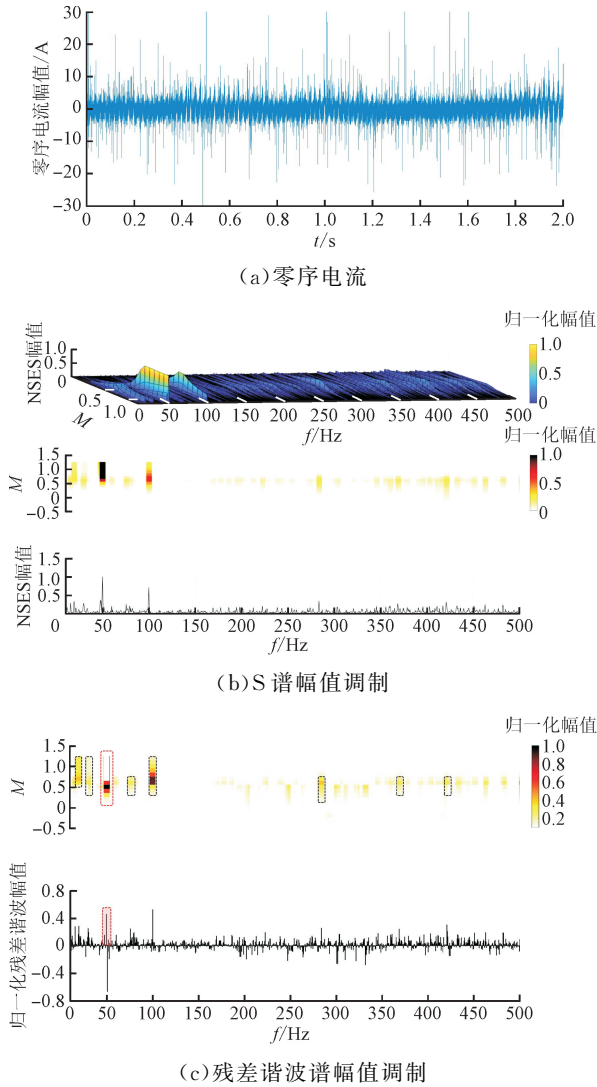


图 10 转子 2 匝短路零序电流及残差谐波谱幅值调制结果

Fig. 10 Zero-sequence current and residual harmonic spectrum amplitude modulation in short circuit between 2 turns of rotor

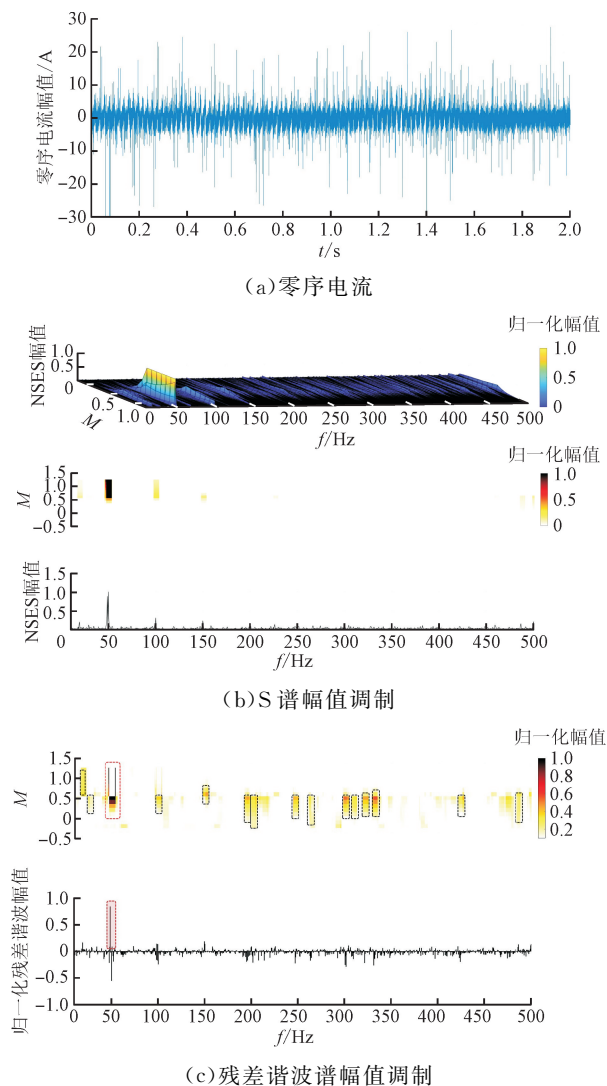


图 11 转子 5 匝短路零序电流及残差谐波谱幅值调制结果
Fig. 11 Zero-sequence current and residual harmonic spectrum amplitude modulation in short circuit between 5 turns of rotor

图 10(c)和图 11(c)为转子 2 匝短路、转子 5 匝短路零序电流残差谐波谱幅调制 RHSAM 分析结果。通过对比图 10(c)和图 11(c)零序电流的归一化残差谐波幅值谱,尤其虚框部分,能够明显看出健康状态和不同程度定子匝间短路故障状态谐波谱线差异,通过零序电流残差谐波谱幅调制 RHSAM 能够区分正常和故障分量。与定子匝间短路故障不同的是,转子匝间短路特征频率受 DFIG 运行转差率 s 的影响,出现很多边带谱线和分数次谐波,由于额定运行工况时 s 比较少,主要的谱线主要集中在基频附近,因此在图 10(c)和图 11(c)图中可以看出明显的边带谱线。

通过 RHSAM 对不同的定子和转子匝间短路

故障采用归一化残差谐波进行差异化比较,无论定子匝间短路故障或转子匝间短路故障,归一化残差谐波谱中最显著的特征频率始终固定在特定频率,便于监控 DFIG 的运行情况。

5 结 论

(1)提出了一种电机电流残差谐波谱幅值调制的双馈感应发电机匝间短路故障诊断方法,用于 DFIG 定子和转子匝间短路故障诊断。

(2)通过监测零序电流残差谐波进行 DFIG 匝间短路故障诊断,采用归一化残差谐波谱有利于检测匝间短路的特征频率,提取边带谐波,区分故障特征频率与干扰分量。

(3)以转子绕组匝间短路故障时提取的定子电流仿真信号为例验证所提出的方法,故障特征频率 $(1-2s)f_s$ 和 $(1+2s)f_s$ 与真实值的特征频率误差分别是 0.083% 和 0.117%,明显优于传统方法所提取的故障特征频率。仿真和实验结果证明,本文所提方法能够有效提取故障特征频率,得到的故障特征频率分量具有更高的精度,实验验证了电机电流残差谐波谱幅值调制方法的可行性及有效性。

本文仿真和实验结果均表明所提方法具有可行性,但在实际应用中仍需进一步考虑在线实时分析的有效性,并在不同类型的双馈感应发电机上进行更多测试,以确保该方法的广泛适用性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 高晨, 赵勇, 汪德良, 等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 30-42.
- GAO Chen, ZHAO Yong, WANG Deliang, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 30-42.
- [2] QIAO Wei, LU Dingguo. A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis: part II signals and signal processing methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6546-6557.
- [3] HE Lijun, HAO Liwei, QIAO Wei. Remote monitoring and diagnostics of pitch-bearing defects in an MW-scale wind turbine using pitch symmetrical-component analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applica-

- tions, 2021, 57(4): 3252-3261.
- [4] 张洋, 别朝红. 一种无速度传感器的双馈风力发电机滞环矢量控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 109-113.
- ZHANG Yang, BIE Zhaohong. Sensor-less hysteretic vector control of doubly-fed machine for wind power generators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(6): 109-113.
- [5] ALEWINE K, CHEN W. A review of electrical winding failures in wind turbine generators [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(4): 8-13.
- [6] CARROLL J, MCDONALD A, MCMILLAN D. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 663-670.
- [7] SHAO Siyu, SUN Wenjun, YAN Ruqiang, et al. A deep learning approach for fault diagnosis of induction motors in manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1347-1356.
- [8] ZHAO Shouwang, CHEN Yu, REHMAN A U, et al. Detection of interturn short-circuit faults in DFIGs based on external leakage flux sensing and the VMD-RCMDE analytical method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.
- [9] ZHAO Shouwang, CHEN Yu, LIANG Feng, et al. Incipient fault detection and condition assessment in DFIGs based on external leakage flux sensing and modified multiscale Poincare plots analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(2): 025007.
- [10] ZHAO Shouwang, CHEN Yu, LIANG Feng, et al. Evaluation method of performance degradation based on end magnetic flux leakage for short circuit fault of doubly fed induction generator [C]//2022 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-4.
- [11] MÉRIGAUD A, RINGWOOD J V. Condition-based maintenance methods for marine renewable energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 53-78.
- [12] PIRES V F, KADIVONGA M, MARTINS J F, et al. Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis [J]. Measurement, 2013, 46(2): 942-948.
- [13] 马宏忠, 张志艳, 张志新, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50-54.
- MA Hongzhong, ZHANG Zhiyan, ZHANG Zhixin, et al. Research on DFIG stator winding inter-turn short circuit fault [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(11): 50-54.
- [14] 魏书荣, 符杨, 马宏忠. 双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 25-28.
- WEI Shurong, FU Yang, MA Hongzhong. Stator winding inter-turn short-circuit diagnosis and experimental research on doubly-fed wind generator [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 25-28.
- [15] 马宏忠, 张艳, 魏海增, 等. 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障诊断 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 151-156.
- MA Hongzhong, ZHANG Yan, WEI Haizeng, et al. Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 151-156.
- [16] WEI Shurong, ZHANG Xin, XU Yao, et al. Extended Park's vector method in early inter-turn short circuit fault detection for the stator windings of offshore wind doubly-fed induction generators [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18): 3905-3912.
- [17] 魏书荣, 张路, 符杨, 等. 基于派克矢量轨迹椭圆度的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3001-3009.
- WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the Park's vector locus ovality for inter-turn faults in stator windings of the offshore wind DFIG [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3001-3009.
- [18] ALLAL A, KHECHEKHOUCHE A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108219.
- [19] MOSHREFZADEH A, FASANA A, ANTONI J. The spectral amplitude modulation: a nonlinear filtering process for diagnosis of rolling element bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 253-276.
- [20] CAMARENA-MARTINEZ D, PEREZ-RAMIREZ C A, VALTIERRA-RODRIGUEZ M, et al. Synchrosqueezing transform-based methodology for bro-

- ken rotor bars detection in induction motors [J]. *Measurement*, 2016, 90: 519-525.
- [21] HOU Bingchang, WANG Dong, XIA Tangbin, et al. Difference mode decomposition for adaptive signal decomposition [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 191: 110203.
- [22] HOU Bingchang, WANG Dong, KONG Jinzhen, et al. Understanding importance of positive and negative signs of optimized weights used in the sum of weighted normalized Fourier spectrum/envelope spectrum for machine condition monitoring [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 174: 109094.
- [23] 刘文朋, 杨绍普, 李强, 等. 一种增强的谱幅值调制方法及其在复杂干扰下滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. *振动工程学报*, 2021, 34(5): 1064-1075.
- LIU Wenpeng, YANG Shaopu, LI Qiang, et al. An enhanced spectral amplitude modulation method and its application to rolling element bearings fault diagnosis under complex interference [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(5): 1064-1075.
- [24] 姜祖华, 张坤, 杨苗蕊, 等. 局部谱幅值调制及其滚动轴承故障诊断应用[J/OL]. 轴承. (2023-10-11)[2024-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1148.TH.20231010.1104.002.html>.
- JIANG Zuhua, ZHANG Kun, YANG Miaorui, et al. Local spectral amplitude modulation and its applications to fault diagnosis of rolling bearing[J/OL]. *Bearing*. (2023-10-11)[2024-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1148.TH.20231010.1104.002.html>.
- [25] 姜祖华, 张坤, 杨欢, 等. 参数化 S 谱幅值调制及轴承故障诊断应用 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(3): 117-128.
- JIANG Zuhua, ZHANG Kun, YANG Huan, et al. Parameterized S spectral amplitude modulation and its applications to bearing fault diagnosis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(3): 117-128.
- [26] STOCKWELL R G. A basis for efficient representation of the S-transform [J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17(1): 371-393.
- [27] BATTISTI U, RIBA L. Window-dependent bases for efficient representations of the Stockwell transform [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2016, 40(2): 292-320.
- [28] 李彧, 侯新国, 胡文彪, 等. 离散频谱校正技术在感应电机转子故障诊断中的应用 [J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(4): 41-46.
- LI Yu, HOU Xinguo, HU Wenbiao, et al. Application of discrete spectrum correction technology to induction machine rotor fault diagnosis [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25(4): 41-46.
- [29] ARTIGAO E, HONRUBIA-ESCRIBANO A, GÓMEZ-LÁZARO E. In-service wind turbine DFIG diagnosis using current signature analysis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(3): 2262-2271.
- [30] 杭俊, 胡齐涛, 丁石川, 等. 基于电流残差矢量模平方的永磁同步电机匝间短路故障鲁棒检测与定位方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 340-350.
- HANG Jun, HU Qitao, DING Shichuan, et al. Robust detection and location of inter-turn short circuit fault in permanent magnet synchronous motor based on square of residual current vector modulus [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 340-350.
- [31] CHEN Peng, XIE Ying, HU Shengming. Electromagnetic performance and diagnosis of induction motors with stator interturn fault [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(2): 1354-1364.
- [32] SINGH M, SHAIK A G. Incipient fault detection in stator windings of an induction motor using Stockwell transform and SVM [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9496-9504.
- [33] 韩斌, 赵勇, 房刚利, 等. 多功能双馈发电机故障模拟试验台的研制 [J]. *大电机技术*, 2017(5): 22-26.
- HAN Bin, ZHAO Yong, FANG Gangli, et al. Development of multi-functional fault simulation test bed of doubly-fed induction generator [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2017(5): 22-26.
- [34] ZHAO Shouwang, CHEN Yu, UR REHMAN A, et al. The inter-turns short circuit fault detection based on external leakage flux sensing and VMD-HHT analytical method for DFIG [C]//2021 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-5.

(编辑 亢列梅)