

[风力发电机组]

风力发电机组系统振动故障诊断及减振方法

文/刘蕴华

中核汇能河北新能源有限公司

风力发电机组系统庞大，受力情况复杂，容易产生各类振动。振动前期如果不进行有效的干预，会在共振情况下对风电机组的机械结构造成影响。因此，通过实时监控与数据分析能够对振动故障进行有效识别，并提前干预，保障风电机组运行安全。研究中重点对振动故障诊断技术中的时域和频域进行具体分析，能够为后续的减振方法提供参考。

风电是常见的可再生能源，风电机组建设是我国能源替代战略的重要实现路径。由于受力不均衡等原因，风电机组系统振动不可避免，甚至形成损坏事故。为此，本次研究在风电机组的运行中针对关键节点（叶片、轴承和齿轮箱）等振动情况进行实时监控，并针对检测结果对产生振动故障的原因进行分析，为实施对应的减振方法提供必要保障。

风力发电机组系统振动故障类型与成因分析

风力发电机组系统发生振动故障的根本原因在于受力不均衡。风电机组在运行中，受到的风力风向存在多变且不均衡特性。同时，叶片沿横轴转动时也会产生振动。当振动在前期无法得到有效修正与遏止时，则会在共振效应的情况下产生较大力矩和应力，进而降低风电机组使用寿命，严重时甚至会直接造成机组的损毁。基于此，对风电机组叶片进行受力分析是判定振动故障的关键。当叶片转动时，机组轴心离心力可以表示为

$$F = t_m R \Omega^2 \quad (1)$$

式中， R 为不均衡受力点距轴心的距离， m ； t_m 为不均衡质量， kg ； Ω 为叶片转动速度， rpm/min ； F 为不均衡离心力。

受到自身重量的影响，叶片及轴承在垂直方向

上的离心力被重力与支持力所抵消，可能的振动多体现在水平方向上，其分力表示为

$$F(t) = F \sin(u + \Omega t) \quad (2)$$

式中， u 为离心分力角度值，度； t 为计算时刻， s ； $F(t)$ 为 t 时刻叶片在水平方向上的离心力分力。

其中计算时刻一般以叶片通过风力发电机组垂线位置后计算。当叶片与水平分力之间的夹角在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间时，离心力的水平分力对切向振动处于激励作用，而水平分力夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 之间时则对于振动处于抑制作用。此时，风电机组轴承在水平面上的振动可以简化为类弹簧的简谐运动，按照简谐运动的微分方程，可以对风电机组的自振频率进行求解，具体为

$$my + dy + sy = F(t) \quad (3)$$

$$X_{\max} = \frac{X_s \sqrt{ms}}{d} \quad (4)$$

式中， m 为风电机组总质量； d 为阻尼系数； s 为类弹簧的刚度系数； y 为质量 m 与平衡点间的距离； X_s 为平均振幅； $X_{\max}$ 为最大振幅。

其中， m 、 s 和 y 均在风电机组的设计与施工中予以明确，属于定值，通过对水平分力 $F(t)$ 的计算后可以对阻尼系数进行求解，从而通过式（4）对具体的振幅进行分析。

通过上述的计算不难发现,风电机组在运行中产生振动不可避免。按照建设要求,风电机组在设计的过程中也需要考虑振动的裕量,在不超过限值的情况下所产生的振动不会对其运行与安全造成影响。如果振动幅度超过限制标准,则可以认定其产生了振动故障,需要第一时间予以排除,甚至需要通过停机检修等方式进行修复。这就需要对风电机组的运行振动进行实时监控,并进行有效的振动故障预警。主要的振动形式包括扭转振动和切向振动两种。扭转振动主要是指风电叶片在转动的过程中,塔架和叶片重心之间的力矩会随之变化,这种变化导致转动中叶片受力分力呈周期性变化,进而表现出周期性振动现象。切向振动的成因更为复杂,叶片受到风力的作用而产生转动,大部分风力会转变为叶片的动能,但在风向方向上依然存在不为零的分力。此部分分力会造成叶片的形变,在叶片弹性的背景下,叶片在形变-恢复的过程中产生与主轴垂直的切向振动。切向振动与叶片转动的速度、切向受到的力差等因素相关,具体为

$$H = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \times \sin(\Omega t) \quad (5)$$

式中, H 为切向振幅; $F_{\min}$ 和 $F_{\max}$ 分别为叶片切向分力的最大值和最小值。

基于时域与频域分析的振动故障诊断技术

通过对风电机组振动产生原因的分析,可以发现设备的振动不可避免,对风电机组进行有效的监控则是防范振动故障的关键。从现有的风力机组振动故障的诊断技术来看,利用传感器搜集设备振动信息,并在振动信号分析的基础上形成对故障可能的分析是一种可行路径。在实际的振动故障诊断中主要包括时域分析和频域分析等两种。

1. 基于时域分析的振动故障诊断

利用振动传感器对风电机组振动情况进行监测,可以形成如图1的风电机组简谐振动示意图。该图按照系统的运行时间给出对应的振幅,其中振幅为正值时表示叶片沿主轴向上运动,为负值则表示叶片沿主轴向下运动。

时域分析的核心在于利用统计技术对系统振幅的均值、方差和均方值等进行求解,从而确定简谐振动的削减值。利用真实值与削减值进行求和后可以获得振幅的波形指示,即异常振幅,如图2所示。

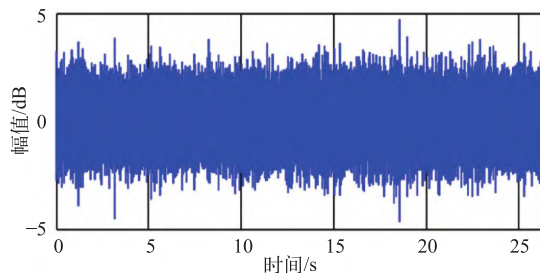


图1 风电机组简谐振动示意图

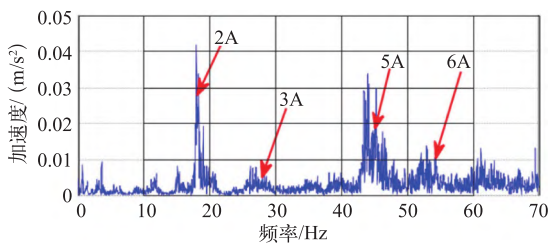


图2 风电机组波形指示示意图

利用振幅的真实值与削减值进行求和后,可以消除平均振幅对图像带来的影响,进而使得振幅异常值能够被更为轻易地识别,从而对可能存在的异常振动做出判断,也可以根据异常的程度对下一步措施进行指导。从图2中可以发现,经过时域分析后,振幅随时间的变化可以得到清晰的展示。图2中的标记点位均可以看做振动故障识别的依据,并可以进一步根据振动异常所表现的不同形式对振动产生的原因与具体处置措施进行安排。如图2中2A点位,振幅极度攀升且快速降低,从这一情况可以判断出叶片的振动是偶然外力所导致的,如飞鸟撞击、风力偶然增强。针对此类因素造成的振动故障可以不做进一步处置,当偶然外力消除后振动故障随之消失。又如3A和6A点位的振动属于小幅度振动,且持续时间较长,可能产生的原因来源于叶片共振或轴承转速不均衡导致的。此时可以通过降低风电机组负载的方式予以消除。图2中5A点的振动幅度较高且持续时间较长,造成此种振动故障的原因在于产生共振振动,对于风电机组的影响较大,需要通过提高负载提高叶片阻力,破坏共振条件或者停机检修等方式予以消除。

2. 基于频域分析的振动故障诊断

时域分析是一种常见且有效的诊断方式,但在实际应用中此种诊断方式更多的是对结果进行分析,对于故障预判以及故障原因分析上则存在一定

的不足。基于此，除时域分析外还可以利用频域分析对风电机组的振动信号进行进一步的处理，从而获得更为精准的故障诊断信息。甚至在引入机器学习等人工智能手段后，还可以根据历史运行数据对未来可能发生的振动故障进行一定程度的预测，从而通过提前干预的方式对避免发生振动故障。在频域分析技术的应用中，主要包括了如下几个方面。

(1) 傅里叶变换

在获得振幅数据后，通过傅里叶变换将周期信号转化为简谐信号，具体计算方式为

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \times \sin(2\pi kft + O_k) \quad (6)$$

式中， $x(t)$ 为傅里叶变换输出结果； A_0 为信号的直流分量； $\sin(2\pi kft + O_k)$ 为谐波分量，其中 k 取 $1, 2, \dots, n$ ； A_k 为谐波分量幅值角； f 为基准频率； O_k 为谐波分量相位角。

通过傅里叶变换可以将无规律信号按照 $0 \sim 1$ 的离散程度转变为计算机可以有效识别的周期性信号，进而使得风电机组振幅数据变换成以时间为横轴的加速度数据，加速度相较于振幅能够更为真实地展示风电机组的受力情况，进而对于故障的研判具有积极意义。

(2) 倒频谱分析

在完成傅里叶变换后，利用倒频谱分析进行倒数变换，对周期性数据中的影响元素进行提取。通过倒数分析后，能够将异常加速度点位转变为周期内唯一的倒谱点。该点位在物理意义上属于异常加速度的起始点，在振动诊断中则可以作为振动故障的判断基点。基于上述的分析能够实现对风电机组振动故障时间点的精确定位，进而对不同的振动故障类型进行进一步分析。

(3) 小波包变换

在傅里叶变换与倒谱分析后，可以确定振动故障的类型与发起时间，但依然需要通过进一步分析消除噪声影响以提高故障检出的有效性与准确性。在具体的技术应用上：首先，需要根据信号的特征进行小波分解，分解的依据按照固定频率波段特征的提取结果，如随机选取 $0 \sim 60$ min内的波动数据，按照 10 Hz为分类依据，对波动数据进行分类。分类后将全部所需要分析数据纳入到分类小波内，如果出现新的波段则形成额外的数据集。其次，建立

波形函数，依据最大分类逐次消除的方式对波段分组进行结果返回。当波形函数处于最大分类数据集内，函数则返回“0”，如果在范围之外则返回“1”。最后，按照上述原则保留特定波段的最后一个数据集，该数据集反馈至故障信号时域图内则成为去除噪声影响后的故障判断结果。按照该结果与时域分析进行碰撞可以对振动故障检测系统的结果进行修正，保障结果的可靠性。

风力发电机组系统减振方法

针对风电机组振动故障的原因，结合风电机组的结构特征，其在运行中虽然无法完全避免振动的发生，但采取有效的措施可以避免振动带来的可能危害，进而保障风电机组的平稳运行，并延长其使用寿命，具体包括了如下几方面减振方法。

(1) 主结构的维养与更换

对于风叶失衡或损坏的问题，可以通过对风叶进行平衡处理或更换损坏的风叶来减轻振动。平衡处理包括调整风叶的安装角度和质量分布，以确保风叶在旋转过程中产生的力矩平衡。更换损坏的风叶时，应选择与原风叶相匹配的新风叶，并按照规定安装要求进行安装。与此同时，轴承故障也是导致风电机组振动的重要原因之一。为减轻振动，应定期对轴承进行检查和维护。一旦发现轴承损坏或磨损严重，应及时更换新的轴承。此外，要确保轴承的润滑良好，以减少摩擦和磨损。

(2) 稳定结构的加固

针对风机塔架的不稳定问题，可以采取加固措施来提高其稳定性。例如，在风机塔架的基础部分增加钢筋混凝土结构，以增强基础的承载能力；检查并紧固塔架的连接件，防止松动和脱落；在塔架表面涂抹防腐涂料，以延长其使用寿命等。此外，在风电机组的设计与建设中也可以采用加固技术对其进行强化设计，并确保施工效果。机组结构的设计对于减轻振动具有重要意义。在设计过程中，应注重结构的平衡性和对称性，避免出现不平衡的情况。同时，要增加机组的刚度，优化结构设计，以减少振动现象的发生。此外，还可以通过优化旋翼系统的设计来减轻振动，如调整螺旋桨的叶片角度和形状，以提高其气动性能并减少振动。对于减振材料的使用也是在设计与施工中避免振动故障的有

效措施。在风电机组的安装过程中，可以使用减震支架、减震垫等装置来减少机组的振动。这些装置通过其弹性材料和结构设计，能够有效降低机组的振动传递到周围环境，还可以在机组周围增加吸音材料来吸收噪声并降低振动对周围环境的影响。

(3) 运行状态的调整

转速太低或太高都可能导致振动现象的发生。因此，应定期检查转速控制系统的运行情况，及时发现问题并进行修理。同时，要根据实际情况对转速进行调整，使其尽量符合设计要求，以减少振动问题的发生。

结束语

本文首先通过受力分析对风电机组振动产生的原因和振动故障的主要类型；其次分别对时域分析和频域分析两种振动故障检测技术的具体应用进行详细介绍，重点在算法的分析和应用效果；最后，结合常见的振动故障和风电机组的结构特点，从主要部件的维护、稳定结构的加固和运行状态的调整

三个方面给出可行的治理对策。**EA**

(收稿日期：2024-07-01)

参考文献

[1] 何玉灵, 徐明星, 张文, 等. 气隙静偏心故障对永磁风力发电机定子绕组振动的影响[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22 (1): 83-88.

[2] 邓亦峰. 风电场双馈风力发电机异常振动故障及排除措施[J]. 仪器仪表用户, 2023, 30 (10): 95-97.

[3] 朱广贺, 朱智强, 袁逸萍. 基于振动传感器的风力发电机故障检测算法[J]. 传感技术学报, 2023, 36 (1): 108-112.

[4] 张利慧, 李晓波, 俎海东, 等. 风力发电机组滚动轴承故障振动诊断方法综述[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40 (3): 7-12.

[5] 魏协奔, 卢旭锦, 孙培明, 等. 浅析风力发电机组振动状态监测与故障诊断[J]. 中国设备工程, 2021, (15): 142-143.

(上接第 41 页)

在低假阳性率的情况下，本文方法依然能够保持较高的真阳性率，充分证明了其在捕捉客户标签关键信息和处理复杂电力营销数据方面的显著优势。这种优势源于本文方法在特征提取和分类算法上的设计。本文方法通过灰色关联分析的方式更准确地提取特征和优化分类算法，灰色关联分析可以根据已有的少量数据来分析不同用户用电行为之间的关联程度，且其能够动态适应数据的变化。这使得本文方法能够更精确地识别客户标签，从而在实际应用中展现出更高的实用价值。

结束语

本文研究构建电力营销信息数据集，采用灰色关联分析方法计算指标间关联度，成功实现客户信息的多维度标签分类。该方法有效提升分类准确性和稳定性，为电力企业描绘出深入且全面的客户画像，助力企业实施更有针对性的营销计划与服务优化措施。通过这一方法，企业能更好地理解客户需求，优化服务体验。未来，将继续探索更先进的灰色关联度分析技术和计算模型，力求更深层次地

挖掘数据潜力，增强分类的稳定性和可靠性，为电力企业的营销决策提供有力支持，推动企业持续发展。**EA**

(收稿日期：2024-11-21)

参考文献

[1] 梁哲辉, 殷秀颜, 李韞莛. 电力营销客户标签分类方法优化设计[J]. 信息技术, 2023(5): 148-152.

[2] 杨峰, 罗尉丹, 李仰杰. 基于量子竞争决策算法的电力营销信息多标签分类方法[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(3): 100-103.

[3] 曹斌. 基于决策树分类算法的电力营销数据异常识别方法[J]. 长江信息通信, 2024, 37(9): 99-101.

[4] 赵天宇. 电力市场化改革对新能源发电企业的影响分析及策略[J]. 中国战略新兴产业, 2024(23): 103-105.

[5] 江腾飞. “新电改”背景下YF电厂电力营销策略探究[J]. 能源科技, 2024, 22(2): 90-93.