

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.024

风电机组双馈发电机振动故障分析

温 斌, 仝世伟, 程林志, 史 航
(许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对双馈发电机在风电机组运行过程中出现的振动故障问题, 根据风力发电机组结构与运行特点, 将频谱分析与ADAMS建模仿真技术应用到双馈发电机设计、制造与维护中。开展了大量的双馈发电机振动测试与频谱分析, 建立了对中、平衡、弹性安装、轴承振动频谱与双馈发电机振动故障之间的关系, 提出了优化对中维护、修改转子平衡工艺与优化弹性支撑-发电机固有频率的解决方法。在ADAMS软件平台上对弹性支撑-发电机固有频率优化进行了评价, 并进行了转子平衡工艺优化前、后与弹性支撑-发电机固有频率优化前、后的振动值对比试验。研究表明, 通过优化双馈发电机振动值已经由10 mm/s减小到2.2 mm/s, 双馈发电机振动减小效果明显。

关键词: 双馈发电机; 振动; 平衡; 弹性安装

中图分类号: TH113; TM614 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-1071-06

Vibration analysis of doubly-fed induction generator for wind power

WEN Bin, TONG Shi-wei, CHENG Lin-zhi, SHI Hang
(XJ Windpower Technology Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the vibration problems of double-fed induction generator in the process of operating wind turbine generator, the spectral analysis and ADAMS simulation technology were applied in the design, manufacturing and maintain of the double-fed generator based on the characteristic of wind turbine generator structure and operation. After the lots of vibration tests and the spectral analyses of double-fed induction generator were carried out, the relation between the alignment, balance, resilient mounting, bearing vibration spectral and generator vibration fault was established. A method was presented to optimize the alignment maintenance, modify rotor balancing technology and optimize inherent frequency of resilient mounting and generator. The inherent frequency of resilient mounting and generator was evaluated in the ADAMS software platform, and the comparison of vibration before and after optimization the balance and inherent frequency were tested. The experimental results show that the optimized vibration is reduced largely from 10 mm/s to 2.2 mm/s, vibration of doubly fed generator decreased obviously.

Key words: doubly-fed induction generator; vibration; balance; resilient mounting

0 引 言

双馈风力发电机是目前国内外应用最为广泛的风力发电机型。随着国内市场对于风电机组质量、稳定性与使用率要求的不断提高, 如何提高机组整体性能成为目前双馈风力发电机组研究的主要方向。作为风力发电系统中直接进行能量转换的发电机, 其运

行稳定性将直接影响风电机组的整体性能。而在影响发电机运行的诸多因素中, 振动占据很大的比例。振动过大会导致发电机运行稳定性破坏、零部件损坏、电机扫膛、主轴弯曲、电机寿命缩短, 甚至造成电机飞车、主轴断裂等恶性事故, 直接影响风电场的安全运行和经济效益^[1]。而双馈发电机振动过大时除会产生以上影响外, 还会直接导致滑环与碳刷间出现严重打火甚至拉弧, 严重时可能导致火灾等恶劣事故。

收稿日期: 2014-02-18

作者简介: 温 斌(1987-), 男, 山西晋中人, 主要从事风力发电机组双馈发电机应用优化与测试方面的研究。E-mail: wenbin@xjgc.sgcc.com.cn

为避免发电机振动过大对风电机组运行造成的不良影响,目前风电行业内已经开始逐步开展相关研究。但大多数研究侧重于发电机自身因素对振动的影响,如发电机地脚变形、定子热变形与零部件配合问题引起的振动,机座刚度不足引起的振动^[2]与滚动轴承故障对发电机振动的影响^[3]等。这些研究针对发电机振动过大提出了解决思路,但对于风力发电机组运行特点考虑较少,并侧重于故障诊断实际减振效果有限。虽然文献[4]就双馈风力发电机组中发电机弹性支撑优化进行了研究,提出了减小弹性支撑刚度对发电机减振的作用,但降低支撑刚度对机组运行影响并未说明并且振动测试点也无法反映发电机实际振动情况。作为风电机组振动故障检测与预防中起重要作用的在线振动检测系统,虽然在国外应用广泛并成为机组投保的前提条件,但国内应用处于起步与试验阶段^[5],实际效果还有待进一步验证。

为此本研究以某双馈发电机为例,基于双馈风力发电机组结构与运行特点,针对实践中几种常见的双馈发电机振动故障,通过大量振动测试与仿真分析寻求更有效、更合适的处理措施。

1 风电中双馈发电机振动要求

由于风力发电机组中双馈发电机安装与运行工况较传统行业有较大的区别,从而导致风电机组中双馈发电机在振动方面要求较为特殊。一般要求双馈发电机在机组安装情况下工作转速内不出现较大振动,并且避免工作转速内共振的出现。

传统行业中发电机一般水平刚性安装,仅有少数功率较小的电机采取弹性安装,并且主要运行在额定

转速与额定功率下。而由于风力发电机组必须依靠自然风能,并且机组组成复杂,各部件间的相互影响突出,必然导致发电机在安装与使用上会有较为特殊的要求。

以上风向高速风力发电机组为例,为避免狂风载荷作用下叶片与塔筒发生相撞,研究人员一般将低速轴向上倾斜 5° 或 6° ^[6],从而导致整机后续传动链各部件安装位置的改变(风力发电机组中部件倾斜布置示意图如图1所示)。为减弱发电机、机架与其他部件振动之间的相互影响,通常将发电机通过弹性支承安装在机架上,以达到隔振与减振的效果。此外,由于风电机组运行转速与功率受到风速的制约,低风速、小功率运行对于风电机组来说是不可避免的,并且往往占据很大的比重。

本研究以某兆瓦级上风向双馈风力发电机组为例,该机组双馈发电机采取驱动端向上倾斜 4.5° ,使用由金属与橡胶组成的复合弹性支撑与机架固定,其工作转速为 $930\text{ r/min}\sim 2\,070\text{ r/min}$,额定转速为 $1\,800\text{ r/min}$,但在风场运行中 $930\text{ r/min}\sim 1\,400\text{ r/min}$ 低转速、小功率的运行时间占据 $1/3$ 或更大的比例,运行情况如表1所示。为此要求该机组双馈发电机在 $930\text{ r/min}\sim 2\,070\text{ r/min}$ 转速内振动较小,并且避免工作转速内出现共振。

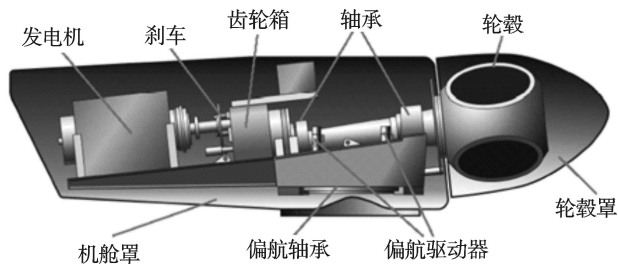


图1 风力发电机组中部件倾斜布置示意图

表1 风电中低转速、小功率运行情况

	年总载荷时间 /h	930 r/min~1 400 r/min 低转速、小载荷时间/h	930 r/min~1 400 r/min 低转速、小载荷时间所占比例/(%)
一类风场	7 900	2 200	27.8
二类风场	7 800	2 500	32.1
三类风场	7 400	3 200	43.2

2 风电中双馈发电机常见振动故障分析

一般而言在电机振动故障处理中,有两点特别重要,往往只要加以适当改进,就可取得明显的减振效果。一是转子的平衡:实践证明,转子的机械不平衡能产生显著的振动,尤其是高速电机。二是电机的安装与连接:实践证明,一台电机的安装与连接的好坏,

可以大大地改变电机自身及与之相连的部件的振动情况^[7]。但实践中发现,对于复杂的风力发电系统来讲,单靠调整动平衡与连接状况是远远不够的。

对于一台出现振动问题的双馈发电机,正确地找到引起振动的原因是至关重要的,只有找到引起振动的原因才能避免走过多弯路并且可以节约大量的人力与财力。随着现代快速傅里叶变换技术的迅速发展,频谱分析已经成为风电中发电机振动故障的诊断

的主要手段。

为进一步分析风力发电机组中双馈发电机振动问题,本研究以第1节中所举的双馈发电机为基础,通过大量的测试、仿真与分析,总结了常见的几种振动故障,并提出相应对策。

2.1 发电机对中不良引起的振动分析

双馈风力发电机组由齿轮箱与发电机实现机械能到电能的转换,通过联轴器传递扭矩。联轴器对中的好坏将直接影响风机齿轮箱与发电机的正常运行,因此本研究对齿轮箱高速轴与发电机转轴之间的对中要求就比较高,加之实际运行中风电机组转速、载荷突变较大,长时间运行后发电机固定螺栓、联轴器紧固螺栓会出现松动,这样就会导致发电机对中的偏移。对中不良会导致发电机轴承振动异常、轴承载荷变化,严重时会导致轴承局部磨损。从振动频谱上来看,不对中主要表现为在以工频、二倍频成分为主,不对中越严重,二倍频比例越大、甚至超过工频。轴心轨迹呈现“月牙状、香蕉状”,严重时呈现“8字形”^[8]。不对中更为严重时频谱中还会出现1/2倍频、1/3倍频、3倍频等调制成分。因此在风场日常维护中,需定期对发电机对中情况进行检查并尽量提高对中精度。

2.2 发电机转子系统不平衡引起的振动分析

一般而言,转子不平衡为电机振动源。产生不平衡振动的根本原因是转子的重心线偏离轴线,即转子质量对轴心线成不均匀分布。也就是说,转子的质心与转子的几何轴心并不重合,存在着一个偏心距 e 。当转子以等角速度 ω 绕定轴旋转时,将产生离心惯性力 F ,其大小为:

$$F = M \cdot e \cdot \omega^2 \quad (1)$$

式中: M —转子质量, e —偏心距。

从发电机自身考虑,由于转子质量分布不平衡导致转子旋转过程中产生离心力。转子每旋转一周,偏心距的方向随着变化一次,离心力的方向也就循环变化一次,转子交变循环离心力作用于支撑件从而导致振动的产生。而且不平衡振动的频率与转速频率一致,并且振动幅值大小与转速大小相关。以有阻尼单自由度振动系统为例(系统如图2所示),其运动方程如下:

$$F = M\ddot{X} + C\dot{X} + KX \quad (2)$$

式中: K —系统刚度, C —系统阻尼。

由式(1,2)可知,转子质量越不均匀,转子就越不平衡,转子离心力就越大,并且其离心力随转子转速的增大而增大,进而导致振动的加剧。为此在转子动平衡中应尽可能模拟实际运行的最大转速。但由于兆瓦级双馈发电机转子重量一般在2 000 kg以上,加之动平衡设备的局限性,目前主要采取低速转子动平

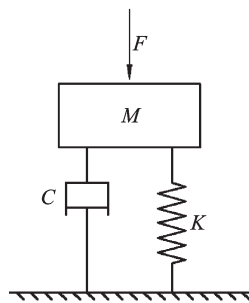


图2 有阻尼单自由度振动系统

衡(一般转速在1 000 r/min左右)。另外,滑环作为有刷双馈发电机的主要特征之一,滑环与转轴采取热套过盈配合,为提高生产效率,一般采取转子与滑环分别单独平衡的方式。虽然目前发电机制造中转子、滑环单独动平衡等级为G2.5或更加严格的企业标准,但二者装配后会出现 $1+1>2$ 的现象,整个转子系统不平衡量可能会发生突变。而且低速平衡后的转子系统残余不平衡量在发电机正常运行时(转速高于平衡转速)将可能产生较大的离心力,从而引起较大的振动。

因此,在双馈发电机生产过程中,研究人员需要对所有转子部件进行整体动平衡,安装时按照标记进行装配,但与此同时带来生产效率的严重降低,为解决该问题,可以采取转子、滑环单独静平衡和高速动平衡两道工序,并提高平衡等级。例如,某台双馈发电机调整转子动平衡前、后振动情况对比分别如图3、图4所示,由此可知调整动平衡后发电机振动已经由调整前的大于10 mm/s减小至2.2 mm/s,减振效果很明显。

2.3 发电机弹性安装引起的振动分析

从大量的振动测试中发现,安装方式对发电机振动影响很大。一般发电机振动测试安装分为自由悬置(弹性安装)与刚性安装。按照GB 10068各版本中对于安装的相关规定,一般中心高较小的电机采取弹性安装,并规定电机及其自由悬置系统6个可能自由

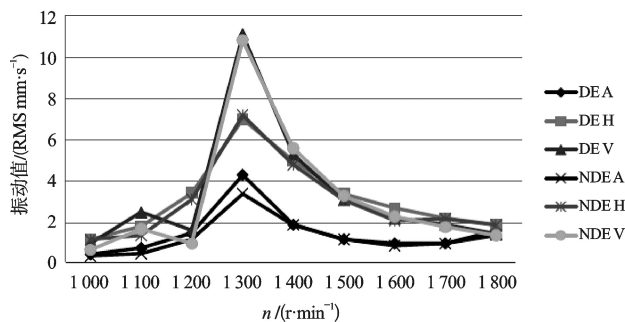


图3 调整平衡前发电机振动情况

DEA—发电机驱动端轴向振动值;DEH—发电机驱动端水平径向振动值;DEV—发电机驱动端垂直径向振动值;NDEA—发电机非驱动端轴向振动值;NDEH—发电机非驱动端水平径向振动值;NDEV—发电机非驱动端垂直径向振动值,下同

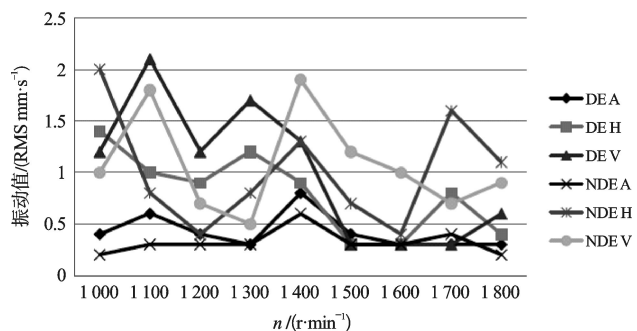


图4 调整平衡后发电机振动情况

度的固有频率应小于被测电机转速频率的1/3。目前兆瓦级双馈发电机出厂试验中主要采取刚性振动测试。而GB 10068最新版中并没有对弹性安装与刚性安装的适用范围进行明确约束,仅规定中心高小于132 mm的电机刚性安装不做考查,那么单从标准上讲,电机应在刚性安装与弹性安装下共同满足振动要求。

在实际测试中,出现部分双馈发电机在电机出厂测试中刚性安装下振动测试值满足国标要求,但通过弹性支撑安装于风电整机后振动加剧的现象如图5、图6所示。

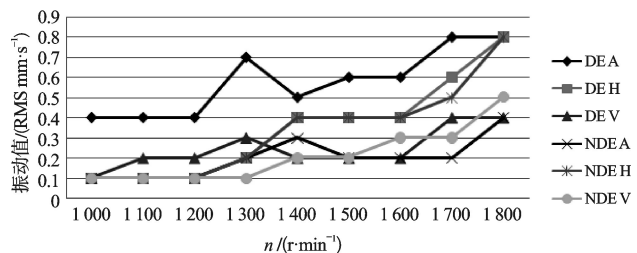


图5 发电机水平刚性安装下振动数据

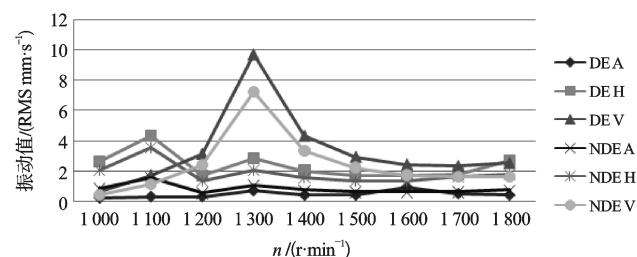


图6 发电机在倾斜面弹性安装下振动数据

从振动测试数据上发现,发电机在弹性支撑安装下会在某一转速突然出现振动较大现象,但一旦转速提高或降低振动幅值会大幅减小,并且最高转速时振动值也较小(发电机全转速振动趋势图如图7所示)。该现象仅出现在个别转速,并且同型号发电机分布转速比较集中。

从发电机振动频谱上看,故障发电机频谱以工频为主并且振幅较大,其他倍频幅值很小,并且没有其他部件所对应的特征频率与故障频率。如某台双馈发电机在1 300 r/min时驱动端与非驱动端轴承垂直方向振

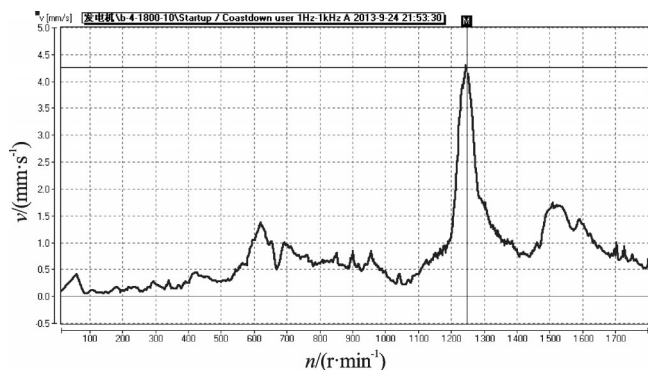


图7 发电机全转速振动趋势图

动值5.38 mm/s,当转速升高或降低时振动水平明显降低,1 200 r/min时振动值为1.86 mm/s,1 800 r/min时振动值为2.66 mm/s。

采集1 200 r/min、1 300 r/min、1 800 r/min驱动端振动频谱,如图(8~10)所示。

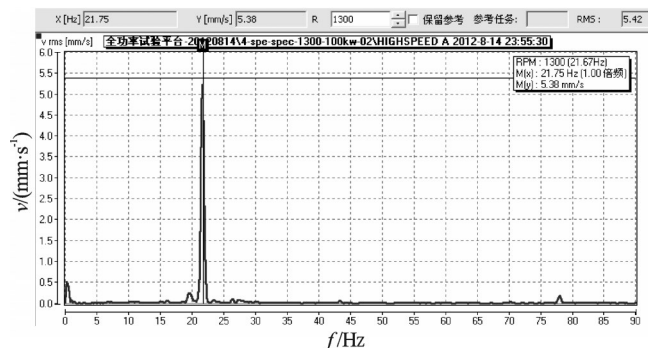


图8 1 300 r/min时发电机振动频谱图

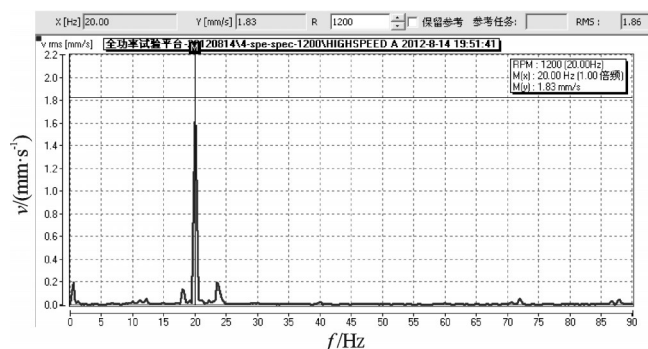


图9 1 200 r/min时发电机振动频谱图

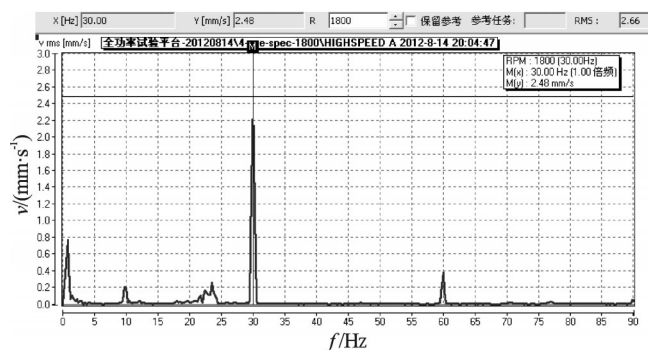


图10 1 800 r/min时发电机振动频谱图

通过对采集的相关数据作综合分析可知,该台发电机在 1 300 r/min 运行时出现振动剧增,可能发生共振。对于刚性转子而言,工作转速应低于第一临界转速,一般工作转速应小于等于第一临界转速的 0.75 倍^[9],经计算该发电机转子第一阶临界转速为 2 540 r/min,符合设计要求。但经敲击法与固有频率测试发现,该发电机安装于风电整机上后固有频率发生改变,系统固有频率约为 22.34 Hz(约 1 340 r/min)。由此可以得知发电机采取弹性支撑安装后,将直接改变发电机系统的固有频率。

由于发电机系统在工作转速内出现共振,并且共振区振动幅值较大,虽然处于低转速、小功率状态下,但该工况运行时间较长,较大的振动也会对风电机组运行带来很大隐患。为避免发电机振动过大对电机运行造成影响,本研究可以从改变系统共振区与减小共振区振动幅值两方面入手对系统共振进行优化。

(1) 改变发电机系统共振区。

由发电机、弹性支撑、机架、塔筒组成的振动系统,在整机设计中应充分考虑工作转速内系统共振问题。以单自由度无阻尼振动系统为例,系统固有频率 $f = (1/2\pi)\sqrt{k/m}$ (其中: k —系统刚度, m —物体质量),当外部激励频谱与系统固有频率一样即 $\lambda = 1$ (λ —激励频率与系统固有频率的比值)时出现共振系统的振动将加剧。但根据隔振理论可知,当 $\lambda > \sqrt{2}$ 时系统才具有明显的隔振效果并且 λ 值越大隔振减振效果越好。故需优化弹性支承刚度与发电机质量,使系统固有频率与工作转频不发生交叉。

为此,本研究对原先刚度较大的弹性支撑进行优化,优化后刚度减小为原来的一半,使用 ADAMS 软件建模对发电机系统优化前、后振动响应仿真结果如图 11、图 12 所示。从中可以看出,弹性支撑优化后发电机系统已经在工作转速内不存在共振区,并且该结果与实际试验结果基本吻合。系统优化后发电机振动平稳,振动水平较低,发电机振动数据如图 13 所示。

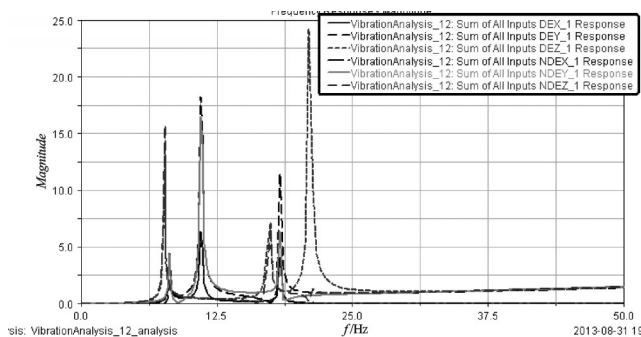


图 11 弹性支撑优化前发电机振动响应曲线

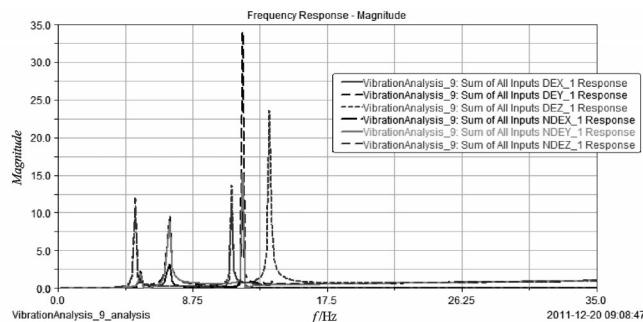


图 12 弹性支撑优化后发电机振动响应曲线

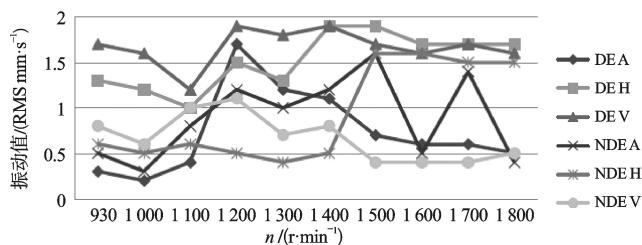


图 13 弹性支撑优化后发电机振动数据

(2) 改变共振区工作状态。

改变系统固有频率固然可以从根本上解决共振问题,但风力发电机组工作转速范围较大,由于弹性支撑承载能力的限制,将直接约束弹性支承刚度与电机重量匹配优化,如调整过大会导致弹性支承失效。因此,在优化设计中,低工作转速下出现共振可能是不可避免的,为确保发电机共振区正常运行,减弱或排除共振区振动较大对发电机的影响,可以从以下方面进行优化:

① 改变现有控制系统运行方式,不在共振区长时间运行,控制系统需做到当转速达到与固有频率一致时迅速提高或降低转速;

② 提高发电机转子系统动平衡精度,采取精细动平衡方法或现场动平衡,减小转子系统不平衡量,最大限度减小振动激励,从而可以减小共振区振动幅值。该方法在工程实际中被广泛应用;

③ 增加发电机系统阻尼。由于阻尼能够减小振动能量沿结构的传递,本研究应用高能量耗散机理降低共振区域的振动幅值。实践证实,增大系统阻尼对于共振区振幅抑制作用明显,但远离共振区后,阻尼对振幅影响大大降低。

2.4 发电机轴承损坏引起的振动

发电机轴承因负载过重、润滑不良、安装不正确、轴电流、异物进入等原因,将会导致轴承出现磨损、表面剥落、点蚀、碎裂、锈蚀、胶合等问题,进而引发轴承运行振动^[10]。系统可以通过异响、运行温度等对轴承振动进行监测,但仅能对较为严重的轴承损伤进行粗劣判断,并且时效性差。由于轴承各组成部分拥有各

自的特征频率,应用频谱分析可以更准确、更及时地对轴承运行情况进行诊断,并可以进行早期故障预警。本研究根据故障检测情况,有针对性地调整维护方案与维护周期,以提高机组稳定性与使用率。

以兆瓦级双馈发电机普遍使用的滚动轴承为例。当轴承内圈、外圈、保持架、滚珠出现故障时,会在振动频谱中出现相应的特征频率。滚动轴承特征频率表如表2所示。

表2 滚动轴承特征频率表

损坏部位	特征频率/Hz
外套	$0.5Z \frac{n}{60} (1 - \frac{d}{D} \cos \beta)$
内套	$0.5Z \frac{n}{60} (1 + \frac{d}{D} \cos \beta)$
滚珠	$\frac{D}{d} 0.5Z \frac{n}{60} [1 - (\frac{d}{D} \cos \beta)^2]$
保持架	$0.5Z \frac{n}{60} (1 - \frac{d}{D} \cos \beta)$

注: Z —滚珠或滚柱数目; n —转速, r/min; d —滚珠直径, mm; D —滚珠分布直径, mm; β —轴承压力角

2.5 发电机其他因素引起的振动

除上面提及的影响振动的因素外,双馈发电机振动还受到定转子不对称、气隙不均匀、电流谐波以及径向力波等电磁因素影响。但鉴于目前双馈发电机电磁设计已经趋于成熟,通过传统测试方法完成也可以进行检测,并且该类故障在目前测试中很少发生,故本研究不作过多阐述。

3 结束语

本研究通过对某双馈机组发电机大量的振动测试与频谱分析,对双馈发电机运行中常见的对中、平衡、弹性安装与轴承故障引起的振动问题进行甄别,

结合现有双馈发电机设计、制造现状与机组运行特点提出了相应的解决方案,并利用ADAMS软件进行了仿真评估与分析。对比测试结果显示,该方案取得了良好的减振效果。经研究发现,双馈风电机组结构与运行特点对发电机振动影响很大,传统电机设计与制造经验存在一定的不足。

风电机组中双馈发电机振动故障是一个复杂的问题,受到电机自身、机组其他部件与机组运行特点的共同影响,为此需要加强对在线振动监控的研究与投入,全面掌握运行情况,才能确保双馈发电机正常运行并尽可能提高其使用寿命。

参考文献(References):

- [1] 刘木清. 双馈风力发电机振动故障分析和实例处理[J]. 上海大中型电机, 2012(1): 71-75.
- [2] 陈纪军,尹曾锋,张越雷,等. 1.5 MW 双馈风力发电机振动研究[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(3): 17-19.
- [3] 刘 宇,谭 伟,闻 婧. 大型双馈风力发电机振动特性分析与故障诊断[J]. 风机技术, 2012(4): 56-59.
- [4] 刘建勋,胡伟辉,林 胜,等. 双馈式风力发电机减振系统的优化[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(3): 29-32.
- [5] 任玉亭. 振动检测技术在风力发电机组的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(2): 8-12.
- [6] BURTON T. 风能技术[M]. 武 鑫,等译. 北京:科学出版社, 2007.
- [7] 陈永校,诸自强,应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1987.
- [8] 董 宵. 转子系统不对中故障的振动特性分析与实验研究[D]. 沈阳:东北大学机械工程与自动化学院, 2010.
- [9] 陈 燕. 高速电机振动处理及原因分析[J]. 电机技术, 2010(6): 37-40.
- [10] 沈标正. 电机故障诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

温 斌, 全世伟, 程林志, 等. 风电机组双馈发电机振动故障分析[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 1071-1076.

WEN Bin, TONG Shi-wei, CHENG Lin-zhi, et al. Vibration analysis of doubly-fed induction generator for wind power[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 1071-1076.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>