[风电机组]

风电机组偏航性能异常及检修方法研究

文/甘肃中广核风力发电有限公司　吴　春　李　志　杨　东　邓牛娃

偏航系统是大型风力发电机组最为重要的子系统。通过分析风力发电机组能量捕获原理与偏航系统能量捕获原理，明确偏航系统造成能量损失的原因，在此基础上，提出了一套机组偏航系统性能异常判别方法，制定了较为适当且实用性较强的状态检修策略。

由于太阳辐射不均，造成地表空气温度不同，不同区域的大气压力存在差异，在空气水平气压梯度差异的作用下，空气沿与地表平行的方向进行流动，产生了风，风的动能叫风能。19世纪晚期，美国的Brush开发并制造了第一台直流风力发电机组，额定功率为12 kW。从2006年开始，风力发电凭借着特有的优势受到越来越多的重视，机组的单机容量开始逐渐增大，风力发电占总发电量的比重随着风力发电机组技术的进步越来越大。通常单机容量接近1 MW或者1 MW以上的机组称为大型风力发电机组，大型风力发电机组是目前风力发电的主流。

目前主流风力发电机依据分类标准的不同，分为以下几种类型：①按照叶片数量分为两叶片和三叶片以及多叶片机组；②按照传动结构分为直驱与双馈机组；③按照功率控制类型分为主动变桨变速恒频机组与定桨失速型机组。

不同的机组有不同的特点，针对不同的风况区域选择不同的机组类型。由于目前风力发电越来越看重经济性与能量利用效率，投运的机组大都是采用带有偏航系统的主动对风型机组。机组偏航系统是机组对风带负荷的重要模块，若机组偏航系统效率低，会直接影响发电量，并使机组载荷出现波动，影响机组可靠性。所以，对机组偏航系统性能异常情况进行判别，并根据评估结果进行检修具有十分重要的意义。

风电机组偏航系统

1．偏航系统理论

大型风力发电机组的整体结构主要由基础、塔架、机舱、轮毂和叶片五部分组成。如图1所示。

风力发电机组的能量来源是机组叶轮捕获的风能，可以假定机组自流风面的来风速度保持恒定不变，且风向垂直于风机叶轮的扫风平面，但是在实际应用过程中，风速和风向都是在不断改

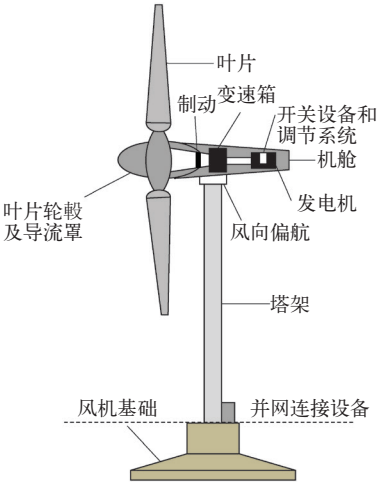

图1　风力发电机组整体结构

变的，具体如图2所示。

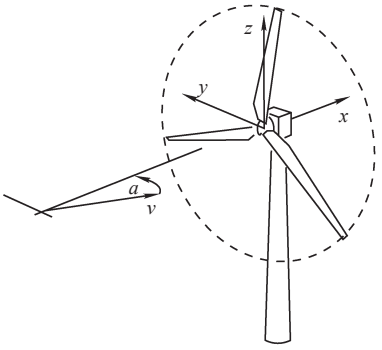

图2　风力发电机组叶轮迎风与来流风速的角度示意图

风速大小的变化由机组最佳叶尖速比追踪系统的转速-转矩控制进行应对。对风向的变化对风机的运行造成的影响情况进行分析。设机组扫风平面与来流风平面之间的夹角为α，则来流风在扫风平面内形成的垂直分量v_x为

$$v_x = v\cos\alpha \tag{1}$$

在考虑了风向偏差的情况下，风轮捕获的能量密度总量P_x可表示为

$$P_x = 2\rho A_d v^3 a(1-a)^2\cos^3\alpha \tag{2}$$

就是说，由风向偏差所造成的能量损失为$(1-\cos^3\alpha)$，理论上，风向偏差造成的能量损失对应关系见下表。

表　风向偏差造成的能量损失对应关系

风向偏差角度(°)	能量损失百分比(%)
3	0.41
5	1.14
10	4.49
15	9.88
20	17.02
30	35.05
40	55.05
50	73.44

2．偏航系统构造

小型风力发电机组偏航系统简单，常采用尾舵对风，即将尾翼装在尾杆上，与风轮轴平行或成一定的角度，尾舵调向结构简单，调向可靠，制造容易，成本低。由于尾舵调向装置结构笨重，很少应用于大型风力发电机组，大多数用于距离电源较远的山区、牧区的居民用户，或者分散式的测量装置。偏航系统的主要机械结构包括偏航轴承（或称回转支撑）、偏航伺服电动机、齿轮组、法兰、制动装置与保护装置，一般的结构如图3所示。

整个风机机舱安装在偏航轴承上，轴承内齿圈与塔筒用螺栓紧固相连，外齿圈与机舱相固

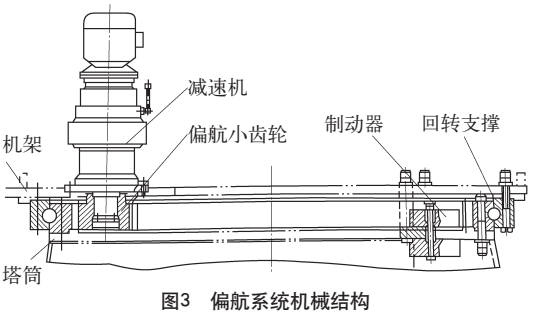

图3　偏航系统机械结构

定。当需要偏航动作时，偏航电动机开始工作，风力发电机组的伺服电动机一般有两个、四个或六个，多为对称分布，以达到受力平衡的目的。为了节省设计空间，伺服电动机一般选用转速较高的电动机，但是偏航动作的特点是转速低，转矩大，所以偏航电动机与机舱之间需要有减速器进行机械传动，来满足设计需求。

3．偏航系统异常及故障原因

（1）齿轮磨损故障

齿轮齿圈磨损的原因不同，大致分为以下几个部分：齿圈是通过齿轮之间的啮合而运行的，一旦齿轮中间混入杂质，就容易造成磨损而缩短齿轮的使用寿命；齿轮在工作时需要一定剂量的润滑剂，避免出现干摩擦的现象。润滑剂的缺失或者使用不到位都会在一定程度上缩短齿轮的使用寿命。

（2）制动系统液压管路渗漏

我国风电场中很多大型风电机组的偏航系统在使用两年之后，就会出现渗漏油故障。就算及时发现更换新的部件，依然反复出现此种情况，工作人员常常会采用换刹车片的方法来延长风电机组的寿命。实际上，风电机组出现渗漏是管路的接头松动，或机组中的密封件损坏造成的。

（3）偏航制动系统压力不稳定

液压系统释放压力，在风电机组偏航对风时，为偏航制动器提供较小的压力，以保障偏航系统平稳无冲击的安全工作。这一过程中容易发生的故障是液压系统为偏航制动系统提供的压力不稳定。原因主要是液压系统的管路出现渗漏，或者蓄能器故障、元件损坏等。

（4）齿轮减速机产生异常噪声

偏航系统的齿轮减速机松动时会产生比较大的噪声。产生噪声的原因还有缺失润滑剂、齿轮齿面损坏以及减速器的油位过低等。齿轮减速机作为一种高损耗的先进设备，无论是出现噪声，还是其他异常，都不应忽视，以防减速机带着故障工

作而最终损耗严重，无法使用。

（5）偏航定位不准确

偏航系统精确定位是风电机组正常工作运行的基础，当出现以下情况时，会导致偏航定位不准确：风向传导的信息不准确；偏航系统齿轮之间的间距偏大；偏航的叶尖阻尼力矩处于不合适位置；偏航制动的力矩小于风电机组的规定数值等。为此，应及时检修，更换风向标，更新力矩设计值，以免风电机组出现更大的问题。

（6）偏航计数器故障

风电机组的偏航系统中都有偏航计数器，它的作用是记录运转圈数。当偏航圈数达到提前设定好的数值时，风电机组会自动解缆，保护机组不受损害。

机组偏航系统性能数据筛选

风力发电机组的运行工况比较复杂，当某些指标超过阈值时，机组进行限负荷运行，某些突发工况也会导致机组存在负荷异常的情况。因此，首先对机组运行数据进行筛选，剔除由自身其他因素限负荷、电网限负荷等异常因素产生的运行数据，剔除后的数据才能准确表征机组的运行状态，准确地对风力发电机组偏航系统性能进行评估。

机组在非正常运行时有如下特征：桨距角增大，功率较正常功率明显偏低。针对这一特点，提出如下数据筛选方法：①发电机组运行状态标识为正常并网运行，该条判据是为了筛除机组故障等情况，提供机组正常并网运行的数据；②剔除功率小于额定功率95%并且桨距角大于最小桨距角的运行数据，该条判据是为了剔除机组限功率运行的数据；③机组并未存在偏航等动作，该条判据是为了筛除机组动态偏航等工况下的数据，这些工况下的数据因为机组动作，性能受一定影响，不在本模型评估的范围之内。

机组偏航系统检修策略

1．偏航控制准确性分析

某山地风电场三个月的风向偏差角度对风波形如图4所示。

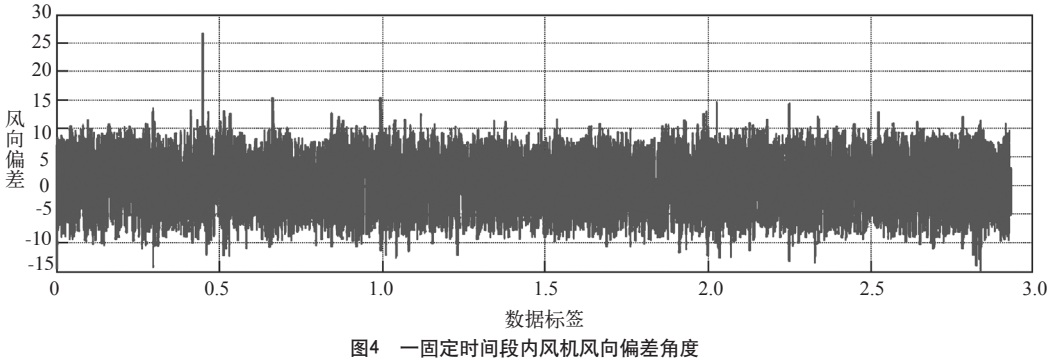

图4　一固定时间段内风机风向偏差角度

应用对机组一段运行时间内风向偏差的平均值统计对机舱位于风向扇区的位置进行表征，平均值偏离0°越大，表明机舱离中心位置越远，偏航对风性能也就越差。平均值的计算方法为

$$\mathrm{Deg}_{\mathrm{anr}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\mathrm{Deg}_i}{N} \tag{3}$$

式中，$\mathrm{Deg}_{\mathrm{avr}}$是风向偏差平均值；$\mathrm{Deg}_i$是第$i$个风向偏差的采样数值；$N$是统计时间内的对风角度采样个数。

应用对机组一段运行时间内风向偏差的标准差统计对机组风向偏差的离散程度进行表征，标准差越大，表明机舱对风角度的离散程度越大，风向偏差角度的极大值较大，同时较大的风向偏差角度情况也越多，偏航对风性能也就越差。标准差的计算方法为

$$\mathrm{Deg}_{\mathrm{std}}=\sqrt{\frac{1}{N-1}\times\sum_{i=1}^{N}(\mathrm{Deg}_i-\mathrm{Deg}_{\mathrm{anr}})^2} \tag{4}$$

式中，$\mathrm{Deg}_{\mathrm{std}}$是风向偏差标准差；$\mathrm{Deg}_i$是第$i$个风向偏差的采样数值；$N$是统计时间内的对风角度采样个数。

通过对数据的统计，可得到用$\mathrm{Deg}_{\mathrm{avr}}$和$\mathrm{Deg}_{\mathrm{std}}$对风机运行情况进行表征。$\mathrm{Deg}_{\mathrm{avr}}$评价机组偏航系统对风的准确性，其绝对值越小越好。$Deg_{std}$评价机组对风策略是否足够适应风况，其值越小越好。

2．偏航系统对风误差分析

偏航误差是一种不会报出的故障，无法从机组的数据中直接得出，需要从能量的角度进行分析。考虑了风向偏差之后机组捕获的总能量密度为

$$P_{\mathrm{x}}=2\rho A_d v^3 a(1-a)^2\cos\alpha \tag{5}$$

当机组存在偏航误差时，机组最大出力点存在偏移，即$\alpha=a$时，机组的出力性能达到最大。找到机组最大出力风向，检测其与0°的偏差，即可确定机组是否存在偏航误差，按照这一思路，使用如下分析方法：

1）通过机组SCADA系统获取机组历史运行数据参数，数据包括：风向偏差角度、风速、发电机有功功率和机组年平均风速等参数。

2）选取最常用的风向偏差角度的区间为（－15°，＋15°），取分析间隔为5°，将该区间进行等分，则该区间可以分为六个区间，再加上（－180°，－15°）与（15°，180°）两个区间，将风向的所有可能角度进行区间划分。

3）按照功率曲线的计算方法，使用bins法计算不同风向偏差区间下的功率曲线，式（5）计算每个区间下的平均风速v_j与平均功率P_j为

$$P_j=\frac{1}{t}\sum_{k=1}^{t}P_{j,k} \tag{6}$$

$$v_j=\frac{1}{t}\sum_{k=1}^{t}v_{j,k} \tag{7}$$

式中，$P_{j,k}$是满足第j个区间风速要求的第k个功率；$v_{j,k}$是满足第j个区间风速要求的第k个风速。

瑞利累积概率分布函数可以看作风频分布的统计函数。记需要计算的机组轮毂高度处的平均风速为V_{avr} m/s，则瑞利累积概率分布函数为

$$F(v_i)=1-\exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v_i}{v_{avr}}\right)^2\right) \tag{8}$$

$$FF=\sum_{k=1}^{t}\left[F(v_i)-F(v_{i-1})\right]\left(\frac{P_{i-1}+P_i}{2}\right) \tag{9}$$

$$P_i=\frac{FF_i}{FF_{\max}} \tag{10}$$

最终得到的P_i即为区间i的机组偏航出力系数。机组偏航出力系数P_i为0～1的区间，该区间的中间值即可表示机组偏航的误差角度。整体的思路是通过计算不同风向偏差区间内的功率曲线，表征机组各个区间内的机组出力情况；再通过瑞利分布与各个区间的功率曲线进行卷积，得出可以量化的出力能力表征参数FF；归一化处理之后得到不同区间的机组偏航出力系数，表征不同区间内的机组出力情况，值越大出力性能越好。

3．参数阈值设定与检修策略确定

通过上述分析，分别对偏航控制准确性与偏航系统对风误差进行了分析，得到了两组参数：风向偏差平均值与标准差；偏航误差角度和偏航能量损失参数。

第一组参数表征机组偏航系统是否存在机械故障或控制策略参数不符合具体风况。为了判断由该参数得出的性能异常机组，需要进一步的数据出力。3σ准则是最常用也是最简单的判别出大误差的准则，对于某一测量列，若各测量值只含随机误差，则根据随机误差的正态分布规律，残余误差落在±3σ以外的概率为0.3%，即在370次测量中有一次残余误差$|v_i|>3\sigma$。

第二组参数表征机组偏航系统是否存在偏航误差。第二组参数是一组绝对值，不存在设定阈值的问题，如果存在偏航误差，即为偏航系统异常，为了提升机组效率，应立即安排检修。

综合以上分析，制定如下的检修策略。

首先，需要定期进行全场风力发电机组偏航性能异常判别。每一季度将全场数据导出，计算得出四个指标，即风向偏差平均值、风向偏差标准差、机组偏航误差角度和机组偏航能量损失参数。

其次，通过评估结果，进行如下分析：①如果风向偏差平均值某台或数台出现超出3σ范围的情况，应立即登塔检查偏航机械结构，确保机组稳定、安全和高效运行；②如果风向偏差标准差值某台或数台出现超出3σ范围的情况，应分析问题机组的偏航控制参数设置，针对具体风况更改参数；③如果机组偏航误差角度不为0°，应针对机组风向传感器进行检修。检修过程中，首先排查风向标是否损坏；如未损坏；检查风向标是否对中；④当机组偏航误差角度不为0°的机组较多时，应先排查偏航能量损失参数较高的机组。

结束语

偏航系统作为风电机组的核心子系统，其性能的优劣不仅影响机组发电量的高低，同样决定着机组是否能够健康、稳定的运行。目前缺乏有效的手段判别风电场中偏航系统性能异常的机组，难以通过机组运行状态指导运维与检修。本文针对这一问题，从理论结合实际的角度，通过分析机组偏航系统运行原理，建立了一套基于SCADA系统机组运行数据的偏航系统性能异常判别模型，模型通过机组运行数据筛选，偏航控制准确性分析，偏航系统对风误差分析，提出了确定性能异常机组的方法，并依据异常机组的不同情况制定了针对性的检修策略。EA

（收稿日期：2020.11.22）