

基于双馈式风电机组定子电流信号现象学模型的齿轮箱故障监测方法^{*}

申艳杰, 李鹏飞, 武英杰, 尹新瑞, 王建国

(东北电力大学自动化工程学院 吉林 132012)

摘要:为解决双馈式风电机组齿轮箱故障诊断中,现有定子电流方法未覆盖双馈并网状态、变工况下频带混叠难以对比等问题,提出了一种基于双馈式风机定子电流信号的齿轮箱状态监测方法。首先,基于双馈式风机实物仿真平台发电机的定子电流信号构建现象学模型,确定定子电流信号构成成分和规律;随后,利用定子电流信号现象学模型将风机机械部分与电气特征联系起来,确定风机机械侧对于电气侧的影响,提出了电流能量比算法;对于变工况导致频带重叠以及无法对比的问题采用切分重组的方法加以避免;依靠电机齿槽谐波进行转速估计,实现了仅定子电流信号的电流能量比计算,其平均相对误差为0.277 2,均方误差为0.114 6。为验证方法可行性,通过双馈式风机实物仿真平台,分别采集齿轮箱正常状态及多种故障状态下不同工况的定子电流信号进行实验验证。结果表明:齿轮箱故障状态下的电流能量比显著高于正常状态,且同一部件故障严重程度与电流能量比呈正相关,具体表现为故障越严重,电流能量比越大;对比齿轮箱平行级与二级行星级的电流能量比结果进一步证实,该算法在风机参数改变时仍具备良好普适性,且可有效监测齿轮箱平行级与二级行星级故障。

关键词:风电机组;齿轮箱;定子电流;状态监测

中图分类号: TH165. 3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470. 4047

A phenomenological model-based gearbox fault monitoring method using stator current analysis for doubly-fed induction wind turbines

Shen Yanjie, Li Pengfei, Wu Yingjie, Yin Xinrui, Wang Jianguo

(School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: To address issues in gearbox fault diagnosis of doubly-fed wind turbines, such as the lack of coverage of doubly-fed grid-connected conditions in existing stator current methods and the difficulty in comparing frequency band aliasing under variable operating conditions, this article proposes a gearbox condition monitoring method based on stator current signals from doubly-fed wind turbines. Firstly, a phenomenological model is formulated based on the stator current signal of the generator of the doubly-fed wind turbine physical simulation platform, and the composition and law of the stator current signal were determined. Then, the stator current signal phenomenological model is used to link the mechanical part of the fan with the electrical characteristics and determine the influence of the mechanical side of the fan on the electrical side. The current-energy ratio algorithm was proposed. For the problems of frequency band overlap and inability to compare caused by variable working conditions, the method of segmentation and reorganization is used to avoid it. Rotor speed estimation is achieved by leveraging motor cogging harmonics, enabling the calculation of the current energy ratio using only stator current signals, with a mean relative error of 0.277 2 and a mean squared error of 0.114 6. To validate the feasibility of the method, stator current signals under various operating conditions are collected from a physical doubly-fed wind turbine simulation platform for both normal and multiple fault states of the gearbox. The results show that the current energy ratio under gearbox fault conditions is significantly higher than that in the normal state, and the severity of faults in the same component is positively correlated with the current energy ratio—specifically, more severe faults correspond to higher current energy ratios. Comparative analysis of the

current energy ratio between the parallel stage and the secondary planetary stage further shows that the algorithm maintains strong universality even when wind turbine parameters change. It can effectively monitor faults in both the parallel and secondary planetary stages of the gearbox.

Keywords: wind turbines; gearbox; stator current; condition monitoring

0 引言

国内风力发电行业发展迅速,但风电机组多安装于空旷高空,工作环境恶劣,常年受风沙侵蚀,故障概率较高,因此对机组进行实时检测、及早发现故障尤为重要。目前,风电机组的检测方法主要包括传统的数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)数据监测^[1]、声音检测法^[2]、振动检测法^[3-4]及定子电流检测法^[5-6]等。不过,现有技术中基于定子电流的齿轮箱故障诊断,仅在旋转发电条件下进行,而非定子电压矢量控制(双馈并网)状态;尽管其定子电流信号的故障特征清晰、故障信息丰富,但所发电能质量无法满足并网要求^[7]。

此外,相较于振动信号,电流信号受外界干扰更小^[8],但受内部因素的影响较大,这些因素包括:发电机差异(如磁极数、极槽比、额定功率等);控制相关因素(如最简线性模型、定子电压矢量控制模型^[9]等控制算法,以及最大功率跟踪等控制策略);工况条件(如恒风速与变风速工况、发电机是否并网^[10]等)。

在相关文献中,电流信号的特征差异显著。对于发电领域而言,非工频成分被视为干扰,需加以抑制和消除^[11];而在故障诊断领域,非工频部分则可能包含与风机故障相关的信息。管一臣等^[12]发现,电流信号存在与振动信号相同的调制现象,进而通过电流包络信号分析,发现其中仅包含与双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)转轴转频成正比的非平稳频率。Cheng等^[13]则观察到定子电流信号的边带分布符合规律 $f_b = f \pm kf_i$ (式中 f_b 为边带频率, f 为工频, k, i 为正整数),但实际上二者的取值取决于发电机结构,并非固定为所有正整数,这与本文总结的现象学模型存在一定相似性^[14]。此外,二者研究还显示,实验条件对电流信号影响显著,前者的实验装置未包含控制与并网部分,而后者则涉及相应控制和并网环节。

大量研究已证实,齿轮箱故障会对定子电流信号产生扰动,据此可评估齿轮箱的健康状态^[15-19]。但现有基于定子电流的齿轮箱故障诊断方法,仅考虑机械部分(即仅在旋转发电条件下开展),未涉及电气控制部分(如定子电压矢量控制下的双馈并网状态);尽管非并网状态下定子电流的故障特征清晰、信息丰富,但其发电质量无法满足并网要求^[20]。

与齿轮箱故障不同,电机自身故障(如转子断条、偏心故障)发生时,会表现出特有的故障特征频率升高现象^[21]。

需注意的是,定子电压矢量控制(双馈并网)会使风电机组在各类工况下均将能量尽可能收敛至50 Hz以满足并网需求,这导致定子电流中的故障信息受到极大影响,给故障诊断带来较大困难。为此,本文首次尝试将定子电流现象学模型用于双馈式风电机组(双馈并网状态),以提取定子电流信号中的有效信息,实现齿轮箱故障监测。

1 双馈风机定子电流信号现象学模型

1.1 双馈风机定子电流信号现象学模型

定子电流信号的调制现象均与双馈电机转速相关,其信号频谱中会出现极对数倍于高速轴转频 f_h 的频率,该频率定义为电磁转频,如式(1)所示。

$$f_e = p \times f_h \quad (1)$$

式中: p 是发电机的极对数; f_e 为电磁转频。

定子电流信号的调制现象在幅值上存在差异,故拟采用幅值较大的频带来建立现象学模型,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} I = & I_1 \sin(2f_e \pi t) + a_2 \sin(2f_e \pi t) + \\ & I_3 \sin(2(2(f_e - f_c) + f_c) \pi t) + \\ & I_4 \sin(2(6(f_e - f_c) + f_c) \pi t) + \\ & I_5 \sin(2(6(f_e - f_c) + 5f_c) \pi t) + \\ & I_7 \sin(2(6(f_e - f_c) + 7f_c) \pi t) + \\ & I_{11} \sin(2(2 \times 6(f_e - f_c) + 11f_c) \pi t) + \\ & I_{13} \sin(2(2 \times 6(f_e - f_c) + 13f_c) \pi t) + \\ & I_{17} \sin(2(3 \times 6(f_e - f_c) + 17f_c) \pi t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: I_i 为调制幅值; t 为时间; f_c 为工频。该模型用于定位定子电流的频带位置并提取其幅值信息,以便后续算法使用。目前,该模型可定位1 200 Hz以内幅值较高的频带,且在变工况与恒工况、正常与故障状态下均适用。

该模型中存在两类调制现象:第1类是电磁转频及其2倍频频带;第2类是电机齿槽谐波引起的6倍及其倍频与工频倍频的调制现象频带。

1.2 模型仿真对比验证

通过将模型构造的仿真信号与实际定子电流信号对比,验证模型有效性。如图1所示,恒风速模型给定的电磁转频为55.45 Hz,实际电磁转频约为55.49 Hz,二者略有偏差,但模型在关键频率处与实际信号基本一致。

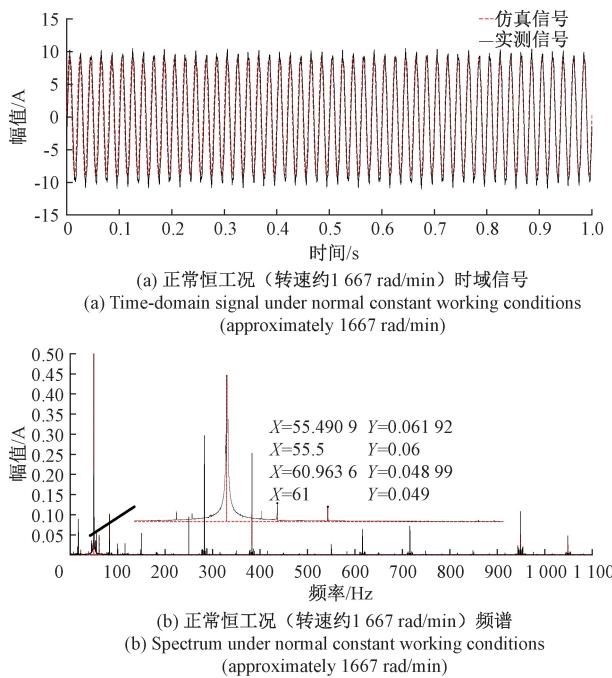


图1 恒工况风速11 m/s定子电流仿真与实际信号频谱图

Fig. 1 Simulation and actual signal spectrum diagram of stator current under constant working conditions with a wind speed of 11 m/s

如图2所示,在变工况条件下,因转速变化,电磁转频也随之变化,对应的频谱不再是单一峰值,而是频带。

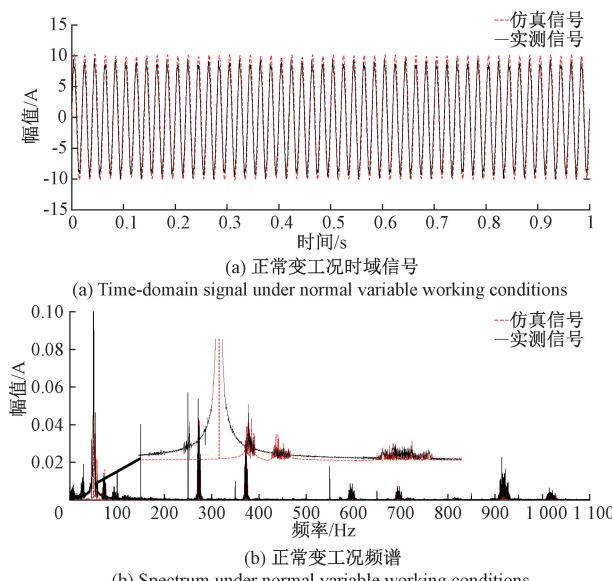


图2 变工况定子电流仿真与实际信号频谱图

Fig. 2 Simulation and actual signal spectrum diagram of stator current under variable working conditions

与恒工况类似,变工况下的频谱也因三相平衡,使得工频偶数倍频及相应调制频带的幅值近乎为0;同时,电

机为消除三次谐波影响、提高发电质量而采用星形接法,导致3倍频及其倍频及相应调制频带的幅值也近乎为0。因此,频谱中主要存在250 Hz(工频5倍)、350 Hz(工频7倍)、550 Hz(工频11倍)、650 Hz(工频13倍)、850 Hz(工频17倍)等调制现象,即除2倍和3倍以外的工频倍频调制特征。

1.3 双馈风机定子电流信号调制现象

双馈式风力发电实物仿真平台(以下简称实验台)采用变频器驱动电动机,配合两级行星一级平行减速齿轮箱共同模拟实际风机的叶轮部分,再通过联轴器将扭矩输出至两级行星一级平行增速齿轮箱,最终连接双馈电机实现发电。通过改变给定值驱动变频器,可模拟变工况运行。实验台同时采用定子电压矢量控制法以及最大功率跟踪策略进行发电,信号采集频率为10 000 Hz,后续定子电流信号均在此条件下采集。

对采集的一组定子电流信号进行频谱分析,其结果如图3所示:该图为齿轮箱无故障时,恒工况(风速11 m/s,电磁转频55.502 Hz)60 s的频谱,其调制现象归纳如表1、2所示。从表1、2中可看出,恒工况下的调制现象可归结为:电磁转频与50 Hz工频信号频率的差值及其倍频,与工频信号及其倍频的总和。前文提出的现象学模型,正是基于这一调制现象建立的,表中括号内数值为频谱中该频率对应的幅值。而变工况下

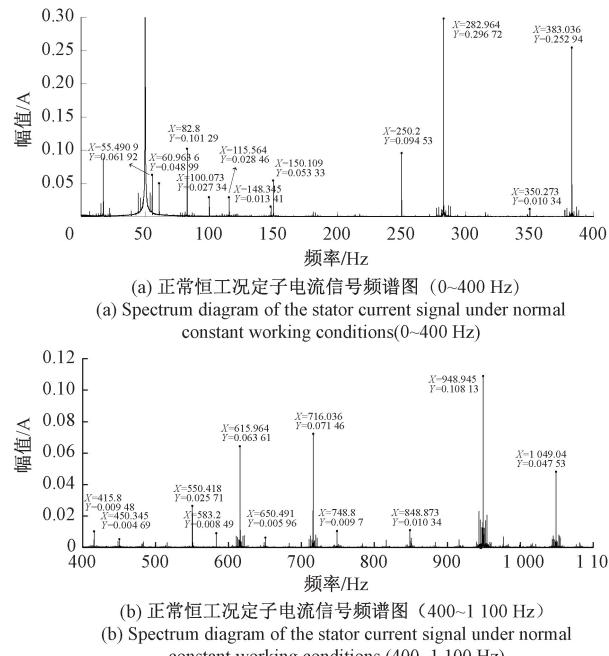


图3 恒工况风速11 m/s(转速约1 667 rad/min)定子电流信号频谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of stator current signal under constant working conditions with a wind speed of 11 m/s (rotation speed is approximately 1 667 rad/min)

(如前文所述,因转速变化导致电磁转频改变),调制现象从单一峰值扩展为频带;因频带较宽易发生混叠,特

征表现不够清晰,但未混叠部分仍存在与恒工况一致的调制规律。

表1 定子电流信号调制现象对照表(1~7倍频)

Table 1 Comparison table of modulation phenomena of stator current signals (1~7 times frequency)

		1倍工频/Hz (幅值/A)	2倍工频/Hz (幅值/A)	3倍工频/Hz (幅值/A)	4倍工频/Hz (幅值/A)	5倍工频/Hz (幅值/A)	7倍工频/Hz (幅值/A)
电磁转频与工频差值	50.000(8.343 0)	100.00(0.026 2)	150.00(0.062 8)	200.00(0.003)	250.00(0.068)	350.00(0.011)	
1倍	5.498	55.498(0.070)	105.53(0.003)			255.21(0.001)	355.28(0.001)
2倍	10.957	60.957(0.037)	111.84(0.002)			261.11(0.001)	361.17(0.001)
6倍	32.808	82.808(0.059)	132.84(0.002)	182.88(0.008 0)		282.96(0.270)	383.03(0.215)
12倍	65.576	115.57(0.030)				315.73(0.003)	415.81(0.006)
18倍	98.328	148.32(0.012)				348.50(0.002)	448.61(0.003)

表2 定子电流信号调制现象对照表(9~17倍频)

Table 2 Comparison table of modulation phenomena of stator current signals (9~17 times frequency)

		9倍工频/Hz (幅值/A)	11倍工频/Hz (幅值/A)	13倍工频/Hz (幅值/A)	15倍工频/Hz (幅值/A)	17倍工频/Hz (幅值/A)
电磁转频与工频差值	450.000(0.004)	550.000(0.026)	650.000(0.002)	750.000(0.000)	850.000(0.004)	
6倍	32.808	483.110(0.003)	583.190(0.005)	683.269(0.002)		883.362(0.001)
12倍	65.576	515.895(0.002)	615.958(0.078)	716.037(0.057)	816.100(0.004)	916.180(0.005)
18倍	98.328		648.759(0.003)	748.805(0.007)	848.855(0.009)	948.965(0.117)
24倍	131.112			783.332(0.001)		

进一步分析可知,定子电流信号中工频50 Hz的2倍频、3倍频及相应倍频的调制现象几乎不存在,这源于发电机三相平衡及星形接法。理论上这些调制现象应该不存在,但实际上制作与安装误差会使其留存极小的一部分。

基于现象结合实验台参数分析,发电机为4极电机(极对数2),即高速轴旋转物理角度,对于发电机而言,对应电角度为极对数倍。因此定子电流信号中不存在高速轴转频,仅存在高速轴转频与极对数乘积对应的电磁转频。调制现象中观测到1、2、6、12、18、24倍调制频率,而常规信号调制本应存在的4倍频未出现,并结合发电机结构推测,后续的6、12、18、24倍频是发电机的齿槽谐波及其倍频^[22-23]。

1.4 双馈式风电机组定子电流成因

电机按运行状态可分为同步运行状态和异步运行状态。由于风能具有不稳定性,而同步运行状态的电机转速恒定,因此同步运行状态的电机基本不适用于风力发电领域。按励磁方式,电机可分为永磁电机和感应电机:永磁电机的磁场由永磁体产生,其磁场强度基本恒定,因此永磁电机多作为同步电机使用。

感应电机的磁场则由电磁感应产生,其磁场强度可通过调节励磁电流进行改变,因此感应电机多作为异步电机使用,但在风力发电领域,二者均处于异步运行状态。

假设风电机组的发电频率为 f_1 ,则有:

$$f_1 = f_e \pm f_2 \quad (3)$$

式中: f_e 为电磁转频; f_2 为转子电流主频。

永磁风电机组中,永磁体磁场强度恒定,相应的转子电流主频 f_2 为0,因此其发电频率 f_1 随转速变化而变化,电能并网前需经全整流以满足电网对电能质量的要求。在整流前,永磁机组的定子电流信号仅受前端机械冲击及发电机本身影响。

感应风电机组中,感应电机的磁场强度可调节,因此可通过改变转子电流主频 f_2 使发电频率 f_1 恒定为工频50 Hz。具体而言:当电磁转频 $f_e < 50$ Hz时,机组处于次同步发电状态,此时电网侧通过双脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变流器向发电机转子输送电能,式(3)中符号取正(即 $f_1 = f_e + f_2$),定子侧发电而转子侧用电;当 $f_e > 50$ Hz时,机组处于超同步发电状态,此时转子侧通过双PWM变流器向电网输送电能,式(3)中符号取负(即 $f_1 = f_e - f_2$),定子侧与转子侧均发电,这也是

“双馈”名称的由来。由于定子电压矢量控制原理上忽略了微小的定子电阻及实际测量、安装等误差,理论上应被完全整流且频谱中不应存在的电磁转频,在实际定子电流信号中仍有体现。

由于次同步发电状态引入了电网能量,定子电流的形成必然受其影响。永磁风电机组采用“先发电后整流”的模式,而双馈式风电机组则是发电与整流同步进行,相比之下,双馈式机组定子电流中的有效信息更难提取。

总体而言,双馈式风电机组的定子电流主要受定子电压矢量控制、电网频率、前端机械旋转及发电机本身影响,其中不同频率成分的决定因素各有不同:工频及其倍频主要与定子电压矢量控制、电网频率及前端机械旋转相关;电磁转频主要由前端机械旋转产生;电机齿槽谐波及其倍频则主要受发电机及前端机械旋转影响。在实际场景中,若控制方式稳定、电网频率恒定且发电机无故障,前端机械旋转便是引发定子电流变化的主要原因。

1.5 基于现象学模型的电磁转频估计方法

结合前文模型及验证可知,电流信号频谱中的调制现象存在规律,体现为既可通过转速信息定位频谱中的频带,反之亦可根据频带位置估计转速。定子电流信号频谱的低频段因频率密集易混叠,高频段则基本无混叠,因此可通过带通滤波提取其中能量较高的单独频带。

结合图3,以工频5倍频谐波为例,计算可得调制频率范围为190~310 Hz,对应实验转速范围可估算为1 200~1 800 rpm。但实际应用中,一段时间内数据对应的转速上下限无法直接使用,需将采样数据进一步切分细化,以逐步获取每份数据的准确转速。

图4中展示了实际转速与转速估计结果,转速估计的平均相对误差(mean absolute percentage error, MAPE)0.2772,均方误差(mean squared error, MSE)为0.1146。

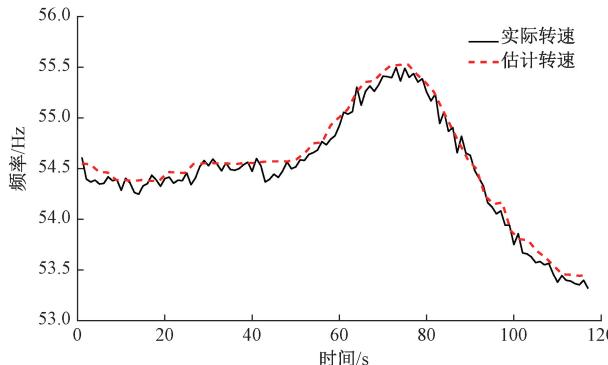


图4 实际转速与估计转速对比

Fig. 4 Comparison between actual and estimated rotational speeds

2 电流能量比算法

现有定子电流算法仅能实现恒工况下多级齿轮箱的状态监测,以及变工况下无行星级齿轮箱的状态监测。为此,提出电流能量比算法,以实现变工况下多级齿轮箱的状态监测。

2.1 算法原理

齿轮箱发生故障时,定子电流信号中必然蕴含故障关联信息,但实验工况越贴近实际场景,此类信息的提取难度越高。基于此,依托前文构建的定子电流现象学模型,突破复杂工况下的故障信息提取瓶颈。

恒工况下,平行级小齿轮50%断齿故障与正常状态的频谱差异体现为相同特征频率下的能量不同(如图5所示)。图5中,正常与故障恒工况数据的高速轴转频均约为1 200 rpm,对比二者特征频率能量可见:正常状态的电磁转频能量高于故障状态;电磁转频关于工频的2倍频能量在故障状态略有降低;电机齿槽谐波引起的6倍频能量则是故障状态高于正常状态。

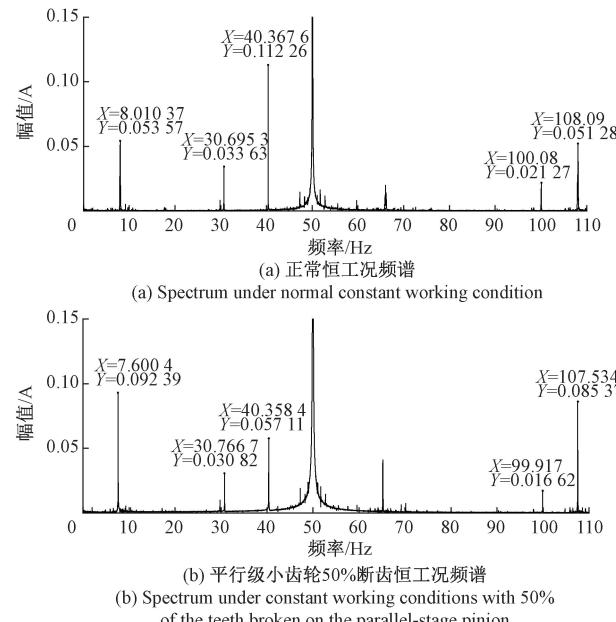


图5 恒工况平行级小齿轮故障与正常工况频谱

Fig. 5 Spectrums of the fault of the parallel-stage pinion and the normal working condition under constant working condition

该现象的成因为:故障件(平行级小齿轮断齿)使发电机输入的电磁转矩减弱,导致电磁转频能量降低;电磁转频关于工频的2倍频能量取决于工频和电磁转频,由于工频能量占据主导且极高,尽管故障状态下电磁转频能量降低,该2倍频能量仍无明显变化;同时,故障件导

致发电机输入的冲击增加,使得电机齿槽谐波引起的6倍频能量相应升高。

工况变化会引起定子电流频带幅值的改变。由于影响3类频带的因素不同,相同故障在不同频带引发的幅值变化存在差异,因此采用比值法可有效反映不同故障工况导致的频带幅值变化。

2.2 电流能量比算法

恒工况下,定子电流信号可通过简单的定位频带加比值法实现故障监测;但风电机组多数时间处于变工况运行,仅实现恒工况故障监测缺乏实际意义。变工况下,由于转速变化会导致频带混叠,且因转速不同无法在同一工况下对比判断(如图6所示)。针对这一问题,可将电流信号按转速标签切分,划归至同一转速范围以实现变工况信号的恒工况化,从而使定位频带加比值法适用于变工况监测。

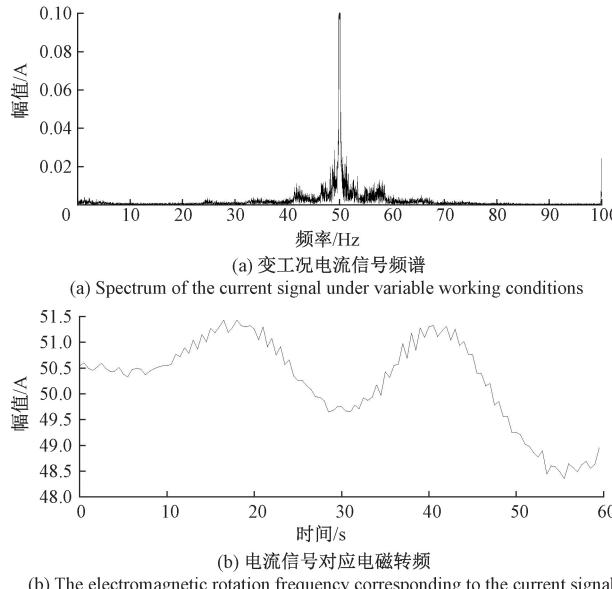


图6 变工况电流信号频带混叠现象

Fig. 6 Frequency band aliasing phenomenon of the current signal under variable working conditions

基于双馈风机定子电流信号现象学模型的电流能量比算法流程如图7所示。

1)对实验台采集的电流数据(采样频率10 000 Hz)和转速数据(采样频率2 Hz)读取并预处理,一组数据采集时长为60 s。由于实际采集的数据与理论上略有出入,须预处理成统一格式。

2)通过过零检测将电流数据切分为若干份,与转速数据个数匹配,重组时保证时域连续性以缓解频谱能量泄露干扰,同时减少变转速数据的频带混叠。在电流数据中工频50 Hz可视为基频信号,其余多特征边带可视为载波信号,其中工频占主导地位,故电流信号在时域上与50 Hz的正弦电流信号基本一致。

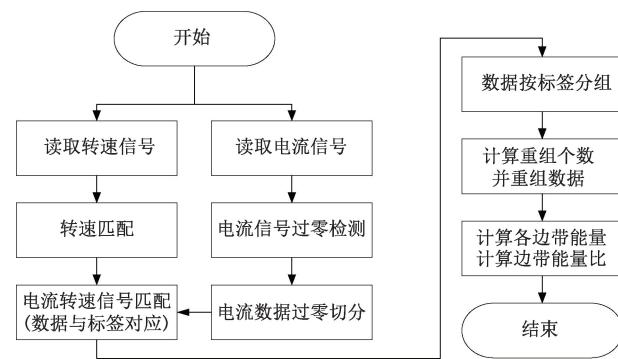


图7 电流能量比算法流程

Fig. 7 Flow chart of the current energy ratio algorithm

3)将切分后的电流信号与对应转速信号匹配,为后续分组做准备(因两类数据采样频率不同,需通过匹配实现关联)。

4)以转速信号为标签对电流数据分组,为重组做准备。切分虽减少了频带混叠,但导致傅里叶变换后频谱分辨率不足(数据量不足所致),故需重组数据:重组范围设为51.5~59.5 Hz(对应转速1 545~1 785 r/min),每隔1 Hz(30 r/min)划分为一个重组单元。该划分可避免重组信号的频带混叠,限定频率范围可规避定子电压矢量控制下电磁转频跨工频的波动;同时,选取高于工频50 Hz的频段,其优势在于对应更高转速,故障信息更丰富。

5)每组由30个切分数据重组成一个重组数据,频谱分辨率随之从原本的1 point/Hz提升至30 point/Hz。

由于未重组前的频谱分辨率为1 point/Hz,与重组范围相同,误差极大,理论上分辨率应至少增加到下一精度10 point/Hz较为合理,并且转速信号采样频率为2 Hz,因此重组数理论上至少应为20。为防止偶然性导致分辨率下降,应留出一定的误差空间,为了在满足频谱精度的同时尽量减少对数据的需求,选择30作为重组数。

6)重组后的数据需依据双馈风机定子电流信号现象学模型计算边带能量,目前采用2倍频与1倍频的比值计算电流能量比,如式(4)所示。

$$EER = \frac{E_1}{E_2} \quad (4)$$

式中:EER为电流能量比(energy efficiency ratio, EER);
 E_1 表示模型中 $I_2 \sin(2f_e \pi t)$ 的边带能量,即电磁转频频带对应的边带能量;
 E_2 表示双馈风机定子电流信号现象学模型中 $I_3 \sin(2(2(f_e - f_c) + f_c) \pi t)$ 的边带能量,即电磁转频关于工频调制的2倍频边带能量,所述边带能量表示对应频率范围内频谱能量总和。

双馈式风电机组定子电流存在3类规律频带:工频及其倍频、电磁转频及其关于工频调制的2倍频、齿槽谐波。相同故障对不同频带的幅值影响不同,但并非所有

频带都适合作为计算参量:工频因受定子电压矢量控制影响,在变工况下会引入或输出能量,导致齿轮箱故障引发的幅值变化不稳定;电磁转频与齿槽谐波本可共同作为参量,但齿槽谐波频率分布广,易与工频倍频混叠,影响特定频率下的算法准确性。因此,最终选择电磁转频及其 2 倍频作为参量计算电流能量比。

根据算法原理,当风机主传动链发生故障时,电磁转频能量下降,而 2 倍频能量基本不变,因此电流能量比会增加,且随故障导致的扭矩变化呈增大趋势。

3 实验验证

3.1 双馈式风力发电实验仿真平台

双馈式风力发电模拟实验台主要由变频器、三相异步电动机、减速齿轮箱、增速齿轮箱、双馈式发电机以及背靠背控制器组成,整体结构如图 8 所示。其中,减速齿轮箱与增速齿轮箱结构完全对称,二者通过扭矩传感器串联,与发电机共同形成能量流闭环。增速齿轮箱参考现场雅克 1.5 MW 齿轮箱进行缩比设计,内部采用两级行星、一级平行结构,具体参数如表 3 所示。



图 8 双馈风电模拟实验台

Fig. 8 Doubly fed wind power simulation test bench

表 3 缩比齿轮箱齿轮参数

Table 3 Gear parameters of the scaled-down gearbox

部件名称	齿数
一级太阳轮	24
一级行星轮	39
二级太阳轮	24
二级行星轮	39
平行级大齿轮	106
平行级小齿轮	29

为验证电流能量比算法的效果,实验涵盖正常状态及多种故障状态:平行级小齿轮 20% 齿根裂纹、30% 齿根裂纹、50% 齿根断齿,平行级大齿轮 30% 齿根裂纹,平行级大齿轮 30% 齿根裂纹与小齿轮 50% 齿角断齿的组合故

障,以及平行级输出端轴承外圈点蚀故障。以平行级小齿轮 50% 齿根断齿故障为例,其含义为:故障集中于平行级小齿轮齿角区域(齿顶与齿根过渡的边角处),沿齿宽方向断裂约 50%。同时,针对上述状态分别开展多组恒工况与变工况实验,实验所用故障件如图 9 所示。

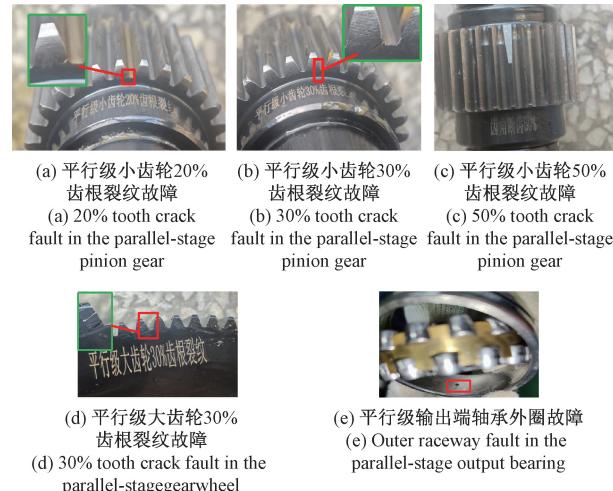


图 9 实验故障件

Fig. 9 Experimental faulty components

3.2 恒工况电流能量比算法验证

在恒工况下,针对双馈风机定子电流信号的状态监测流程为:1)循环读取文件夹中的电流与转速信号数据;2)依据理论模型,构建当前恒定转速与特征频带间的对应关系;3)确定具体的特征频带范围,并将其与电流信号频谱的实际范围进行匹配;4)通过计算匹配成功的各频带能量,完成状态特征的提取。该流程得益于转速恒定导致的频谱稳定无混叠,因而无需复杂的预处理,可直接进行高效的状态对比与分析。实验设计了 5 种恒工况,对应风速(电磁转频)分别为:8 m/s(约 40.5 Hz)、9 m/s(约 45 Hz)、11 m/s(约 55.2 Hz)、10 m/s(约 50.4 Hz)、12 m/s(约 59.6 Hz)。其中 10 m/s 工况因电磁转频接近工频被淹没,无法计算,故未列入表 4。

实验结果如图 10 所示,从中可见直接获取的电流能量比效果不佳;而将结果按齿轮箱状态求取均值后,可得图 11 则呈现出较好的效果。

为进一步辅助故障检测分析,本研究将电流能量比算法与文献[13]中学者 Cheng 提出的噪信比 (noise-to-signal ratio, NSR) 方法进行对比,并保持所有案例和分析数据的一致性。该方法基于齿轮箱故障时的电流信号特征变化:当齿轮箱发生故障时,定子电流基频 f 附近的 $f \pm k_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) 边带幅值会发生变化,或出现新边带,因此基频分量边频带的总功率可表征齿轮箱退化状态,据此定义 NSR 作为故障特征,计算公式如式(5)所示。

表 4 恒工况电流能量比
Table 4 Current energy ratio under constant working conditions

工况(电磁转频)	正常	平行级小齿轮 20%裂纹	平行级小齿轮 30%裂纹	平行级大齿轮 30%裂纹	平行级小齿轮 50%断齿	平大30%裂纹+ 平小50%断齿
8 m/s(约 40.5 Hz)	0.406	0.463	0.614	0.593	0.524	0.614
9 m/s(约 45.0 Hz)	0.754	0.717	0.853	0.850	0.926	0.880
11 m/s(约 55.2 Hz)	0.804	0.944	0.992	0.818	0.828	0.892
12 m/s(约 59.6 Hz)	0.542	0.690	0.758	0.665	0.771	0.802

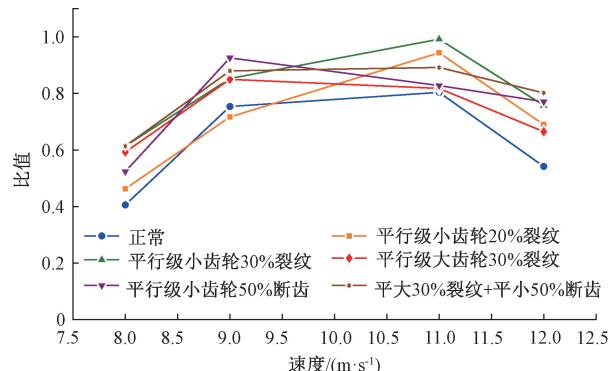


图 10 恒工况电流能量比

Fig. 10 Current energy ratio under constant working conditions

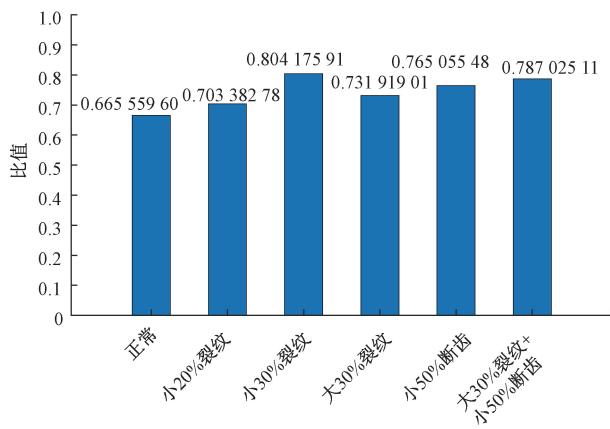


图 11 恒工况电流能量比均值

Fig. 11 Mean current-to-energy ratio under constant working conditions

$$NSR = \frac{P_{noise}}{P_{signal}} \quad (5)$$

式中: p_{signal} 为 A 相定子电流信号的基频分量功率, 其大小可通过该电流信号的功率谱密度 (power spectral density, PSD) 确定, 即对应 PSD 曲线在基频点处的幅值; $p_{noise} = p_{total} - p_{signal}$; p_{total} 为电流信号的总功率, 定义为:

$$P_{total} = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} |i_{sa}(n)|^2 \quad (6)$$

式中: N_s 是记录的定子电流信号中数据样本的总数。

该方法在恒工况下, 通过两级平行结构的齿轮箱加金刚砂以加速磨损实验, 验证了有效性。但基于试验台数据计算发现, 高转速工况下该方法效果较差 (如图 12 所示), 因为转速升高时, 故障带来的噪声能量增长远没有工频能量增长得多, 故剧烈工况下噪信比方法不适用。

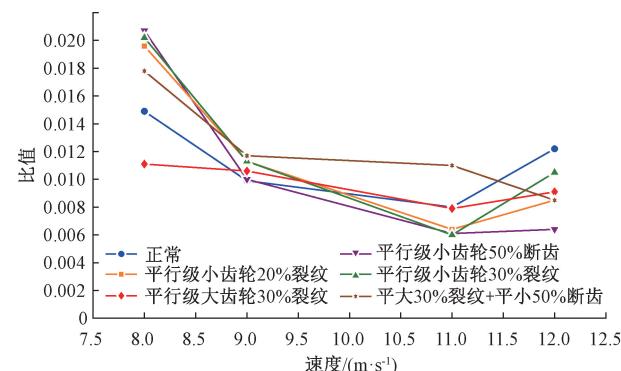


图 12 恒工况噪信比方法对比

Fig. 12 Comparison of noise-to-signal ratio methods under constant operating conditions

3.3 变工况电流能量比算法验证

双馈风机变工况电流信号因转速变化存在频带混叠现象, 且由于转速不同难以统一度量比较, 因此采用切分重组的方法, 其算法流程如图 7 所示。

变工况设计包含 4 种工况; 3 种源自实际风场的风速数据 (转速序列各不相同, 风速均在 8~12 m/s), 以及轴承外圈故障对应的 8~12 m/s 规律升降信号, 均对一个半小时的数据进行切分重组。

变工况下的电流能量比分析结果如图 13、表 5 所示, 其中 53.5~54.5、54.5~55.5 和 55.5~56.5 Hz 这 3 个频率范围的效果最佳且连续, 因此对这三者的能量比取均值处理 (如图 14 所示)。由图 13、14 可见, 对于同一部件 (如平行级小齿轮), 故障严重程度越高, 其电流能量比越大, 这是由于更严重的故障会对输入发电机的转矩产生更显著的干扰; 同时, 变工况下故障状态的能量比均高于正常状态, 验证了该指标的有效性。该指标不仅可用

于判断主传动链是否存在故障,还适用于主传动链的长期状态监测。

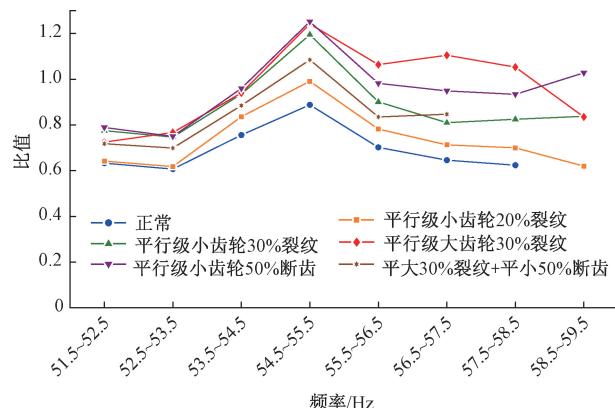


图 13 变工况电流能量比

Fig. 13 Energy ratio of current under variable operating conditions

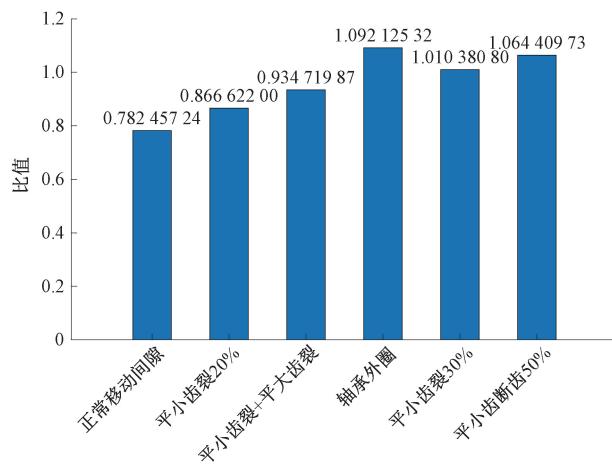


图 14 变工况电流能量比均值(平行级)

Fig. 14 Average energy ratio of variable condition current (parallel stage)

表 5 变工况切分重组电流能量比(平行级)

Table 5 Reorganization of current energy ratios under variable operating conditions (parallel stage)

工况(电磁转频) /Hz	正常	平行级小齿轮 20%裂纹	平行级小齿轮 30%裂纹	平行级大齿轮 30%裂纹	平行级小齿轮 50%断齿	平大30%裂纹+ 平小50%断齿
51.5~52.5	0.633	0.642	0.775	0.725	0.789	0.718
52.5~53.5	0.607	0.618	0.747	0.767	0.750	0.699
53.5~54.5	0.756	0.836	0.935	0.940	0.960	0.885
54.5~55.5	0.888	0.991	1.195	1.242	1.252	1.085
55.5~56.5	0.702	0.782	0.901	1.064	0.982	0.835
56.5~57.5	0.646	0.713	0.810	1.105	0.949	0.847
57.5~58.5	0.624	0.700	0.825	1.053	0.934	
58.5~59.5		0.620	0.838	0.835	1.028	

为验证算法的普适性,通过更改驱动电动机变频器的输出(模拟实际风机叶轮半径减小),使实验台在相同工况下的最大功率跟踪曲线及转矩发生显著变化(等效于风机参数改变),并在此基础上进行风机齿轮箱二级行星级实验验证,相关结果如表 6、图 15 和 16 所示。

表 6 变工况切分重组电流能量比(二级行星级)

Table 6 Current energy ratio of split and reorganized operating conditions (secondary planetary stage)

工况 (电磁转频) /Hz	二级行星 轮齿根裂 纹 20%	二级行星 轮齿根裂 纹 30%	二级太阳 轮轮齿根 裂纹 20%	二级太阳 轮轮齿根 裂纹 30%
51.5~52.5	0.977	0.971	0.968	0.933
52.5~53.5	0.900	0.969	0.889	0.853
53.5~54.5	0.994	1.068	0.983	0.985
54.5~55.5	1.014	1.124	1.001	0.946
55.5~56.5	0.907	0.966	0.857	0.829
56.5~57.5	0.841	0.881	0.788	0.793

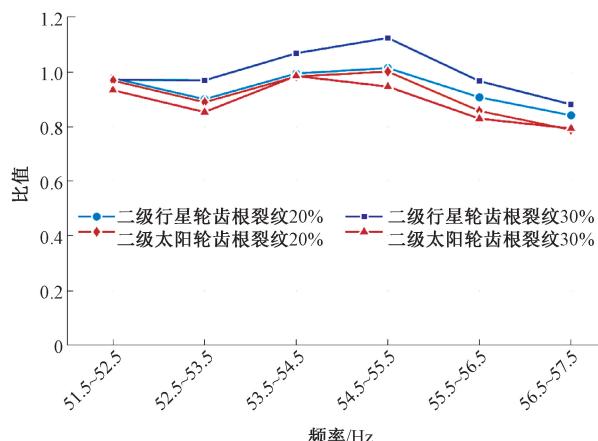


图 15 变工况电流能量比均值(二级行星级)

Fig. 15 Mean current energy ratio under variable operating conditions (secondary planetary stage)

由图 15、16 同样可知,在风机参数修改后,对于二级行星级的太阳轮、行星轮,同一部件其故障严重程度与电

流能量比仍呈正相关,即故障越严重,能量比越大。对比平行级与二级行星级的电流能量比结果可见,该算法在风机参数改变时仍具有良好的普适性,且对齿轮箱的平行级和行星级均能有效监测。

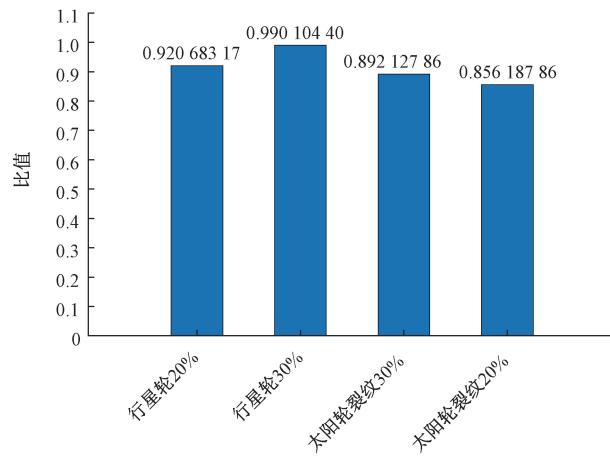


图 16 变工况电流能量比均值(平行级)

Fig. 16 Mean current energy ratio under variable operating conditions (parallel stage)

此外,表 5 和 6 中的 EER 均呈现先上升后下降的趋势,其原因在于:随着转速升高,电磁转频能量虽随之增加,但工频能量的增长速度逐渐超过电磁转频能量;同时,电磁转频关于工频的 2 倍频能量受工频影响显著,当转速超过一定阈值后,2 倍频能量的增长比例超过电磁转频能量,导致 EER 出现下降。

3.4 基于转速估计的变工况电流能量比算法验证

基于转速估计的变工况电流能量比算法与原变工况电流能量比算法流程基本一致,唯一区别在于前者通过 1.4 节所述的转速估计方法获取转速数据,取代了直接测量的转速数据,具体流程如图 17 所示。

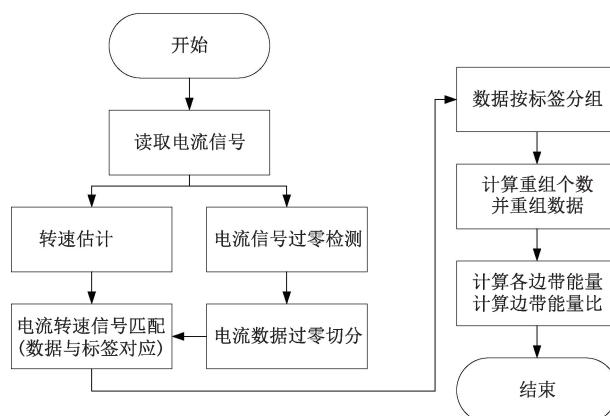


图 17 转速估计电流能量比算法流程

Fig. 17 Flow chart of the current energy ratio algorithm for speed estimation

由于转速估计存在误差,因此基于转速估计计算的电流能量比与基于实际转速的结果存在差异。在实际转速变工况分析中,53.5~54.5、54.5~55.5 和 55.5~56.5 Hz 这 3 个频率范围效果最佳且连续,因此转速估计电流能量比算法沿用这 3 个频带的能量比数据。不同之处是为凸显估计误差带来的差异,对这 3 个频带的能量比进行加和处理。

如图 18 所示,基于转速估计的故障变工况能量比仍显著高于正常状态,验证了该指标的有效性;且能量比随故障严重程度递增,表明其具备状态监测能力。尽管与实际转速算法相比效果稍差,但仍能有效反映故障程度变化趋势。

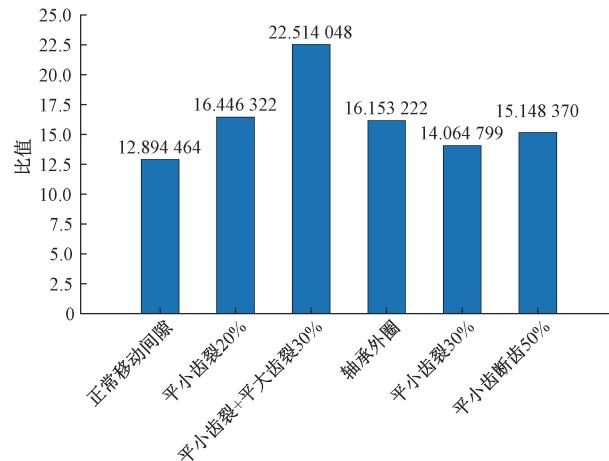


图 18 变工况转速估计电流能量比均值

Fig. 18 Estimated current energy ratio mean under variable operating conditions

4 结 论

本文构建了一种基于双馈式风机定子电流信号的齿轮箱状态监测方法,通过定子电流信号现象学模型明确电流信号组成,基于该模型利用电流能量比算法计算状态监测指标,采用切分重组方法解决变工况导致的数据频谱重叠及无法统一对比评价的问题;借助转速估计方法,仅通过定子电流信号即可实现电流能量比算法的替代方案。该指标不仅能判断主传动链是否存在故障,还可用于主传动链的长期状态监测。

目前,该方法仅在低功率实验台上验证了有效性。对于大功率大型风电机组,其励磁电流与磁场较强,会增加定子电流的采集难度;且现场工况复杂,可能引入更多定子电流噪声,因此该算法的实际应用仍需通过现场测试进一步改进。

参考文献

- [1] 金晓航, 杨宇辰, 喻轩昂. 改进多层自组织映射网络驱动的风电机组状态监测[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 231-241.
- JIN X H, YANG Y CH, YU X ANG. Wind turbine condition monitoring based on improved multilayer self-organizing map [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 231-241.
- [2] 王建国, 田野, 刘皓宇, 等. 复合故障下风电齿轮箱声音信号耦合调制模型辨识与故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 58-68.
- WANG J G, TIAN Y, LIU H Y, et al. Identification and fault diagnosis of sound signal coupling modulation model of wind power gearbox under compound fault [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 58-68.
- [3] BADIHI H, ZHANG Y M, JIANG B, et al. A comprehensive review on signal-based and model-based condition monitoring of wind turbines: Fault diagnosis and lifetime prognosis [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(6): 754-806.
- [4] 刘少康, 武英杰, 田野, 等. 基于振动信号耦合调制新模型和参数辨识的风电齿轮箱齿圈故障监测[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 260-269.
- LIU SH K, WU Y J, TIAN Y, et al. Fault monitoring of ring gear of wind turbine gearbox based on coupling modulation new model of vibration signal and parameter identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 260-269.
- [5] ZHANG Y, MA H Q, FENG ZH P, et al. Generator stator current signal analytical models and signature analysis for fault diagnosis of wind turbine planet bearings [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 3550593.
- [6] WANG ZH Y, WANG J T, ZHENG D Y, et al. Epicyclic gear fault diagnosis based on fault characteristic energy extracting from stator current in closed-loop control system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-10.
- [7] 时献江, 李苏健, 郭华, 等. 行星齿轮箱的定子电流信号诊断方法试验研究[J]. 振动. 测试与诊断, 2022, 42(4): 671-676, 822-823.
- SHI X J, LI S J, GUO H, et al. Stator current signatures diagnosis method of planetary gearbox [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42 (4): 671-676, 822-823.
- [8] 白国振, 王录, 李炳初, 等. 基于三相交流异步电机定子电流信号分析的机电传动系统齿轮箱裂纹故障非侵入式诊断[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1186-1193.
- BAI G ZH, WANG L, LI B CH, et al. Non-invasive fault diagnosis of gearbox crack in electromechanical drive system based on stator current signal analysis of three-phase AC asynchronous motor [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1186-1193.
- [9] 刘雨洪, 徐鹏, 舒炜, 等. 永磁同步电机多矢量模型预测电流控制[J]. 电子测量技术, 2025, 48(6): 65-72.
- LIU Y H, XU P, SHU W, et al. Multi-vector model predictive current control for PMSM [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(6): 65-72.
- [10] 王鑫, 程启明, 陈炯, 等. 基于阻抗分析法的双馈风电场并网系统的次同步振荡分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 133-144.
- WANG X, CHENG Q M, CHEN J, et al. Subsynchronous oscillation analysis of grid-connected doubly fed wind farm system based on impedance analysis method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 133-144.
- [11] 黄琛, 沈毅, 李银红. 撬棒保护投入下考虑多影响因素的双馈风机电流包络区间计算[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 93-102.
- HUANG CH, SHEN Y, LI Y H. Calculation method for DFIG current envelope interval considering multiple influencing factors under crowbar activation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49 (3): 93-102.
- [12] 管一臣, 童攀, 冯志鹏. 基于ICEEMDAN方法和频率解调的行星齿轮箱故障电流信号特征分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 41-47.
- GUAN Y CH, TONG P, FENG ZH P. Planetary gearbox fault diagnosis via current signature analysis based on ICEEMDAN and frequency demodulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 41-47.
- [13] CHENG F ZH, QU L Y, QIAO W, et al. Fault diagnosis of wind turbine gearboxes based on DFIG stator current envelope analysis [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1044-1053.
- [14] FENG ZH P, CHEN X W, ZUO M J. Induction motor stator current AM-FM model and demodulation analysis for planetary gearbox fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (4): 2386-2394.
- [15] 杨亚博. 基于电流信号和辛几何模态分解的行星齿轮箱故障诊断研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.

- YANG Y B. Research on fault diagnosis of planetary gearbox based on current signal and symplectic geometry mode decomposition [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024.
- [16] 徐凯, 伍星, 王东晓, 等. 电机电流瞬时频率极坐标视图及其在 RV 齿轮箱故障诊断中的应用 [J]. 振动工程学报, 2025, 38(6): 1326-1334.
- XU K, WU X, WANG D X, et al. Motor current instantaneous frequency polar view and its application in RV gearbox fault diagnosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(6): 1326-1334.
- [17] 王城宇, 万书亭, 王萱, 等. 基于转子绕组电流的双馈风电机组齿轮箱阶次跟踪与故障诊断 [J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 556-564.
- WANG CH Y, WAN SH T, WANG X, et al. Order tracking and fault diagnosis of gearbox in doubly-fed wind turbine based on rotor winding current [J]. Acta Energize Solaris Sinica, 2025, 46(2): 556-564.
- [18] CHENG F ZH, QU L Y, QIAO W. Fault prognosis and remaining useful life prediction of wind turbine gearboxes using current signal analysis [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 157-167.
- [19] GAO AO R, FENG ZH P, LIANG M. Permanent magnet synchronous generator stator current AM-FM model and joint signature analysis for planetary gearbox fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149(9): 107331.
- [20] 王萱, 万书亭, 闫慧丽, 等. 基于机电信号融合的双馈发电机故障诊断 [J]. 控制与信息技术, 2025(1): 33-38.
- WANG X, WAN SH T, YAN H L, et al. Fault diagnosis of doubly-fed generator based on electromechanical signal fusion [J]. Control and Information Technology, 2025(1): 33-38.
- [21] 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.
- [22] 赵寿旺, 陈玉, 张思超, 等. 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 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 135-146.
- ZHAO SH W, CHEN Y, ZHANG S CH, et al. Diagnosis method for inter-turn short circuit faults in doubly fed induction generators based on spectral amplitude modulation of the residual current harmonic analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(3): 135-146.
- [23] 王中, 孙元章, 李国杰, 等. 双馈风力发电机定子电流谐波分析 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 1-5.
- WANG ZH, SUN Y ZH, LI G J, et al. Stator current harmonic analysis of doubly-fed wind power generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 1-5.

作者简介



申艳杰, 2001 年于东北电力学院获得学士学位, 2012 年于华北电力大学获得工商管理 MBA 硕士学位, 现为东北电力大学博士研究生, 主要研究方向为新能源发电智能运维。

E-mail: 12103564@ceic.com

Shen Yanjie received his B. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2001 and a master of business administration (MBA) degree from North China Electric Power University in 2012. He is currently a Ph. D. candidate at Northeast Electric Power University. His main research interest includes intelligent operation and maintenance of new energy power generation.



武英杰(通信作者), 分别于 2009、2012 和 2016 年于华北电力大学获得学士、硕士和博士学位, 现工作于东北电力大学, 主要研究方向为风电机组故障诊断。

E-mail: wuyingjie6668@163.com

WU Yingjie (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from North China Electric Power University in 2009, 2012, and 2016, respectively. He is currently working at Northeast Electric Power University. His main research interest includes wind turbine fault diagnosis.



王建国, 1985 年于天津大学获得学士学位, 1988 年于天津大学获得硕士学位, 2001 年于华北电力大学获得博士学位, 现为东北电力大学二级教授, 主要研究方向为电力设备故障诊断及安全性分析、动力电池性能评估及寿命预测、换热设备污垢机理及对策。

E-mail: ssrs8706@163.com

Wang Jianguo received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Tianjin University in 1985 and 1988, and his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2001. He is currently a second-level professor at Northeast Electric Power University. His main research interests include fault diagnosis and safety analysis of power equipment, performance evaluation and life prediction of power batteries, and the fouling mechanism and countermeasures of heat exchange equipment.