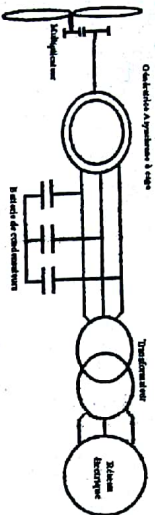


TD 2 système éolien

Exercice 1

Soit l'installation suivante :



La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (MAS) à cage qui débite sur un réseau de distribution.

Les données sont :

Densité de l'air : $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
Rayon des pales : $R = 45 \text{ m}$
Coefficient du multiplicateur : $k = 70$
Nombre de paires de pôles de la MAS : $p = 2$
Fréquence du réseau : $f = 50 \text{ Hz}$

1- Calculer pour un glissement g de -1% :

- La vitesse du rotor de la génératrice asynchrone Ω en rad/s, et N en tr/min.
- La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne Ω_1 en rad/s et N_1 en tr/min.

2- On suppose que la vitesse du vent est constante et égale à 10 m/s . La valeur maximale du coefficient de puissance C_p réel est $0,4$. Calculez pour le même glissement qu'à la question 1 la vitesse spécifique et la puissance électrique maximum P_e fournie au réseau par l'éolienne. On prendra un rendement de multiplicateur à 97% et de la génératrice de 96% .

Exercice 2

On donne quelques paramètres d'une éolienne de 300 kW :

Diamètre des pales : 28 m

Surface balayée par le rotor : 615 m^2

Vitesse nominale du vent : 14 m/s

Vitesse nominale de rotation du rotor : 43 tr/min

Rapport du multiplicateur : 35

Vitesse nominale de la MAS : 1515 tr/min

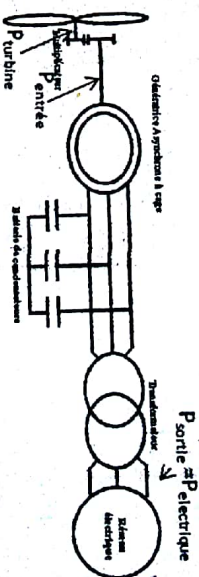
- Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère-t-on au point de fonctionnement nominal ?

Exercice 4

- De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?
- Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice ?

L'éolienne sert à transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Nous vous proposons d'étudier la génératrice asynchrone à cage d'une éolienne installée au sein d'une ferme éolienne de puissance totale de $7,5 \text{ MW}$. Les éoliennes fonctionnent à vitesse fixe, la génératrice est reliée au réseau. Nous allons déterminer la puissance, la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice, et le schéma équivalent de la génératrice. Les éoliennes comportent des multiplicateurs.

Le schéma est le suivant :

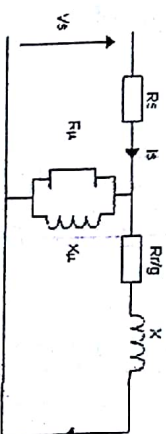


Soient les données suivantes :

- $V = 15 \text{ m/s}$, la vitesse du vent nominale supposée constante
- $N = 32,8 \text{ tr/min}$, la vitesse nominale de la turbine éolienne
- $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'air
- $C_p = 0,27$, le coefficient aérodynamique
- $R = 21,7 \text{ m}$, le rayon des pales

1- Calculez la puissance électrique en sortie de la génératrice P_{sortie} et la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice sachant que le multiplicateur utilisé a un rapport de $46,48$ et un rendement de 96% et que les éoliennes tournent à $32,5 \text{ tr/min}$. Les pertes dues à la génératrice sont supposées négligeables.

2- Dans un deuxième temps, on souhaite déterminer le schéma équivalent de la génératrice asynchrone. On suppose que l'hypothèse de Kapp est vérifiée.



- I_s : courant statorique
- R_s : résistance statorique
- V_s : tension simple statorique
- R_r : résistance magnétisante
- X_r : réactance magnétisante
- R_r/g : résistance au rotor tenant compte du glissement g
- X_r : réactance au rotor
- I_r : courant rotorique

Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone

La plaque signalétique indique (en fonctionnement moteur) : 4 pôles, tension nominale entre phases : 660 V , courant nominal : 760 A , couplage : étoile, fréquence nominale : 50 Hz , puissance : 790 kW (avec prise en compte des pertes électriques), $\cos \phi$: $0,91$, vitesse : 1509 tr/min .

On a réalisé deux essais :

-Essai en moteur à vide :

Tension	660,3 V
Courant	209,4 A
Puissance absorbée	11,17 kW

-Essai à rotor bloqué

Tension	120,1 V
Courant	980 A
Puissance absorbée	25,6 kW

-Essai en courant continu

La résistance statorique entre deux bornes est égale à 5,63 m Ω .

On donne :

Les pertes mécaniques : $P_{mec} = 5,6 kW$

-Exploitation de l'essai à vide

3- Déterminer les pertes Joule statoriques P_s et rotoriques P_r , ainsi que les pertes fer statoriques P_{fs} . En déduire la résistance R_u et la réactance X_u du schéma équivalent.

- Exploitation de l'essai à rotor bloqué

$$g = 1$$

- 4- Calculer la résistance rotorique R_r et la réactance de fuites X ramenées au stator.
- 5- Déterminer le couple électromagnétique sur l'arbre de la machine asynchrone.
- 6- La machine asynchrone consomme de la puissance réactive. Pour compenser cette consommation de puissance réactive, la solution est d'installer une batterie de condensateurs fournissant : 125 kVAR sous une tension nominale de 660 V. Calculer la capacité du condensateur équivalent C_{eq} .

TD n°2

Ex n°1:

$$1^{\circ} \quad q = -1 \quad \text{or} \quad q = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$$

$$N = N_s (1 - q) = \frac{60 f_s}{P} (1 - q) = 1520 (1 + 0,01) = 1515 \text{ tr/min.}$$

$$\Omega = \Omega_s (1 - q) = \frac{2\pi f_s}{P} (1 - q) = 157 (1 + 0,01) = 158,65 \text{ rad/s.}$$

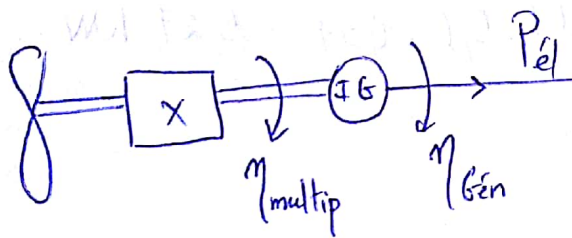
$$k = 70; \quad \Omega_L = \frac{\Omega}{k} = \frac{158,65}{70} = 2,26 \text{ rad/s.}$$

$$N_L = \frac{N}{k} = \frac{1515}{70} = 21,64 \text{ tr/min.}$$

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{45 \times 2,26}{10} = 10,17$$

$$P_{\text{est}} = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3 = 0,5 \times 1,22 \times \pi \times 45^2 \times 0,4 \times 10^3$$

$$\Rightarrow P_{\text{est}} = 1551,47 \text{ kW.}$$



$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{multip}} \cdot \eta_{\text{Gen}} \cdot P_{\text{est}}$$

$$\Rightarrow P_{\text{elec}} = 0,97 \times 0,96 \times 1551,47 \Rightarrow P_{\text{elec}} = 1444,72 \text{ kW.}$$

Ex n°2:

$$1^{\circ} \quad P_{\text{est}} = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3 \Rightarrow C_p = \frac{2 P_{\text{est}}}{\rho A V^3} = \frac{2 \times 300}{1,22 \times 615 \times 14^3}$$

$$\Rightarrow C_p = 0,29 \Rightarrow C_p = 29\%$$

$$2^{\circ} \quad \lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{14 \times 2\pi \times 43}{14 \times 60} = 4,5 > 3$$

\Rightarrow Eolienne rapide.

$$37/ N = 43 \times 35 = 1505 \text{ tr/min.}$$

$$\underline{I \times n = 3.}$$

$$V = 32,5 \text{ tr/min}$$

$$1/ P_{\text{ed}} = \frac{1}{2} \rho S G V^3 = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 0,27 \times 15^3 \times (21,7)^2$$

$$\Rightarrow P_{\text{ed}} = 842,53 \text{ kW.}$$

$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{Gen}} \cdot P_{\text{ed}} = 0,96 \times 842,53 = 808,83 \text{ kW.}$$

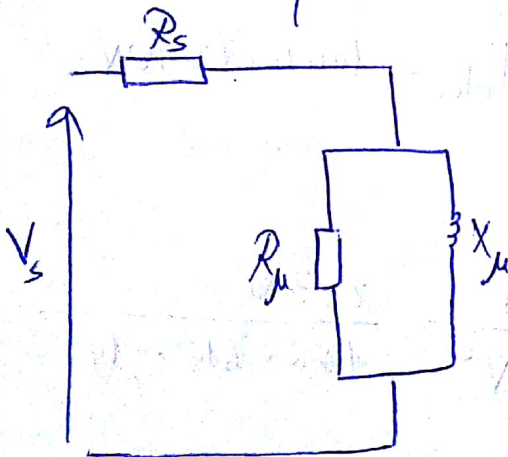
$$2/ P_{js} = \frac{3}{2} R_s I^2 = \frac{3}{2} \times 5,63 \cdot 10^{-3} \times (209,4)^2 = 370,29 \text{ W.}$$

$$P_{jr} = g P_u \text{ or } \alpha \text{ vide } g=0 \Rightarrow P_{jr}=0.$$

$$P_a = \sum P_{\text{pertes}} = P_{js} + P_{jr} + P_{fs} + P_m$$

$$\Rightarrow P_{fs} = P_a - P_{js} - P_{jr} - P_m = 11,17 - 5,6 - 0,37 = 5,27 \text{ kW.}$$

3/ Schéma équivalent:



$$P_{fs} = \frac{U^2}{R_{\mu}} \Rightarrow R_{\mu} = \frac{U^2}{P_{fs}}$$

$$\Rightarrow R_{\mu} = \frac{660,3^2}{5,27 \cdot 10^3} = 82,73 \Omega.$$

$$S = \sqrt{3} U I = \sqrt{3} \times 660,3 \times 209,4 \Rightarrow S = 239,4 \text{ kVA.}$$

$$\text{or } S = \sqrt{P^2 + \Phi^2}, \quad \Phi^2 = S^2 - P^2$$

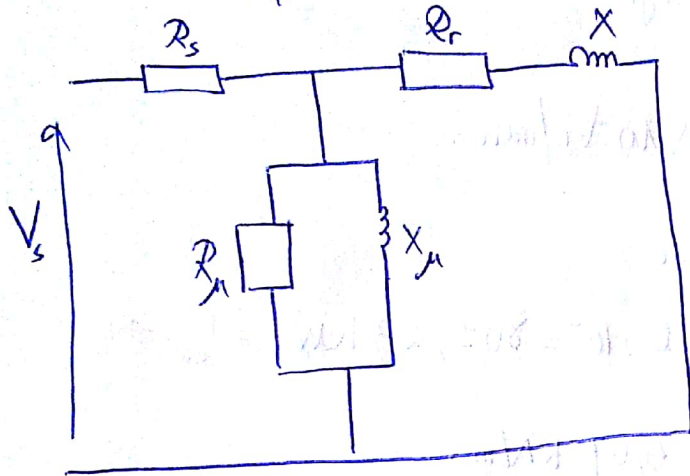
$$\Rightarrow \Phi^2 = (239,4)^2 - (11,47)^2 \Rightarrow \Phi = 239,13 \text{ kVAR.}$$

$$\phi = \frac{3V^2}{X_\mu} \Rightarrow X_\mu = \frac{3V^2}{\phi} = \frac{3 \times 660,3^2}{239,13 \cdot 10^3}$$

$$\text{d'où } X_\mu = 1,82 \Omega$$

A rotor bloqué: $g = 1$.

4° Schéma équivalent:



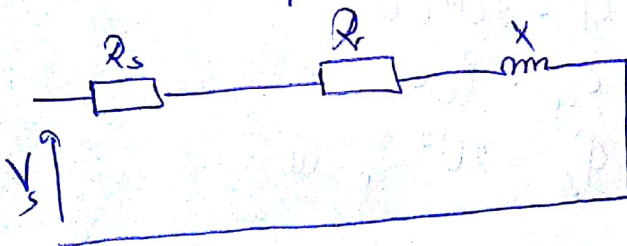
$$P_{jr} = g P_{tr} = P_{tr} = P_a - P_{js} \quad \text{or} \quad P_{js} = \frac{3}{2} R \bar{I}^2 = \frac{3}{2} \times 5,63 \cdot 10^{-3} \times 980^2$$

$$\Rightarrow P_{js} = 8,1 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow P_{tr} = 25,6 - 8,1 = 17,5 \text{ kW} = P_{jr}$$

$$P_{jr} = 3 R_r \bar{I}_{rb}^2 \Rightarrow R_r = \frac{P_{jr}}{3 \bar{I}_{rb}^2} = \frac{17,5 \cdot 10^3}{3 \times 980^2} \Rightarrow R_r = 6,07 \cdot 10^{-3} \Omega$$

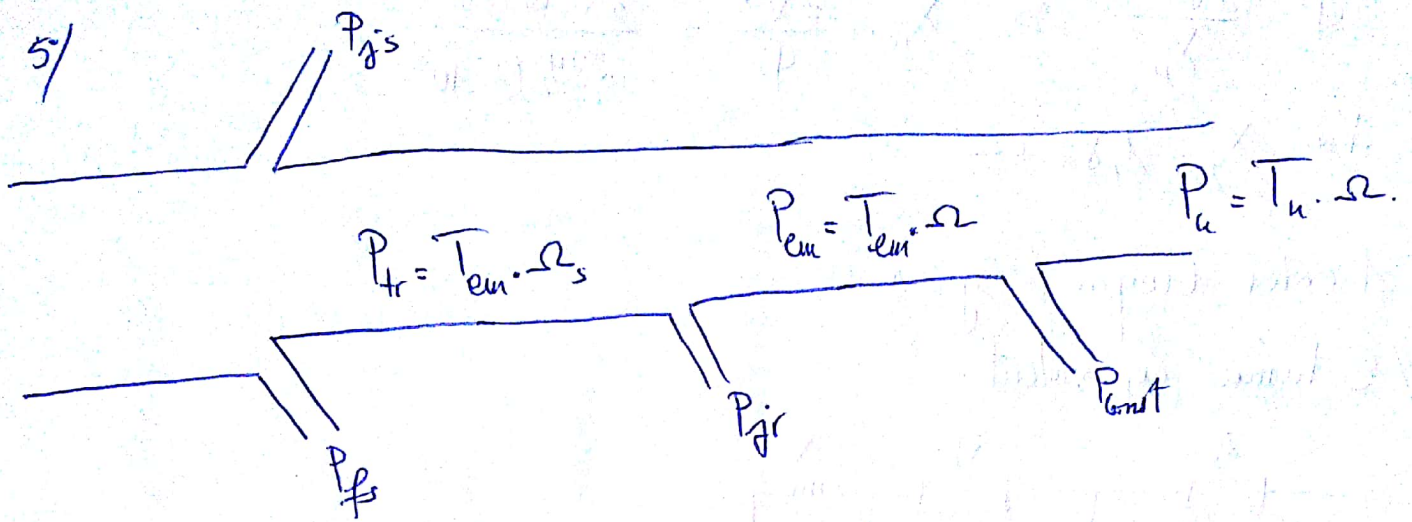
A rotor bloqué:



$$\begin{aligned} \phi_{rb} &= \frac{\sqrt{S^2 - P^2}}{\omega} \\ &= \frac{\sqrt{(\sqrt{3} \times 120,1 \times 980)^2 - (25,6 \cdot 10^3)^2}}{2\pi \cdot 50} \\ &= 202,24 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\text{or } \phi_{rb} = 3 X \bar{I}_{rb}^2 \Rightarrow X = \frac{\phi_{rb}}{3 \bar{I}_{rb}^2} = \frac{202,24 \cdot 10^3}{3 \times (980)^2}$$

$$\Rightarrow X = 0,07 \Omega$$

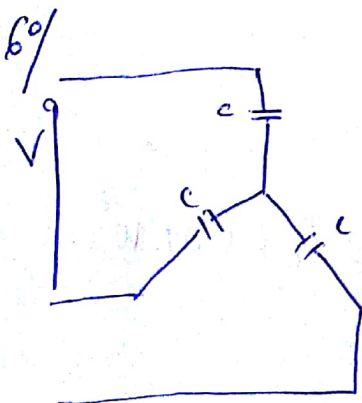


D'après la question 1°/ ; $N = 1510 \text{ tr/min}$.

$$P_{\text{élec}} (\text{pertes}) = 808,83 \text{ kW} = P_{\text{mec}}$$

$$P_{\text{em}} = P_u - P_{\text{cout}} = 808,83 \cdot 10^3 - 5,6 \cdot 10^3 = 803,23 \text{ kW} = T_{\text{em}} \cdot \Omega$$

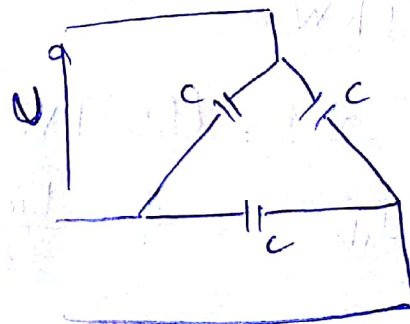
$$\Rightarrow T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega} = \frac{803,23 \cdot 10^3}{\frac{2\pi}{60} \times 1510} = 5,07 \text{ kNm}$$



$$\Phi = 3V^2 C \omega$$

$$C_{\text{eq}} = \frac{C}{2}$$

$$\Rightarrow \Phi_1 = 2V^2 C_{\text{eq}} \omega = V^2 C \omega$$



$$\Phi = 3V^2 C \omega$$

$$C_{\text{eq}} = \frac{3}{2} C$$

$$\Phi_{\Delta} = 2V^2 C_{\text{eq}} \cdot \omega$$

$$\Phi_c = 2V^2 C_{\text{eq}} \cdot \omega \Rightarrow C_{\text{eq}} = \frac{\Phi_c}{2V^2 \omega} = \frac{125 \cdot 10^3}{2 \times (660)^2 \times 2\pi \times 50}$$

$$\Rightarrow C_{\text{eq}} = 4,56 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 0,456 \text{ mF}$$