

# エネルギーシステム・要素論

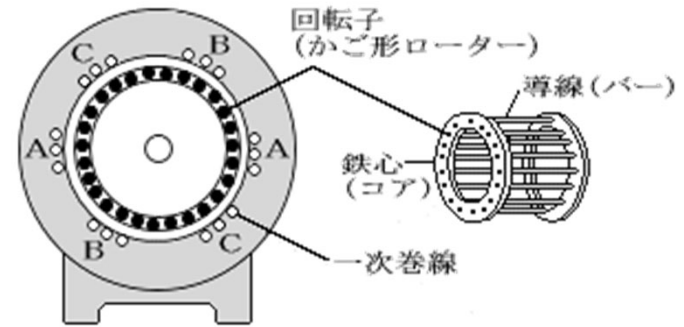
## 第三回 風力発電2

2022年5月13日

# 風力発電機

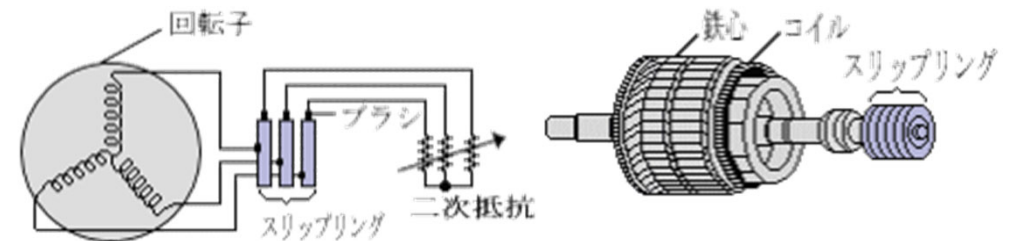
- 出力変動抑制
  - ピッチ制御
  - 可変速運転
    - 増速機+DFIG+巻線用インバータ 新設の79%
- 電圧変動対策
  - 電力変換器による無効電力制御
  - 同期発電機と定格容量の電力変換器

# DFIG



- 誘導電動機の種類

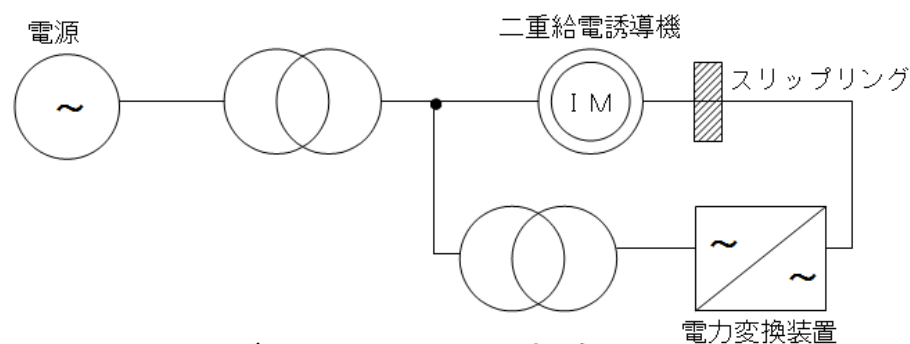
- かご型
- 巻線型



- 回轉子巻線はスリップリングを介して外部抵抗(二次抵抗)に接続される
- 二次抵抗制御は、回轉子に流れる電流の大きさを抵抗器によって制御する

# DFIG

- 二重給電誘導発電機
  - 回転子の回転磁界の回転速度を制御することで、固定子の同期回転速度と異なる回転運転速度を可能とする
  - コンバータインバータ方式が発電機出力と同等の変換器容量を必要とするのに比べ、変換器容量を小さく抑えることが可能(25%程度)



# ギアレス同期風車

- 構造簡単・信頼性・保守性向上
- 低速回転 → 発電機の大直径(2MWクラスで $\Phi 6\sim 8\text{m}$ , 数十t), 多極化(数十極)
  - 増速機付(4極, 1500~1800rpm,  $\Phi 1\text{m}$ , 数t)
  - 永久磁石同期発電機
    - ナセル重量は増速機付DFIGと同程度
    - ブラシレス化による保守性の向上
    - 回転数上昇に伴う発電電圧の上昇による過電圧に注意する必要あり

# ベルヌーイの定理

- 完全流体・定常流の流管(流線)の任意の場所で次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = \text{const}$$

ただし,流速 $v$ [m/s],重力加速度 $g$ [m/s<sup>2</sup>],高さ $z$ [m],圧力 $p$ [Pa],  
流体の密度 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]

- 完全流体  
粘性のない理想化された流体。ずれによる摩擦が生じない。
- 定常流  
流線, 圧力, 密度が時間によって変化しない流れ。
- 流線・流管  
流体中の各位置において流れの方向を向くようにひいた曲線。流線の束を流管。


# 風力(パワー)

- 風が持つ単位時間当たりの運動エネルギー

$$K = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} (\rho V) V^2 = \frac{1}{2} \rho V^3 [J / m^2 s]$$

- 風速  $V$  [m/s],  $1\text{m}^2$  を一秒に通過する空気の質量  $m$  [kg], 空気の密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],  $m = \rho V$
- プロペラ半径  $R$  [m] の理想風車の出力  $W$  [W]

$$W = \frac{1}{2} \rho A V^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 [J / s]$$

- 仮定: 風車の後ろでは風速  $0\text{m/s}$   ブラックホールみたいなものありえへん
- 受風面積  $A$  [m<sup>2</sup>]

面積に比例  
風速の3乗に比例

$$Mgh = Kgm s^{-2} m = Kgm^2 s^{-2}$$

$$0.5mv^2 = Kgm^2 s^{-2}$$

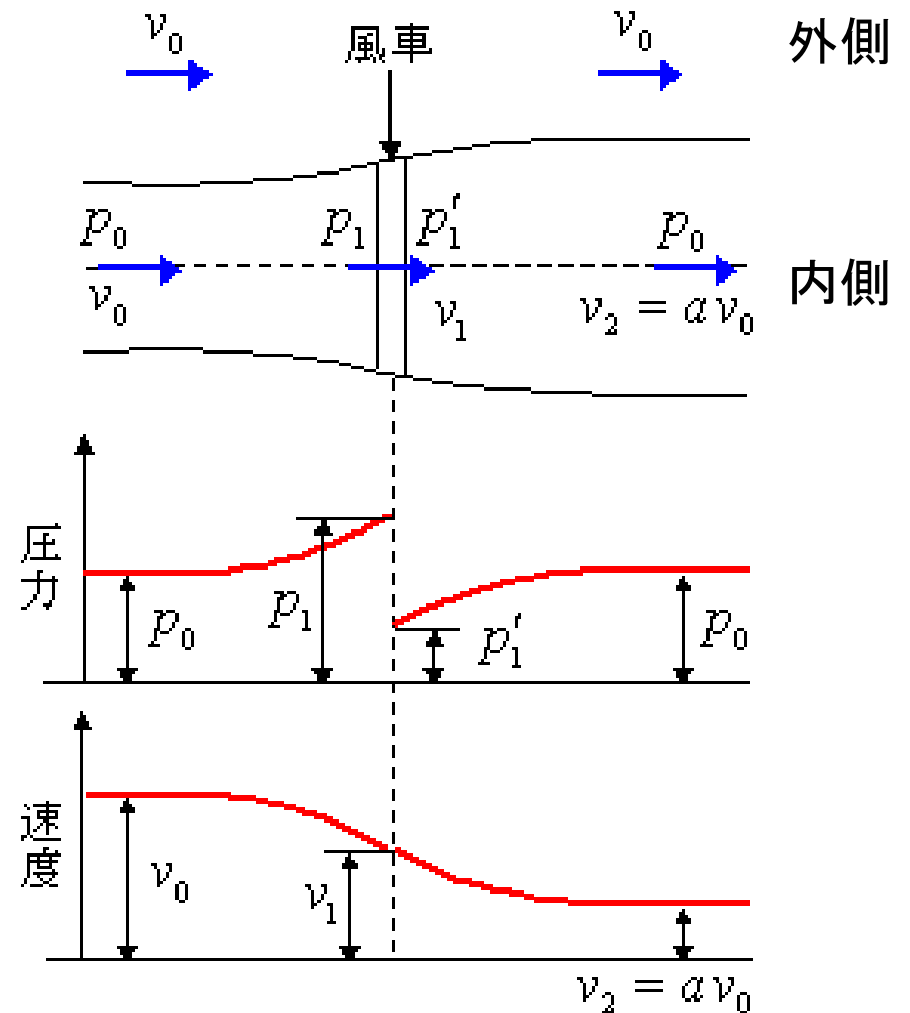
# 風車におけるベルヌーイの定理

- 風車の前後に対するベルヌーイの定理

$$\begin{cases} \text{前} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 \\ \text{後} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p_1' + \frac{\rho}{2} v_1^2 \end{cases}$$

- 風車前後の圧力差と速度の関係

$$\text{前-後} \quad p_1 - p_1' = \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2)$$





# 風車に作用する力

- 圧力差により風車の受ける力 $F$ [N]

$$F = \pi R^2 (p_1 - p_1') [N]$$

- 運動量の時間変化より風車の受ける力 $F'$ [N]

$$F' = \pi R^2 \rho v_1 \Delta t \frac{v_0 - v_2}{\Delta t} = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

- 両者は等しい

$$F = \pi R^2 (p_1 - p_1') = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) = F' = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

$$\frac{1}{2} (v_0 + v_2) (v_0 - v_2) = v_1 (v_0 - v_2)$$

- 風車を通過する風速は前後の風速の平均となる  $v_1 = \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$

# 風車の出力

- 理想風車の出力L[J/s]

$$L = Fv_1 = \pi R^2 (p_1 - p_1') v_1 = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$$

$$= \frac{\pi R^2 \rho (v_0 - v_2)(v_0 + v_2)^2}{4} [J/s]$$

減速比 $a(0 < a < 1)$   $a = \frac{v_2}{v_0}$

$$= \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1 - a)(1 + a)^2}{4} [J/s]$$

風車の出力は減速比 $a$ の関数となる

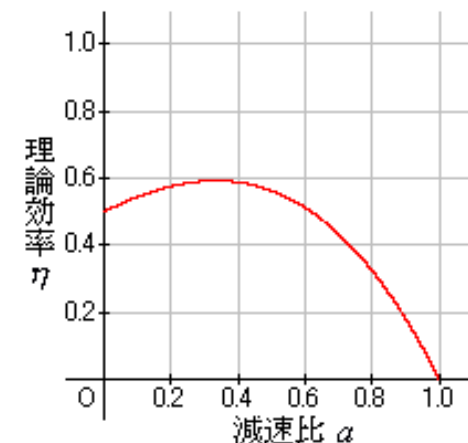
# 風車の効率

- 風力の出力 $W$   $W = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3 [J / s]$

- 理想風車の出力 $L$   $L = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4} [J / s]$

- 風車の効率 $\eta$

$$\eta = \frac{L}{W} = \frac{\frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4}}{\frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3} = \frac{(1-a)(1+a)^2}{2}$$



# ベッツの限界

- 風車の最大効率(出力)となる条件

$$\begin{aligned}\frac{d}{da}\eta &= \frac{d}{da} \frac{(1-a)(1+a)^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{d}{da} [(1-a)(1+a)^2] \\ &= \frac{1}{2} [-(1+a)^2 + (1-a)2(1+a)] = \frac{1}{2} (1+a) [-(1+a) + (1-a)2] \\ &= \frac{1}{2} (1+a) [1-3a] = 0 \quad \longrightarrow \quad a = \frac{1}{3}\end{aligned}$$

- 理論最大効率(ベッツの限界)

実際には40%ぐらいが限度  
空気抵抗, 粘性による損失

$$\eta_{\max} = \frac{(1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{2} = \frac{\frac{2}{3}(\frac{4}{3})^2}{2} = \frac{16}{27} = 0.593$$

- 風車の最大出力 $L_{\max}$

増速ギヤ, 発電機損失  
で30%ぐらいになる

$$L_{\max} = \frac{\pi R^2 \rho V^3 (1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{4} = \frac{8}{27} \pi R^2 \rho V^3 [J/s]$$