

Spring Semester, 2011
Energy Engineering
에너지공학

Wind power

Ref. ch.5

Introduction

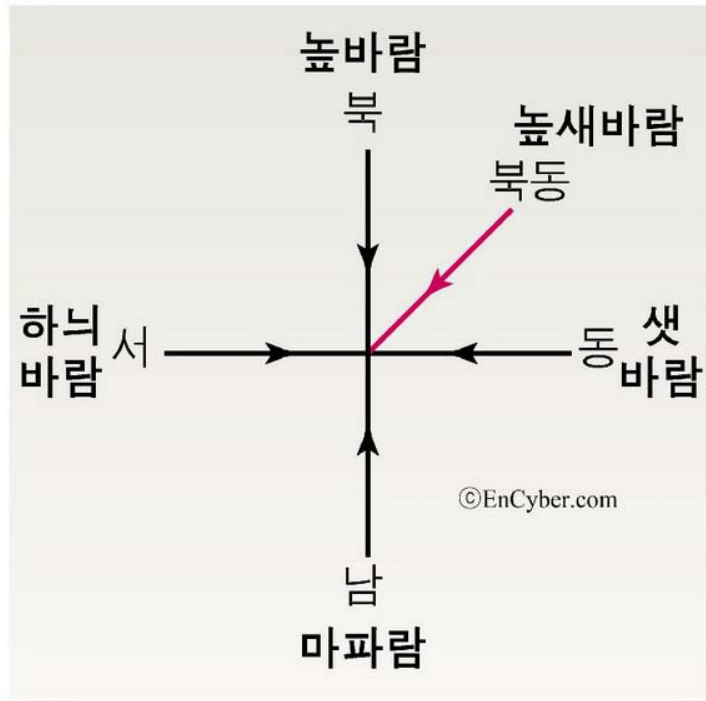
Carbon-free & pollution-free energy

Wind power could produce globally 10~20% of the electric energy currently used

20% of Demark's electricity is currently generated by the wind

The modern wind turbine is some hundred times more powerful than the traditional windmills

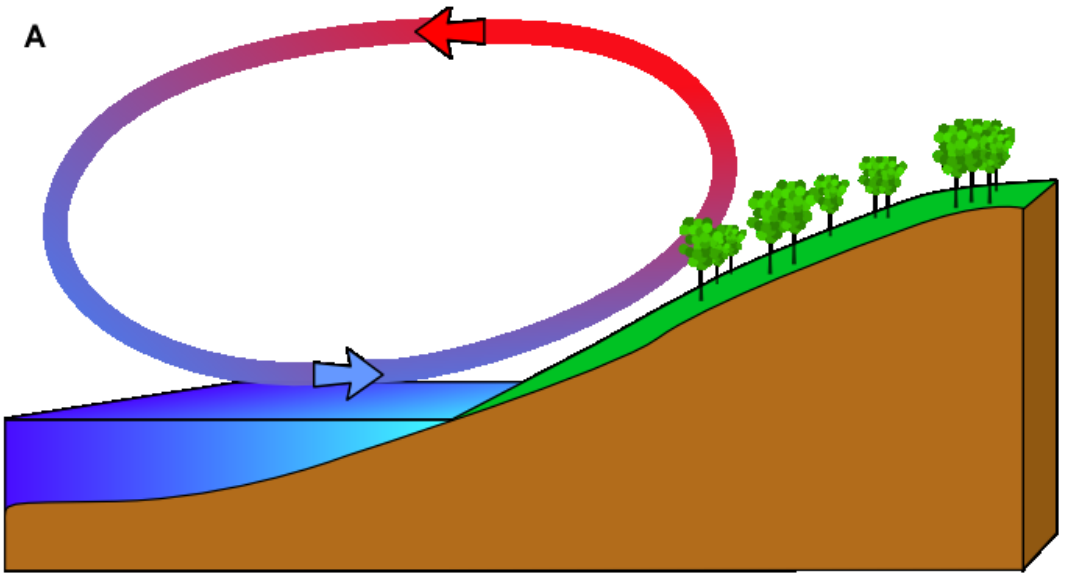
바람



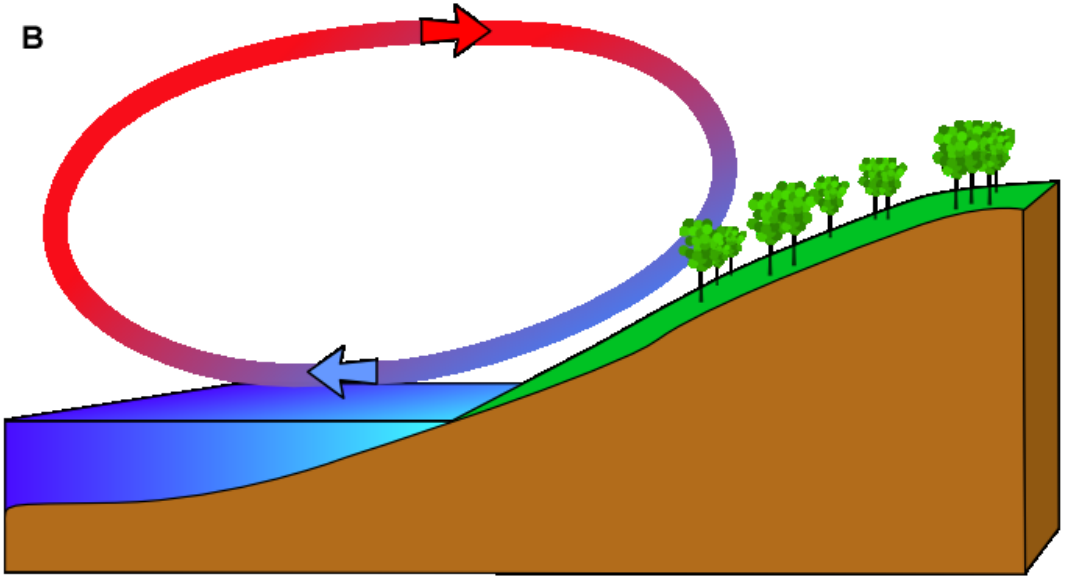
풍속은 m/sec 단위로 표시하며, 다른 단위에 의한 수치와의 환산은 다음과 같다. $1\text{km/h} = 0.278\text{m/sec} = 0.621\text{mph}(\text{mile/h}) = 0.540$

$\text{kn}(\text{knot})=0.911\text{ft/sec}$ 이것을 간략하게 표시하면 $1\text{m/sec} \doteq 2\text{kn}$, $1\text{kn} \doteq 1852\text{m/h}$ 가 된다.

天



地



1. Source of wind energy

The original source of wind energy is the radiation from the Sun → absorbed by the land & sea, which in turn heat the surrounding air)

Materials absorb radiation differently so temperature gradients arise causing convection and pressure change, which result in winds

Off-shore night-time wind found on coasts, caused by the sea retaining the heat from the Sun better than the land

On a global scale, the higher intensity of solar radiation at the equator than elsewhere causes warm air to rise up from the equator and cooler air to flow in from north and south

An enormous amount of power resides in the winds as about **1-2% of the incident solar power of 1.37 kW/m²** is converted into winds

Earth radius ~6000 km → cross-sectional area receiving solar radiation ~ 10^{14} m²
→ the power in the winds ~ 10^{15} W

$\sim 10^{15}$ W wind power: 100 times the total global power usage → the wind is a diffuse source and it is only practical to harness a very small fraction of this amount

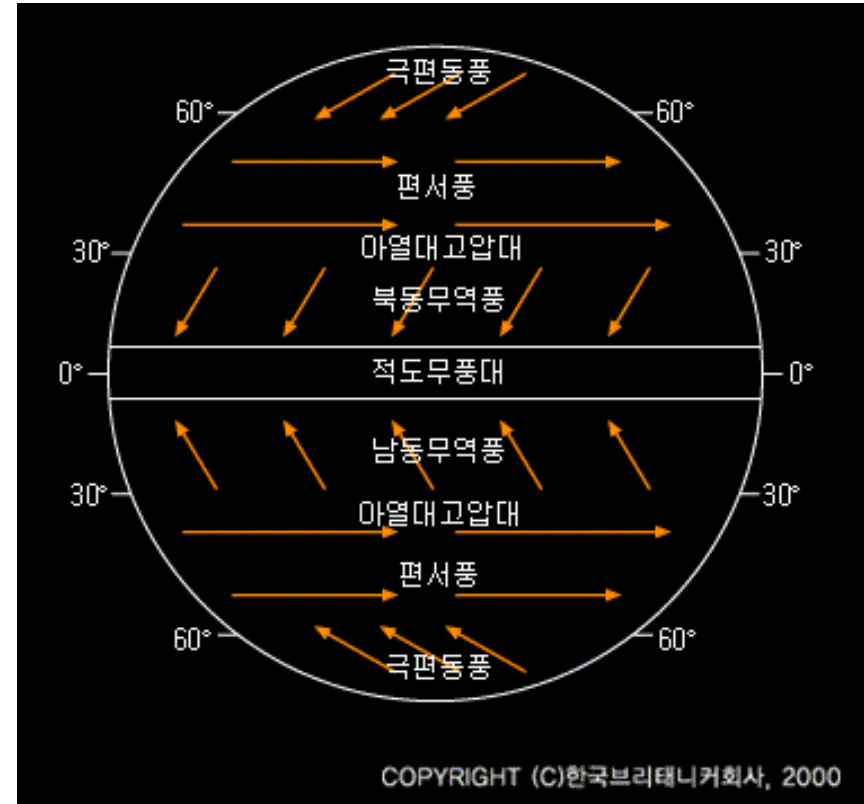
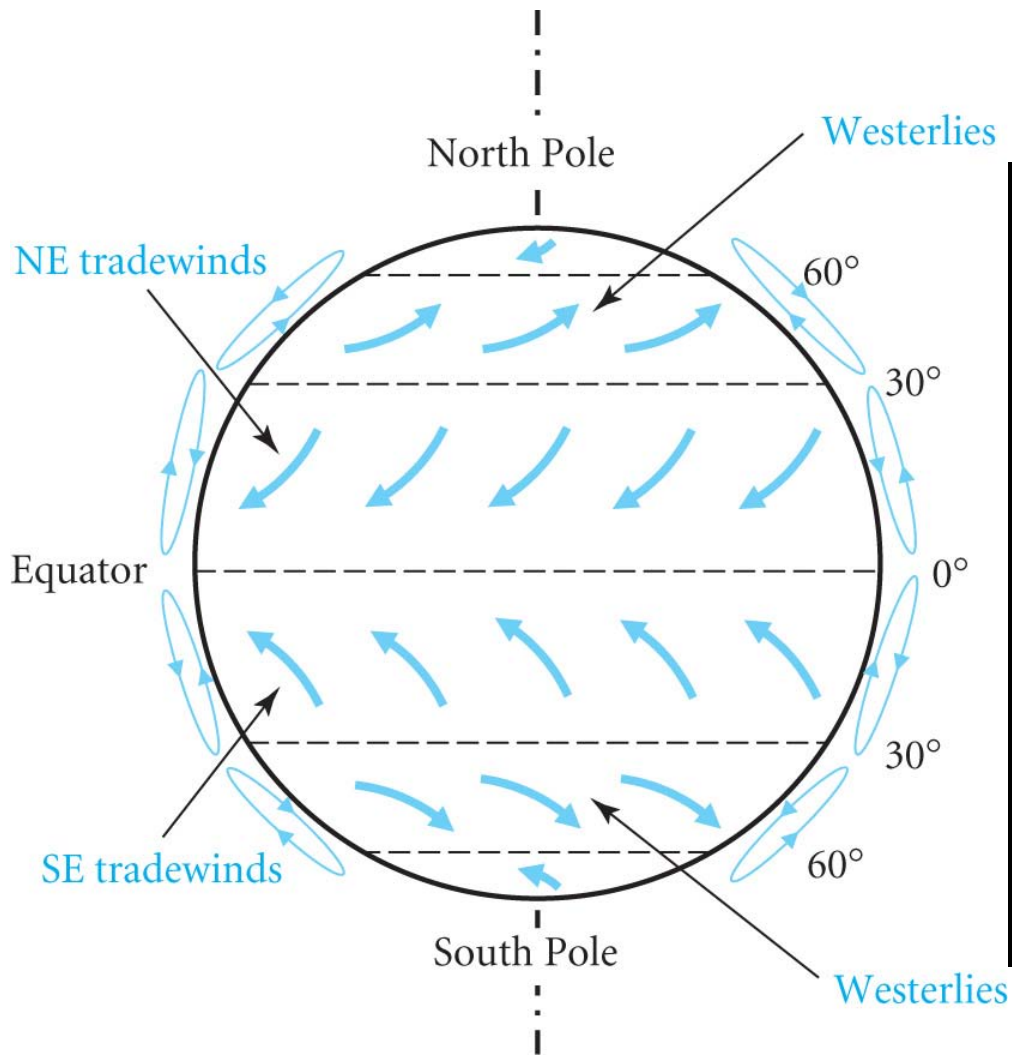
Wind are variable both in time and in location, with some parts of the world exposed to frequent high winds and some to almost no wind

2. Global wind patterns

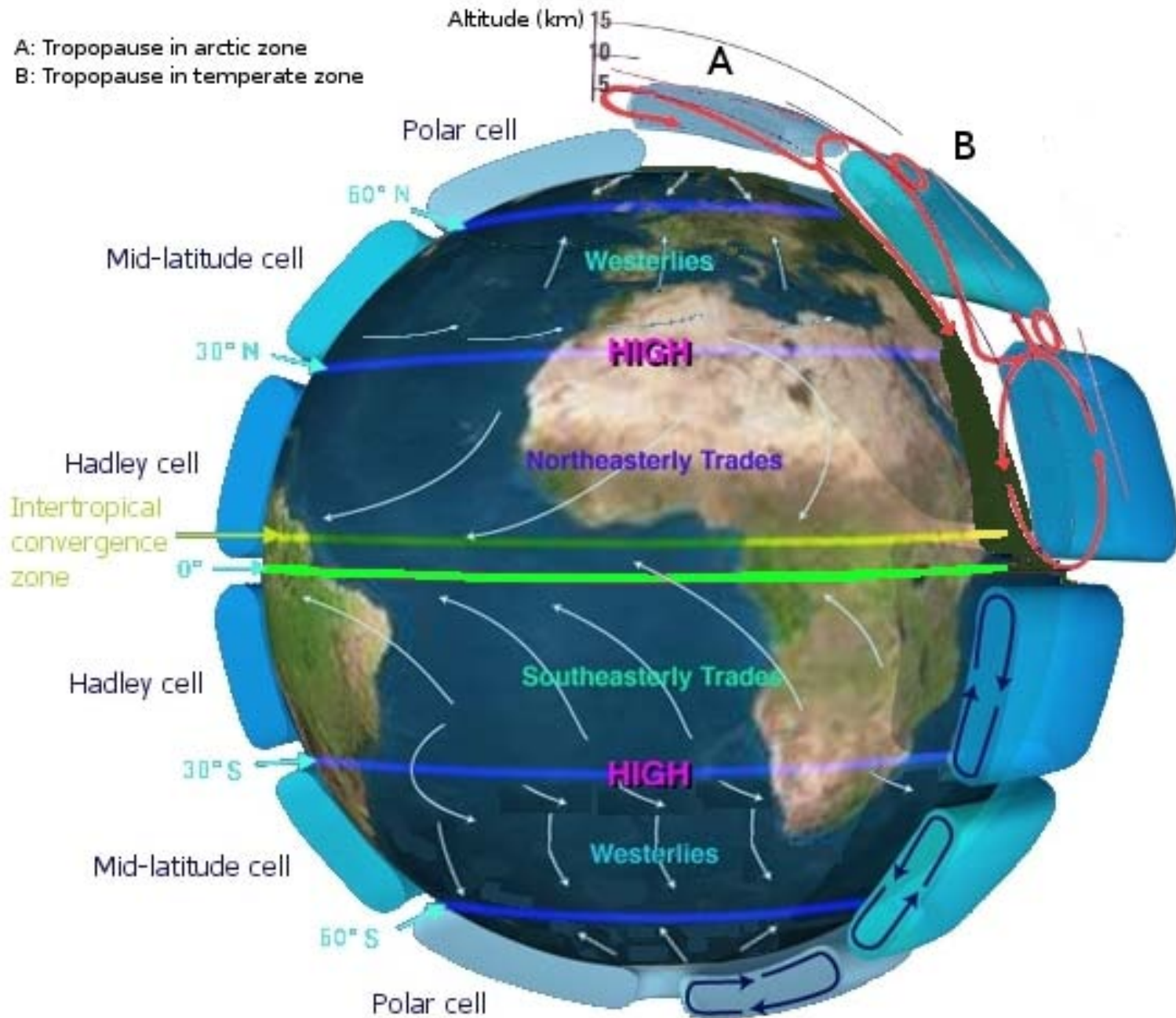
The higher intensity of solar radiation at the equator would set up a north-south convective flow of air if the Earth were not rotating → the Earth's rotation causes a point to have a velocity towards the east that is highest at the equator, decreasing towards the poles

Three regions in each hemisphere “cell”: Hadley cell (nearest the equator), Ferrel cell (mid-latitude), polar cell. The winds are generally weak in the regions between cells

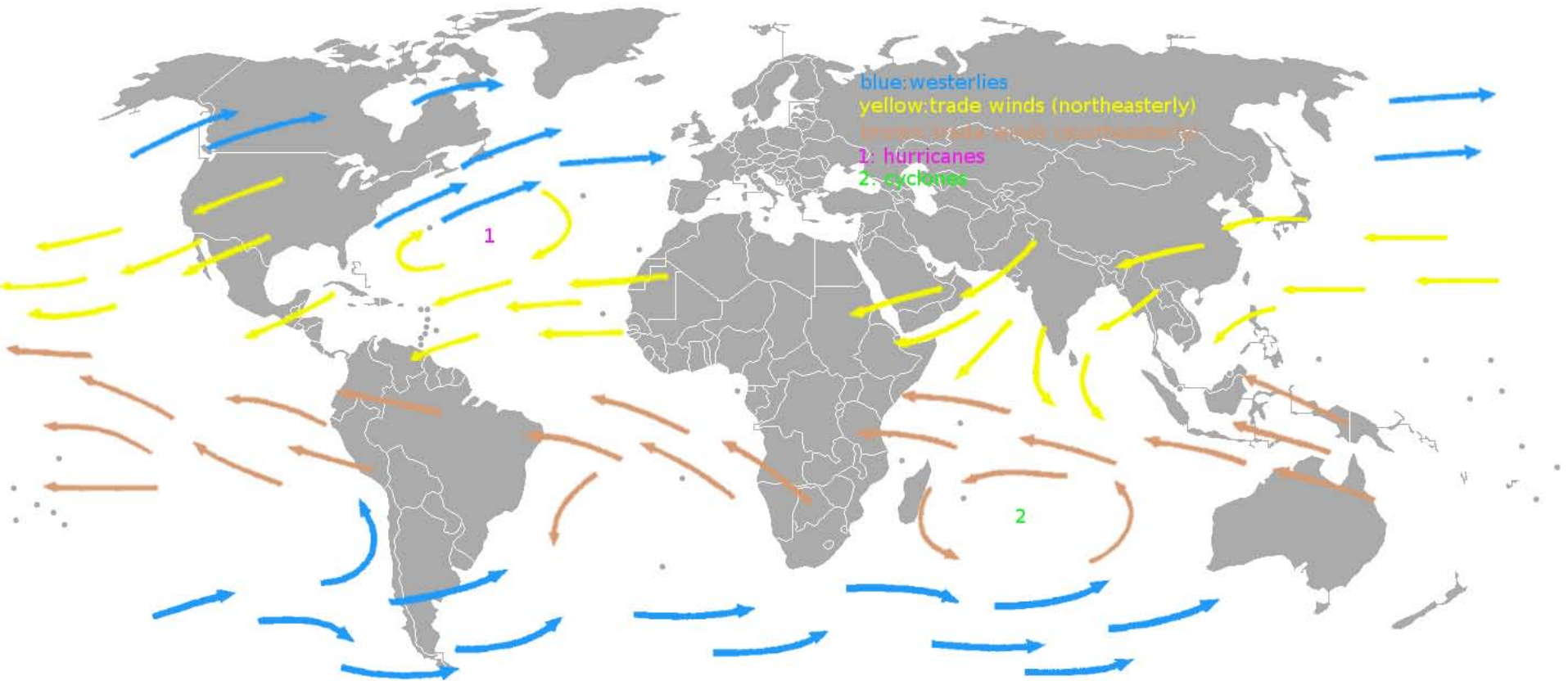
Simplified map (without consideration of oceans and continents)



A: Tropopause in arctic zone
B: Tropopause in temperate zone



Simplified map (without consideration of oceans and continents)





- 자료 선택(최근 5년간)
 - 연 평균자료
 - 봄철 평균자료
 - 여름철 평균자료
 - 가을철 평균자료
 - 겨울철 평균자료

- 고도 선택
 - 50m
 - 80m

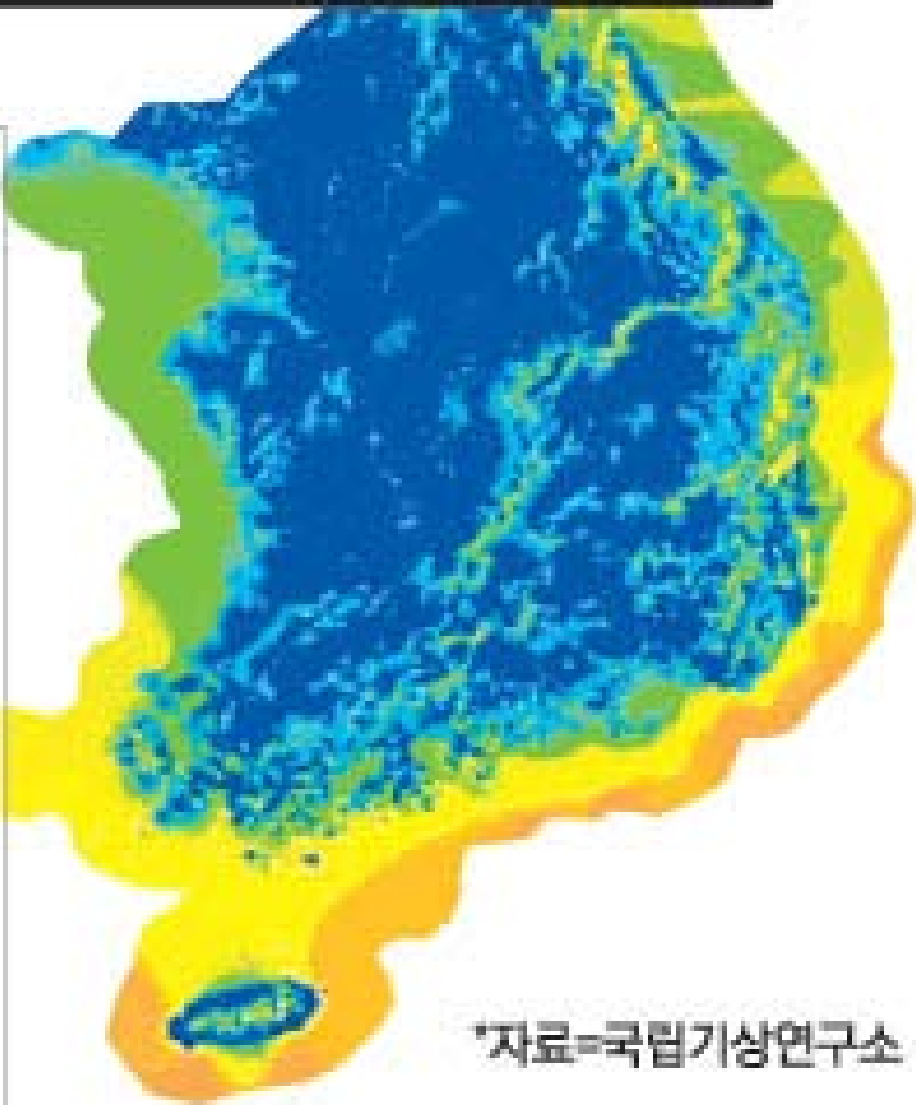
- 범례 보기
 - 범례보기
 - 범례 숨기기

- 지도 선택
 - 기본지도
 - 확대지도



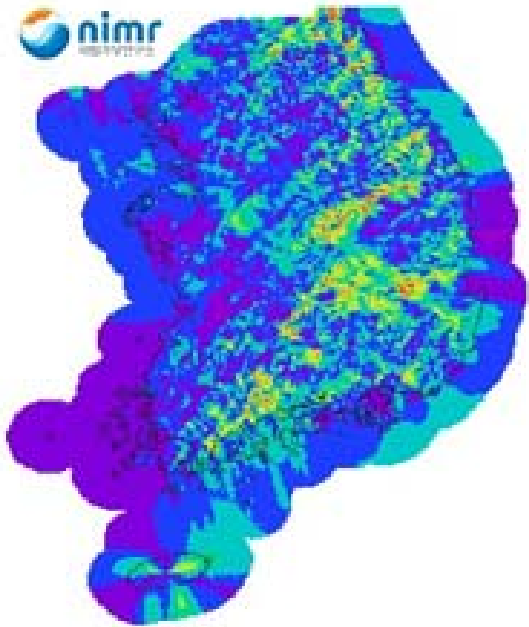
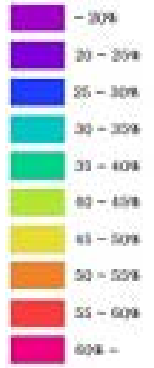
TIP 자료 및 고도를 선택하고 좌측 지도의 해당지점에 마우스를 가져가면 상세한 정보가 나타납니다.

연평균 풍력 기상자원 지도



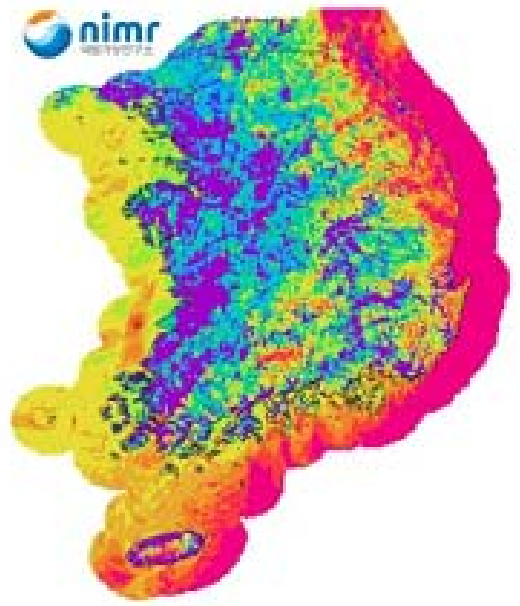
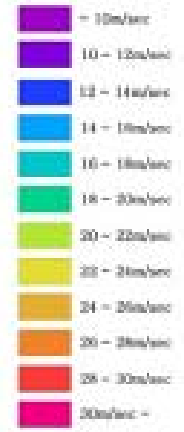
*자료=국립기상연구소

연평균 월별
주풍향 비율



주풍향 비율

연평균 월별
최대풍속



최대풍속

History of wind power

Windmills ((a) Persian vertical axis, (b) tower-mill)

(a)

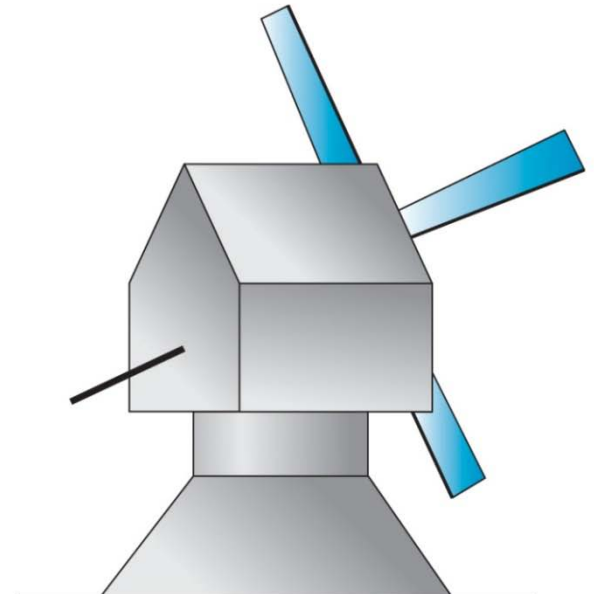
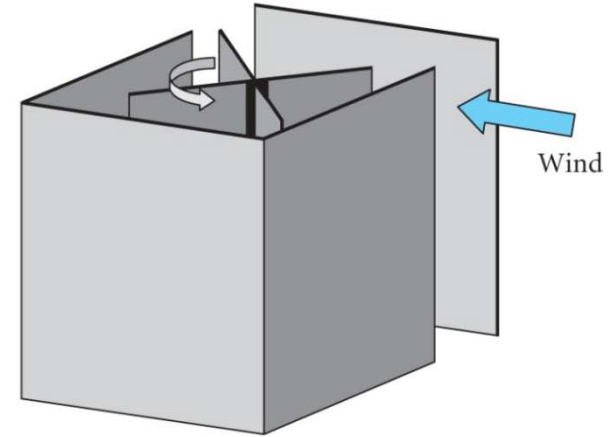
Coal power steam 등장 전까지 많이 이용됨

1930년대 전기도입으로 거의 사라짐

1960년 전기생산을 위한 wind turbine 개발시작

Wind turbine을 이용한 전기생산, 수소생산 등

(b)



3. Modern wind turbines

Vast majority of current designs
→ horizontal-axis wind turbines
(HAWTs)

Tower

Nacelle (an enclosure):

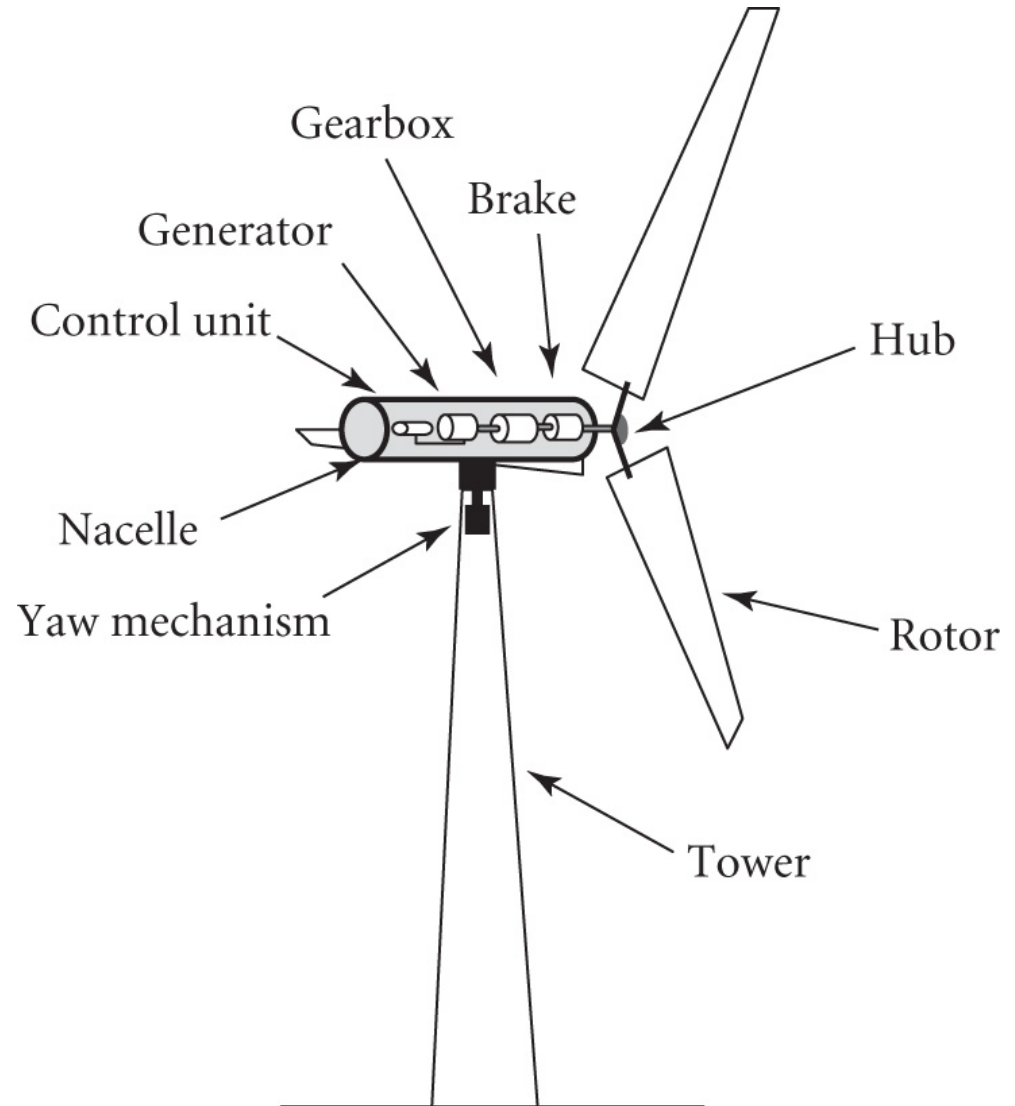
Bearings for the turbine shaft,

The gearbox,

The generator

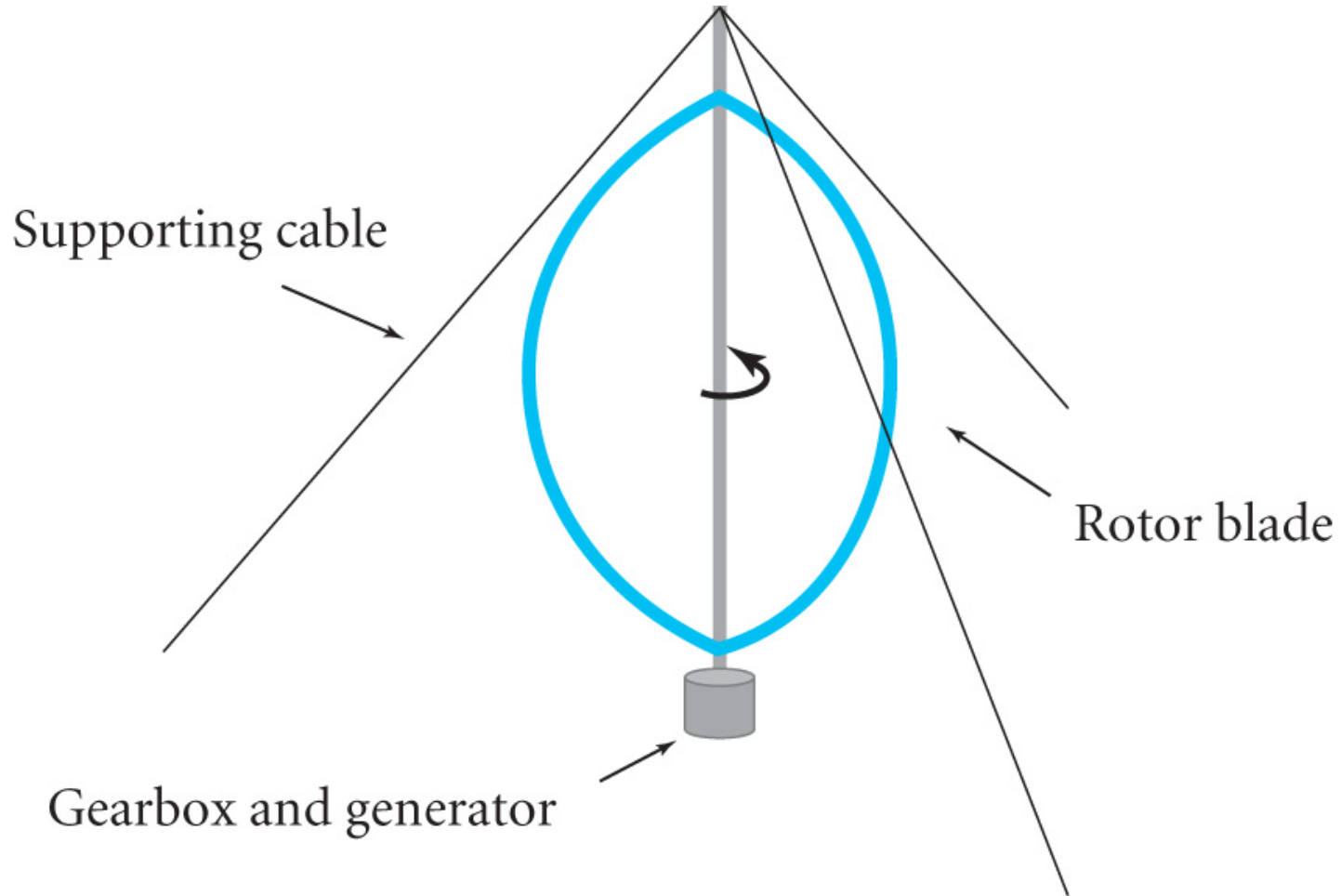
Wind turbine blades: three or two

Yaw control (into the wind)



Modern 5 MW horizontal-axis wind turbine

Vertical-axis wind turbines (VAWTs): Darrieus design (Figure) → no yaw mechanism required, easier maintenance since the gearbox and generator are situated at ground level. Less cost-effective (supporting cable required (height limitation, not for strong wind, more robust construction for greater gearbox torques than HAWT))

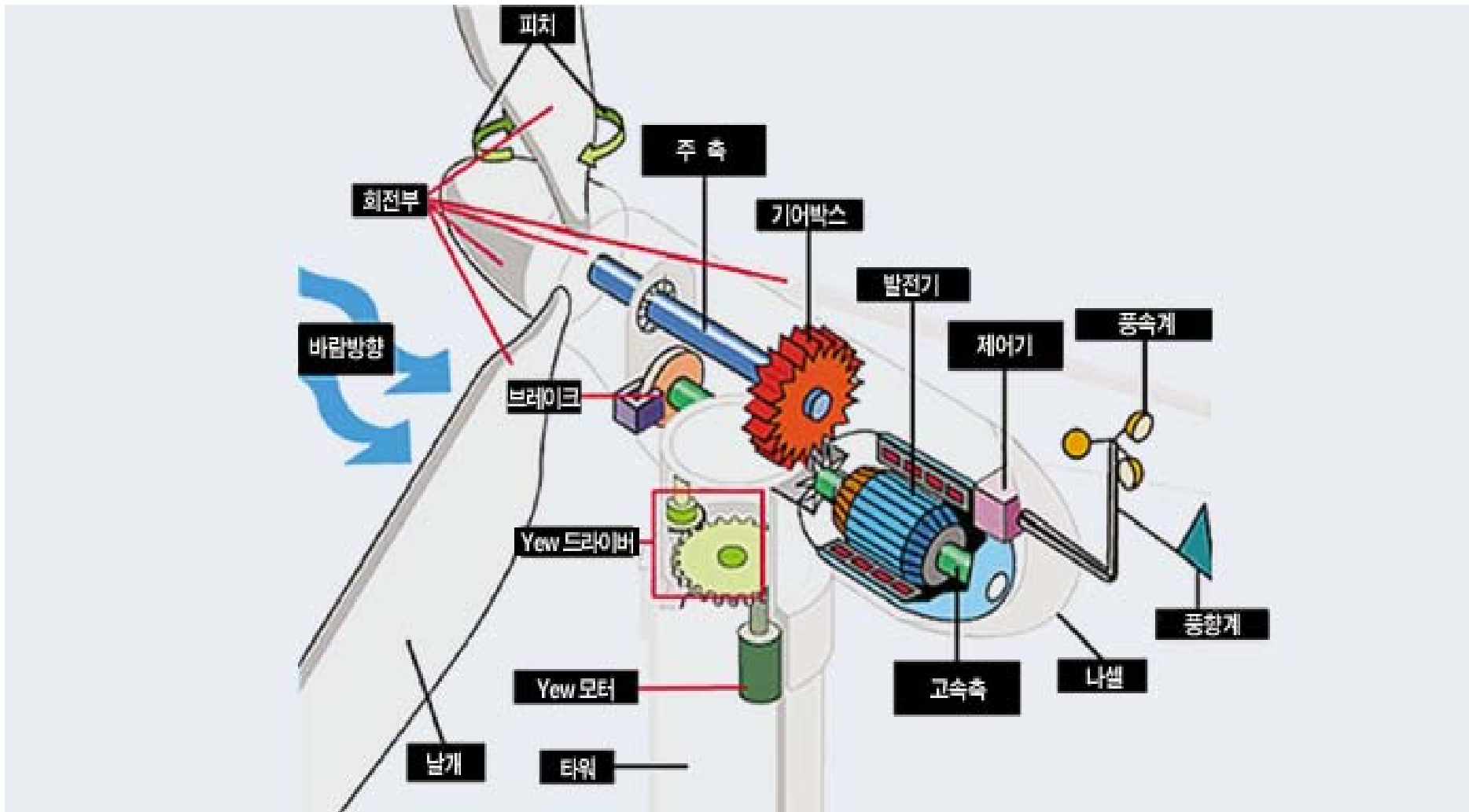


풍력발전기(WTG : Wind Turbine Generator) 시스템은 주요 부품들(Components)로 구성된 기계시스템, 전기 시스템, 그리고 풍력발전기를 제어하는 제어시스템으로 나눌 수 있다. 또 한편으로는 날개를 포함한 허브 시스템, 각종 기계, 전기, 제어장치를 탑재시킨 나셀(Nacelle), 그리고 이들 상부 중량물을 지상으로부터 받쳐주는 타워시스템으로도 구분할 수도 있다.

- 기계 및 전기시스템

바람에너지를 회전력으로 변환시켜 주는 회전날개(Blade)와 이를 주축(主軸)과 연결시켜 주는 허브(Hub)시스템, 날개의 회전력을 증속기 또는 발전기에 전달하여 주는 회전축(Shaft) 또는 주축(Main shaft), 회전속도를 올려 주는 증속기(Gear box), 증속기로부터 전달받은 기계적에너지를 전기적에너지로 변환시키는 발전기(Generator), 제동장치인 Brake, 날개의 각도를 조절하는 피치 시스템, 날개를 바람방향에 맞추기 위하여 나셀을 회전시켜 주는 요잉시스템(Yawing System), 그리고 풍력발전기를 지지하는 타워시스템 등으로 구성되어 있다.

풍력의 제어시스템은 풍속에 따른 출력, 피치각, 로터와 발전기의 회전수를 조절하는 속도 및 출력 제어 시스템, 풍향과 제동장치, 회전방식에 대한 제어를 담당하는 운전 상황 및 운전 모드 제어시스템, 전력계통과의 병렬운전을 제어하는 계통연계 제어 시스템, 풍력발전기의 운전 상태를 실시간으로 감시하고 모니터링 하는 운전 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다.





수평축 풍력발전기



수직축 풍력발전기

수평축 풍력발전기는 1개에서 4개까지의 날개를 가진 다양한 종류가 있지만, 현재 발전용으로 가장 많이 이용되고 있는 것은 3개의 날개를 가진 프로펠러형이다. 수평축 발전기는 구조가 간단하고 설치가 용이하며 에너지 변환효율이 우수하다는 장점은 있지만, 날개 전면을 바람 방향에 맞추기 위해서는 나셀을 360도 회전시켜줄 수 있는 요잉(Yawing)장치가 필요하며, 증속기(Gear box)와 발전기 등을 포함하는 무거운 나셀(Nacelle)이 타워 상부에 설치되어 점검, 정비가 어렵다는 단점이 있다.

수직축 풍력발전기에는 원호형 날개 2-3개를 수직축에 붙인 다리우스 형(Darrieus type)과 2-4개의 수직 대칭익형 날개를 붙인 자이로밀 형(Gyromill type), 그리고 반원통형의 날개를 마주보게 한 사보니우스 형(Savonius type) 등이 있다. 수직축 풍력발전기는 바람의 방향에 영향을 받지 않아 요잉장치가 필요 없으며, 사막이나 평원에는 적합하지만 소재가 비싸고 수평축에 비해 효율이 떨어지는 단점이 있다.

Gear box 유무에 따른 구분

풍력발전기 날개에 직결되어 회전되는 주 축(Main shaft)과 발전기 사이에 설치되어 발전기 축의 회전속도를 증가시켜 주는 장치를 증속기(Gear box)라고 하는데, 풍력발전기에는 증속기를 포함하는 증속기형 풍력발전기와 증속기가 없이 발전기로 직결되는 직결형(gearless type) 풍력발전기가 있다.

간접구동식이라고도 불리는 **증속기형(g geared type) 풍력발전기**는 초기 풍력터빈의 개발 단계부터 적용된 기술적 접근방법이었으며 그동안 기술적인 발전을 거듭하면서 오늘에 이르렀고 아직도 시장의 80~ 90% 이상이 이 형식으로 되어 있다. 최근에는 증속비를 높여 발전기의 크기를 감소시키는 기술과 증속기형의 문제점인 진동, 소음 및 하중의 불균등한 분배 등의 문제점을 해소하기 위한 기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

직결식 풍력발전기는 풍력터빈용 발전기(generator)의 기술이 향상되면서 증속기가 없는 형태로 개발된 것이다. 기어박스가 없기 때문에 구조가 단순하고 기계적인 응력이 감소되며 기계적 소음도 낮다. 또한 운전, 유지비용이 적게 소요되며 가동율(availability)도 높다는 장점이 있다. 그러나 회전속도가 느려 다극발전기를 사용해야 하기 때문에 발전기의 크기와 무게가 증가되고 가격도 비싸진다. 또한 로터와 발전기가 가까이 있어 나셀의 무게중심이 한쪽으로 쏠릴 수 있어 이를 해소하는데 타워와 기초비용이 증가되는 단점이 있다. 그러나 최근에는 관련 기술의 발달로 이러한 단점이 상당부분 해소된 혁신적인 시스템이 개발되고 있다.

운전속도에 의한 분류

정속형 풍력발전기란 풍속에 상관없이 로터가 일정한 속도로 회전되는 풍력터빈을 말한다. 정속운전 풍력발전기는 유도발전기를 장착하고 계통에 직접 연결되는데, 무효전력 보상을 위하여 역률 보상장치를 설치하여야 하며, 계통연계시 돌입전류로 인한 시스템 보호를 위하여 소프트 스타터를 사용한다.

정속형 풍력발전기는 구조가 간단하고 신뢰성이 높으며 발전기의 가격이 낮다는 장점을 가지고 있는 반면, 무효전력 및 전력품질의 제어가 어렵고 기계적 응력을 많이 받는다는 단점이 있다. 특히 정속운전은 특정 풍속에서는 최대의 효율을 낼 수 있어 1990년대 초기 대개의 풍력터빈은 정속으로 운전하였다.

가변속형 풍력터빈은 넓은 범위의 풍속에서 최대의 공력효율을 얻을 수 있도록 설계된 풍력발전기를 말한다. 이 형식은 가변속 운전을 통하여 변동하는 풍속에 대응하는 회전속도를 연속적으로 받아들일 수 있으며, 이때 최대 출력계수에 해당하는 주속비는 일정한 값으로 유지된다. 가변속형은 발전기의 토크를 일정하게 유지하고 풍속의 변화는 발전기의 속도를 변화시켜 대응한다.

유도발전기나 동기발전기를 사용하는데 전력변환기를 통하여 계통에 연결된다. 전력변환기는 발전기의 속도를 제어하는데 풍속변화에 의한 출력변동은 발전기의 속도 변화와 로터 속도의 변화를 통하여 흡수한다.

가변속형은 동일한 풍황 조건에서 정속형 보다 많은 출력과 우수한 전력품질을 얻을 수 있으며 기계적 응력이 감소된다는 장점이 있는 반면, 정속형보다 전기시스템이 복잡하여 관련된 전기부품이 많이 소요되며 가격이 상승된다는 단점이 있다.

계통 연계(grid connection) 유무에 따른 분류

풍력터빈에서 생산된 전력을 국가의 전력계통망에 연결하여 전력을 공급하는 형식을 **계통연계형 풍력발전**이라 한다. 오늘날 중형 이상의 풍력터빈의 경우 대부분 계통에 연결하여 발전용으로 사용하고 있으며 이 경우가 경제성이나 기술적인 측면에서 유리하다.

전력이 사용되는 지역 근처에 발전기를 설치하고 독립적으로 전력을 활용하는 형식을 **독립운전형 풍력발전**이라고 한다. 소형풍력터빈의 경우에도 드물게 계통에 연계하여 사용하는 경우도 있으나 대개는 원격지에서 독립적으로 운전하거나 디젤발전기 등과 혼합하여 하이브리드 형식으로 운전하기도 한다.

설치 장소에 따른 분류

육상풍력발전이란 물 속이 아닌 내륙지역에 풍력발전설비를 건설하여 발전하는 것을 말한다. 육상풍력은 건설이 용이하고 경제성이 높다는 장점이 있어 지금까지 건설된 국내외 대부분의 풍력발전단지는 이 형식에 속하였지만, 육상 단지의 포화, 민원 발생, 풍력효율 저하, 대형화의 한계성 등 건설 상의 제약요인이 많아 지금은 점차 해상풍력으로 이행하는 추세에 있다.

해상풍력발전이란 물 속에 풍력발전단지를 건설하여 바람에 의한 전력생산을 하는 것을 말한다. 해상(Offshore)이라는 개념은 해양산업에서 통상적으로 사용하는 바다만을 의미하는 것이 아니기 때문에, 해상풍력발전에는 호수, 협강, 폐쇄된 해안 지역 등 내륙(Inshore)에 속하는 지역의 풍력발전도 포함된다. 해상풍력발전은 전통적인 바닥고정(Fixed bottom)형 풍력발전기술은 물론, 물이 깊은 곳에서는 부유식 풍력터빈(Floating wind turbine) 기술도 사용된다. 또한 해상풍력은 넓은 부지 확보가 가능하고 민원이 적어 풍력단지의 대형화가 가능하며, 바람의 품질이나 풍속이 양호하여 풍력발전기의 안전성과 효율성 측면에서도 유리할 뿐 아니라, 설비의 대형화 추세에도 적합하다는 장점이 있다. 반면, 육상풍력에 비하여 경제성이 낮고, 설치와 운전·유지에 어려움이 있으며, 계통연계가 어렵다는 등의 단점이 있다.

4. Kinetic energy of wind

The energy of wind is in the form of kinetic energy

For wind speed u , air density ρ , the energy density E (energy per unit volume)

$$E = \frac{1}{2} \rho u^2$$

The air volume = uA (A : cross-sectional area)

Kinetic energy of the volume of air flowing per second (power), $P = EuA$

$$P = \frac{1}{2} A \rho u^3$$

Power in the wind varies as the cube of the wind speed u

e.g. 5.1

5. Principles of a horizontal-axis wind turbine

Not all the power in the wind can be extracted by a wind turbine (because of downstream to maintain air flow) → theoretical maximum efficiency of **59%** (Betz limit)

The maximum power is generated when downstream of the turbine the wind speed is 1/3 of the upstream speed u_0 and at the turbine the wind speed is 2/3 of u_0 →

$$u_2 = 1/3 u_0 \text{ and } u_1 = 2/3 u_0$$

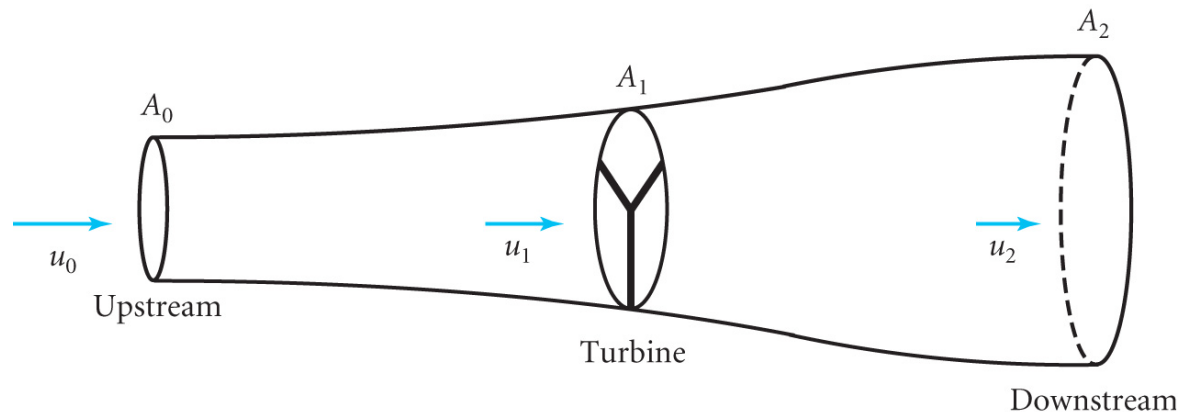
$$\rightarrow \text{power } P = \frac{1}{2} \rho A_1 (16/27) u_0^3 \text{ (page 106)}$$

The power through A_1 with a speed u_0 : $P_W = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3$

The fraction of the power extracted by the turbine ('power coefficient', C_P)

$$C_P = P / [\frac{1}{2} \rho u_0^3 A_1] \text{ or } P = \frac{1}{2} C_P \rho u_0^3 A_1$$

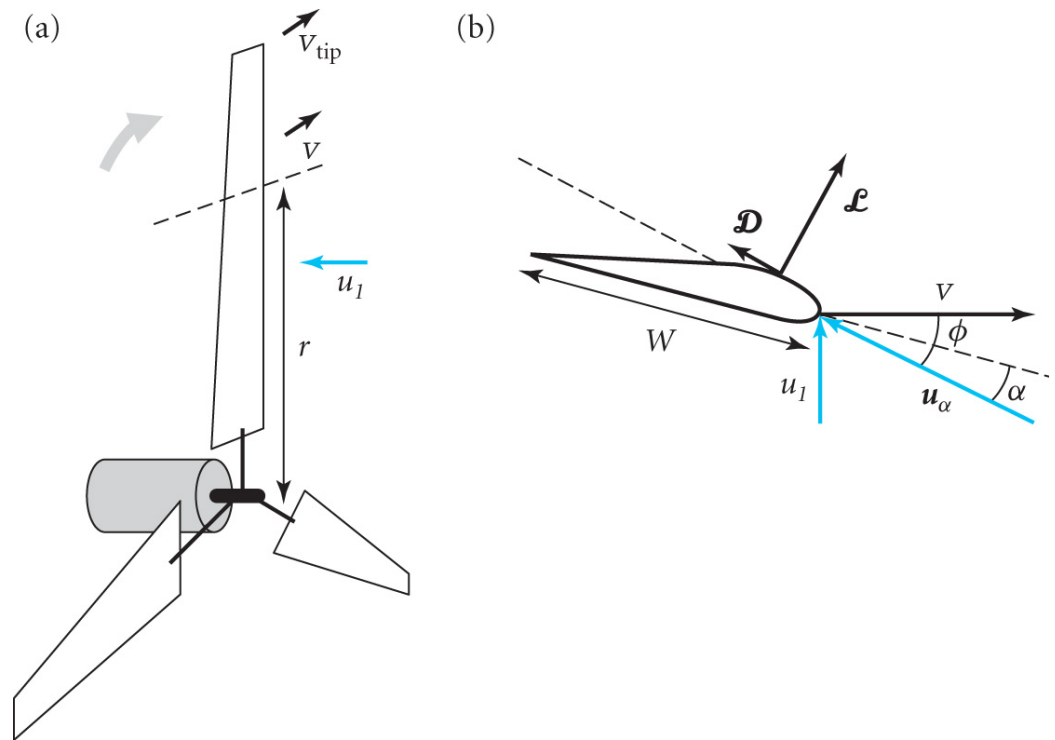
$C_P = (16/27)\% \sim 59\%$ Betz or Lanchester-Betz limit



6. Wind turbine blade design

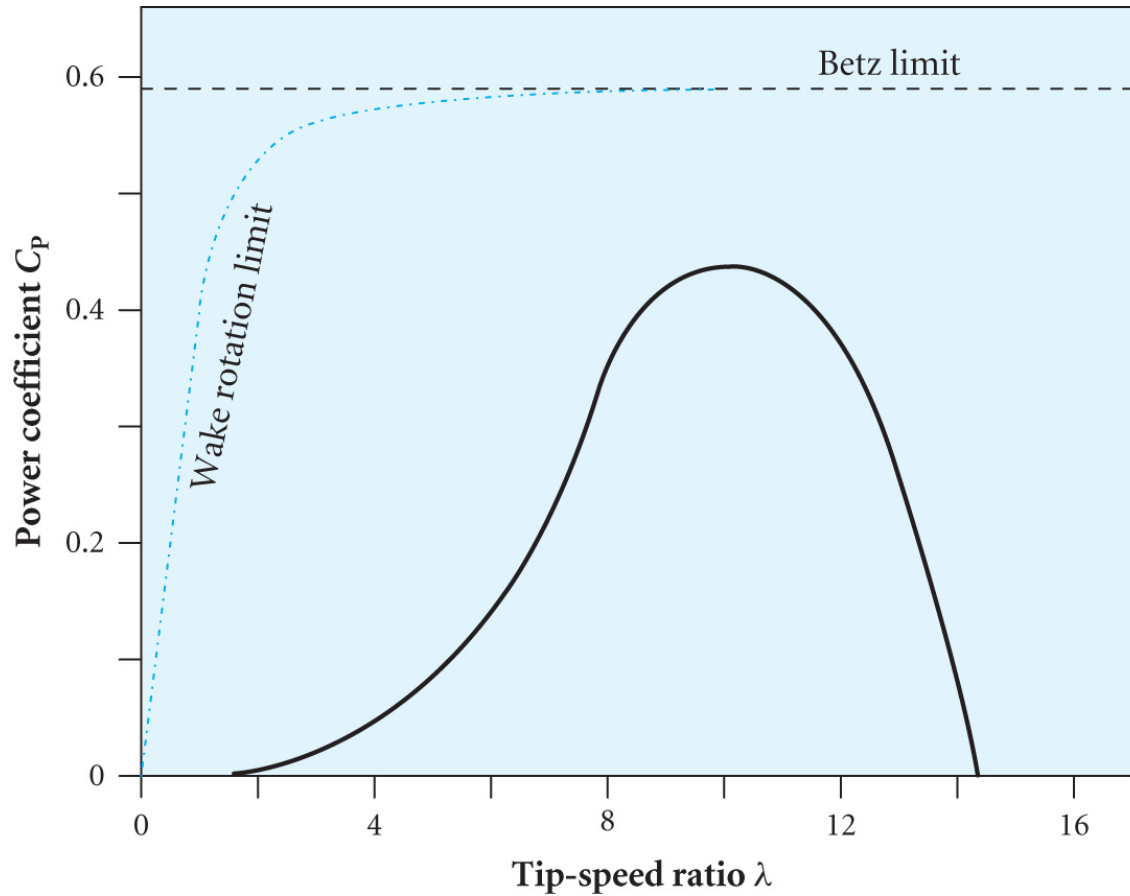
Table 5.1 (page 110): radius, width, angle...

Tip-speed ratio(λ): the ratio of the speed of the blade at the tip (v_{tip}) to the speed of the incident wind (u_0) $\rightarrow \lambda = v_{\text{tip}}/u_0$



7. Dependence of the power coefficient C_P on the tip-speed ratio λ

Maximum efficiency at $\lambda \sim 10$



7. Design of a modern horizontal-axis wind turbine

Modern turbine design with λ of 6- to give a higher power efficiency C_p

Larger λ means a higher shaft speed, smaller width blades, less blade material....→ in practice these considerations have tended to favor the maximum size possible, which is ~5 MW (2005).