

---

# エネルギー論第10回目 風力発電システムの仕組み

千葉大学電気電子工学科

劉 康志

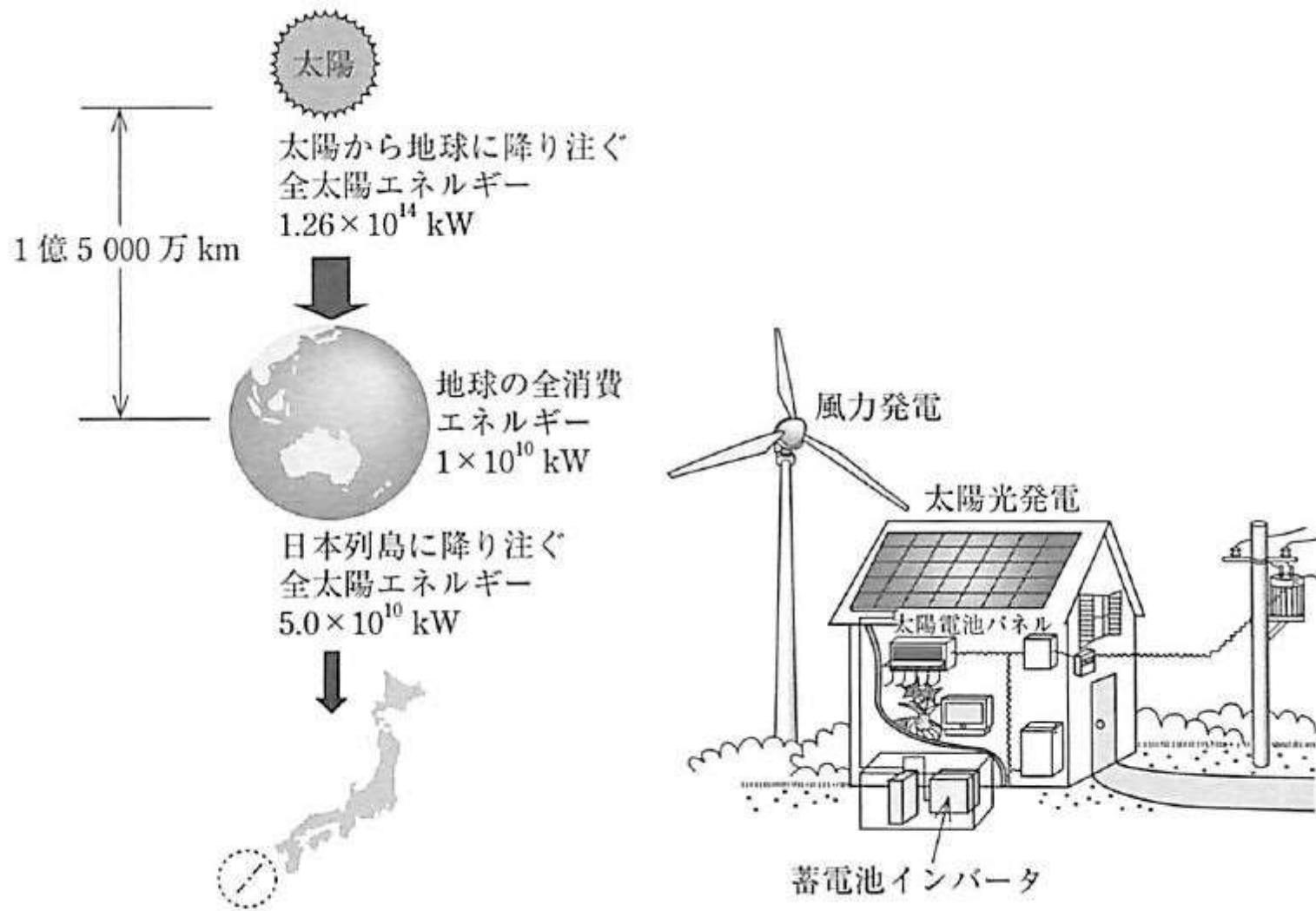
2016年6月15日

# 講義内容

---

- 風力エネルギーの基礎
- 風力発電の基本的な流れ
- 風車の種類
- 風車のエネルギー変換効率
- 風力のパワー曲線
- 各種風力発電システムの構成・特長
- 風力エネルギーの最大利用技術
- 風力発電の課題
- 風力発電の出力安定化
- 劉研究室における取組

# 地球に降り注ぐ太陽光エネルギー



● 図 10・1 太陽からのエネルギー ●

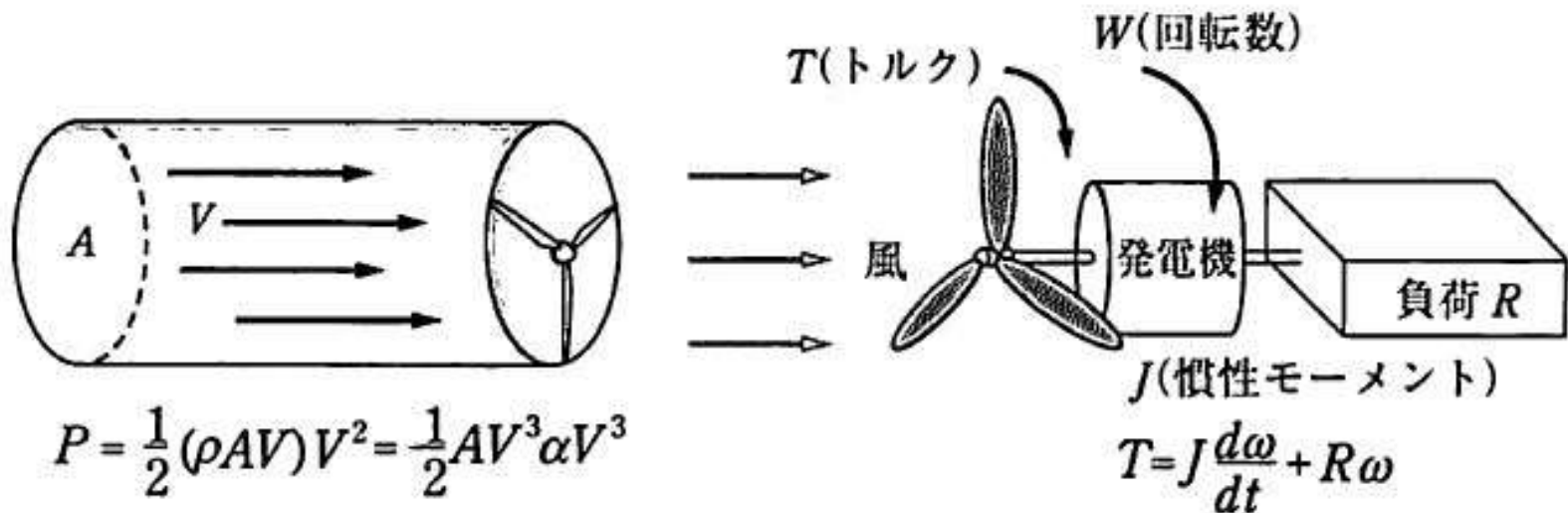
# 太陽光エネルギー

---

- 地球に降り注ぐエネルギー  
電力換算:  $1.26 \times 10^{14}$  kW  
全世界消費量の 1万倍以上  
日本:  $5.0 \times 10^{10}$  kW
- 風力エネルギー  
太陽光エネルギーの 0.2%
- 無尽蔵、ただ。

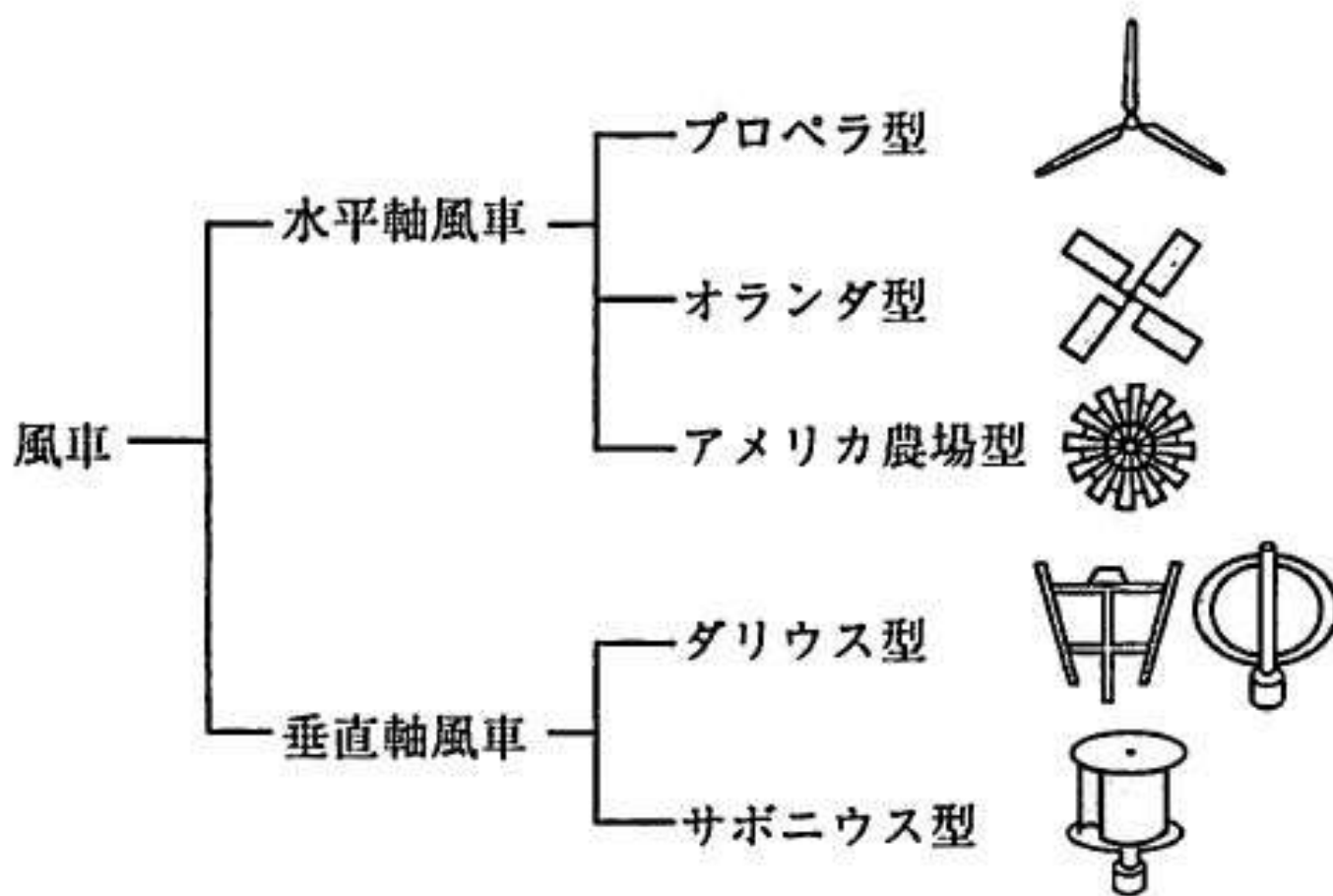
# 風力発電の原理

- 風車のブレードで風を受け取る
- 風車を回し、風車軸に直結する発電機を回転させる。
- 発電機で発電し、電気エネルギーに変換する。



◎ 図 10・2 風力エネルギー ◎

# 風車の種類



◎ 図 10・3 風車の種類 ◎

# 風車の変換効率

---

- 風の運動エネルギー

$$W = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$  : 空気密度

$A = \pi R^2 \text{ m}^2$  : 受風断面積

$V$  : 風速

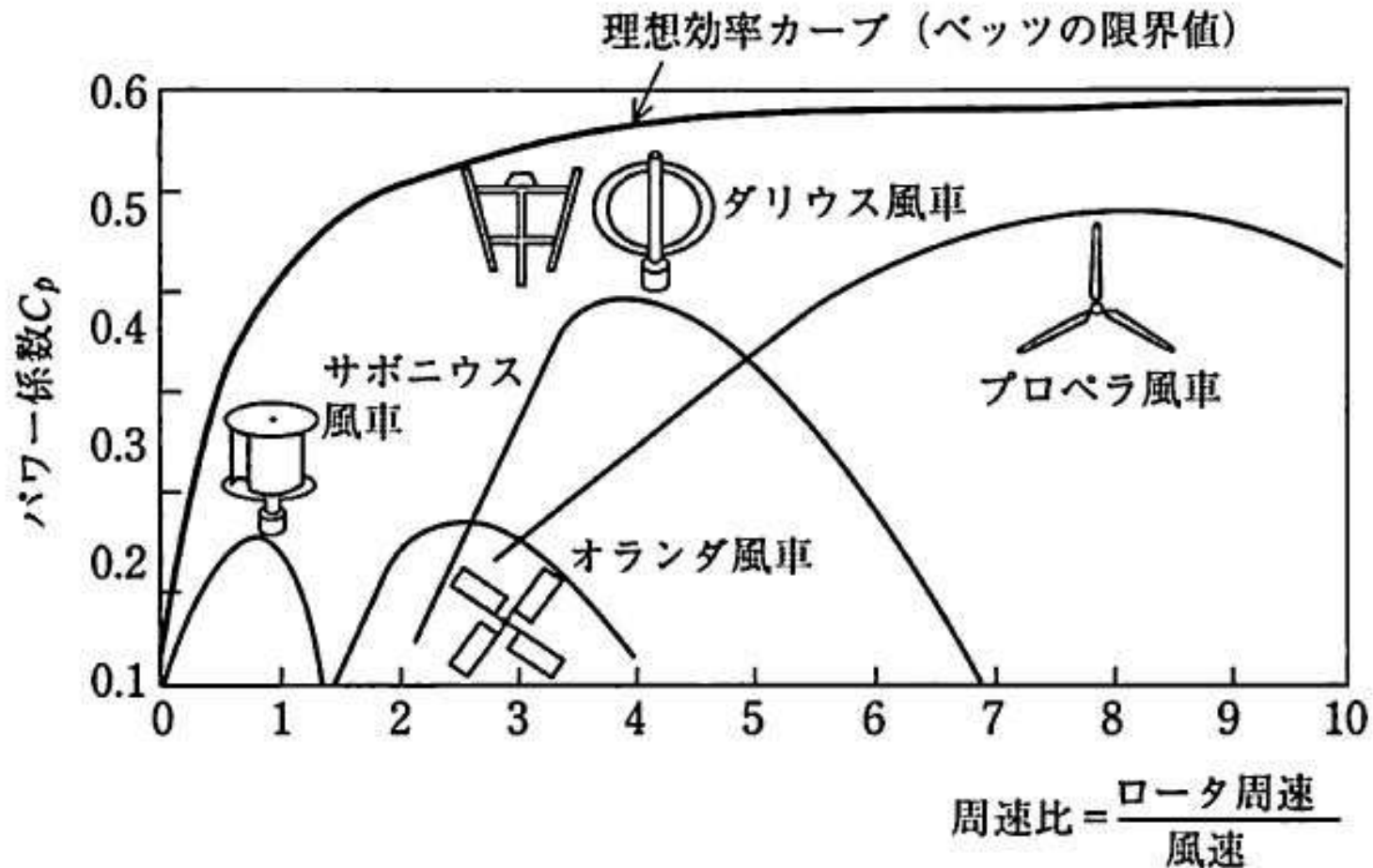
- 風車の効率 : 60% 以下

風車が受け取るパワー:

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

$$C_p < 60\%$$

# 各種風車のパワー係数： 周速比依存

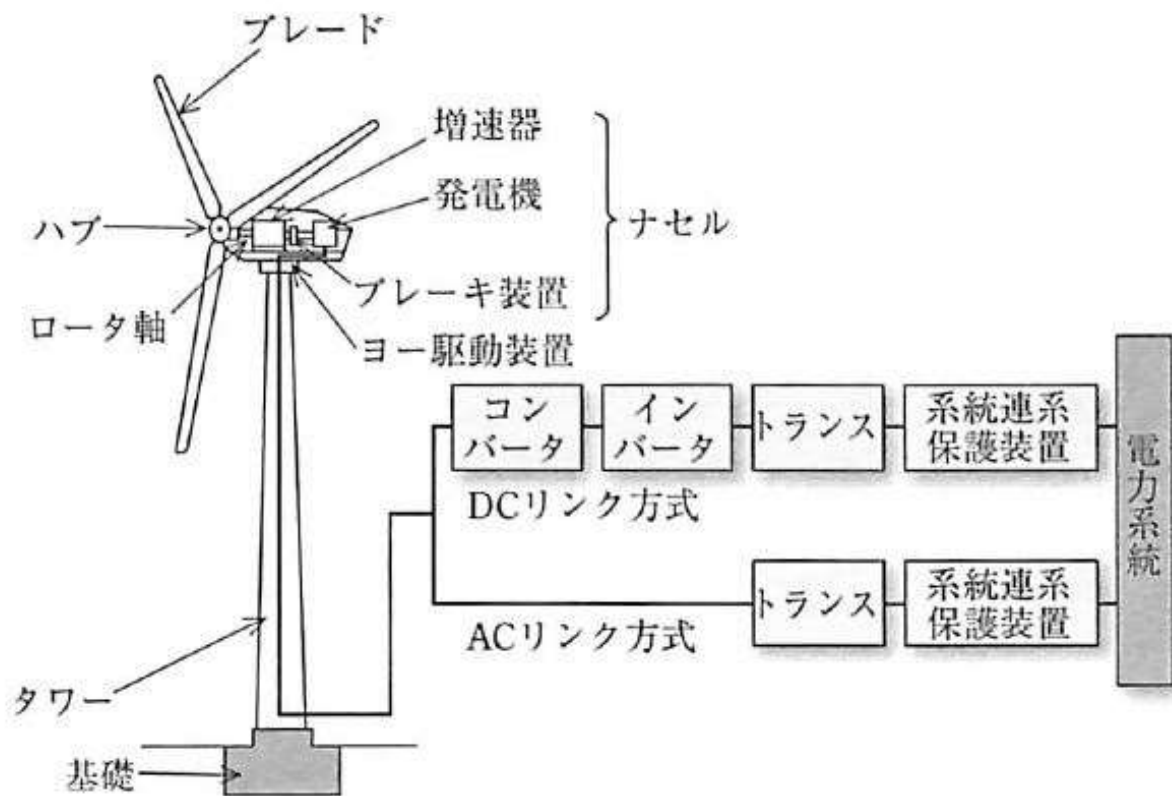


● 図 10・4 各種風車の出力係数 (エネルギー変換効率) ●



# 大型風力発電システムの構成

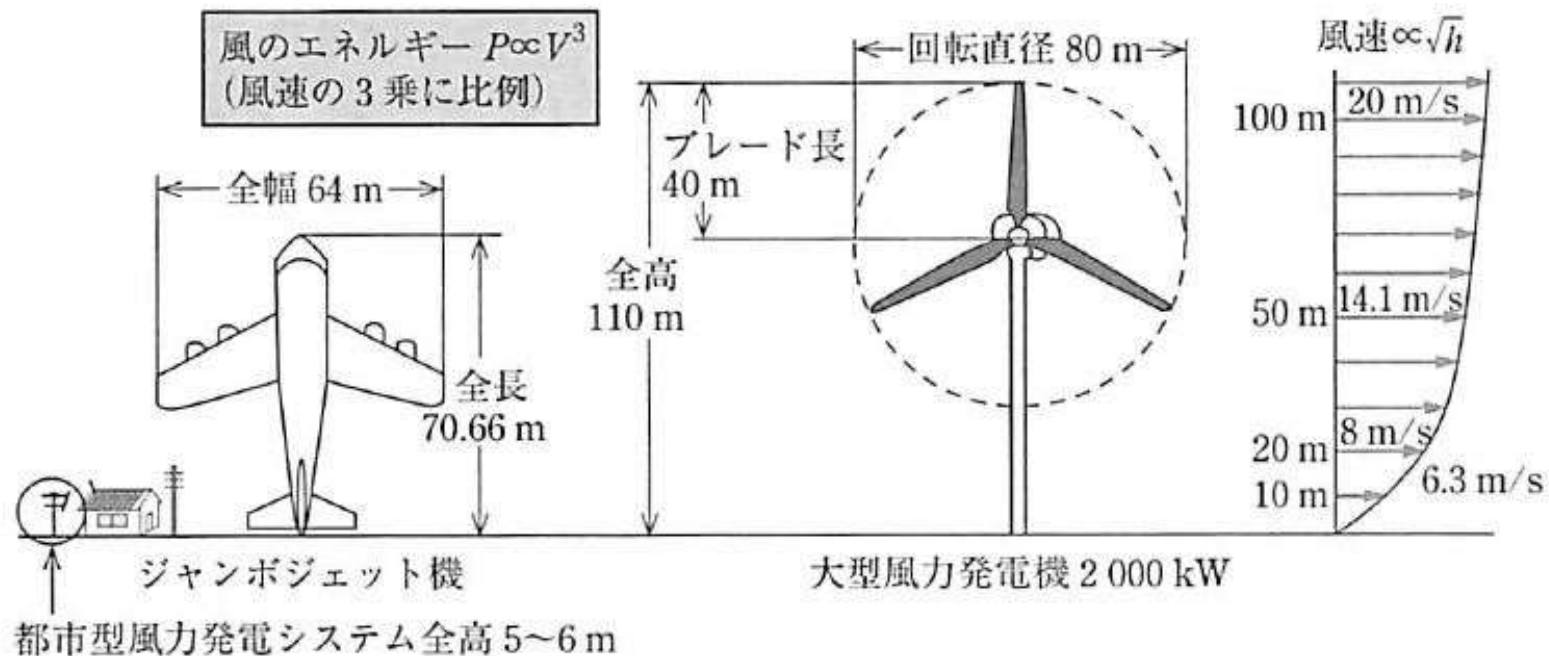
- ブレードを長くすることにより、高い周速比を確保、変換効率は高められる。
- 火力発電匹敵するC/P



● 図 10・5 プロペラ型大型風力発電システム (2 000 kW) の基本構成 ●

# 風力発電機の大型化

- 洋上発電がメイン
- エネルギー密度が高い
- コストが安い



● 図 10・6 大型風力発電システムの概要 ●

# 都市型風力発電システム

- 設置が容易
- パワー密度、エネルギー密度共に低い
- コスト高



水平軸型風車  
回転面を風向に正対させる方位制御が必要である



垂直軸型風車  
あらゆる方位の風に対応可能

● 図 10・7 都市型風力発電システム（小型ダリウス風車） ●  
写真提供：大同工業大 佐藤研究室

# Wind energy benefits

---

- No air emissions
- No fuel to mine, transport, or store
- No cooling water
- No water pollution
- No wastes



# Wind turbines

---



# Turbines: Different sizes and applications



## **Small ( $\leq 10$ kW)**

- Homes (Grid-connected)
- Farms
- Remote Applications  
(e.g. battery charging, water pumping, telecom sites)



## **Intermediate (10-500 kW)**

- Village Power
- Hybrid Systems
- Distributed Power



## **Large (500 kW – 5 MW)**

- Central Station Wind Farms
- Distributed Power
- Offshore Wind

# Onshore wind farm

---



- Range in size from 100 kW to 5 MW
- Provide wholesale bulk power
- Require 13-mph average wind sites

# Offshore wind farm

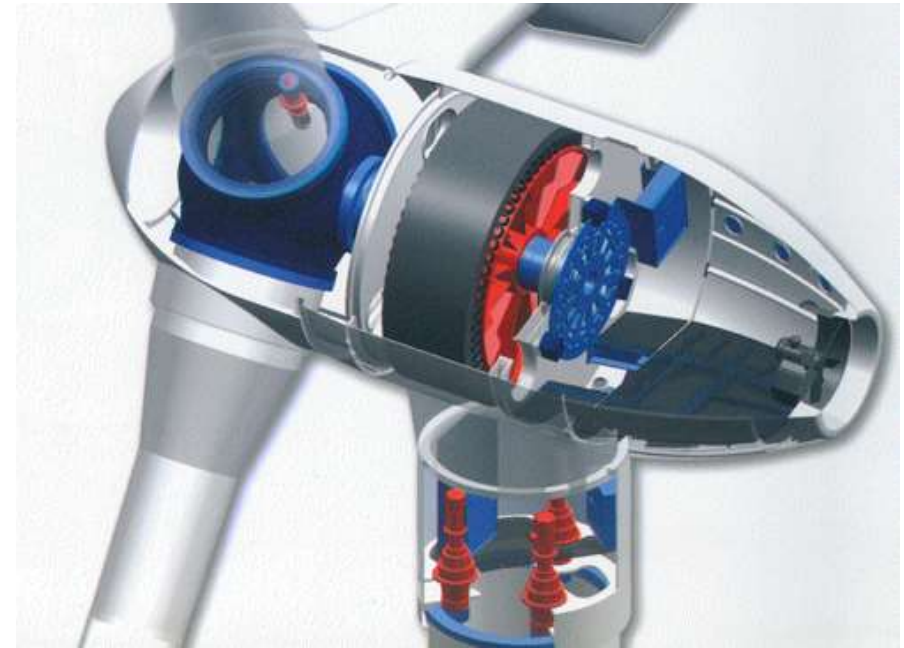
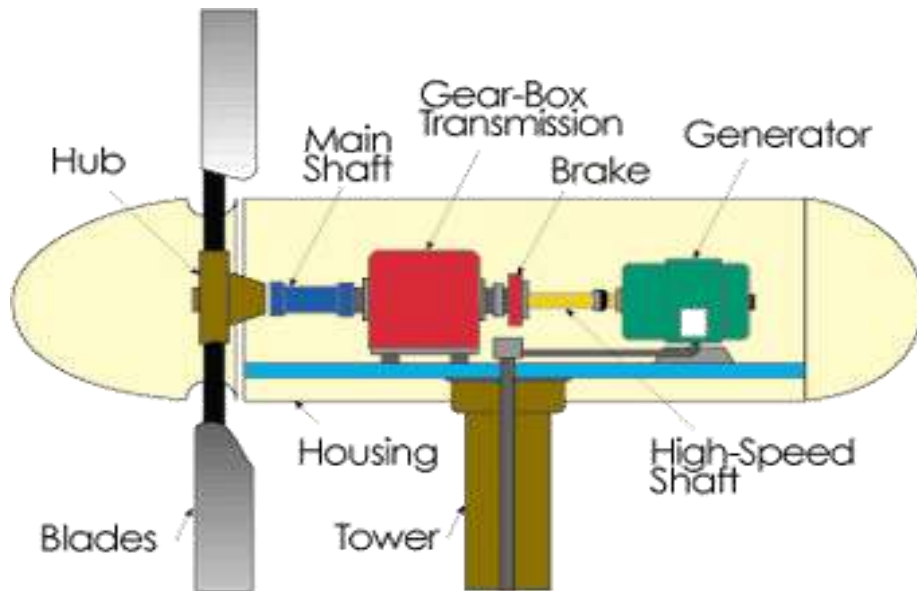
---





# Wind turbine structure

---



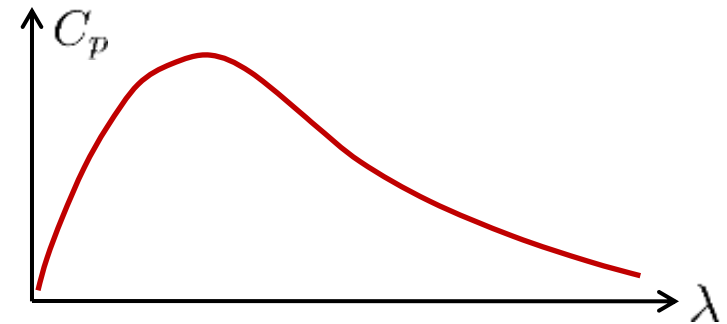
# Power curve: Aerodynamics

---

- Power to the generator shaft

$$P_{\text{tur}} = \frac{1}{2} C_p(\theta, \lambda) \rho A_v v_{\text{wind}}^3$$

$$\lambda = \frac{v_{\text{tip}}}{v_{\text{wind}}} = \frac{R\omega}{v_{\text{wind}}}$$

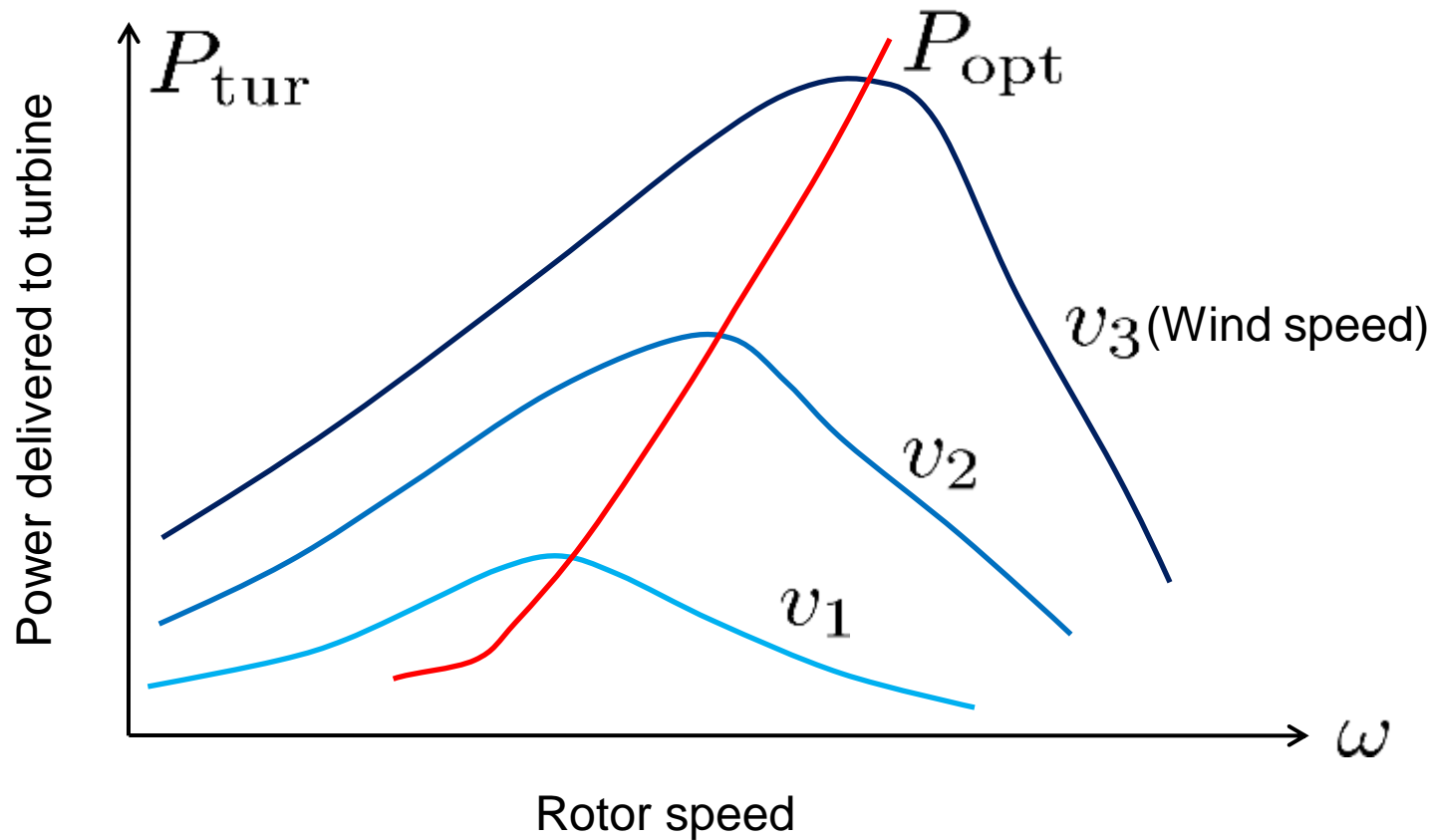


= ratio between tip-speed and wind speed

- Torque to the generator shaft

$$T_w = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 v_{\text{eq}} C_p(\theta, \lambda)$$

# MPPT (maximum power point tracking)



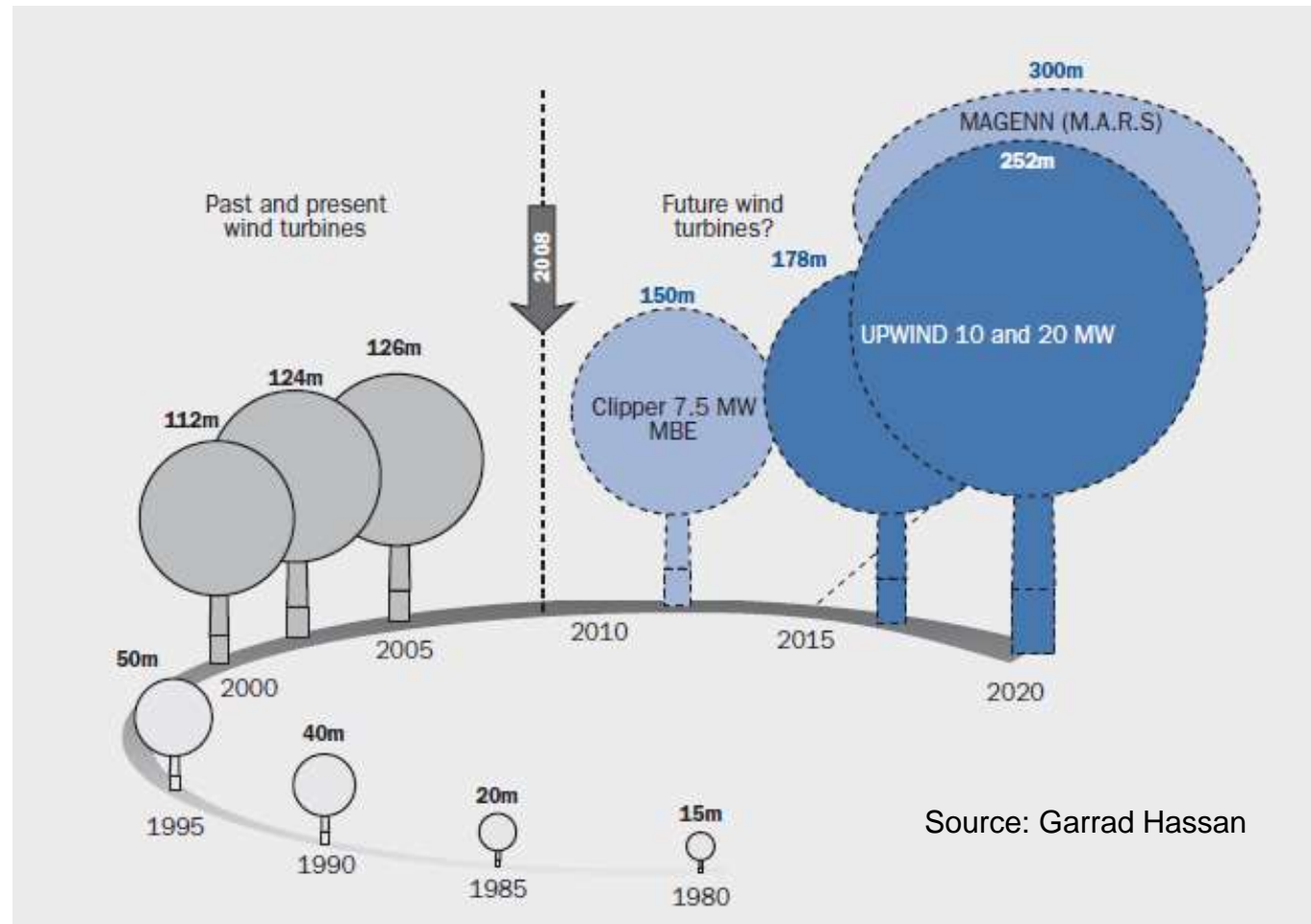
# Wind turbine sizes

1980s:

- 50 kW capacity

Today's average:

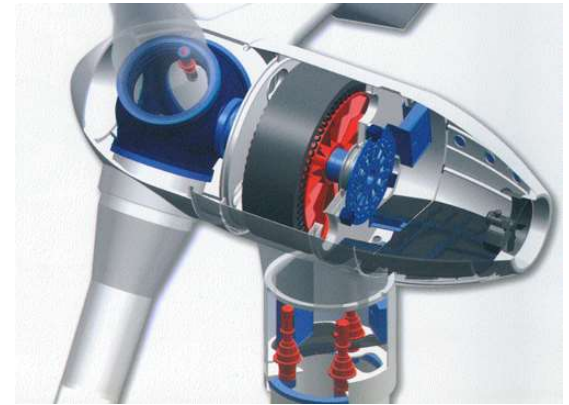
- Onshore: 2 MW
- Offshore: 5 MW



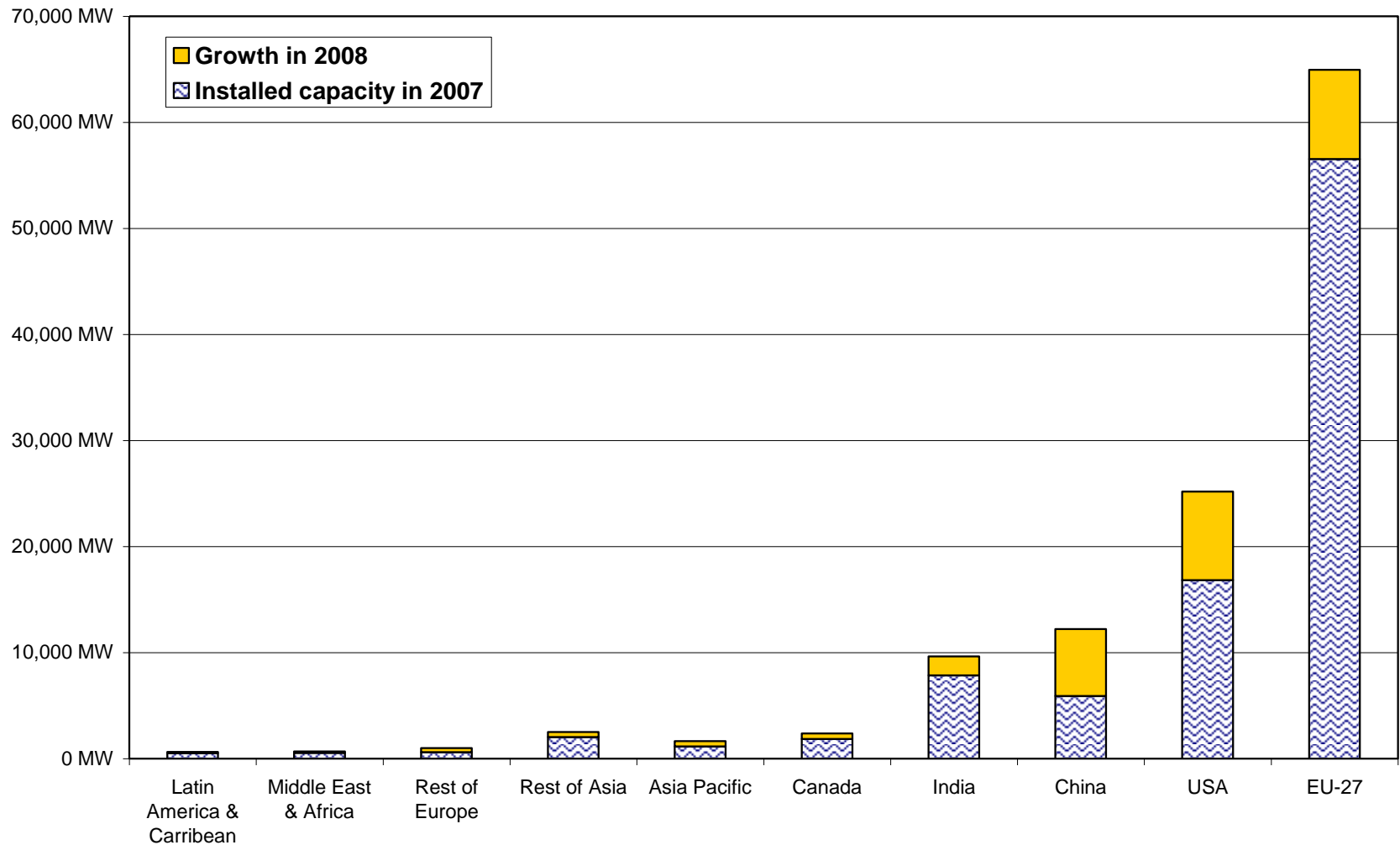
# Cost structure of a typical 2 MW wind power plant

---

	Investment (€/kW)	Share (%)
Turbine (excluding labor)	928	75.6
Foundation	80	6.5
Electric installation	18	1.5
Grid connection	109	8.9
Control systems	4	0.3
Consultancy	15	1.2
Land	48	3.9
Financial costs	15	1.2
Road	11	0.9
<b>Total</b>	<b>1,227 €/kW</b>	<b>100 %</b>

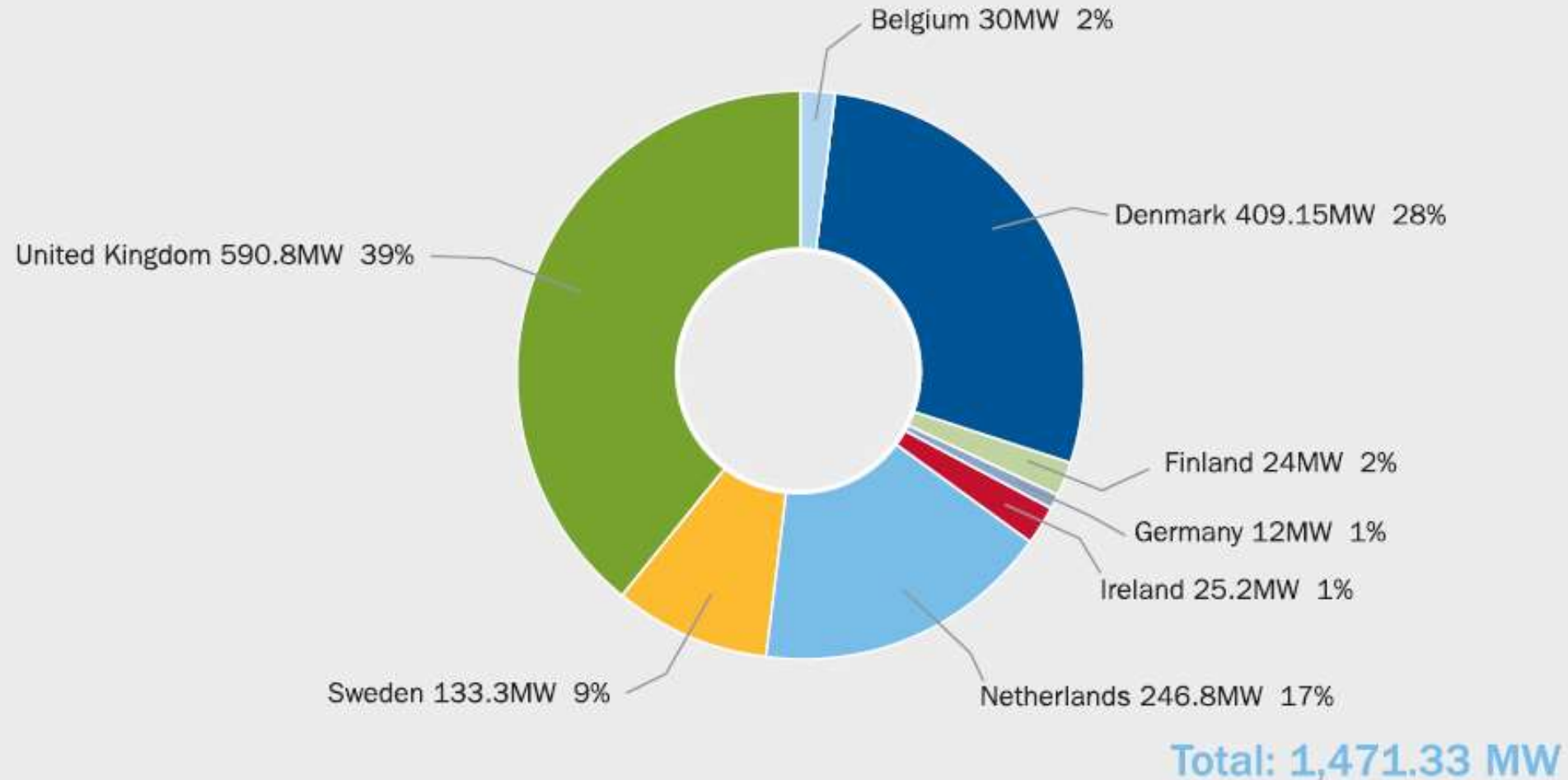


# Installed wind power capacity in 2008

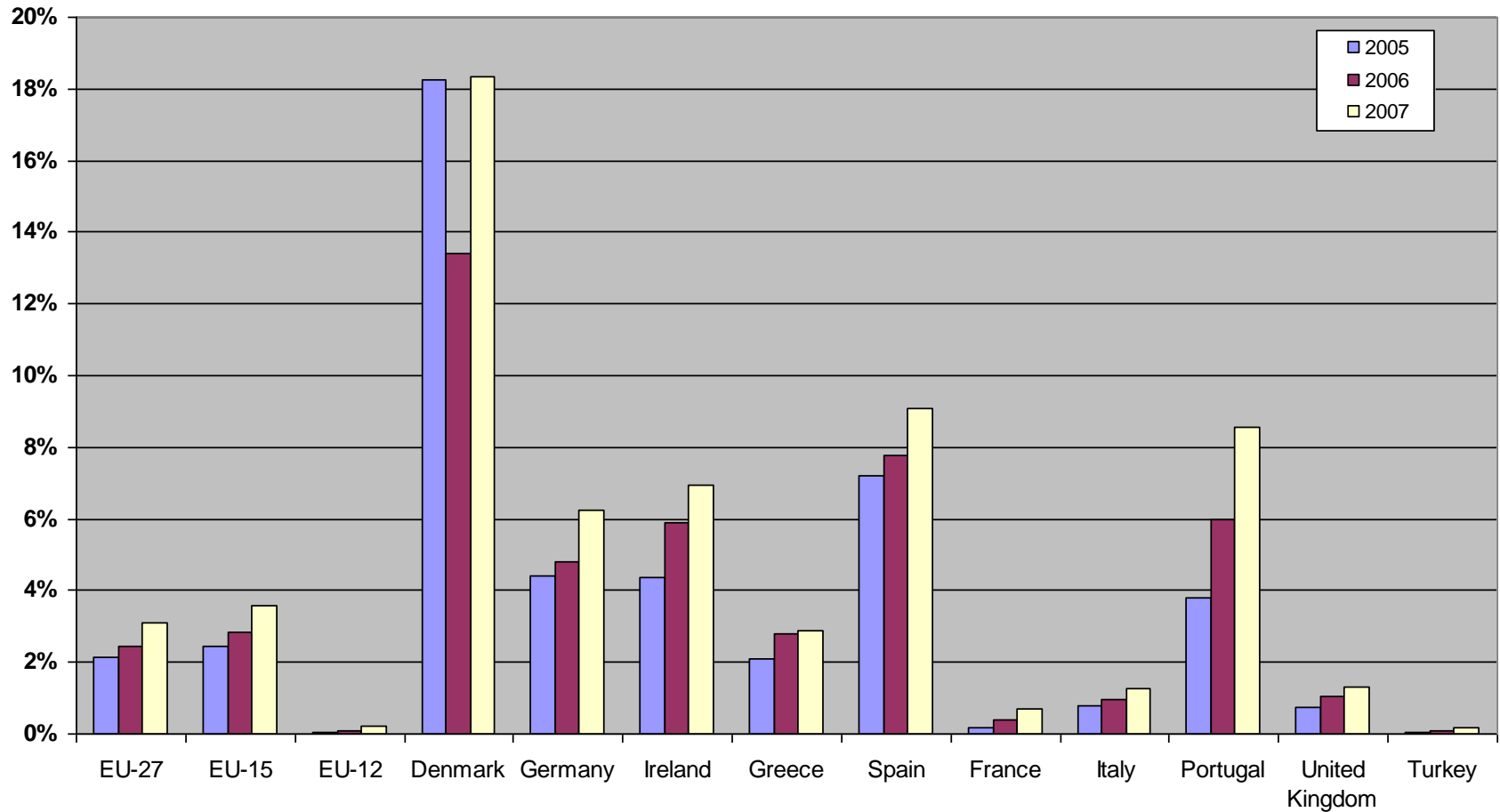


# Offshore wind power installed in EU-27 by 2008

---



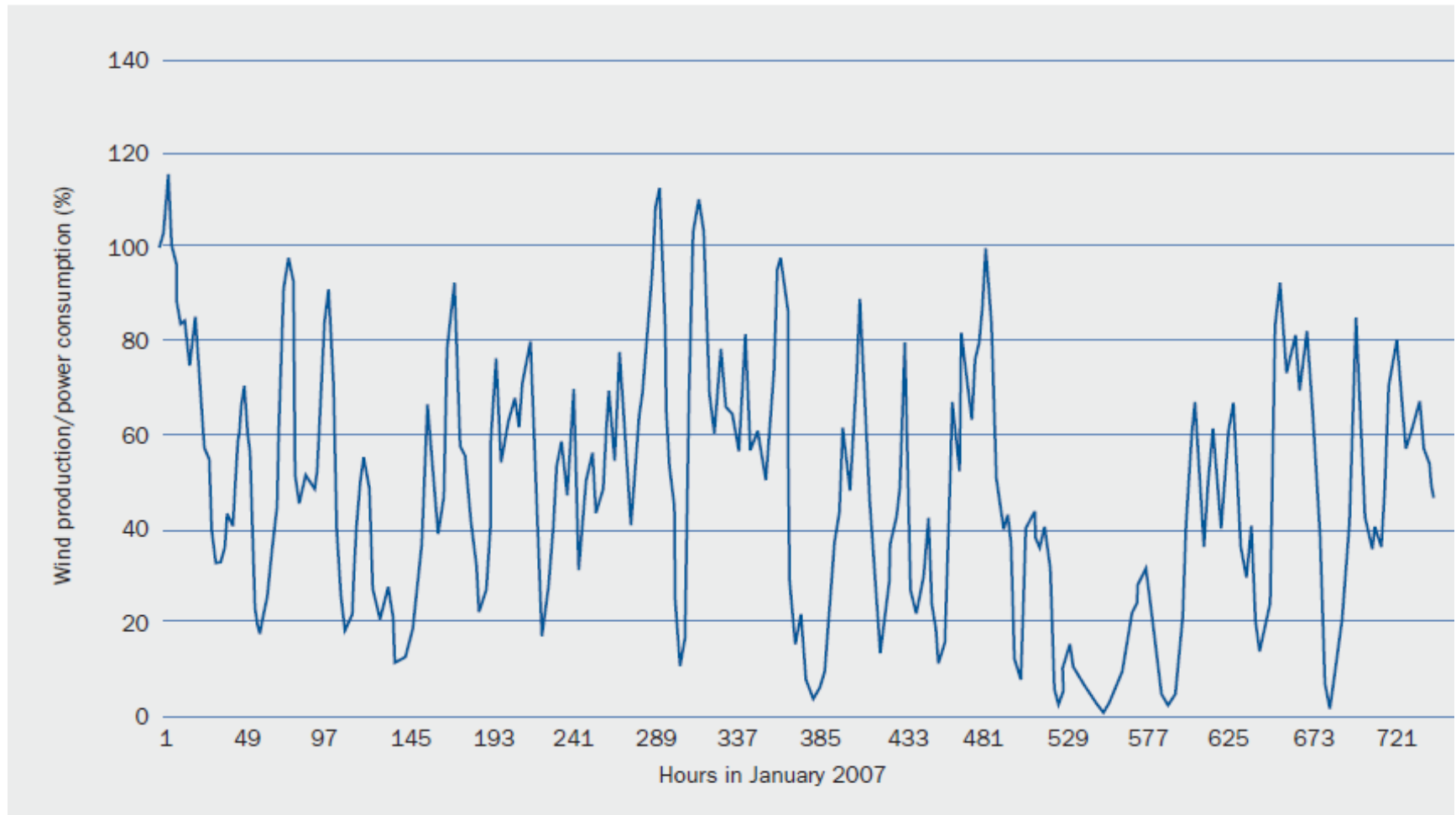
# Wind energy in gross electricity generation





# Example: Share of Wind power in Denmark

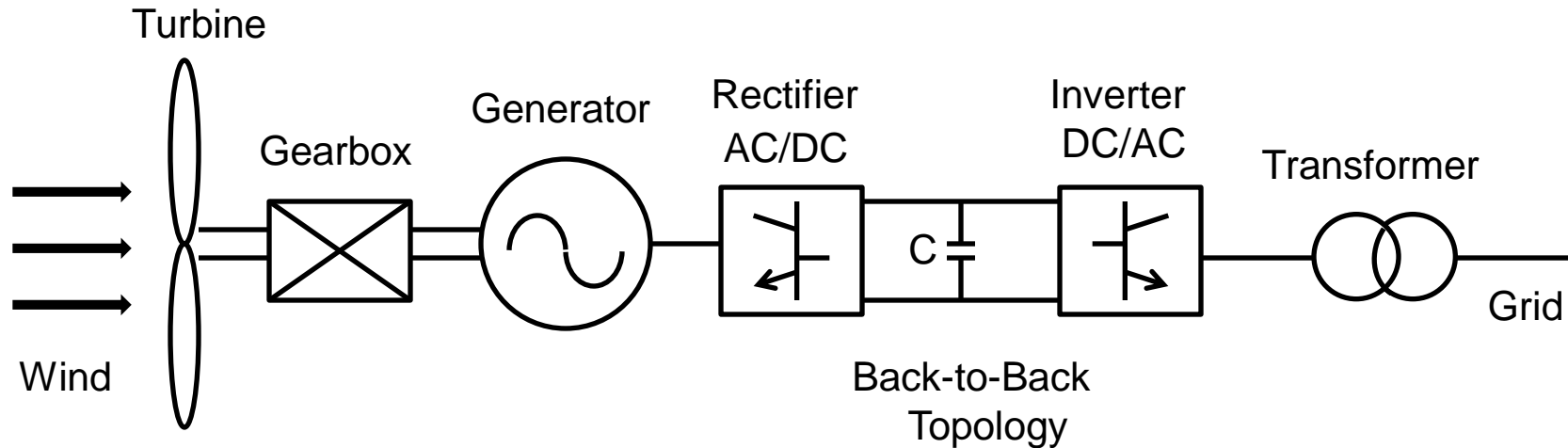
---



---

# Integration of wind energy into the power grid

# Integration into grid: Wind energy



- Wind turbine is operated at MPPT mode, rotor speed is variable, leading to frequency fluctuation.
- To synchronize with grid, power electronics plays the key role.
- Rectifier: AC/DC
- Converter: DC/AC

# Connecting wind power to the grid

---

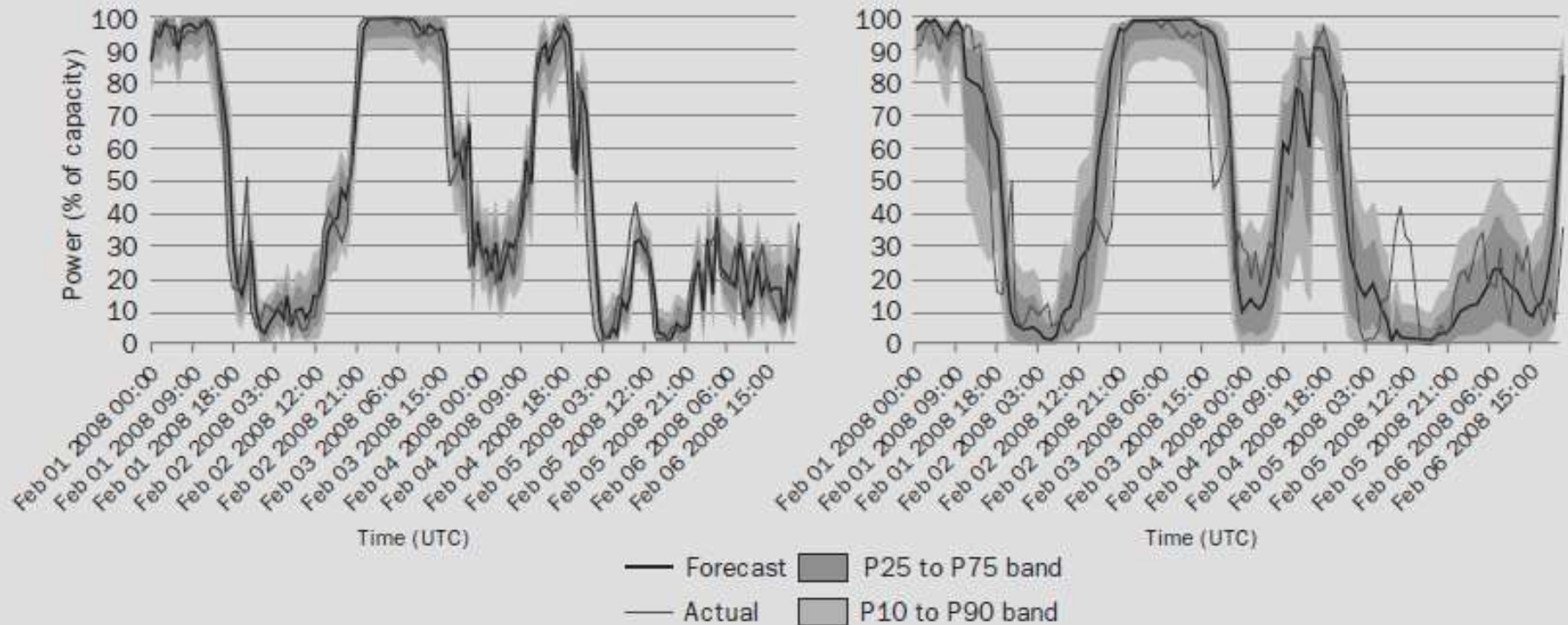
## Administrative challenge

- Grid access in many countries a key barrier for wind power development

## Physical challenge

- The electricity grid has been built for centralized power plants (fossil, nuclear, hydro)
- The best wind sites are sometimes in areas with weak grid infrastructure → Grid extensions required to integrate these wind energy potentials

# Fluctuating wind energy source (1)



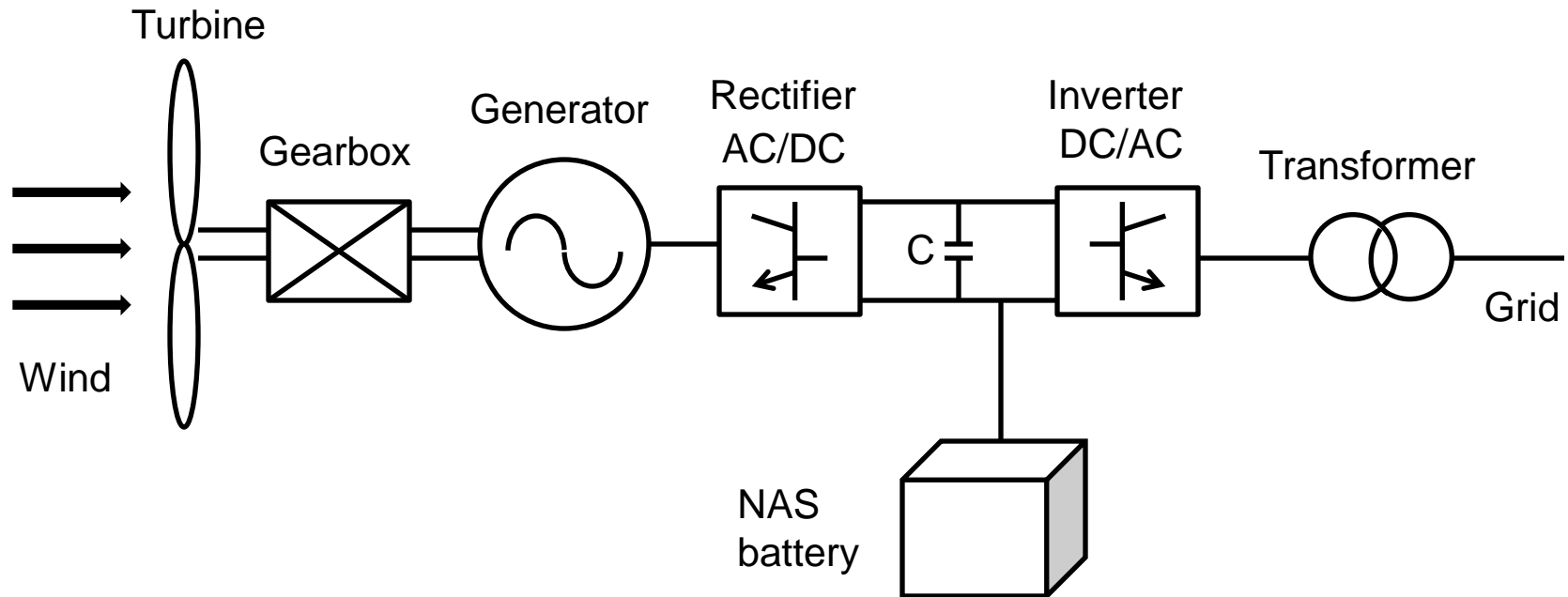
Source: Garrad Hassan

→ Challenge of forecasting and balancing wind power production

# Fluctuating wind energy source (2)

- Disadvantage: Wind source is not always available
- Advantage: When it is available, zero fuel costs
- Power fluctuation causes instability of grid, even blackout in the worst case
- → Combination with other flexible power generators such as hydro generation
- → Combination with high power storages such as NAS battery

# Smoothing wind power fluctuation



# Wind power isn't perfect

---

- Wind power output varies over time; it isn't dispatchable
- Wind power is location-dependent (rural vs. urban where it is needed most)
- Wind power is transmission-dependent for tie-in to the grid
- Wind power has environmental impacts (low freq. noise)
- Wind power can only meet part of the electrical load

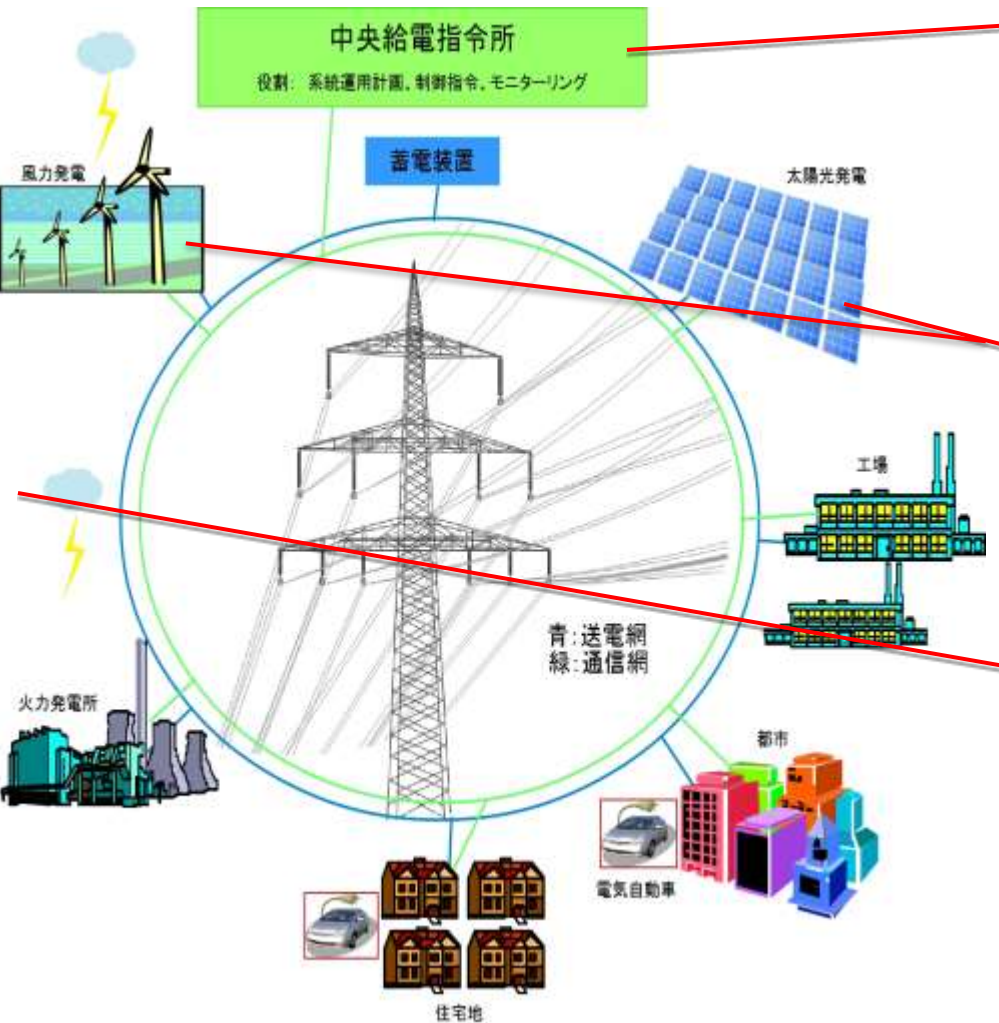


# 大規模再生可能エネルギー発電の電力品質保証

千葉大学 工学部 電気電子工学科



再生可能エネルギーを大量導入した際の電力品質を保証するため、スマートグリッド全体から発電機までの各階層の制御を行う研究



予測誤差を考慮した発電量の調整(上位レベル)

- 常に需要と供給を合わせる必要
- 風力, 太陽光はその地域の天候に左右
- 風力, 太陽光発電の統計的性質を活用
- 火力発電量を調整して需給バランス

ソーラー, 風力発電所の出力平滑化(中位レベル)

- 自然エネルギー発電は出力が不安定
- 探索的最適化手法によって実現
- それぞれの発電所で最適に制御
- 蓄電設備の投資を最小限に抑える

事故を拡散させない局所的安定化技術(下位レベル)

- 電力系統では落雷, 強風や飛来物により事故
- 慣性が小さい太陽光, 風力は不安定になりやすい
- 有効電力, 無効電力の適切な制御切り替えにより周波数, 電圧を安定化させる

# まとめ

---

- 風力発電の基本的な流れ
- 風車のエネルギー変換効率
- 各種風力発電システム
- 課題