

变频运行风机扭矩脉动抑制研究

路 鹏¹, 梁 超¹, 沈中信², 赵文广³

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆新能集团有限责任公司乌鲁木齐电力建设调试所, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 东南大学 火电机组振动国家工程研究中心, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对某台轴流式引风机变频改造后频繁发生轴系故障的现象, 采用无线应变电测技术测试了轴系扭应力脉动特性。试验发现, 风机变频运行在一定转速以上时, 传动轴扭应力脉动幅度突增, 并一直维持在高位。在运行过程中扭应力脉动频率被锁定, 不随转速变化, 该现象和扭转共振不同。分析表明, 变频器-电机-传动轴-叶轮组成的机电耦合系统出现了扭振失稳。提出将轴系上的膜片联轴器改为高弹橡胶联轴器, 通过增加系统阻尼的方法抑制扭振失稳。改造前后的试验结果对比表明, 高弹联轴器可以有效地抑制轴系扭振失稳。

关键词: 引风机; 变频; 应力; 联轴器; 扭振

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0044-04

Research on Torque Pulsation Control of Fan Driven by Frequency Converter

LU Peng¹, LIANG Chao¹, SHEN Zhongxin², ZHAO Wenguang³

(1. Electric Power Research Institute of Xinjiang Power State Grid Corporation, Urumqi 830000, China;

2. Xinjiang Xinneng Group Co., Ltd. Urumqi Electric Power Construction and Commissioning Institute, Urumqi 830000, China;

3. National Engineering Research Center of Turbo-Generator Vibration, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the failure of an axial flow induced draft fan after the variable frequency driven conversion, the torsional stress pulsation characteristics of the fan were tested by using the wireless strain measurement technology. It was found that the torsional stress fluctuation amplitude increased sharply when the fan was running over a certain rotating speed and then kept high. In this process, the torsional stress pulsation frequency was locked and did not change with the rotation speed, which was different from the phenomenon of torsional resonance. The results showed that the unstable torsional vibration occurred in the electromechanical coupling system composed of frequency converter, motor, shaft and fan. It was proposed to solve the unstable torsional vibration problem by replacing the diaphragm coupler with the high elastic rubber coupler. The experimental results before and after replacement showed that the high elastic coupler could effectively suppress the unstable torsional vibration.

Key words: induced draft fan; variable frequency; stress; coupler; torsional vibration

0 引 言

为了节能降耗, 发电厂正在对传统定速运行

的引风机实施变频改造, 但变频改造后的引风机运行一段时间后出现了联轴器断裂、转轴裂纹、叶片损坏等故障^[1-5], 严重影响了风机的安全与可

靠运行。故障原因的分析及其解决方案的提出正在得到广泛重视。

文献[6]分析了某台变频改造后的风机叶片损坏事故,发现变频运行时产生的扭转激励导致了叶片疲劳失效。文献[7]分析了变频器载波频率变化对电机振动的影响,指出带有谐波的电磁激振力的频率与轴系扭转振动固有频率接近时,会产生共振现象。文献[8]在变频电机驱动轴系试验台上开展了升速过程中的扭矩特性试验研究,结果表明:变频电机不仅会产生转速的多阶整数倍频分量,而且在转速频率附近也会产生若干谐波分量,随着转速的升高,扭矩脉动幅值越来越大。文献[9]分析了多台变频机组发生的轴系故障与联轴器损坏事故,指出这类事故大多由电机谐波引发的强烈交变扭应力所致。

目前的研究普遍认为,风机变频运行在一定转速区间时会产生扭转共振。某电厂的1台1 000 MW发电机组配套引风机变频运行,在一定转速以上时,传动轴扭应力脉动幅度突增,并一直维持在高位,其现象不同于共振故障。本文以该台引风机为研究对象,采用无线应变电测法,测试了变频运行过程中转轴扭应力脉动情况,指出由变频器-电机-传动轴-叶轮组成的机电耦合系统在一定转速以上区间运行时出现了扭振失稳现象。通过提高系统阻尼,将膜片联轴器更换为高弹橡胶联轴器,解决了轴系扭振失稳问题。

1 变频运行风机扭应力脉动试验

图1所示为某电厂1 000 MW超临界机组配套轴流式引风机外形图,主要参数如表1所示。变频改造前该风机故障率较低,变频改造后多次发生轴裂纹与膜片损坏故障,轴裂纹发生在联轴器附近,与轴向成约45°夹角,呈现比较明显的扭转疲劳损坏特征。



图1 某台1 000 MW机组配套引风机

表1 风机系统参数

参数名称	参数值
引风机型号	AN42e6(V19-1°)
电机型号	YKS1000-10
额定转速/(r·min ⁻¹)	596
额定功率/kW	6 450
叶轮重量/kg	5 365
轮毂直径/mm	2 448
风机转动惯量/(kg·m ²)	12 300
电机转动惯量/(kg·m ²)	1 519

1.1 扭应力测试方法

采用无线应变电测法测试风机变频运行时扭应力脉动特性。由轴裂纹可知,联轴器附近扭应力截面最大。选择该截面为测量截面,将2组应变片按180°对称布置,采用全桥法测试,如图2所示。该风机最高工作频率为10 Hz,将采样率设为1 000 Hz可以满足测试需求。测试时调节变频器参数,使风机在3~10 Hz区间内升频运行一次,再在10~3 Hz区间内降频运行一次,变频间隔为1 Hz。



图2 应变片和无线信号发射装置

1.2 扭应力脉动现象

图3所示为升频与降频试验过程中扭应力脉动录波图。图4所示为596 r/min下扭应力波形图与频谱图。图5所示为风机变频运行过程中扭应力三维频谱图。

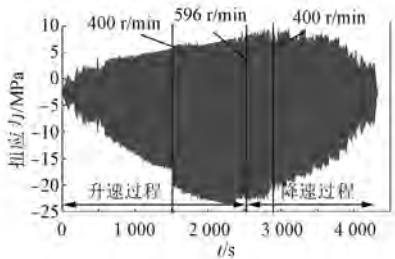


图3 风机变频运行扭应力录波图

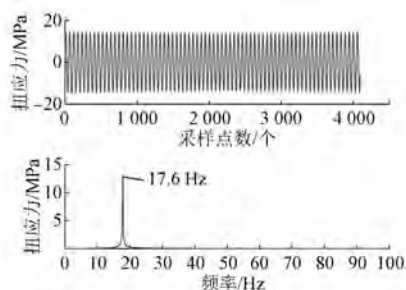


图4 596 r/min 转速下扭应力波形与频谱图

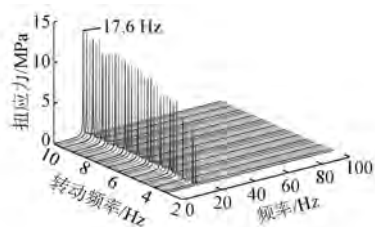


图5 风机变频运行时扭应力三维频谱图

分析表明,该风机变频运行时发生的扭应力脉动具有以下典型特征。

(1) 转速升高过程中,扭应力脉动幅度逐渐增大,当转速升高到400 r/min 后,脉动幅度突增。

(2) 转速进一步升高,脉动幅度一直维持在高位。

(3) 扭应力脉动时的波形为比较规则的正弦波,主频率为17.6 Hz。脉动发生后,脉动频率并不随转速变化,出现了频率锁定现象。

1.3 扭应力脉动原因分析

扭转共振和自激失稳都会导致大幅扭矩脉动。目前普遍认为,风机变频运行在一定转速区间时会出现扭转共振,而本文风机上发生的扭转脉动现象完全不同于共振,分析如下。

(1) 共振故障发生在特定转速区间,避开该转速区间后共振就会消失。本文风机扭振发生在400 r/min 以上的高转速区,故障发生后就一直维持在高位,不存在共振故障所特有的振动峰值现象。

(2) 共振故障属于强迫振动类型,故障发生后,振动频率随转速变化。本文风机扭振发生后,频率不随转速变化,出现了频率锁定现象。

(3) 新出现的频率点频率不是转动频率的整数倍谐波。

根据上述特征可以明确排除共振故障,可以认为变频器-电机-传动轴-叶轮组成的机电耦合系统发生了扭转自激失稳。

2 机电耦合系统自激振动分析

以矢量变频控制系统为例进行分析,如图6所示。矢量变频调节系统控制电机产生特定频率的电磁扭矩,并通过轴系传递给机械系统,可得电机和风机转动速度以及传动轴传递扭矩。风机侧转速反馈给异步电机以及矢量变频器中的速度控制器和矢量控制器。这是一类典型的机电耦合系统。

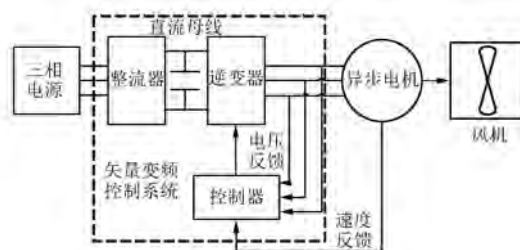


图6 矢量变频驱动风机系统

电机经过变频改造后,系统中会引入大量电容、电感等非线性元件。当变频器参数和原先电气参数匹配不当时,有可能发生自激失稳,其中异步自激失稳最为常见。这是一种典型的参数谐振现象。失稳发生后,自激电流产生的旋转磁场转速低于同步转速,并与工频电源产生的工频电流同步转速旋转磁场之间相互作用,从而产生脉动扭矩。如果脉动扭矩频率和电机主轴扭振固有频率相同,可能进一步引起机械谐振,使主轴断裂。

电气系统一般在转速高于一定值后会出现电压、电流的大幅波动,电磁扭矩也会大幅波动,电机升速速率下降,甚至不能达到正常转速。

3 基于高弹联轴器的解决方案

由电机、膜片联轴器、传动轴和叶轮所组成的传动系统阻尼较小,而自激失稳与系统阻尼有很大关联。在对变频控制系统进行彻底改造之前,增大系统阻尼是一条简单可行的措施。

高弹橡胶联轴器的阻尼大,决定用高弹橡胶联轴器替换膜片联轴器。图7所示为新设计的高弹联轴器。高弹联轴器主要参数如表2所示。高弹

联轴器的额定扭矩、许用变动扭矩等能满足本文风机使用需求。高弹联轴器的相对阻尼达到了 1.13。



图 7 高弹橡胶联轴器

表 2 高弹联轴器主要参数

参数名称	参数值
额定扭矩/(kN·m)	125
最大扭矩/(kN·m)	375
许用变动扭矩/(kN·m)	31.25
许用转速/(r·min ⁻¹)	1 040
动态扭转刚度/(kN·rad ⁻¹)	1 800
相对阻尼	1.13

4 更换联轴器后扭应力试验

图 8 所示为将原膜片联轴器改为高弹联轴器后变频运行扭应力录波图。升降速过程中扭应力脉动规律相同,重复性强。在整个变频运行区间轴系扭应力脉动幅度都较小,且不随转速变化。以 596 r/min 定速运行工况为例,扭应力脉动幅度较小,约为 1.5 MPa。

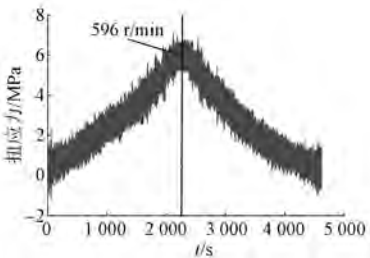


图 8 采用高弹联轴器后变频运行扭应力录波图

图 9 所示为 596 r/min 下扭应力波形与频谱图。表 3 所示为改造前后扭矩脉动特性比较。改造前扭应力脉动主频率为 17.6 Hz,改造后主频率为 10.0 Hz,整个变频运行过程中主频率都为转动频率及其若干倍频,未出现与转动频率无关的谐

波,也未出现频率锁定现象,各频率分量幅值也比改造前大幅度减小。

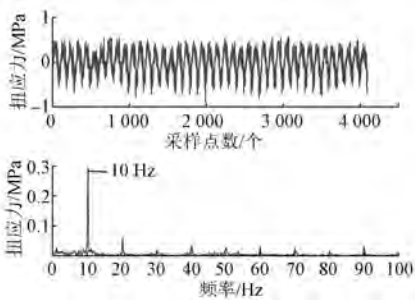


图 9 采用高弹联轴器后 596 r/min 下扭应力波形与频谱图

表 3 改造前后扭矩脉动特性比较

参数名称	膜片联轴器	高弹联轴器
最大扭应力脉动/MPa	29	1.5
脉动主频率/Hz	17.6	10.0

试验结果表明:采用高弹联轴器替换膜片联轴器后,传动系统阻尼增大,对抑制传动轴上出现的扭应力脉动起到了较好的效果。

5 结 语

- (1) 变频驱动的风机在一定转速区间运行时,有可能出现大幅度扭应力脉动故障,对风机安全运行产生较大危害。
- (2) 共振和自激失稳都可能导致大幅扭应力脉动。目前的研究主要集中在共振上,但本文风机上发生的扭应力脉动现象是由于机电耦联系统扭转自激失稳引起的。
- (3) 用高弹橡胶联轴器替换膜片联轴器,增大传动系统扭转阻尼,可以有效地解决风机变频运行时扭应力脉动故障。

【参考文献】

[1] FEESE T, MAXFIELD R. Torsional vibration problem with motor/ID fan system due to PWM variable frequency drive [C] // Proceedings of the 37th Turbomachinery Symposium, 2008: 45.

[2] KERKMAN R J, THEISEN J, SHA H K. PWM inverters producing torsional components in AC motors [C] // 2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2008.

(下转第 56 页)

- [10] LANGLOIS K, HOEVEN T V D, CIANCA D R, et al. EtherCAT tutorial: an introduction for real-time hardware communication on windows [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, 25(1): 22.
- [11] CHEN X, LI D, WAN J F, et al. A clock synchronization method for EtherCAT master [J]. Microprocessors & Microsystems, 2016, 46: 211.
- [12] 张淑珍, 于子然, 孔民秀, 等. 基于 RTX 弧焊机器人控制系统的设计与实现[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1540.
- [13] CHEN Z Y, SHENG B Y, YANG H Y, et al. Tile cut synchronization control and compensation design and implement for multi-wire saw [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 3493.
- [14] KIM I, KIM T. Guaranteeing isochronous control of networked motion control systems using phase offset adjustment[J]. Sensors, 2015, 15(6): 13945.
- [15] LUO Y, JIAO X D, ZHOU C F, et al. Welding robot system applied in sub-sea pipeline-installation [J]. Industrial Robot, 2015, 42(1): 83.
- [16] 林梦云, 马文礼, 熊皑, 等. 基于 EtherCAT 实时通信的电机驱动控制[J]. 微型机与应用, 2017, 36(10): 1.
- [17] LIU J M, YANG L, XU D, et al. A high precision clock synchronization algorithm for the EtherCAT[C] // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications (ICIEA), 2017: 1369.
- [18] LI N N, MA H B, FEI Q, et al. Motion control of 6-DOF manipulator based on EtherCAT[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2018, 22(4): 415.
- [19] IEC. Industrial communication networks-fieldbus specifications-part 1: overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series IEC 61158: 2014 [S]. Geneva: 2014.
- [20] WANG S Y, OUYANG J, LI D, et al. An integrated industrial Ethernet solution for the implementation of smart factory[J]. IEEE Access, 2017, 5: 25455.
- [21] PARK S, KIM H, KIM H, et al. Synchronization improvement of distributed clocks in EtherCAT networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1277.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 47 页)

- [3] 张磊, 张俊杰, 葛鸿昌, 等. 某型引风机变频改造后电机断轴原因分析[J]. 华北电力技术, 2013(12): 50.
- [4] 徐甫荣, 崔力. 发电厂辅机电机变频调速节能方案探讨[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(2): 3.
- [5] 李明, 黄丕维, 朱光明, 等. 火电厂泵与风机变频改造技术及应用[J]. 华电技术, 2008, 30(8): 55.
- [6] 李文, 赵慧敏, 邓武. 变频器驱动异步电机振动频谱特征分析[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(8): 67.
- [7] 李年仔, 郭玉杰, 张晓斌, 等. 变频电机驱动轴系扭矩脉动特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(9): 731.
- [8] WANG Q, FEESE T D, PETTINATO B C. Torsional natural frequencies: measurement vs. prediction [C] // Proceedings of the Forty-First Turbomachinery Symposium, 2012.
- [9] HUTTEN V, BEER C, KRAUSE T, et al. VSDS motor inverter design concept for compressor trains avoiding interharmonics in operating speed range and verification [C] // Proceedings of the 42nd Turbomachinery Symposium, 2013: 15.

收稿日期: 2018-12-18