



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

新能源与分布式发电

——新能源/分布式电源并网运行分析

主讲人：吴锴/周峻/何英杰/**刘俊**

单 位：西安交通大学电气工程学院

时 间：2016.03



电气工程学院

XJTU SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

第三部分简介

- ◆ 新能源/分布式电源并网运行分析（10学时）
 - ◆ 风力发电系统简介，风电并网潮流计算，分布式发电接入对电力系统的影响，风电规划理论等（授课8学时）
 - ◆ 分布式发电系统并网运行潮流计算（上机2学时）
- ◆ 答 疑：每周四7-8节
- ◆ Email: eeliujun@mail.xjtu.edu.cn
- ◆ Office: 电力工程系，东2楼137室
- ◆ 资 源: <http://gr.xjtu.edu.cn/web/eeliujun>
《新能源与分布式发电》课程资源



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 1

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

风能与风力发电原理

1.1 风电机组的能量获取

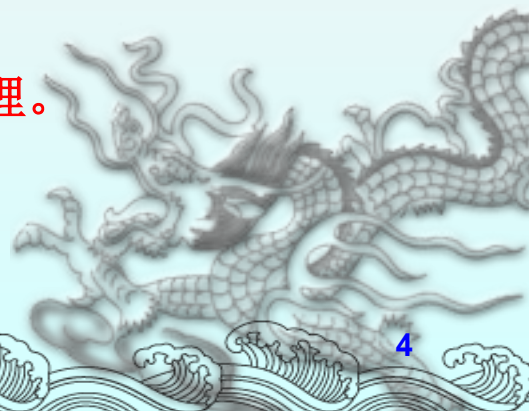
掌握风力发电的能量转换过程。

1.2 恒速风电机组的原理

掌握恒速风力发电机的基本原理。

1.3 变速风电机组的原理

掌握双馈风机和永磁直驱风机的结构和原理。



1.1 风电机组能量获取

据中国气象科学院预测，我国经济可开发风能资源为：

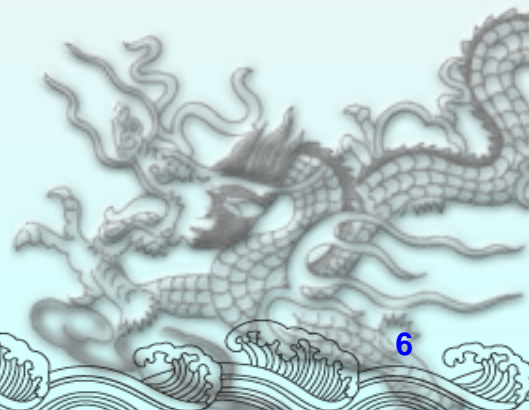
- 陆上约有**2.53亿**千瓦
(年电量5000亿千瓦时)
- 海上约有**7.5亿**千瓦
- 合计约**10亿**千瓦



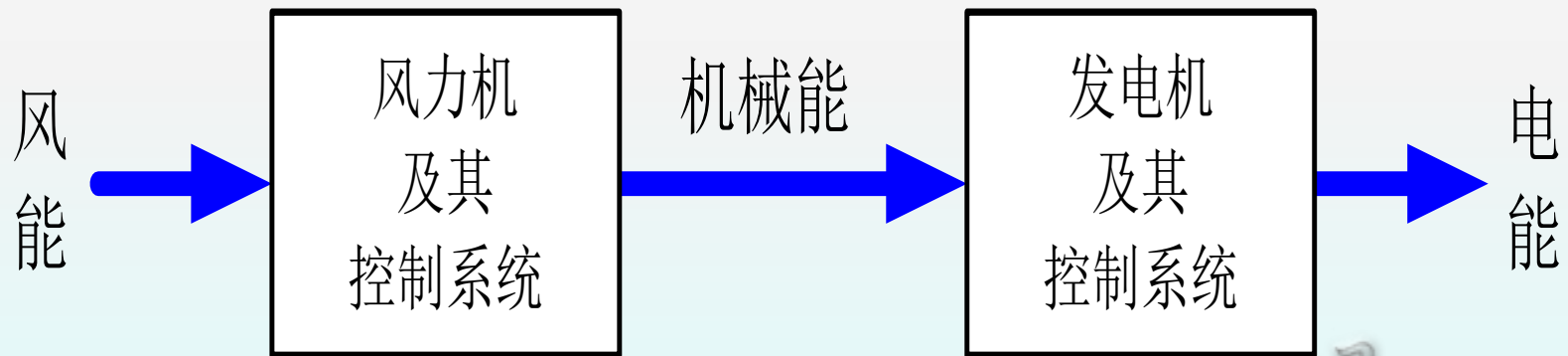
1.1 风电机组能量获取

◆ 风力发电的基本原理

- ◆ 风力发电的原理：利用风力带动风轮叶片旋转，再透过增速装置将旋转的速度提升，进而带动发电机发电。
- ◆ 风力发电机组的结构，包括风轮、塔架和机舱三部分。



风力发电系统：实现“风能—机械能—电能”转换的系统，称为风力发电系统，是一个非常复杂的能量转换系统，包括多学科的基础知识：空气动力学、流体力学、结构力学、机械学、电力电子技术、计算机技术、通信技术、电机技术、电网技术……

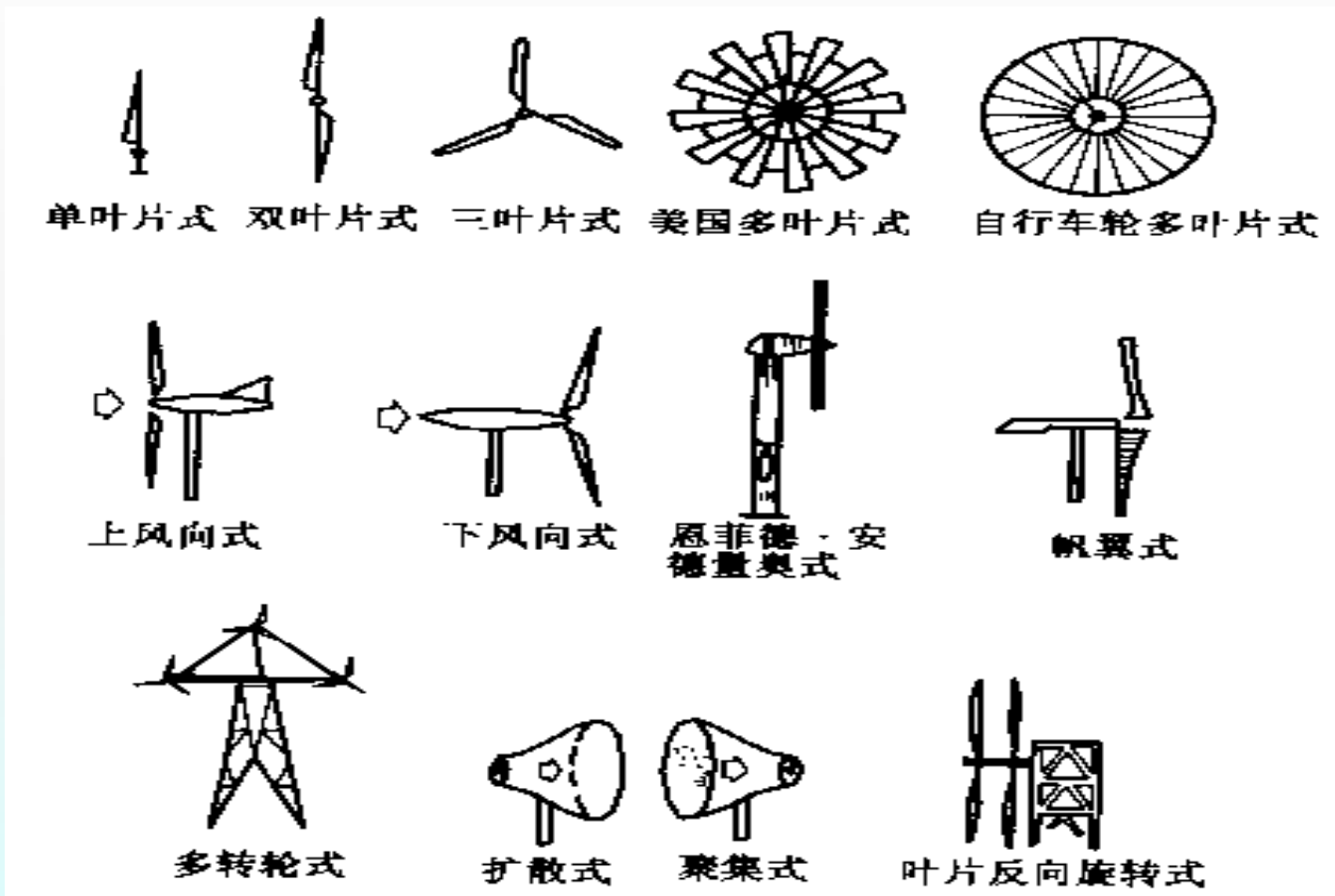


一、风力机的分类

- ◆ 1. 按转轴与风向的关系，风力机可分为两类：
 - ◆ 一水平轴风力机（风轮的旋转轴与风向平行）；
 - ◆ 一垂直轴风力机（风轮的旋转轴垂直于地面或气流方向）。



1) 水平轴风力机



2) 垂直轴风力机

虽然目前还没有大量商业化，但它有许多特点，如：

不需要塔架、发电机可安装在地面上、维修方便及叶片制造方便等。



垂直轴风力机

高空风电VS海上风电



一、风力机的分类

◇ 2. 按风轮桨叶分类：

◇ 失速型：

- ◆ 高风速时，因桨叶形状或叶尖处的扰流器动作，限制风力机的输出转矩与功率；

◇ 变桨型：

- ◆ 高风速时通过调整桨距角，限制输出转矩与功率。

一、风力机的分类

◇ 3. 按风轮转速分类：

◇ 定速型：

- ◆ 风轮保持一定转速运行，风能转换率较低，与恒速发电机对应；

◇ 变速型：

- ◆ (1) 双速型：可在两个设定转速运行，改善风能转换率，与双速发电机对应；
- ◆ (2) 连续变速型：在一段转速范围内连续可调，可捕捉最大风能功率，与变速发电机对应。

一、风力机的分类

◇ 4. 按传动机构分类：

◇ 齿轮箱升速型：

- ◆ 用齿轮箱连接低速风力机和高速发电机；（减小发电机体积重量，降低电气系统成本）

◇ 直驱型：

- ◆ 直接连接低速风力机和低速发电机。（避免齿轮箱故障）

一、风力机的分类

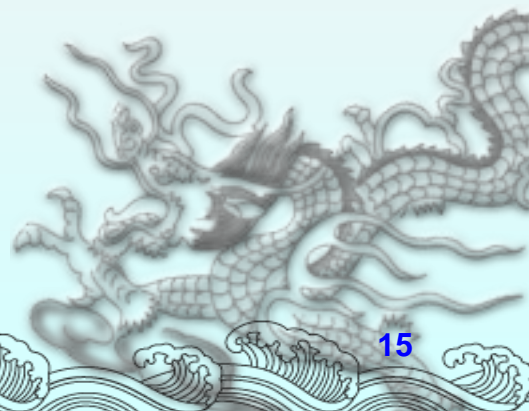
◇ 5. 按发电机特点分类：

◇ 异步型：

- ◆ (1) 笼型单速异步发电机；
- ◆ (2) 笼型双速变极异步发电机；
- ◆ (3) 绕线式双馈异步发电机；

◇ 同步型：

- ◆ (1) 电励磁同步发电机；
- ◆ (2) 永磁同步发电机。



一、风力机的分类

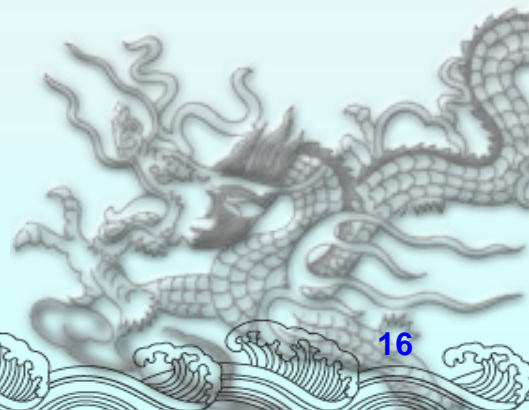
◇ 6. 按风机额定功率（容量）分类：

◇ 微型机：10kW以下

◇ 小型机：10kW至100kW

◇ 中型机：100kW至1000kW

◇ 大型机：1000kW以上（MW级）



一、风力机的分类

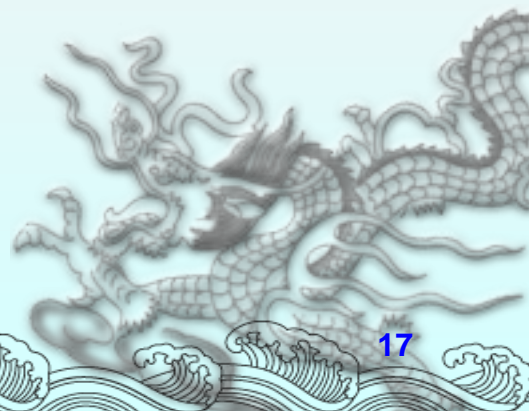
◇ 7. 按并网方式分类：

◇ 并网型：

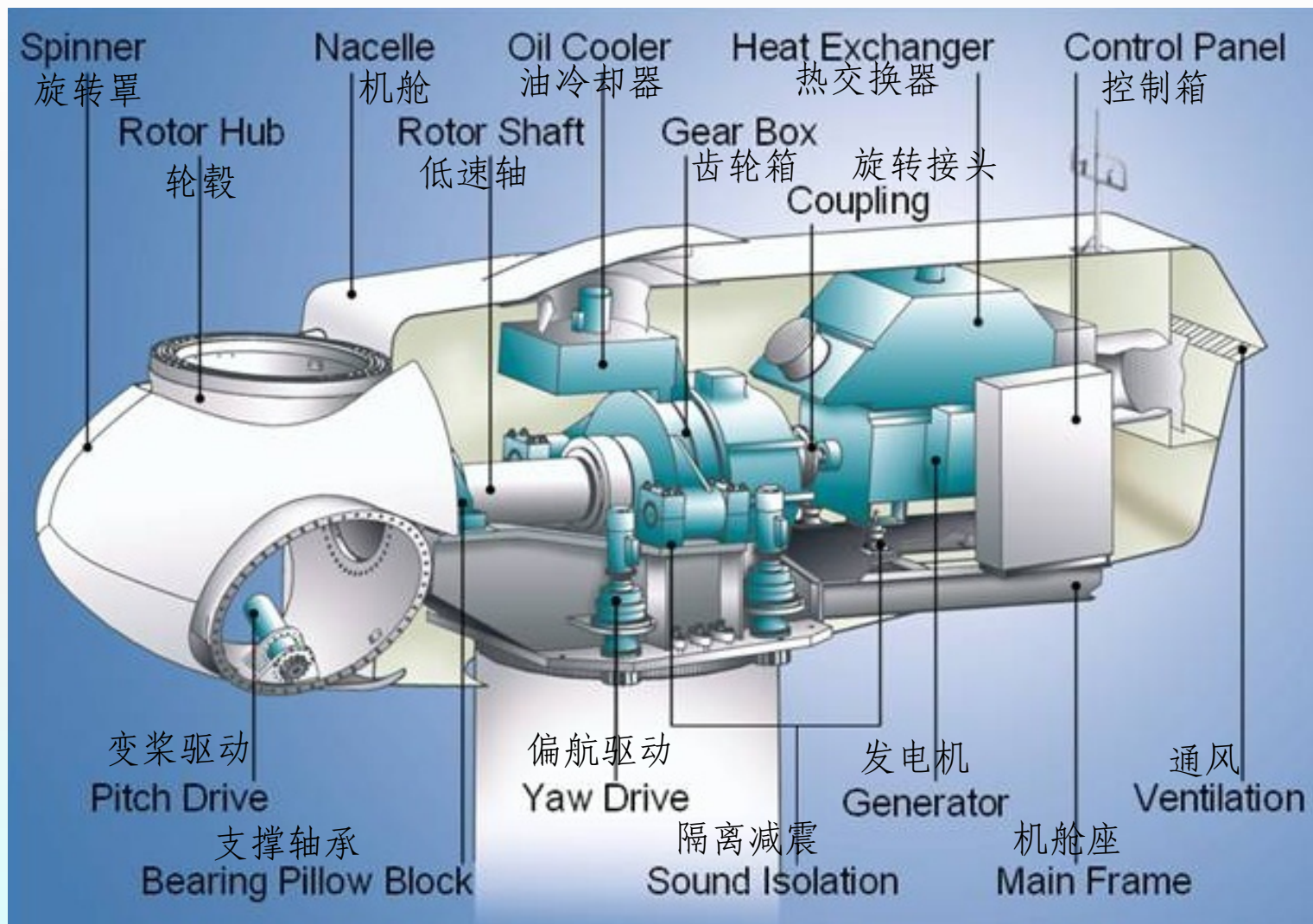
- ◆ 并入电网，可省却储能环节。

◇ 离网型：

- ◆ 一般需配蓄电池等直流储能环节，可带交、直流负载。或与柴油发电机、光伏电池并联运行。

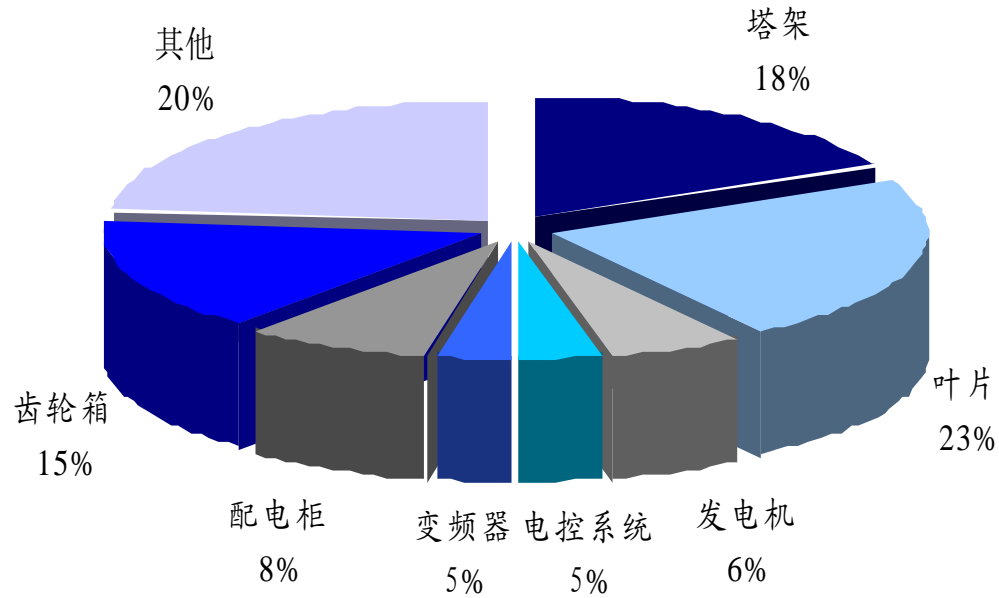


二、风电机组的总体结构



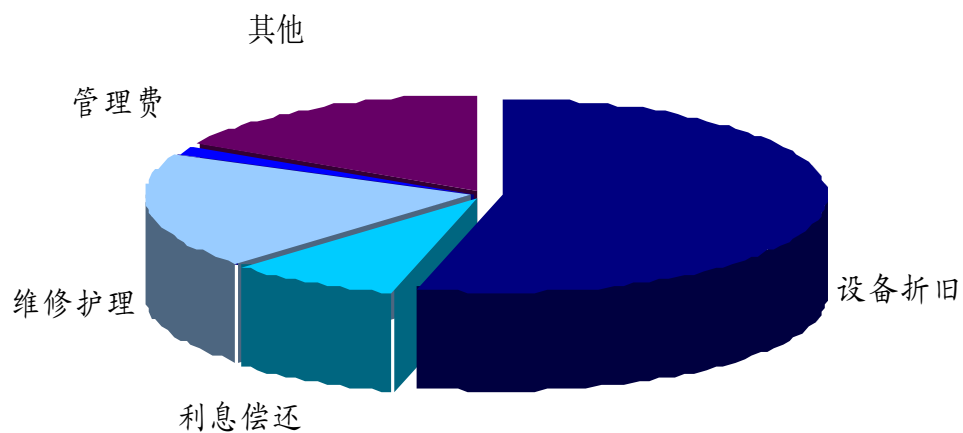
[风力发电机视频](#)

风力发电机组零部件所占成本比例



资料来源：中国风能协会，海通证券研究所整理

风力发电成本的一般占比示意图



资料来源：中国风能协会，海通证券研究所整理

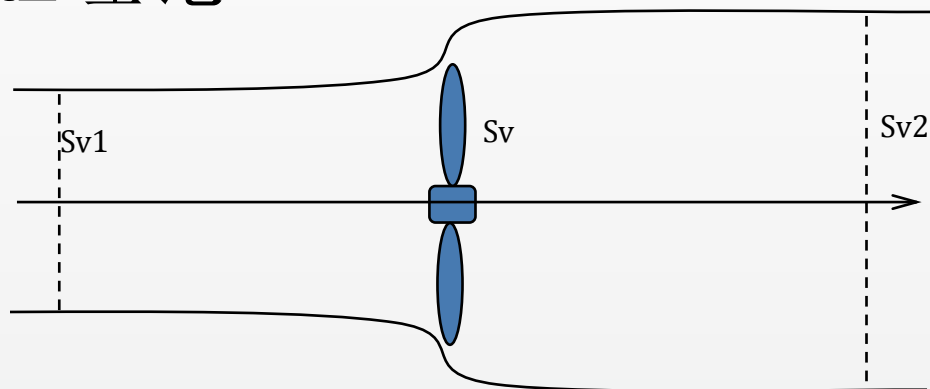
三、风力机能量转换过程

◆ 风能基本知识

- ◆ **风能(Wind Energy)**: 地球表面大量空气流动所产生的动能。
- ◆ 由于地面各处受太阳辐照后气温变化不同和空气中水蒸气的含量不同, 因而引起各地气压的差异, 在水平方向上高压空气向低压地区流动, 即**形成风**。
- ◆ 地球吸收的**太阳能有1%~3%转化为风能**, 总量相当于地球上所有植物通过**光合作用**吸收太阳能转化为化学能的**50到100倍**。

三、风力机能量转换过程

◆ 贝兹Betz理论



风能经风轮之后的气体体积变化示意图

气流动能为：

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

m ——空气质量；
 v ——气流速度。

$$m = \rho V = \rho Sv$$

$$E = \frac{1}{2} \rho Sv^3$$

◆ 贝兹Betz理论假设，基于理想风轮，经过风轮前后的空气体积相等。

根据牛顿第二定律，单位时间内风轮上的受力及风轮吸收的功率为：

$$F = mv_1 - mv_2 = \rho Sv(v_1 - v_2)$$

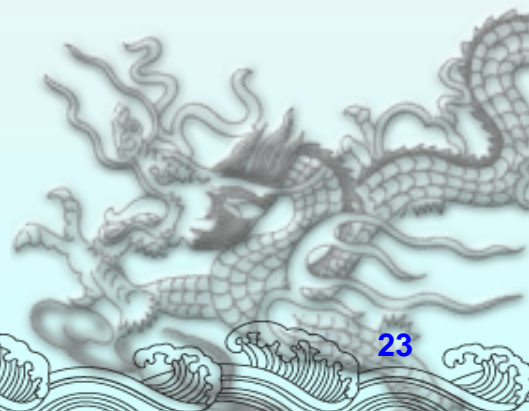
$$P = Fv = \rho Sv^2(v_1 - v_2)$$

风轮吸收的功率也等于风轮前后动能（单位时间）的变化：

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho Sv(v_1^2 - v_2^2)$$

令右边两式相等，可推出风电功率 P 的表达式：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{1}{4} \rho S(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)$$



◆ 贝兹极限（理想风轮的理论最大效率）

- ◆ 因为风涡轮提取能量，空气减速，导致它在风涡轮附近，并在某种程度上牵制它的旋转。德国物理学家 **Albert Betz**，1919年确定风涡轮可提取流经涡轮的横断面至多59.3%的能量。

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{1}{3}v_1 \quad \Rightarrow$$

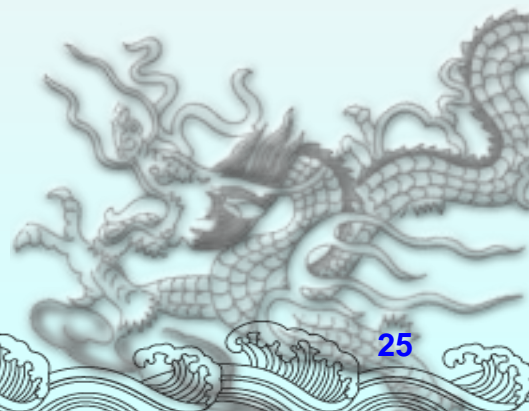
$$\Rightarrow \quad P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad \Rightarrow \quad \eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{E} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

美国FloDesign公司：在风力涡轮机的叶片周围罩上遮蔽物，引导空气通过叶片并使其加速，提高风力机的能量转换效率。

四、风力机的主要特性系数

◆ 1. 风能利用系数 C_p

- ◆ 定义：风力机从风中吸取的能量，与风轮扫过面积内的全部风能(未受风轮干扰时)之比，称为**风能利用系数**，也称**风能转换系数**；
- ◆ 风能利用系数主要取决于：
 - ◆ **风轮叶片的设计（如攻角、桨距、翼型）**
 - ◆ **风机的制造水平**
 - ◆ **风轮的转速**



四、风力机的主要特性系数

◆ 1. 风能利用系数 C_p

◆ 风力机的实际功率：  $P_s = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 C_p$

◆ C_p 小于 Betz 极限 0.593，一般为 0.15~0.5 之间。

◆ 高性能的螺旋桨式风力机， C_p 值才能达到 0.45 左右。

四、风力机的主要特性系数

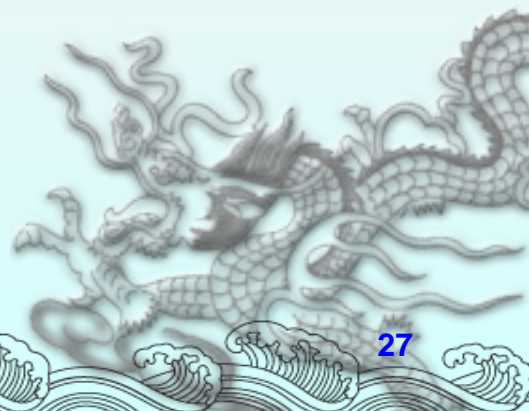
◆ 2. 叶尖速比 λ

- ◆ 叶片圆周速度与上游未受干扰的风速比：
为了表示风轮在不同风速中的状态。



$$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v}$$

- ◆ 当 λ 取特定值时 C_p 值最大，称之为最佳叶尖速比。



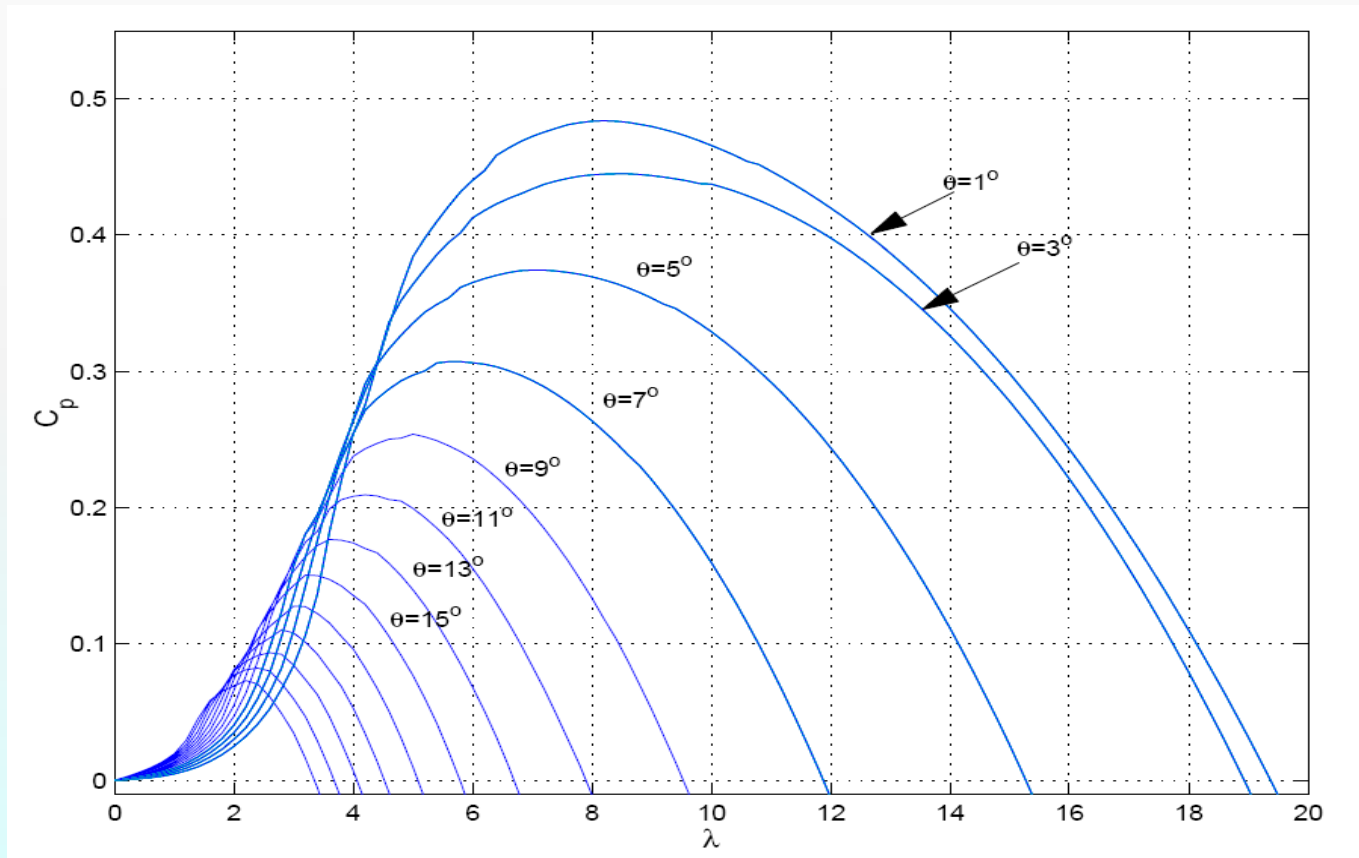
四、风力机的主要特性系数

◆ 3. 桨距角 θ (Pitch Angle)

- ◆ 桨距角 θ 是指风机叶片与风轮平面夹角，也称节距角，或叶片安装角（定桨距风机）。
- ◆ 变桨距风机在不同风速下调节桨距角以最大利用风能。
- ◆ 区别于：攻角、入流角。

风能转换系数与叶尖速比和桨距角的关系

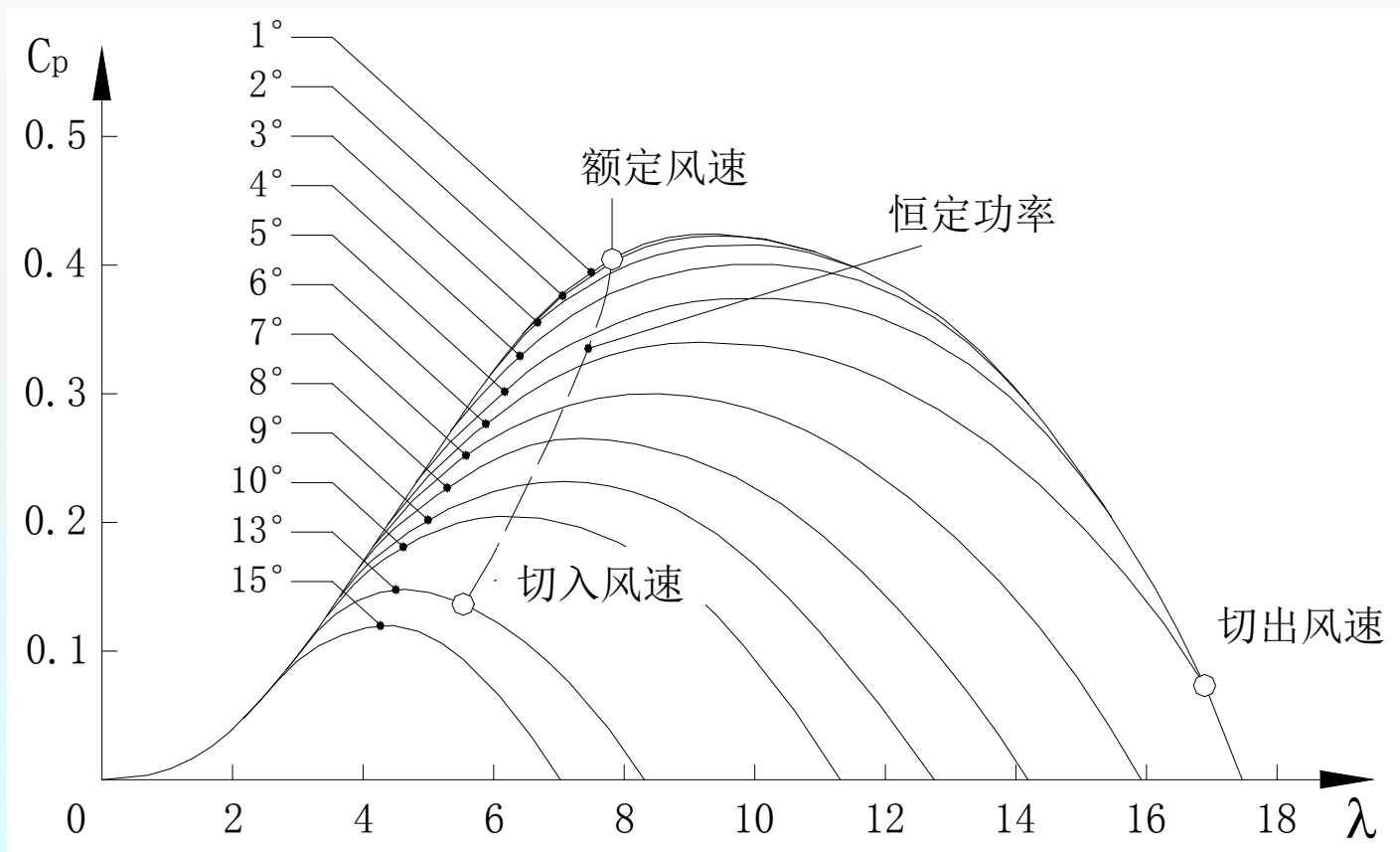
多项式拟合:
$$C_p(\lambda, \theta) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{i,j} \theta^i \lambda^j$$



不同桨距角下典型风能转换系数-叶尖速比曲线

风能转换系数与叶尖速比和桨距角的关系

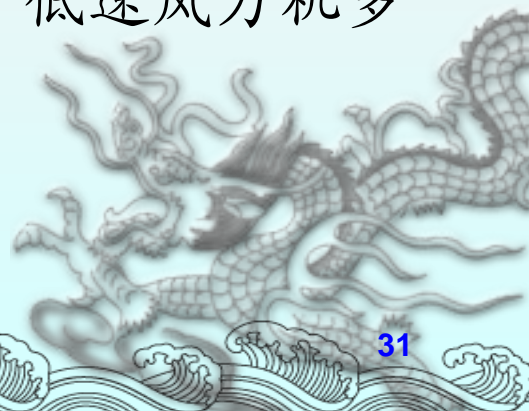
◆ C_p 与切入、额定、切出风速关系（功率运行点）



◆ 4. 风力发电机其它主要技术参数

- ◆ **启动风速**，一般为3~5m/s，也称切入风速；
- ◆ **额定风速**，一般为8~20m/s；
- ◆ **停机风速**，通常为15~35m/s，也称切出风速；

- ◆ **输出功率**，现代风力机一般为几百千瓦~几兆瓦；
- ◆ **叶片材料**，现代常采用高强度低密度的复合材料；
- ◆ **风轮直径**，通常风力机的功率越大，直径越大；
- ◆ **叶片数目**，高速发电用风力机为2~4片，低速风力机多于4片；
- ◆ **塔架高度**等。



◆ 5.力矩和转速:

- ◆ 风力机**机械能**等于叶片**角速度**与风作用于风轮的**力矩**的**乘积**。
- ◆ 风力机获取的风能相同时，**角速度小**，则**力矩大**；**角速度大**，则**力矩小**。
- ◆ 低速风力机的输出功率小，扭矩系数大，用于磨面和提水的风力机，常采用**多叶片**风力机；高速风力机效率高、输出功率大，风力发电常用**3个叶片**。

◆ 思考题1:

- ◆ 1.为什么大型风电场的风力发电机通常采用三个叶片?

◆ 思考题2:

- ◆ 2. 电力系统为什么采用三相制?

五、风力机的输出特性

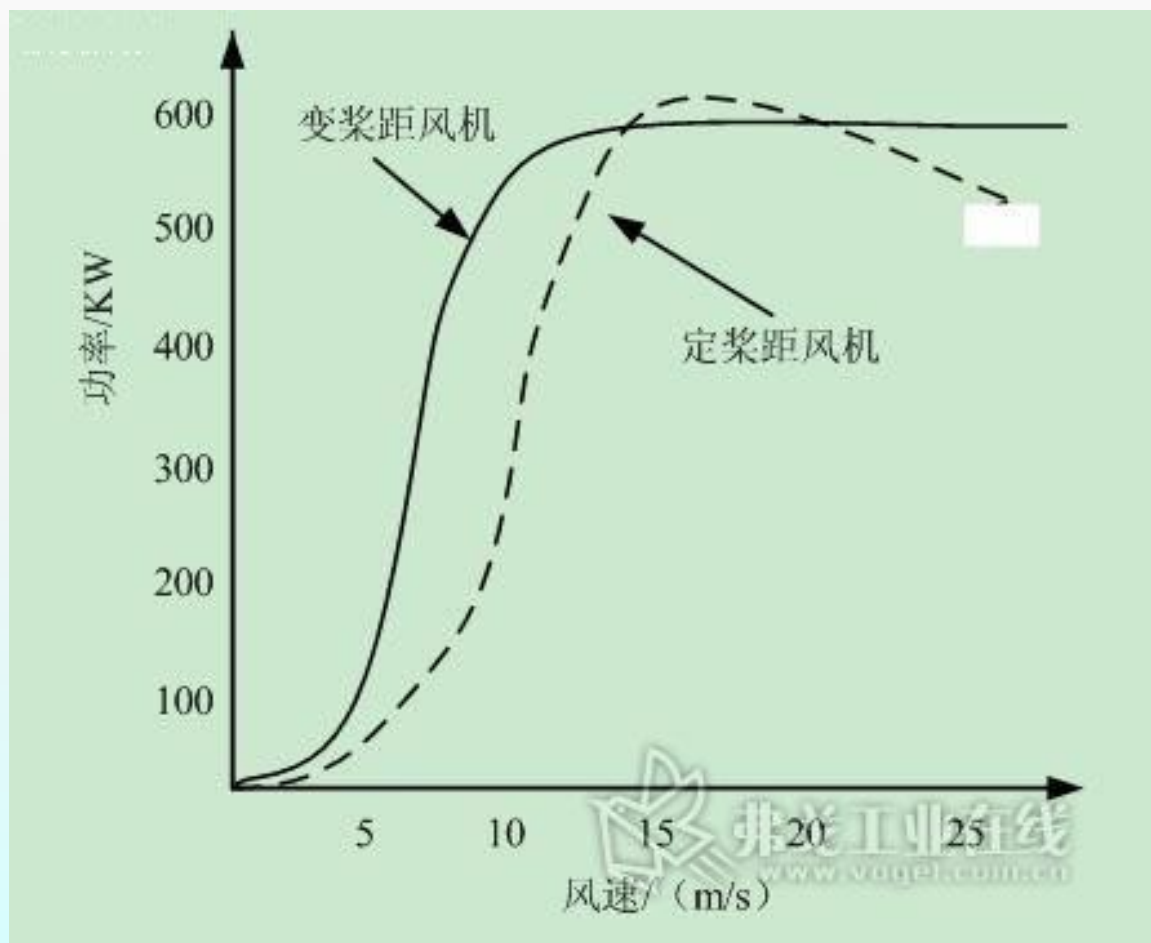
- ◆ 风力发电机将风能转换为机械能的特性，与风力发电机的类型、风速、叶片设计、风电场空气密度、桨距角等因素有关。
- ◆ 风速-机械功率关系：

$$P_{mech} = \begin{cases} 0 & v_w < v_{in} \\ \frac{1}{2} \rho S v_w^3 C_p(\lambda, \theta) & v_{in} \leq v_w < v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v_w \end{cases}$$

ρ ——空气密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； v_w ——风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； v_{in} 、 v_{out} ——风力机的切入风速和切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； $S=\pi R_{ae}^2$ ——风力机叶片的扫风面积/ m^2 ； R_{ae} ——风轮半径/ m ； C_p ——风力机的风能利用系数。

五、风力机的输出特性

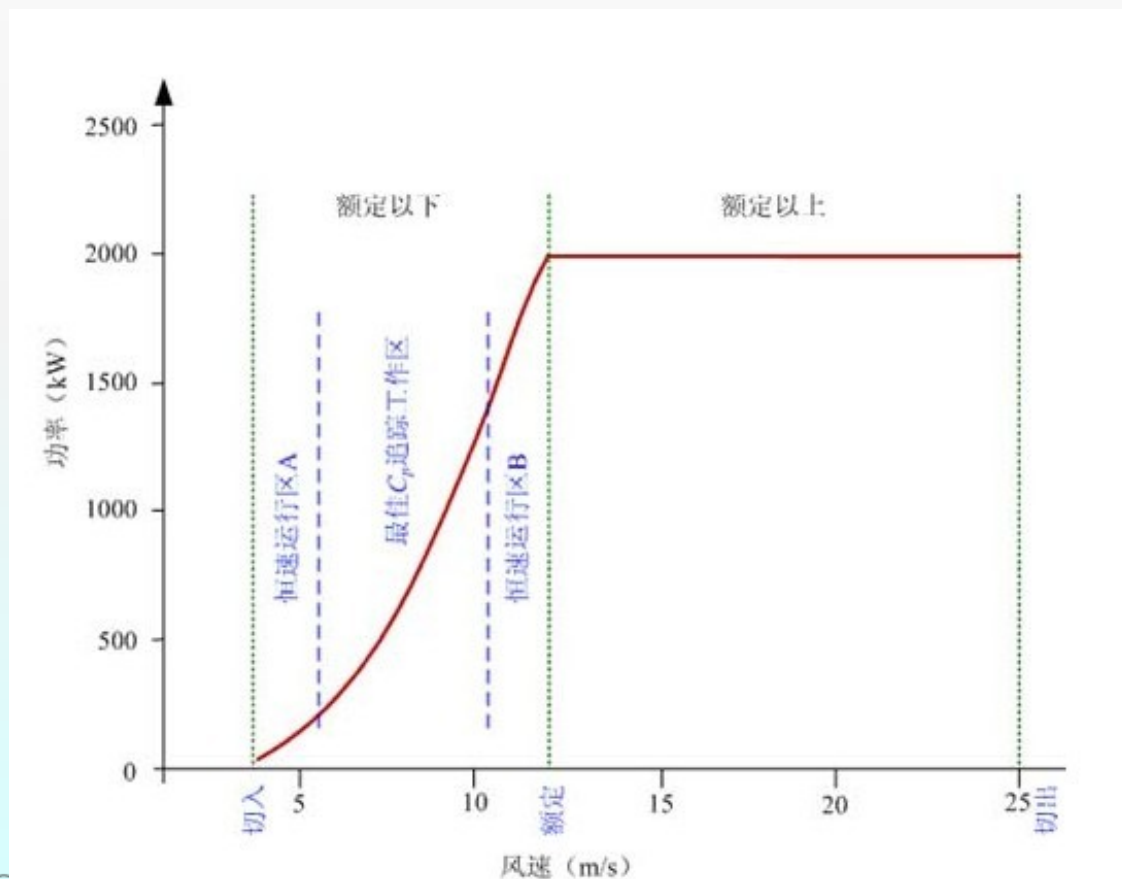
◇ 不同类型风电机组输出功率曲线：



五、风力机的输出特性

◇ 变桨距风电机组输出功率曲线

- ◆ (注意: 也有很多工程应用场合, 将风机输出功率的上升段近似以线性函数表达)



六、风力发电的特点

◆ 优点：

- ◆ (1) 没有直接污染排放；
- ◆ (2) 没有燃料问题；
- ◆ (3) 不需要水参与发电过程；
- ◆ (4) 经济性好。

◆ 对环境的负面影响：

- ◆ (1) 风力机的噪声；
- ◆ (2) 风力机的电磁干扰；
- ◆ (3) 视觉影响等等。

◆ 技术上：风力发电机发电功率较不稳定。



1.2 恒速风电机组的原理

一、恒速风力发电技术原理

- ◆ 一般采用鼠笼式异步发电机；
- ◆ 当风机带动发电机达到或接近同步速时并网，电机转速基本保持恒定，电压频率恒定；
- ◆ 异步发电机转子的转速变化范围很小，转差率一般约为3%~5%，称恒速恒频风力发电机。

1.2 恒速风电机组的原理

一、恒速风力发电技术原理

恒速风机的主要特点：

- ◆ 电气系统简单，适合于在野外缺少维护环境下工作，成本低；
- ◆ 控制简单，可靠性好；
- ◆ 风力发电机组的转速不随风速的波动而变化，始终维持恒转速运转，从而输出恒定额定频率的交流电。

◆ 恒速风电机组主要有两种类型：**定桨距失速型**和**变桨距型风力机**

- ◆ **定桨距失速型风力机**利用风轮叶片翼型的气动失速特性来限制叶片吸收过大的风能，功率调节由风轮叶片来完成，对发电机的控制要求比较简单。这种风力机的叶片结构复杂，成型工艺难度较大。
- ◆ **变桨距风力机**则是通过风轮叶片的变桨距调节机构控制风力机的输出功率。

二、恒速风力发电控制技术

◆ 1.定桨距失速控制

◆ 定桨距风力发电机组的主要特点：

- ◆ 桨叶与轮毂固定连接，当风速变化时，桨叶的迎风角度固定不变；
- ◆ 利用桨叶翼型本身的失速特性，在高于额定风速下，气流的攻角增大到失速条件，使桨叶的表面产生紊流，效率降低，达到限制功率的目的；
- ◆ 控制调节简单可靠；
- ◆ 但为了产生失速效应，导致叶片重，结构复杂，机组的整体效率较低，当风速达到一定值时必须停机。

◆ 2.变桨距调节方式

- ◆ 恒速恒频风力发电系统是目前应用较多的方式。
- ◆ 恒速恒频风力发电系统的工作原理：
 - ◆ 一般风速情况要维持风力机转速的稳定，这在风速处于正常范围之中时可以通过电气控制而保证。
 - ◆ 而在风速过大时，输出功率继续增大可能导致电气系统和机械系统不能承受，因此需要限制输出功率并保持输出功率恒定。通过调节叶片的桨距，改变气流对叶片攻角，从而改变风力发电机组获得的空气动力转矩。

◇ 2.变桨距调节方式

◇ 优点：

- ◆ 由于变桨距调节型风机在低风速时，可使桨叶保持良好的攻角，比失速调节型风机有更好的能量输出，因此，**比较适合于平均风速较低的地区安装。**
- ◆ 变桨距调节的另外一个优点是在风速超速时可以逐步变化到无负载的全翼展模式位置，**避免停机，增加风机发电量。**
- ◇ 对变桨距调节的一个要求是其**对阵风的反应灵敏性。**

◆ 3.主动失速控制

- ◆ 1)主动失速调节方式是前两种功率调节方式的组合，吸取了被动失速和变桨距调节的优点。
- ◆ 2)风机叶片的设计采用失速特性，调节系统采用变桨距调节，从而优化机组功率的输出。系统遭受强风达到额定功率后，叶片桨距主动向失速方向调节，将功率调整在额定值以下，限制机组最大功率输出。

◆ 3.主动失速控制

- ◆ 3)随着风速的不断变化，叶片仅需微调即可维持失速状态。另外，调节叶片还可实现气动刹车。
- ◆ 4)这种系统的优点是既有失速特性，又可变桨距调节，提高机组的运行效率，减弱机械刹车对传动系统的冲击。系统控制容易，输出功率平稳，执行机构的功率相对较小。

三、恒速风力发电的缺点：

- ◆ (1)转速不变，输出功率和转速的控制全靠倾角控制完成，要求控制响应快，动作次数多，调节机构易疲劳损坏；
- ◆ (2)强阵风来时，转速不变，风力机和发电机之间的轴承、齿轮箱将会承受巨大的机械摩擦和疲劳应力，机械承受应力大，要求坚固；
- ◆ (3)异步发电机需要从电网吸收滞后的无功功率以产生旋转磁场，恶化了电网的功率因数；
- ◆ (4)不能从空气中捕获最大风能，影响系统的运行效率。

仅适用于中小功率风电系统，通常不大于1000kW。

1.3 变速风电机组的原理

一、变速变桨风电机组原理

◇ 变速的原理

- ◇ 风机**变速器**，它包括**主轴**、**辅轴**、**齿轮**、**复位弹簧**、**拨齿叉**、**变速箱**、**变速齿轮固定卡**、**电磁铁**、**弹簧卡销**、**继电器**和**转数传感器**。
- ◇ 其特征是**齿轮**分别设置在**主轴**、**辅轴**上，**主轴**的一端与**发电机**相连接，**辅轴**与**风机主轴**相连接，在**主轴**的另一端设置有**变速齿轮固定卡**，在**变速箱**内设置有**电磁铁**和**复位弹簧**，**转数传感器**通过**继电器**与**电磁铁**相连接，采用**转数传感器**、**继电器**和**电磁铁**控制**主轴**上的**齿轮**，通过**齿轮组的变化**达到**控制发电机转数**的目的。

◆ 变桨距的原理

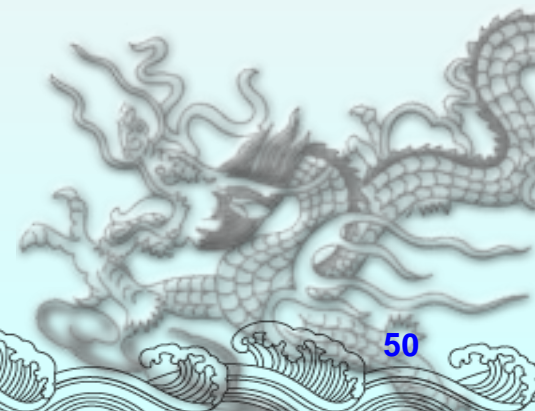
◆ 风机的变桨作业大致可分为两种工况：

- ◆ 正常运行时的连续变桨
- ◆ 停止（紧急停止）状态下的全顺桨

◆ 工作原理：

- ◆ 1. 风机开始启动时桨叶由 90° 向 0° 方向转动以及并网发电时桨叶在 0° 附近的调节都属于连续变桨；液压变桨系统的连续变桨过程是由液压比例阀控制液压油的流量大小来进行位置和速度控制的。
- ◆ 2. 当风机停机或紧急情况时，为迅速停止风机，桨叶将快速转动到 90° ：（1）让风向与桨叶平行，使桨叶失去迎风面；（2）利用桨叶横向拍打空气来进行制动，以达到迅速停机的目的，这个过程叫做全顺桨；液压系统的全顺桨是由电磁阀全导通液压油回路进行快速顺桨控制的。

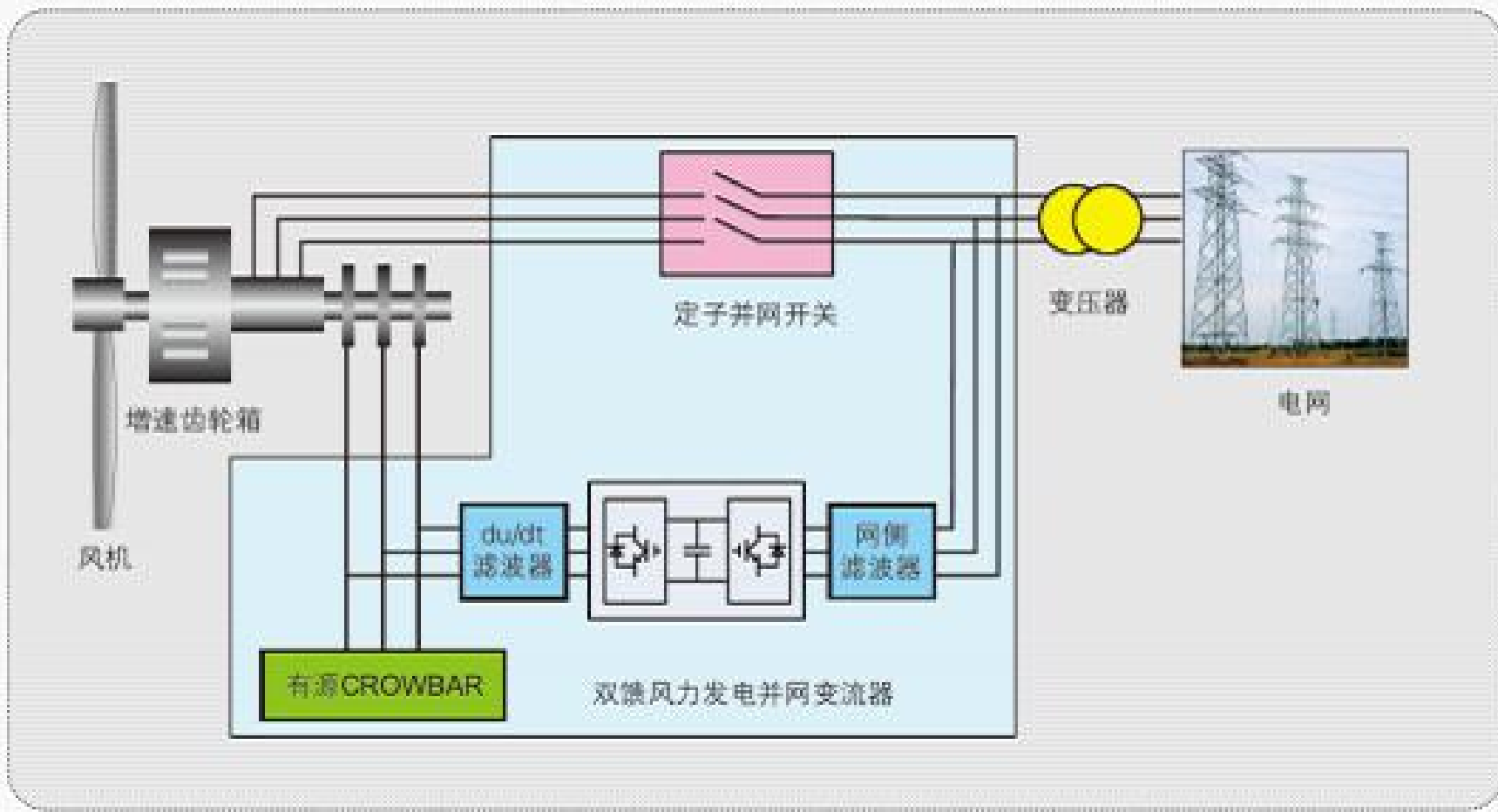
- ◆ 变速变桨距风力发电机主要包含以下两类：
 - ◆ 双馈异步感应发电机（Doubly Fed Induction Generator, **DFIG**）
 - ◆ 交流励磁转差功率变换型
 - ◆ 永磁直驱同步发电机（Permanent Magnetic Synchronous Generator, **PMSG**）
 - ◆ 全功率变换直驱型



◆ 变速发电的特点：

- ◆ 不同风速下，风力机都工作在最高效率点，提高效率10%；
- ◆ 减小发电机电磁转矩脉动和机械承受的应力，减轻机械强度要求；
- ◆ 电磁转矩脉动小，发出电力的波动小，提高发电质量；
- ◆ 在强风来时倾角控制器才工作，对倾角控制的响应速度大大降低、动作次数显著减少、机构寿命得以延长。

适用于大功率发电场合，通常大于1000kW。

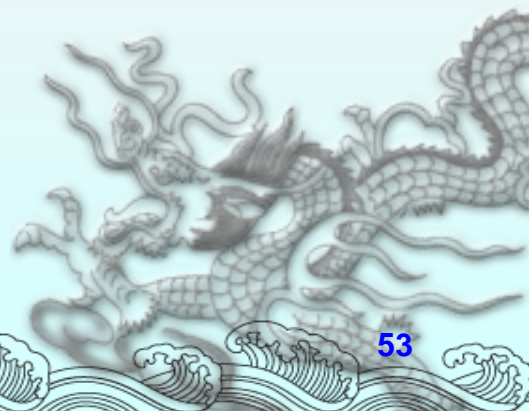


双馈异步风力发电机结构及并网示意图

二、双馈风机

◆ 双馈风机结构：

- ◆ ①调向机构（风轮：叶片和桨距角调节机构）
- ◆ ②塔架
- ◆ ③齿轮箱（机舱内）
- ◆ ④发电机（机舱内）
- ◆ ⑤控制系统（机舱内）



二、双馈风机

◆ “双馈”原理：

- ◆ 双馈感应发电机由定子绕组直连恒频三相电网的绕线型感应发电机，和安装在转子绕组上的双向背靠背IGBT电压源变流器组成。
- ◆ “双馈”的含义：定子电压由电网提供，转子电压由变流器提供。
- ◆ 该系统允许在限定的大范围内变速运行：转子绕组电源的频率、幅值和相位按运行要求由变流器自动调节，机组可以在不同的转速下实现恒频发电，满足用电负载和并网的要求。

二、双馈风机

◆ “双馈”原理：

- ◆ 电力电子变流器由两部分组成：**转子侧变流器**和**电网侧变流器**，它们是彼此独立控制的。变流器的主要原理是转子侧变流器通过控制转子电流分量控制有功功率和无功功率，而电网侧变流器控制直流母线电压并确保变流器运行在单位功率因数（即零无功功率）。
- ◆ 有功功率是馈入转子还是从转子提取，取决于传动链的运行条件：在**超同步**状态，有功功率从**转子**通过变流器馈入电网；而在**亚同步**状态，有功功率反方向传送。在两种情况（超同步和亚同步）下，**定子都向电网馈电（发送有功功率）**。

◆ 思考题3:

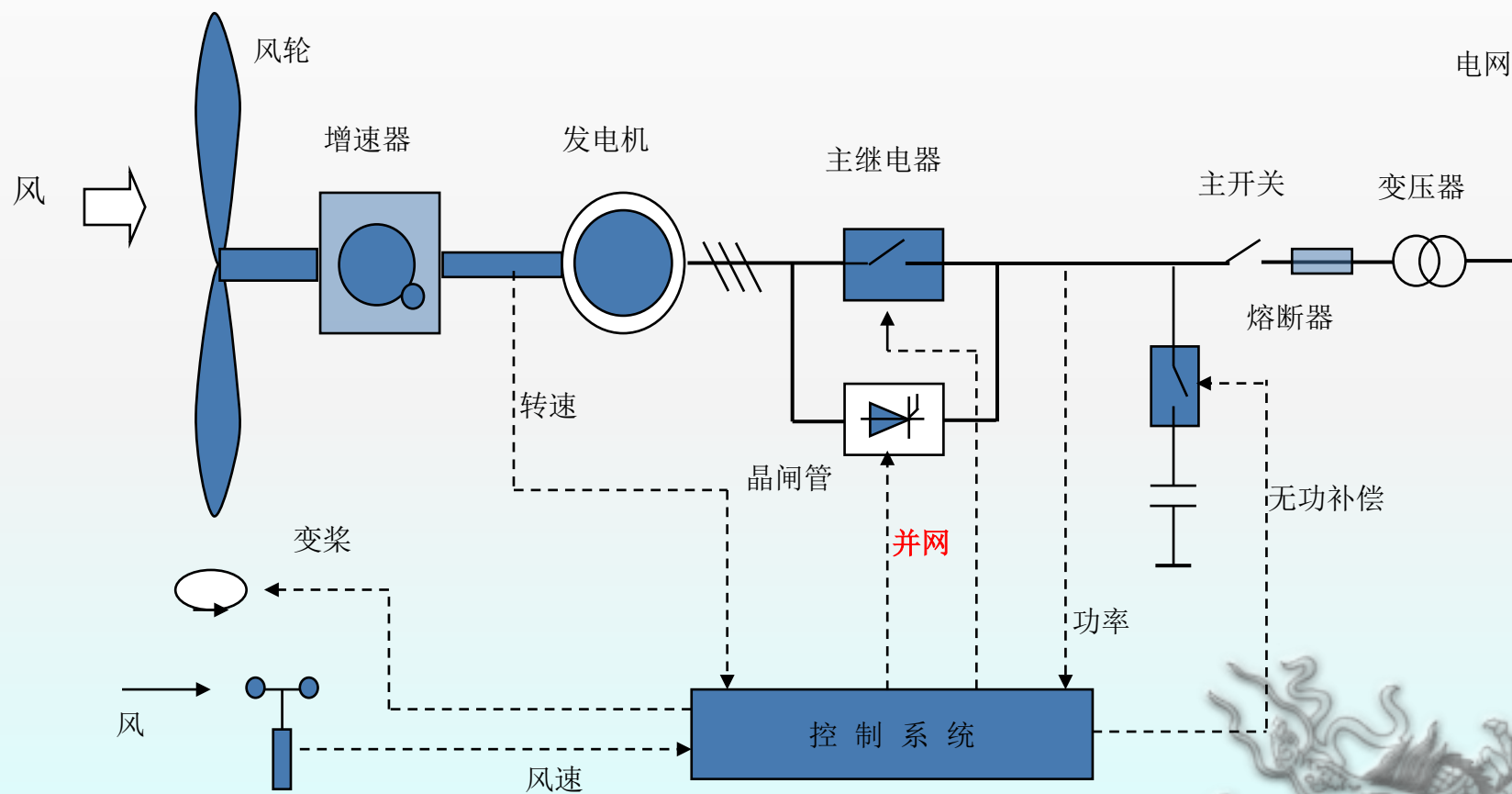
- ◆ 3. 什么双馈式风力发电机的亚同步，超同步？

◆ DFIG的3种运行状态:

◆ 亚同步，同步速，超同步

- ◆ $n < n_1$ （假设 n_1 是定子旋转磁场的同步转速）时，处于**亚同步**运行状态，此时变流器向发电机转子提供交流励磁，发电机由定子发出电能给电网；
- ◆ $n > n_1$ 时，处于**超同步**运行状态，此时发电机同时由定子和转子发出电能给电网，变流器的能量流向逆向；
- ◆ $n = n_1$ 时，处于**同步**状态，此时发电机作为同步电机运行，励磁变流器向转子提供励磁。

典型的风电机组并网示意图



◇ 控制系统实现的功能：

- ① 按预先设定的风速值(比如为 $3\sim 4\text{m/s}$)自动启动风力发电机组，并通过控制实现并网。
- ② 借助各种传感器自动检测风力发电机组的运行参数及状态，包括风速、风向、风力机风轮转速、发电机转速、发电机温升、发电机输出功率、功率因数、电压、电流等以及从齿轮箱轴承的油温、液压系统的油压等。

◇ 控制系统实现的功能：

- ③ 各运行工况内的自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）。
- ④ 当风速大于最大运行速度(比如为25m/s)时实现自动停机或故障保护。
- ⑤ 与主控中心通信：如通过调制解调器与电话线连接。

◇ 交流励磁转差功率变换原理

- ◇ 定子绕组与电网直接相连；
- ◇ 转子绕组通过变流器供以频率、幅值、相位和相序都可改变的三相低频励磁电流；
- ◇ 电机的转速改变时，通过变流器调节转子的励磁电流频率来改变转子磁势的旋转速度，发电系统便可做到变速恒频运行；
- ◇ 发电机是通过对其转差频率的控制，来实现发电机的双馈调速；

双馈风机的特点

◆ DFIG的优势:

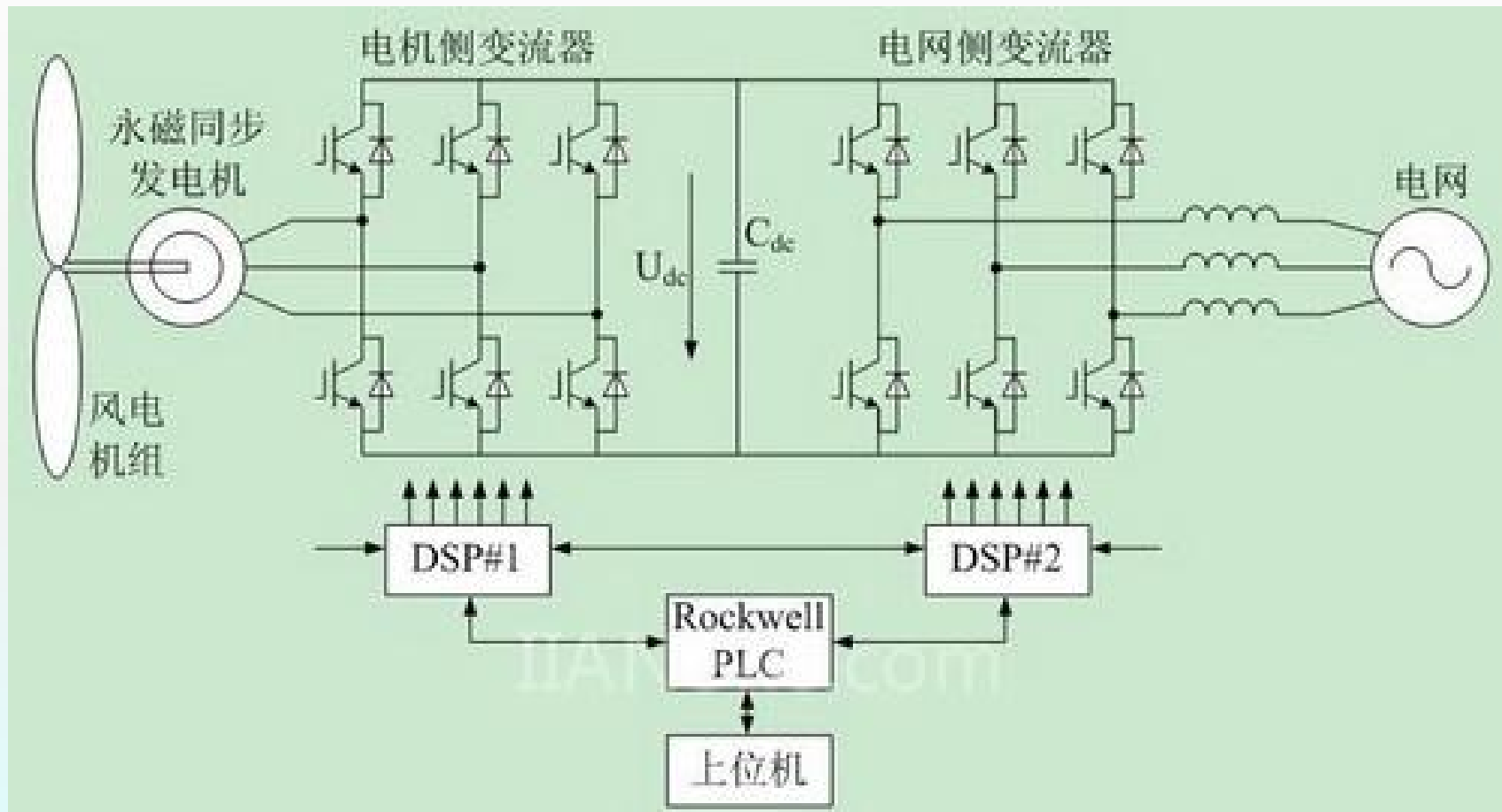
转子励磁电流幅值、相位、频率均可调

有功功率、无功功率均可调

可实现变速恒频运行，适用于风力、潮汐等绿色发电领域

可实现与电网的柔性并网，并网特性优良

三、永磁直驱风机



永磁直驱同步发电机结构及并网示意图

三、永磁直驱风机

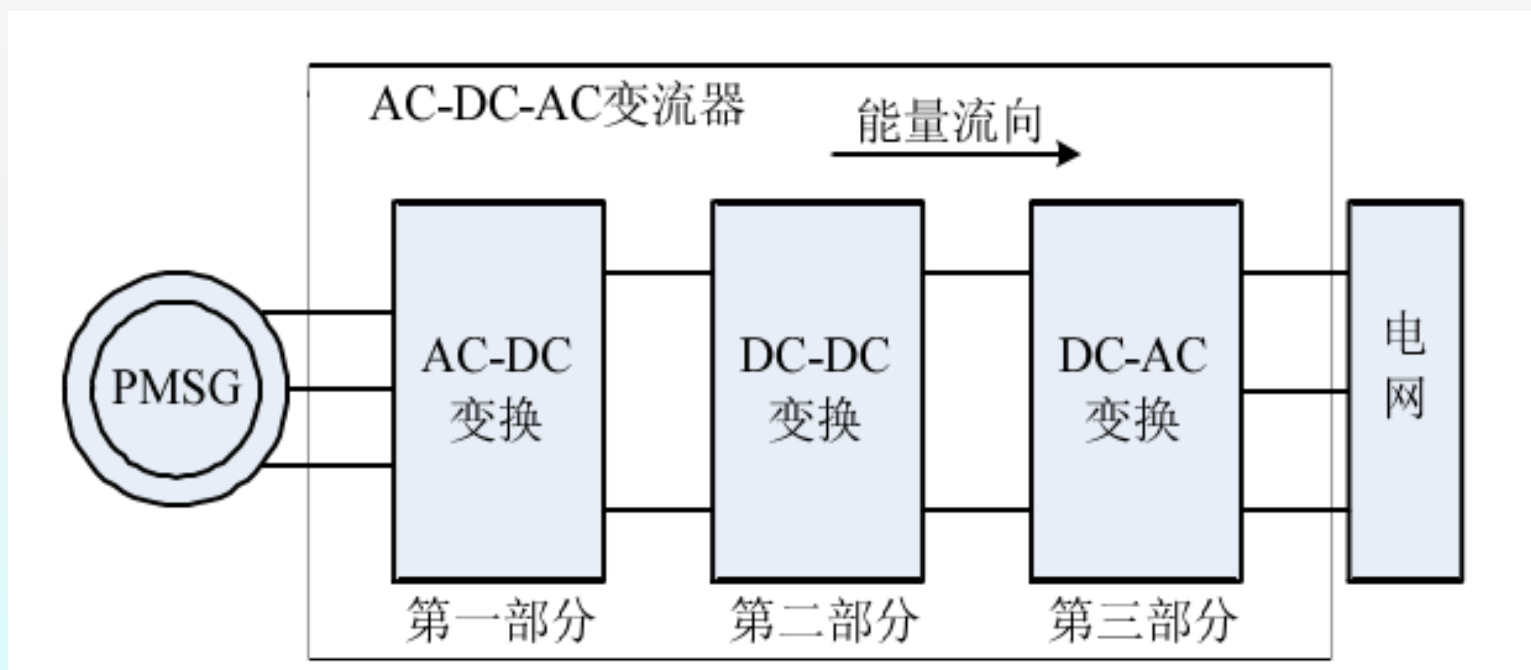
◆ 永磁直驱风机结构

- ◆ 与双馈风机相比，两者的最大区别在于不同的传动、发电结构，亦称无齿轮风力发动机。
- ◆ 发电机采用多极电机与风力机直接连接进行驱动的方式，免去齿轮箱这一传统部件。
- ◆ 永磁直驱风机更能适应低风速，且能耗较少、后续维护成本低。

我国低风速的三类风区占到全部风能资源的50%左右，更适合使用永磁直驱式风电机组。

◆ 全功率变换原理

- ◆ 直驱型风电机组需要较大容量的全功率风机变流器以实现能量的并网控制；
- ◆ 主要为交直交变流器（AC-DC-AC converter）；



◆ 全功率变换原理

◆ 三部分变流器功能及器件要求：

- ◆ AC-DC：二极管或晶闸管，或IGBT（IGCT）；
- ◆ DC-DC：升压斩波电路，电感储能或电容储能；
- ◆ DC-AC：晶闸管，IGBT（或IGCT）三相全桥。

永磁直驱风机的特点

◇ PMSG的优势：

没有齿轮箱，减少了传动损耗，提高了发电效率

省去了齿轮箱及其附件，简化了传动结构，提高了机组的可靠性

减少了零部件数量，降低了运行维护成本

低电压穿越使得电网并网点电压跌落时，能够在一定电压跌落的范围内不间断并网运行，从而维持电网的稳定运行

双馈风机和永磁直驱风机的性能比较分析表

特性	永磁直驱和双馈风机比较	分析
电网兼容性	永磁直驱风机更强	永磁直驱风机具备较强电容补偿、低电压穿越能力，对电网冲击小
维护成本	永磁直驱风机更低	永磁直驱风机省去齿轮箱维修费用
空气动力学性能	永磁直驱式受风速限制较小	永磁直驱风机通过电磁感应原理发电，在额定的低转速下输出功率较大、效率较高
噪音	永磁直驱风机噪音更低	永磁直驱风机省去了齿轮箱，噪音低
效率	永磁直驱风机效率更高，发电效率平均提高5-10%	双馈式风机支持齿轮箱工作，本身也耗电
运输难度	永磁直驱风机运输难度更大	永磁直驱风机体积较大，运输难度更大
电控要求	永磁直驱风机要求更高	永磁直驱风机省去齿轮箱，全功率逆变
改进空间	永磁直驱风机改进空间更大	永磁直驱风机技术较新，电子化程度高

四、变速风力发电的特点

- ◆ 相对于**恒速恒频**风力发电，变速运行的**优点**：
 - ◆ **系统效率高**，变转速风力机大大提高了风能利用率，从而提高了风力机的运行效率。
 - ◆ **与电网实现柔性连接**，降低风电系统与电网之间的影响，可减少对电网的冲击。
 - ◆ **减少阵风冲击对风力机的机械应力**，如阵风时风轮转速增加，把风能余量存储在风轮转动惯量中，风速下降时，把风轮动能重新释放出来。
 - ◆ **环保效果好**，低风速时，低转速运行状态，噪声低。

四、变速风力发电的特点

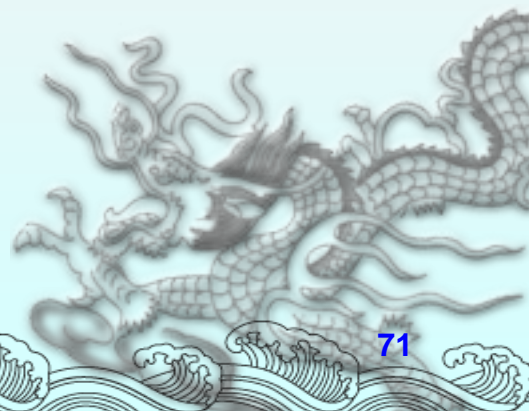
◆ 变速运行的概括：

综上所述，变速恒频方式，即风力发电机组的转速随风速的波动作变速运行，但仍输出恒定频率的交流电，这种方式可**提高风能的利用率**；

但将导致必须**增加**实现恒频输出的**电力电子设备**，且变频器的**体积、重量较大，成本较高，控制较为复杂**。

课后感兴趣可自学:

- ◆ 风力发电系统的各部分的运行控制原理?
 - ◆ 机组主结构及控制系统
 - ◆ 励磁变换器结构及原理
 - ◆ DFIG控制（机侧变流器控制）
 - ◆ 网侧变流器控制
 - ◆ 变桨机构及其控制
 - ◆ 偏航机构及其控制
 - ◆ 其他机构及控制、保护



第一讲 小结

- ◇ 风力发电基本原理
- ◇ 风力机能量转换过程，**Betz理论、Betz极限**
- ◇ 风力发电机主要特性系数
 - ◇ 风能利用系数、叶尖速比、桨距角
- ◇ 恒速风力发电、变速变桨技术
 - ◇ 变速运行的优点
- ◇ **双馈风机DFIG、永磁直驱风机PMSG特点**

