

行星齿轮箱的定子电流信号诊断方法试验研究*

时献江, 李苏健, 郭华, 司俊山

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨, 150080)

摘要 为了解决风力双馈感应发电机(doubly fed induction generator,简称DFIG)行星齿轮箱故障诊断中常规振动检测技术成本高、现场安装与实施困难等问题,提出了一种直接利用DFIG定子电流信号的间接诊断方法。利用电动机、行星齿轮箱和变频器等通用设备,建立了一个简便易行的DFIG传动系统故障模拟试验台。通过模拟试验和Hilbert解调谱分析方法,以行星齿轮为例,研究传动系统的DFIG定子电流信号故障感应机理,探讨故障特征频率成分随发电机运行工况的变化规律。通过与振动加速度信号和扭振信号的对比分析,表明DFIG定子电流信号可以兼顾反映行星齿轮的径向振动与扭振信号的振动特征,可作为实际风电机组常规振动检测技术的一种替代方法。

关键词 行星齿轮箱; 定子电流; 故障诊断; 模拟试验; 风力双馈感应发电机

中图分类号 TH17

引言

行星齿轮箱具有结构紧凑、传动比大、传动效率高和承载能力强等优点,广泛应用于风力DFIG的机械传动系统中^[1]。但是,由于风力发电机运行环境恶劣,行星齿轮箱存在故障停机时间长、维修成本高等问题。据统计,其故障停机时间约占风力发电机系统总故障停机时间的19.4%^[2],而更换一台大型风力发电机齿轮箱的费用就达百万元^[3]。因此,有必要对该设备进行状态监测与诊断,合理安排维修计划,避免不必要的停机损失。

与定轴轮系不同,行星齿轮箱中的齿轮啮合位置是时变的,采用固定安装位置的径向振动传感器存在一定的问题。因此,有些学者尝试采用扭振检测方法进行行星齿轮箱的故障诊断^[4-5]。但是,由于扭矩传感器安装时需要现有设备的机械结构进行改造,导致扭振检测方法往往停留在实验室研究阶段,而无法在实际中广泛应用。

鉴于上述情况,一种采用定子电流信号的间接诊断方法逐步得到人们的重视。该方法将电机本身作为一种能够实现电磁转矩估计的扭矩传感器,利用定子电流即可实现电机及其传动系统的机械故障检测与诊断^[5-6]。定子电流信号获取方法简便、成本低,非常适合风力发电机这类集群、分布式设备的故障监测与诊断。

目前,针对行星齿轮故障诊断的研究文献多是利用电动机定子电流信号^[7-8],而利用风力发电机,特别是市场占有率较高的风力DFIG定子电流信号的研究文献较少^[9],其主要原因是风力发电机本身结构庞大,现场试验条件困难,而试验台建造方面也存在着控制系统复杂、成本高和不易实现等问题。另外,与电动机不同,发电机作为一个负载设备感应传动系统的故障信息,传动系统齿轮等部件的故障冲击扭矩变化对定子电流信号故障感应原理尚不是很清楚。因此,有必要建立相关故障模拟试验台,深入研究发电机定子电流信号的行星齿轮故障感应原理及诊断方法,为风力发电机行星齿轮箱故障诊断技术提供基础研究与应用支持。

1 风力DFIG组成及行星齿轮箱特征频率

典型的风力DFIG系统组成如图1所示,主要由风力机、行星齿轮增速箱、DFIG和双向AC\DC\AC变流器及其控制系统组成。其中,行星齿轮箱结构如图2所示,其内齿圈与机座相连,行星齿轮回转架与风力机相连,太阳齿轮与DFIG相连。当风力机通过行星齿轮增速箱带动DFIG转子以频率 f_1 旋转时,自动控制系统可调节转子励磁电流频率 f_2 的大小,保证定子发电频率 f_i 与电网频率相等。 f_1 , f_i 和 f_2

* 国家自然科学基金资助项目(51275136)

收稿日期:2020-05-19;修回日期:2020-07-07

的关系为

$$f_1 = p_n f_r + f_2 \quad (1)$$

其中: p_n 为发电机的极对数。

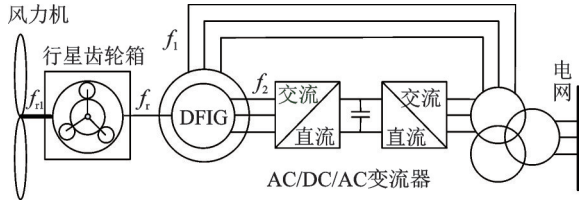


图1 风力DFIG的基本组成示意图

Fig.1 Basic composition diagram of DFIG wind turbine

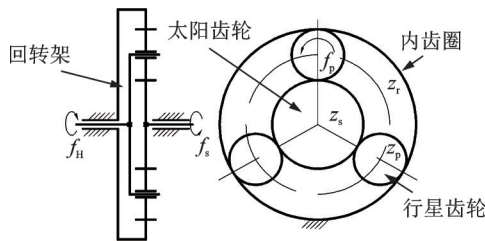


图2 行星齿轮系结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the planet gear train

将行星齿轮箱的动轴轮系转化为定轴轮系,并根据行星齿轮与太阳齿轮或内齿圈间的啮合频率 f_m 相等条件,可建立各个部件运行频率之间的关系^[1,9]为

$$f_m = f_p z_p = (f_r - f_H) z_r = (f_{sm} - f_H) z_s \quad (2)$$

其中: f_p, f_s, f_r 和 f_H 分别为行星齿轮、太阳齿轮、内齿圈和行星齿轮回转架的旋转频率; z_p, z_r 和 z_s 分别为行星齿轮、内齿圈和太阳齿轮的齿数。

由式(2)可以计算各部件的运动特征频率,例如,当内齿圈固定($f_r=0$)时,行星齿轮的旋转频率或故障频率 f_p 为

$$f_p = \frac{f_m}{z_p} = \frac{z_r}{z_p} f_H = \frac{z_s}{z_p} (f_s - f_H) \quad (3)$$

根据文献[6],定子电流信号中感应的机械故障特征频率 f_{Gc} 的表达式为

$$f_{Gc} = |f_1 \pm k f_c| \quad (4)$$

其中: f_c 为上述机械故障特征频率; k 为谐波次数, $k=1,2,\dots$ 。

2 信号处理方法

假设时域信号为 $x(t)$,其Hilbert变换 $h(t)$ 为

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

根据 $x(t)$ 和 $h(t)$ 可以构造解析信号 $x_a(t)$

$$x_a(t) = x(t) + jh(t) = |x_a(t)| e^{j\varphi(t)} \quad (6)$$

其中: $x_a(t)$ 为原始信号 $x(t)$ 的包络信号; $\varphi(t)$ 为相角解调信号,如式(7)和式(8)所示。

$$|x_a(t)| = \sqrt{[x(t)]^2 + [h(t)]^2} \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{h(t)}{x(t)} \quad (8)$$

由式(8)可计算瞬时频率信号 $f(t)$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (9)$$

笔者主要利用式(7)和式(9),借助快速傅里叶变换进行各种信号的包络谱和瞬时频率谱分析。

3 DFIG传动系统故障模拟试验台

DFIG传动系统故障模拟试验台总体结构及控制系统如图3所示,试验台结构部分的实物照片如图4所示。试验台主要包括变频器、异步驱动电动机、行星齿轮增速箱、主轴承、联轴器、DFIG及负载 R 、传感器及数据采集系统等。其中,驱动电动机采用5.5 kW的6极三相交流异步电动机,配套变频器模拟不同风速下的风力机工作状态。利用1.5 kW的6极、YZR系列交流异步绕线式电动机替代DFIG,将其接成发电机运行方式,定子线圈接三相阻性负载 R 。 R 为220V的白炽灯,Y形连接,可通过更换不同功率的白炽灯组合调节发电机负载。

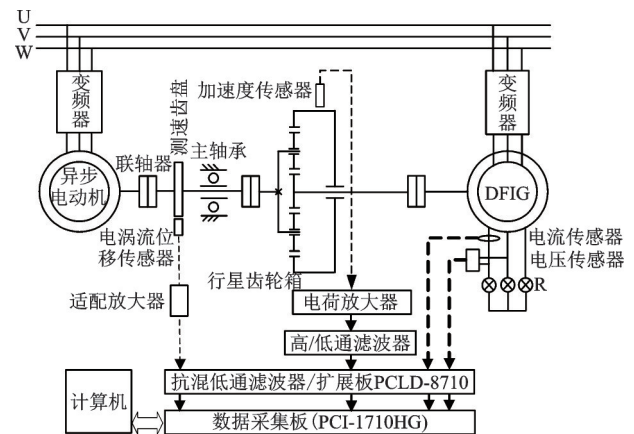


图3 DFIG传动系统故障模拟试验台组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of DFIG transmission system fault simulation test bench

由于DFIG大部分时间工作于亚同步运行状态,此时DFIG转子转速低于同步转速,励磁频率 $f_2 > 0$,双向AC\DC\AC仅使用单向励磁功能。另外,故障模拟试验对DFIG控制系统要求也不高,只需提供恒转速的稳定工况即可。在此情况下,可利

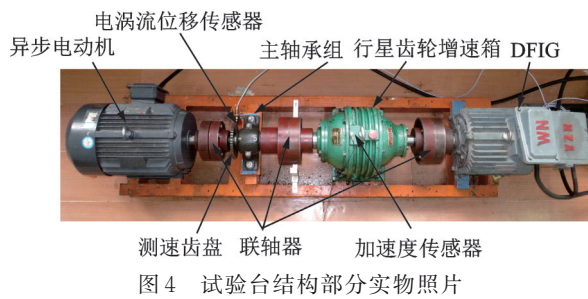


图4 试验台结构部分实物照片

用普通变频器代替复杂的双向AC\DC\AC变流器,直接给DFIG转子提供励磁电流。但是,由于绕线式电动机的转子额定电压和电流与普通电动机的定子线圈不同(额定电压为130V,额定电流约为12.5A),因此选择了7.5kW、额定电流为15A的三相交流变频器,将其额定输出电压限制为130V使用。

行星齿轮箱采用NGW-11型行星齿轮减速箱,将其倒装在传动链中,作为增速箱使用。其太阳齿轮、行星齿轮、内齿圈的齿数分别为35,14和64;行星齿轮数量为3;增速比为2.8。利用氩弧焊的电弧熔化行星齿轮的一个齿面,形成齿面局部故障,如图5所示。

采用KLC型钳形电流互感器测量DFIG定子电流信号;采用加速度传感器(型号为TS1100,螺钉安装)测量行星齿轮箱的振动信号;利用测速齿盘配合CWY系列电涡流位移传感器,测量行星齿轮箱的实际转速,用于测算行星齿轮箱的各部件特征频率,也可用于估计行星齿轮箱的扭振成分^[4-5]。

数据采集系统由各传感器信号的放大、滤波电路

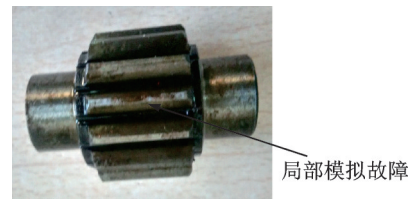


图5 模拟局部故障的行星齿轮
Fig.5 Simulated local faulty planetary gear

和数据采集板构成(见图3),其中定子电流信号和振动信号采样前均经1500Hz抗混低通滤波处理。定子电流信号近似为整周期采样方式,采样频率为5120Hz,采样点数为262144。振动加速度和电涡流位移信号的采样频率均为5kHz,采样点数为262144。

4 试验结果分析

4.1 行星齿轮正常

4.1.1 DFIG 定子电流信号

行星齿轮箱正常时的试验条件如下:电动机供电频率 $f_d=10\text{Hz}$,DFIG转子励磁频率 $f_2=23.2\text{Hz}$,三相总负载 R 为300W。为了保证解调谱的分析精度,定子电流信号经过40~100Hz的数字带通滤波后,再根据式(7)和式(9)计算包络谱和瞬时频率谱。行星齿轮箱正常时的幅值谱、包络谱和瞬时频率谱局部如图6(a)所示。由幅值谱可见,发电频率为 $f_1=49.86\text{Hz}$,满足50Hz的发电要求。另外,在幅值谱的发电频率 f_1 附近有大量的调制边带成分,

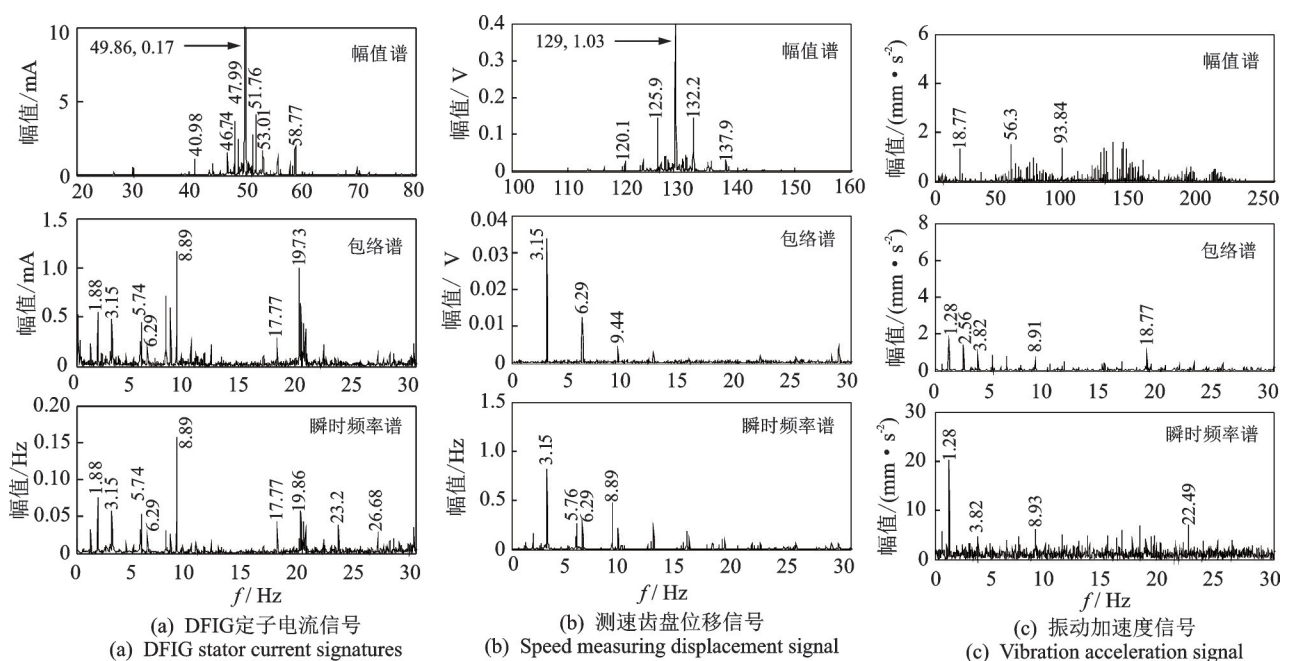


图6 行星齿轮正常状态的试验分析结果

Fig.6 Test analysis results when planetary gear is normal

如40.98 Hz和58.77 Hz边带成分,对应解调谱(包络谱和瞬时频率谱)中的8.89 Hz频率成分,为太阳齿轮的转频,也就是DFIG的转频成分。同理,幅值谱中46.74 Hz和53.01 Hz边带对应的调制频率为3.15 Hz,为行星架转频,也就是驱动电动机的转频成分。

4.1.2 测速齿盘位移信号

利用电涡流位移传感器测取的测速齿盘径向位

移信号频谱局部如图6(b)所示,其中解调谱均为经过100~160 Hz的数字带通滤波后的分析结果。图6(b)幅值谱中的129 Hz即为测速齿盘的齿通过频率,将其除以齿盘齿数41,即为驱动电动机轴或行星架的旋转频率 $f_H=3.15$ Hz。由此,根据式(1)~(3)计算的其余部件正常时的特征频率如表1所示。

表1 行星齿轮箱特征频率计算值

Tab.1 Calculated characteristic frequency of planetary gearbox							Hz	
行星齿轮	行星架转频 $f_H (=f_H)$	行星齿轮 故障频率 f_p	太阳齿轮转频 f_s / 故障频率 $3f_s^*$	内齿圈故障 频率 $3f_H^*$	齿轮啮合 频率 f_m	DFIG励磁 频率 f_2	DFIG发电 频率 f_1	
正常时	3.15	14.40	8.91/26.73	9.45	201.60	23.2	49.93	
故障时	3.16	14.45	8.94/26.81	9.48	202.24	23.2	50.01	

*因为3个行星齿轮同时与太阳齿轮啮合,所以太阳齿轮故障频率为 $3f_s$;内齿圈同理

在图6(b)的幅值谱中,齿盘的齿通过频率(129 Hz)两侧同样含有丰富的边带成分,从解调谱中可以发现行星架转频3.15 Hz及倍频成分,太阳齿轮转频8.89 Hz及倍频成分等。

4.1.3 行星齿轮箱振动加速度信号

行星齿轮箱正常时的振动加速度信号频谱局部如图6(c)所示,其中解调谱均为再经过75~175 Hz的数字带通滤波后的分析结果。在图6(c)中的幅值谱中难以发现有用的特征频率成分,在解调谱中可以发现行星架转频(3.82 Hz)和太阳齿轮转频(8.91 Hz)等特征频率成分,但是频率定位精度明显不如测速齿盘位移信号和定子电流信号。

综合比较图6的3种信号分析结果可以看出,相对于径向振动加速度信号,定子电流信号与测速齿盘位移信号的频率成分及幅值分布更加接近。根据文献[4],测速齿盘位移信号具有间接测量系统扭振成分的功能,这说明定子电流信号主要是以扭矩波动方法感应传动系统故障信息的。另外,上述3种信号分析结果中均没有发现行星齿轮的故障特征频率,说明行星齿轮正常无故障。

4.2 行星齿轮故障

当增速箱中的一个行星齿轮出现图5(b)所示的齿面局部故障时的试验结果如图7所示,此时的试验、采样与分析条件与正常时相同。为了节省篇幅,仅分析与行星齿轮相关的特征频率成分。

4.2.1 DFIG定子电流信号

行星齿轮故障时的DFIG定子电流信号频谱局部如图7(a)所示。可以看到,解调谱中新增加了正

常时没有的14.43 Hz和倍频28.87 Hz成分,这就是行星齿轮的故障特征频率 f_p 和 $2f_p$,预示着行星齿轮可能出现故障。

另外,从解调谱还可以看出,与正常时相比,行星架转频(3.16 Hz)幅值增大了约1.5~2倍,但是太阳齿轮转频成分(8.89 Hz)的幅值不但没有增大,反而减小了。这种现象除了结构因素外(如行星架是与行星齿轮相关的支承部件),还与发电机定子电流信号的故障感应原理以及故障部件在传动链的具体位置有关。由于故障部件(如行星齿轮)会额外消耗驱动系统能量,使处于该故障部件传动链后端的发电机和其他部件承受的平均输入功率和扭矩减少,即传动系统故障对发电机电磁转矩是一个负贡献成分,这可能是造成定子电流信号中太阳齿轮一类正常部件转频成分幅值减小的主要原因。行星齿轮故障除了减小发电机的平均扭矩外,还会引起扭矩波动幅度的增大,解调分析真正获取的是发电机定子电流中的电磁扭矩波动成分,而不是平均电磁扭矩成分,这是发电机作为负载设备能够感应其传动系统设备故障的基本原理。

4.2.2 测速齿盘位移信号

行星齿轮故障时的测速齿盘位移信号分析结果如图7(b)所示。根据幅值谱可知,故障时的齿通过频率为129.5 Hz,据此计算出各个部件故障时的特征频率见表1。另外,从幅值谱可以看出,其边带成分较正常时(图6(b))更加丰富。在瞬时频率谱中出现了行星齿轮的故障频率 f_p 及其倍频成分(14.44 Hz和28.88 Hz),但是在包络谱中却没有发现这种故障特征频率。产生这种现象的主要原因是:测速

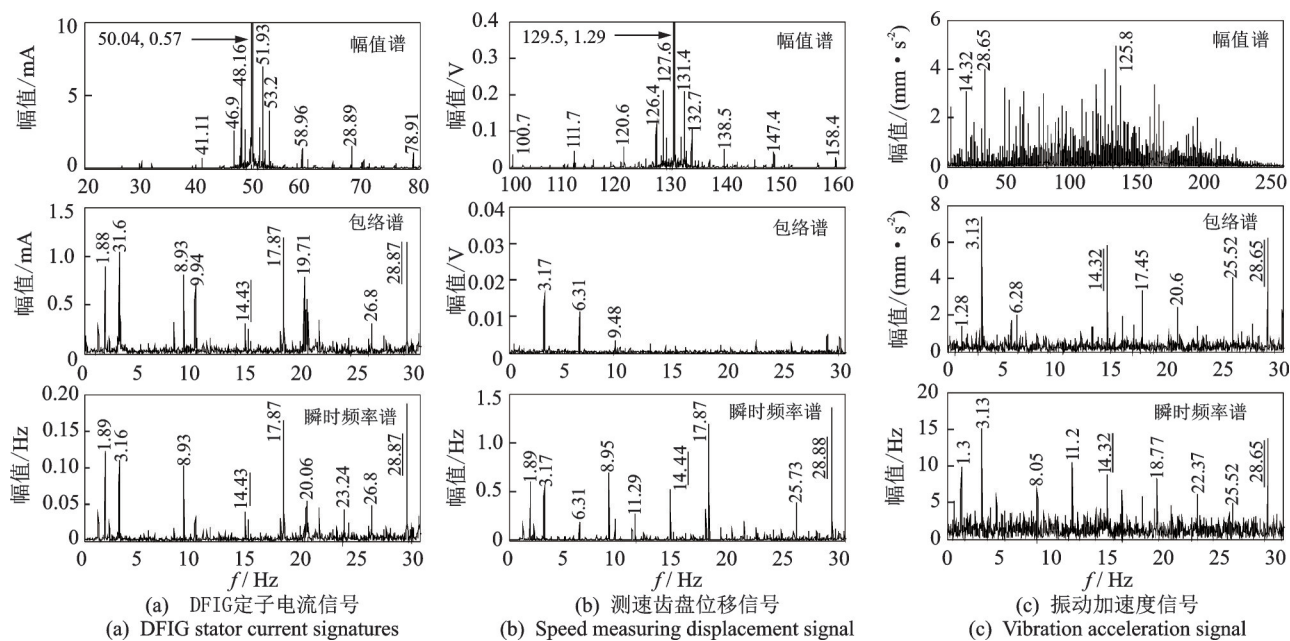


图7 行星齿轮故障状态的试验分析结果

Fig.7 Test analysis results when planetary gear is faulted

齿盘主要依靠齿间的相位波动来感应扭振信号;测速齿盘安装位置远离行星齿轮的径向振动感应范围,其位移信号在空齿段基本处于超量程状态,所以测得的幅值信号并没有实际意义。因此,其测量幅值也没有进行标定,直接使用了测量电压单位V。

4.2.3 行星齿轮箱振动加速度信号

行星齿轮故障时的振动加速度信号分析结果如图7(c)所示。与正常时(图6(c))相比,各个频谱中均出现了行星齿轮故障特征频率14.32 Hz和28.65 Hz,而且与行星齿轮运动紧密相关的行星架转频3.13 Hz的幅值也明显增大,这些均说明行星齿轮出现了故障。

从正常和故障时的3种不同信号的分析结果可以看出,定子电流信号分析结果基本包含了扭振和径向振动分析的所有特征频率成分,充分说明了DFIG定子电流信号诊断方法的有效性。

4.2.4 行星齿轮故障特征频率及其幅值变化规律

为了探讨风力发电机运行工况对定子电流信号分析效果的影响,在驱动电机不同运转速度情况下,进行了行星齿轮正常和故障时的比较试验。限于篇幅,笔者仅给出了DFIG定子电流的发电频率 f_1 成分、行星齿轮特征频率 f_p 及其倍频 $2f_p$ 成分的分析结果,如图8(数据取自幅值谱和包络谱)和图9(数据取自瞬时频率谱)所示。可见:随着驱动电机供电频率 f_d 的增大,发电频率 f_1 的频率及其幅值基本不变;而行星齿轮故障特征频率 f_p 及其倍频成分的频率和幅值却在逐渐增大。

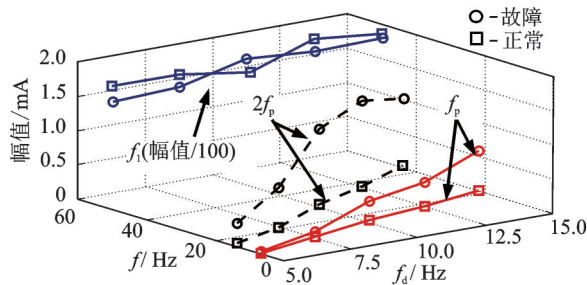


图8 不同转速下的行星齿轮包络谱特征频率及其幅值变化规律

Fig.8 Characteristic frequency and amplitude variation of planetary gear envelope spectrum at different rotational speeds

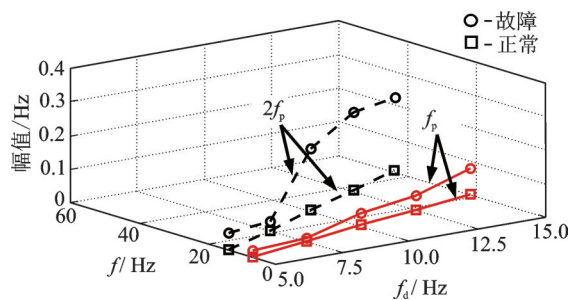


图9 不同转速下的行星齿轮瞬时频率谱特征频率及其幅值变化规律

Fig.9 Characteristics of instantaneous frequency spectrum of planetary gear at different rotational speeds and its variation of amplitude

但是,随着行星齿轮箱转频继续增大,定子电流信号中的 $2f_p$ 倍频特征频率幅值的增幅变小,甚至有

所下降。产生这种现象的主要原因是:当行星齿轮箱转速低时,齿间冲击能量较弱,对发电机的定子电流信号影响较小,只有当转速增大到一定程度时,这种冲击效果才能显示出来;但是,当转速过大时,系统的惯性变大,此时由齿轮故障冲击引起的扭振变化量对系统的转速(或相位)变化量的影响相对减弱,导致定子电流信号中的故障特征频率幅值下降。

5 结 论

1) 建立了一个可以模拟风力DFIG亚同步运行工况的简易行星齿轮箱故障模拟试验台。通过对行星齿轮正常与故障状态时的3种信号对比试验分析,证明发电机定子电流信号可以兼顾反映行星齿轮的扭振信号和振动加速度信号频谱特征,充分说明定子电流信号诊断方法是常规振动检测技术的一种行之有效的替代或补充方法。

2) 虽然传动系统部件故障对发电机的输入平均扭矩和定子电流是一个负贡献分量,但是发电机仍然可以根据故障扭矩的变化量(扭振)来检测与感知传动系统的机械故障类型与特征。

3) 发电机运行转速过低或过高均不利于定子电流信号中的机械故障特征获取。因此,对于实际风力DFIG的行星齿轮增速箱的故障诊断,可以寻找敏感的风速运行频段进行测试分析,以提高定子电流信号分析方法的检测与诊断灵敏度。

参 考 文 献

- [1] 雷亚国, 汤伟, 孔德同, 等. 基于传动机理分析的行星齿轮箱振动信号仿真及其故障诊断[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 45-52.
LEI Yaguo, TANG Wei, KONG Detong, et al. Vibration signal simulation and fault diagnosis of planetary gearboxes based on transmission mechanism analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(17): 45-52. (in Chinese)
- [2] CAPOLINO G A, FAR Z D, HENAO H. Modeling and simulation of planetary gearbox effects on a wound rotor induction machine [C] // 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China: IEEE, 2012: 1234-1239.
- [3] 陈雪峰, 李继猛, 程航, 等. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 45-52.
CHEN Xuefeng, LI Jimeng, CHENG Hang, et al. Research and application of condition monitoring and fault diagnosis technology in wind turbines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 45-52. (in Chinese)
- [4] 闫兵, 董大伟, 华春蓉, 等. 一种扭振测量新方法及其在故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(4): 294-297.
YAN Bin, DONG Dawei, HUA Chunrong, et al. Torsional vibration measuring and its application to diagnosis of individual cylinder misfires [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(4): 294-297. (in Chinese)
- [5] MARZEBALI H M, FAIZ J, CAPOLINO G A, et al. Planetary gear fault detection based on mechanical torque and stator current signatures of wound rotor induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1072-1085.
- [6] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Torsional vibration effects on induction machine current and torque signatures in gearbox-based electromechanical system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4690-4699.
- [7] FENG Z 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.
- [8] ZHANG J, DHUPIA J, GAJANAYAKE C. Stator current analysis from electrical machines using resonance residual technique to detect faults in planetary gearboxes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5709-5721.
- [9] NETI P, ZHANG P, SHAH M, et al. Electrical signature analysis based online monitoring of drive-trains for doubly-fed wind generators [C] // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 1746-1769.



第一作者简介:时献江,男,1962年1月生,教授。主要研究方向为机械故障诊断。曾发表《基于无传感器检测方法的机械系统扭振试验研究》(《振动、测试与诊断》2009年第29卷第3期)等论文。
E-mail: hustsxj@hrbust.edu.cn