

## 风力发电基础知识

### 叶轮

风电场的风力机通常有 2 片或 3 片叶片，叶尖速度  $50\sim 70\text{m/s}$ ，具有这样的叶尖速度，3 叶片叶轮通常能够提供最佳效率，然而 2 叶片叶轮仅降低  $2\sim 3\%$  效率。甚至可以使用单叶片叶轮，它带有平衡的重锤，其效率又降低一些，通常比 2 叶片叶轮低  $6\%$ 。尽管叶片少了，自然降低了叶片费用，但这是有代价的。对于外形很均衡的叶片，叶片少的叶轮转速就要快些，这样就会导致叶尖噪声和腐蚀等问题。更多的人认为 3 叶片从审美的角度更令人满意。3 叶片叶轮上的受力更平衡，轮毂可以简单些，然而 2 叶片、1 叶片叶轮的轮毂通常比较复杂，因为叶片扫过风时，速度是变的，为了限制力的波动，轮毂具有翘翘板的特性。翘翘板的轮毂，叶轮链接在轮毂上，允许叶轮在旋转平面内向后或向前倾斜几度。叶片的摆动运动，在每周旋转中会明显的减少由于阵风和剪切在叶片上产生的载荷。

叶片是用加强玻璃塑料 (GRP)、木头和木板、碳纤维强化塑料 (CFRP)、钢和铝构成的。对于小型的风力发电机，如叶轮直径小于 5 米，选择材料通常关心的是效率而不是重量、硬度和叶片的其它特性。对于大型风机，叶片特性通常较难满足，所以对材料的选择更为重要。

世界上大多数大型风力机的叶片是由 GRP 制成的。这些叶片大部分是用手工把聚脂树脂敷层，和通常制造船壳、园艺、游戏设施及世界范围内消费品的方法一样。其过程需要很高的技术水平才能得到理想的结果，并且如果人们对重量不太关心的话，比如对于长度小于 20 米的叶片，设计也不很复杂。不过有很多很先进的利用 GRP 的方法，可以减小重量，增加强度，在此就不赘述了。玻璃纤维要较精确的放置，如果把它放在预浸片材中，使用高性能树脂，如控制环氧树脂比例，并在高温下加工处理。当今，出现了简单的手工铺放聚脂，通过认真地选择和放置纤维，为 GRP 叶片提供了降低成本的途径。

### 偏航系统

风力机的偏航系统也称为对风装置，其作用在于当风速矢量的方向变化时，能够快速平稳地对准风向，以便风轮获得最大的风能。

小微型风力机常用尾舵对风，它主要有两部分组成，一是尾翼，装在尾杆上与风轮轴平行或成一定的角度。为了避免尾流的影响，也可将尾翼上翘，装在较高的位置。

中小型风机可用舵轮作为对风装置，其工作原理大致如下：当风向变化时，位于风轮后面两舵轮（其旋转平面与风轮旋转平面相垂直）旋转，并通过一套齿轮传动系统使风轮偏转，当风轮重新对准风向后，舵轮停止转动，对风过程结束。

大中型风力机一般采用电动的偏航系统来调整风轮并使其对准风向。偏航系统一般包括感应风向的风向标，偏航电机，偏航行星齿轮减速器，回转体大齿轮等。其工作原理如下：

风向标作为感应元件将风向的变化用电信号传递到偏航电机的控制回路的处理器里，经过比较后处理器给偏航电机发出顺时针或逆时针的偏航命令，为了减少偏航时的陀螺力矩，电机转速将通过同轴联接的减速器减速后，将偏航力矩作用在回转体大齿轮上，带动风轮偏航对风，当对风完成后，风向标失去电信号，电机停止工作，偏航过程结束。

## 风机的发电机

所有并网型风力发电机通过三相交流（AC）电机将机械能转化为电能。发电机分为两个主要类型。同步发电机运行的频率与其所连电网的频率完全相同，同步发电机也被称为交流发电机。异步发电机运行时的频率比电网频率稍高，异步发电机常被称为感应发电机。

感应发电机与同步发电机都有一个不旋转的部件被称为定子，这两种电机的定子相似，两种电机的定子都与电网相连，而且都是由叠片铁芯上的三相绕组组成，通电后产生一个以恒定转速旋转的磁场。尽管两种电机有相似的定子，但它们的转子是完全不同的。同步电机中的转子有一个通直流电的绕组，称为励磁绕组，励磁绕组建立一个恒定的磁场锁定定子绕组建立的旋转磁场。因此，转子始终能以一个恒定的与定子磁场和电网频率同步的恒定转速上旋转。在某些设计中，转子磁场是由永磁机产生的，但这对大型发电机来说不常用。

感应电机的转子就不同例如，它是由一个两端都短接的鼠笼形绕组构成。转子与外界没有电的连接，转子电流由转子切割定子旋转磁场的相对运动而产生。如果转子速度完全等于定子转速磁场的速度（与同步发电机一样），这样就没有相对运动，也就没有转子感应电流。因此，感应发电机总的转速总是比定子旋转磁场速度稍高，其速度差叫滑差，在正常运行期间。它大概为 1%。

## 同步发电机和异步发电机

将机械能转化为电能装置的发电机常用同步励磁发电机、永磁发电机和异步发电机。同步发电机应用非常广泛，在核电、水电、火电等常规电网中所使用的几乎都是同步发电机，在风力发电中同步发电机即可以独立供电又可以并网发电。然而同步发电机在并网时必须要有同期检测装置来比较发电机侧和系统侧的频率、电压、相位，对风力发电机进行调整，使发电机发出电能的频率与系统一致；操作自动电压调压器将发电机电压调整到与系统电压相一致；同时，微调风力机的转速从周期检测盘上监视，使发电机的电压与系统的电压相位相吻合，就在频率、电压、相位同时一臻的瞬间，合上断路器将风力发电机并入系统。同期装置可采用手动同期并网和自同期并网。但总体来说，由于同步发电机造价比较高，同时并网麻烦，故在并网风力发电机中很少采用。

## 控制监测系统

风力机的运行及保护需要一个全自动控制系统，它必须能控制自动启动，叶片桨距的机械调节装置（在变桨距风力机上）及在正常和非正常情况下停机。除了控制功能，系统也能用于监测以提供运行状态、风速、风向等信息。该系统是以计算机为基础，除了小的风力机，控制及监测还可以远程进行。控制系统具有及格主要功能：

- 1、顺序控制启动、停机以及报警和运行信号的监测
- 2、偏航系统的低速闭环控制
- 3、桨距装置(如果是变桨距风力机)快速闭环控制
- 4、与风电场控制器或远程计算机的通讯

## 风机传动系统

叶轮叶片产生的机械能有机舱里的传动系统传递给发电机，它包括一个齿轮箱、离合器和一个能使风力机在停止运行时的紧急情况下复位的刹车系统。齿轮箱用于增加叶轮转速，从20~50转/分到1000~1500转/分，后者是驱动大多数发电机所需的转速。齿轮箱可以是一个简单的平行轴齿轮箱，其中输出轴是不同轴的，或者它也可以是较昂贵的一种，允许输入、输出轴共线，使结构更紧凑。传动系统要按输出功率和最大动态扭矩载荷来设计。由于叶轮功率输出有波动，一些设计者试图通过增加机械适应性和缓冲驱动来控制动态载荷，这对大型的风力发电机来说是非常重要的，因其动态载荷很大，而且感应发电机的缓冲余地比小型风力机的小。

## 异步发电机

永磁发电机是一种将普通同步发电机的转子改变成永磁结构的发电机，常用的永磁材料有铁氧体(BaFeO)、钕钴5(SmCo)等，永磁发电机一般用于小型风力发电机组中。

异步发电机是指异步电机处于发电的工作状态，从其激励方式有电网电源励磁发电(他励)和并联电容自励发电(自励)两种情况。

1 电网电源励磁发电：是将异步电机接到电网上，电机内的定子绕组产生以同步转速转动的旋转磁场，再用原动机拖动，使转子转速大于同步转速，电网提供的磁力矩的方向必定与转速方向相反，而机械力矩的方向则与转速方向相同，这时就将原动机的机械能转化为电能。在这种情况下，异步电机发出的有功功率向电网输送；同时又消耗电网的无功功率作励磁作用，并供应定子和转子漏磁所消耗的无功功率，因此异步发电机并网发电时，一般要求加无功补偿装置，通常用并列电容器补偿的方式。

2、并联电容器自励发电：并联电容器的连接方式分为星形和三角形两种。励磁电容的接入在发电机利用本身的剩磁发电的过程中，发电机周期性地向电容器充电；同时，电容器也周期性地通过异步电机的定子绕组放电。这种电容器与绕组组成的交替进行充放电的过程，不断地起到励磁的作用，从而使发电机正常发电。励磁电容分为主励磁电容和辅助励磁电容，主励磁电容是保证空载情况下建立电压所需要的电容，辅助电容则是为了保证接入负载后电压的恒定，防止电压崩溃而设的。

通过上述的分析，异步发电机的起动、并网很方便且便于自动控制、价格低、运行可靠、维修便利、运行效率也较高、因此在风力发电方面并网机组基本上都是采用异步发电机，而

同步发电机则常用于独立运行方面。

### 偏航系统的设计

根据调向力矩的大小，可以进行齿轮传动部分的设计计算。当驱动回转体大齿轮的主动小齿轮的强度不能满足时，可选用两套偏航电机——行星齿轮减速器分置于风轮主轮的两侧对称布置，每个电机的容量为总容量的一半。齿轮传动计算可按开式齿轮传动计算，其主要的磨损形式是齿面磨损失效，如调向力矩较大，除按照弯曲强度计算之外，应计算齿面接触强度。

值得注意的是，大多数风机的发电机输出功率的同轴电缆在风力机偏航时一同旋转，为了防止偏航超出而引起的电缆旋转，应该设置解缆装置，并增加扭缆传感器以监视电缆的扭转状态。位于下风向布重的风轮，能够自动找正风向。在总体布置时应考虑塔架前面的重量略重一些，这样在风机运行时平衡就会好一些。

### 电机的切换

根据风速决定是选择小发电机并网发电，还是选择大发电机空转，若风速低于 8 米/秒，则小发电机并网运行且风机运行状态切换到“投入 G2”。如果风速高于 8 米/秒，则选择“空转 G1”运行状态。

#### 投入 G2:

小发电机接触器闭合，发电机并网电流由可控硅控制到 350A。一旦投入过程完成，可控硅切除，风机切换到“运行 G2”状态。

风电投入小发电机发电，如果平均输出功率在某一单位时间内太低，这是小发电机断开且风机切换到“等待重新支转”的状态。如果平均输出功率超过了限定值 110KW，则小发电机切除，风机运行状态切换到“G1 空转”。

#### G1 空转:

风机等待风速达到投入大电机的风速，一旦达到这个风速则风机就切换到“投入 G1”状态。

#### 投入 G1:

大发电机的接触接通。发电机的并网电流由可控硅将其限定在 350A。投入过程一结束，可控硅切除，风机切换到“运行 G1”状态。

#### 运行 G1

风机的大电机投入发电，如果功率输出在一定的时间内少于限定值 80KW，大发电机切除，风机的运行状态切换到“切换 G11-G12”状态。

#### 切换 G1-G2

大发电机的接触器切除小发电机的接触器接通，可控硅将发电机的电流限定到 700A，一旦投入过程完成，可控硅切除，风机转为“运转 G2”状态。

#### 等待再投入

如果小发电机的出力小于限定值，则此运行状态动作。此状态下，小发电机的接触器被切除，如果风速有效，风机就切换到“投入 G2”状态，如果风速低于限定值，风机将切换到“空转 G2”状态。

## 风机工作状态之间转变

### 风机工作状态之间转变

说明各种工作状态之间是如何实现转换的。

提高工作状态层次只能一层一层地上升，而要降低工作状态层次可以是一层或多层。这种工作状态之间转变方法是基本的控制策略，它主要出发点是确保机组的安全运行。如果风力发电机组的工作状态要往更高层次转化，必须一层一层往上升，用这种过程确定系统的每个故障是否被检测。当系统在状态转变过程中检测到故障，则自动进入停机状态。

当系统在运行状态中检测到故障，并且这种故障是致命的，那么工作状态不得从运行直接到紧停，这可以立即实现而不需要通过暂停和停止。

下面我们进一步说明当工作状态转换时，系统是如何动作的。

#### 1. 工作状态层次上升

紧停→停机

如果停机状态的条件满足，则：

- 1) 关闭紧停电路；
- 2) 建立液压工作压力；
- 3) 松开机械刹车。

停机→暂停

如果暂停的条件满足，则，

- 1) 起动机偏航系统；
- 2) 对变桨距风力发电机组，接通变桨距系统压力阀。

暂停→运行

如果运行的条件满足，则：

- 1) 核对风力发电机组是否处于上风向；
- 2) 叶尖阻尼板回收或变桨距系统投入工作；
- 3) 根据所测转速，发电机是否可以切入电网。

#### 2. 工作状态层次下降

工作状态层次下降包括 3 种情况：

(1) 紧急停机。紧急停机也包含了 3 种情况，即：停止→紧停；暂停→紧停；运行→紧停。

其主要控制指令为：

- 1) 打开紧停电路；
- 2) 置所有输出信号于无效；

- 3) 机械刹车作用;
- 4) 逻辑电路复位。

(2) 停机。停机操作包含了两种情况，即：暂停→停机；运行→停机。

暂停→停机

- 1) 停止自动调向;
- 2) 打开气动刹车或变桨距机构回油阀(使失压)。

运行→停机

- 1) 变桨距系统停止自动调节;
- 2) 打开气动刹车或变桨距机构回油阀(使失压);
- 3) 发电机脱网。

(3) 暂停。

- 1) 如果发电机并网，调节功率降到。后通过晶闸管切出发电机;
- 2) 如果发电机没有并入电网，则降低风轮转速至 0。

(三) 故障处理

工作状态转换过程实际上还包含着一个重要的内容：当故障发生时，风力发电机组将自动地从较高的工作状态转换到较低的工作状态。故障处理实际上是针对风力发电机组从某一工作状态转换到较低的状态层次可能产生的问题，因此检测的范围是限定的。

为了便于介绍安全措施和对发生的每个故障类型处理，我们给每个故障定义如下信息：

- 1) 故障名称;
- 2) 故障被检测的描述;
- 3) 当故障存在或没有恢复时工作状态层次;
- 4) 故障复位情况(能自动或手动复位，在机上或远程控制复位)。

(1) 故障检测。控制系统设在顶部和地面的处理器都能够扫描传感器信号以检测故障，故障由故障处理器分类，每次只能有一个故障通过，只有能够引起机组从较高工作状态转入较低工作状态的故障才能通过。

(2) 故障记录。故障处理器将故障存储在运行记录表和报警表中。

(3) 对故障的反应。对故障的反应应是以下三种情况之一：

- 1) 降为暂停状态;
- 2) 降为停机状态;
- 3) 降为紧急停机状态。
- 4) 故障处理后的重新启动。在故障已被接受之前，工作状态层不可能任意上升。故障被接受的方式如下：

如果外部条件良好，一此外部原因引起的故障状态可能自动复位。一般故障可以通过远程控制复位，如果操作者发现该故障可接受并允许起动风力发电机组，他可以复位故障。有些故障是致命的，不允许自动复位或远程控制复位，必须有工作人员到机组工作现场检查，这些故障必须在风力发电机组内的控制面板上得到复位。故障状态被自动复位后 10min 将自动重新启动。但一天发生次数应有限定，并记录显示在控制面板上。

如果控制器出错可通过自检(WATCHDOG)重新启动。

沧州天硕联轴器有限公司，是专业从事胀紧联结套、机械传动和机械密封研究、生产的企业。