

Conversion d'énergie

Midterm 2018

Correction

October 24, 2018

1 Exercice: Cycle de Brayton (2 points)

Dans un cycle d'air standard idéal de Brayton, l'air entre dans le compresseur à 1 bar et sort à 12 bar et 610.2 K. La température maximale du cycle T_3 (entrée de la turbine) est de 1400 K. La chaleur ajoutée dans la chambre de combustion est $Q_e=84$ MW. Pour ces conditions:

1. Dessiner les principales unités du système (un groupe turbogaz avec un seul arbre rotor).
2. Dessiner le cycle sur un diagramme T-s. En prenant comme point 1 l'injection d'air dans le compresseur, comme point 2 la sortie du compresseur, comme point 3 la sortie de la chambre de combustion et comme point 4 la sortie de la turbine.
3. Déterminer la pression et la température à chaque point du cycle.
4. Calculer la puissance-travail nécessaire pour la compression.
5. Calculer la puissance-travail fournie par la turbine.
6. Calculer l'efficacité énergétique du cycle.
7. On considère le cycle combiné gaz-vapeur ou le générateur de vapeur est réalisé par un échangeur de chaleur que utilise le gaz chauds en sortie de la turbine de le cycle Brayton. Calculer l'efficacité du cycle combiné si la puissance mécanique utile fournie par la turbine à vapeur est 15 MW.

Données

- Pour une compression isentropique:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^\delta \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4. \quad (3)$$

- Pour une détente isentropique:

$$\left(\frac{T_4}{T_3}\right) = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^\delta \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4. \quad (6)$$

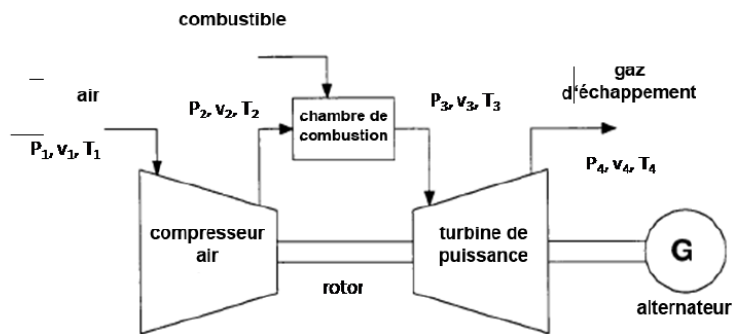
- Chaleur spécifique à pression constante de l'air $c_p = 1.0087 \frac{kJ}{kgK}$;

Hypothèses

- l'air est assimilable à un gaz parfait;
- les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeables;
- les processus de la turbine et du compresseur sont isentropiques;
- la transformations dans la chambre de combustion et le condensateur sont isobares.

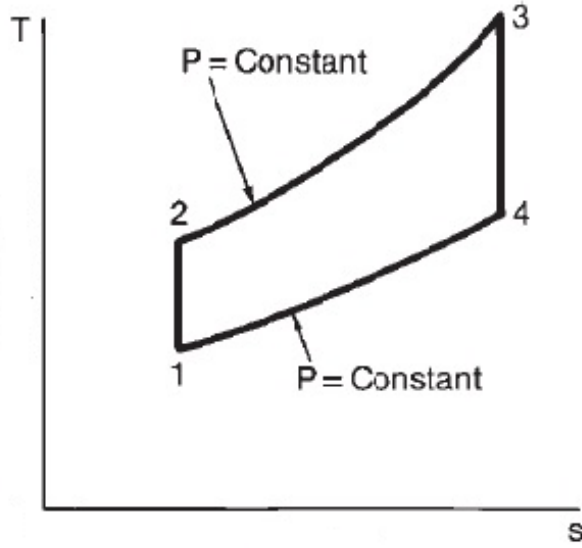
Solution

1. Groupe turbogaz:



2. Cycle de Brayton sur un diagramme T-s:

Les transformations 1-2 et 3-4 sont isentropiques.



3.

$$p_2 = 12 \text{ bar}, \quad T_2 = 610.2 \text{ K}$$

$$\delta = \frac{\gamma - 1}{\gamma} = 0.2857$$

$$p_1 = 1 \text{ bar}, \quad T_1 = T_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{-\delta} = 300 \text{ K}$$

$$p_3 = p_2 = 12 \text{ bar}, \quad T_3 = 1400 \text{ K}$$

$$p_4 = p_1 = 1 \text{ bar}, \quad T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\delta} = 688.3 \text{ K}$$

4. On peut calculer le débit massique:

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{C_p(T_3 - T_2)} = 105 \text{ kg/s}.$$

Transformation 1-2 est une transformation adiabate, donc:

$$W_c = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) = 33 \text{ MW}$$

5. Transformation 3-4 est une transformation adiabate, donc:

$$W_t = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) = 75.7 \text{ MW}$$

6. L'efficacité est, conformément à la définition:

$$\eta = \frac{W_t - W_c}{Q_e} = 51\%.$$

7. L'efficacité du cycle combiné gaz-vapeur est:

$$\eta = \frac{W_t + W_{tv} - W_c}{Q_e} = 69\%.$$

W_{tv} est la puissance mécanique utile fournie par la turbine à vapeur.

2 Exercice: Turbines éoliennes (1 point)

On veut construire une turbine éolienne capable de produire une puissance maximale de 1.16 MW. La vitesse maximale du vent $U_{\infty, max}$ dans cette région est de 10 m/s.

1. Quel est le rayon de la turbine nécessaire pour produire une telle puissance en conditions optimales (le coefficient de puissance maximale $C_{p, max}$ est 0.35)?
2. À quelle vitesse angulaire devrait tourner la turbine pour obtenir la puissance maximale, si la vitesse du vent est $U_{\infty, max}$? Le tip-speed-ratio pour le $C_{p, max}$ est $\lambda_{max} = 5$.
3. Si la vitesse du vent est $U_{\infty, max}$, la vitesse axiale du vent en correspondance de la turbine, U_D , est de 6 m/s.

Donner:

- la vitesse axiale du vent en aval de la turbine (U_w);
- la vitesse tangentielle à l'extrémité des pales ($U_{tan, R}$) (considérer le tip-speed ratio optimale);

Données

- La densité de l'air est de 1.205 kg/m^3 .
- Les facteurs d'induction axiale et tangentielle sont liés par:

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda}. \quad (7)$$

Solution

1. On sait que la puissance qu'une turbine peut produire est donnée par la formule:

$$P_T = \frac{1}{2} C_{p, max} \rho A_d U_{\infty, max}^3$$

On utilise la relation $A_d = \pi R^2$ et la valeur maximale du coefficient de puissance $p, max = 0.35$. Le rayon des turbines est donné par:

$$R = \sqrt{\frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho C_{p, max} \pi U_{\infty, max}^3}} = \sqrt{\frac{1.16 \cdot 10^6}{\frac{1}{2} \cdot 1.205 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.35 \cdot \pi \cdot (10 \text{ m/s})^3}} = 41.8 \text{ m}$$

2. La vitesse de rotation de la turbine est donnée par la formule:

$$\Omega = \frac{\lambda U_{\infty, max}}{R}$$

On a donc:

$$\Omega = \frac{\lambda_{max} U_{\infty, max}}{R} = \frac{5 \cdot 10 \text{ m/s}}{41.8 \text{ m}} = 1.2 \text{ rad/s}$$

3. On peut trouver la valeur du facteur d'induction de flux axial a , grace au fait que on connait les vitesses U_∞ et U_D , liées par la formule $U_D = U_{\infty, max}(1 - a)$. On a que:

$$a = 1 - \frac{U_D}{U_{\infty, max}} = 1 - \frac{6 \text{ m/s}}{10 \text{ m/s}} = 0.4$$

La vitesse axiale du vent en aval de la turbine U_W est donc:

$$U_w = U_{\infty, max} (1 - 2a) = 10 \text{ m/s} (1 - 2 \cdot 0.4) = 2 \text{ m/s}$$

On trouve la valeur de a' en utilisant la valeur maximale du tip-speed ration $\lambda_{max} = 5$ et par la formula suivante.

$$a' = \frac{a(1 - a)}{\lambda_{max}} = \frac{0.4 \cdot (1 - 0.4)}{5} = 0.048$$

Les vitesses tangentielles en aval de la turbine est:

$$U_{tan, R} = 2a'\Omega R = 2 \cdot 0.048 \cdot 1.2 \text{ rad/s} \cdot 41.8 \text{ m} = 4.8 \text{ m/s}$$

Conversion d'énergie

Midterm 2018

Correction

October 24, 2018

1. L'accroissement d'énergie interne totale d'un système thermodynamique fermé est égal à:
 - A. la somme de l'énergie-travail et de l'énergie-chaleur reçues par le système de l'extérieur.
 - B. la somme de l'enthalpie et de l'énergie-chaleur reçues par le système de l'extérieur.
 - C. la somme de l'énergie-travail et de l'enthalpie reçues par le système de l'extérieur.
 - D. la somme de l'énergie-travail, de l'énergie-chaleur et de l'enthalpie reçues par le système de l'extérieur.

La réponse est A.

2. 0.4 kg de gaz subit un processus thermodynamique pour lequel $p=\text{constante}$. La pression initiale est de 3 bars, le volume initial de 0.1 m^3 et le volume final de 0.2 m^3 . Le changement d'énergie interne spécifique du gaz dans le processus est de $u_2 - u_1 = -55 \text{ kJ/kg}$. Déterminez le transfert de chaleur net pour le processus, en kJ. Les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeables.
 - A. 8 kJ.
 - B. 4.4 kJ.
 - C. -22 kJ.
 - D. 22 kJ.

La réponse est A.

3. On désigne avec L, X et S les points qui représentent le liquide, la vapeur saturé à titre constant et la vapeur sèche à la même pression. Calculer l'enthalpie spécifique h_X de la vapeur saturée a pression 0.7 MPa, en sachant que $s_X = 6.6586 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, $s_S = 6.67086 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, $s_L = 1.9922 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, $h_L = 697.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ et $h_S - h_L = 2066.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.
 - A. $\approx 2760 \text{ kJ/kg}$.
 - B. $\approx 3020 \text{ kJ/kg}$.
 - C. $\approx 1300 \text{ kJ/kg}$.
 - D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

4. Lequel des énoncés suivants est vrai pour le diagram T-s associé à un fluide qui change de phase liquide-vapeur?
 - A. Les courbes à pression constante sont des droites horizontales dans la région de vapeur saturé.
 - B. Les courbes à volume constante sont des droites horizontales dans la région de vapeur saturé.

- C. Les courbes à pression constante et les courbes à volume constante sont des droites horizontales dans la région de vapeur saturé.
- D. Les courbes à pression constante sont des droites horizontales dans la région de vapeur sèche.

La réponse est A.

5. Pour un cycle de Rankine idéal, lequel des énoncés suivants est vrai?
- A. dans la chaudière, le chauffage est réversible et à pression constante.
 - B. dans la turbine, l'expansion est adiabatique et réversible.
 - C. dans le condenseur, le refroidissement est réversible et à pression constante.
 - D. toutes les réponses sont correctes.

La réponse est A.

6. L'énergie interne totale
- A. caractérise le niveau énergétique d'un système thermodynamique en tenant compte de l'énergie cinétique et potentielle du système.
 - B. est donnée par la différence entre la variation d'énergie interne et l'énergie-travail.
 - C. est définie dans le cadre du deuxième principe de la thermodynamique.
 - D. n'est pas une fonction d'état.

La réponse est A.

7. Nous souhaitons dimensionner les pales d'une éolienne pour obtenir une puissance mécanique de 750 kW pour une vitesse maximale du vent de 13.8 m/s. On considère un coefficient de puissance C_p égal à 0.51. Quel sera le rayon de la surface balayée par la turbine?
- A. ≈ 17 m.
 - B. ≈ 30 m.
 - C. ≈ 3 m.
 - D. ≈ 20 m.

La réponse est A.

8. Lequel de ces énoncés est **faux** pour une turbine éolienne?
- A. La vitesse tangentielle de l'air est la même pour toutes les positions radiales.
 - B. L'application d'un couple par l'air passant sur le disque de rotor nécessite d'un couple opposé et égal imposé à l'air.
 - C. L'acquisition de la composante tangentielle de vitesse par l'air est compensée par une diminution de pression statique de l'air dans le sillage.
 - D. Le couple sur l'anneau est égal au taux de changement du moment angulaire sur l'air passant par l'anneau.

La réponse est A.

9. Une éolienne est caractérisée par un facteur d'induction axiale $a = 0.3$, et la vitesse du vent en amont du disque actuateur est $U_\infty = 8$ m/s. Quelles sont les valeurs de la vitesse du vent en correspondance du disque (U_d) et la vitesse du vent en aval U_w ?
- A. $U_d = 5.6$ m/s et $U_w = 3.2$ m/s.
 - B. $U_d = 3.2$ m/s et $U_w = 5.6$ m/s.
 - C. $U_d = 5.6$ m/s et $U_w = 0$ m/s.
 - D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

10. Pour une turbine éolienne idéale, lequel de ces énoncés concernant le **coefficient de poussée** C_t est vrai:
- A. Il atteint son maximum pour une valeur du facteur d'induction de flux axial a égale à 0.5.
 - B. Il atteint son maximum pour une valeur du facteur d'induction de flux axial a égale à $1/3$.
 - C. Sa valeur maximale est de 0.593.
 - D. Il est défini comme le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance à disposition dans le streamtube sans le disque actuateur.

La réponse est A.

11. Une turbine éolienne produit une puissance de 1.16 MW pour une vitesse du vent de 10 m/s. En supposant que le coefficient de puissance reste constant, quelle est sa puissance pour une vitesse du vent de 12 m/s?
- A. 2 MW.
 - B. 1.1 MW.
 - C. 0.83 MW.
 - D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

12. Pour une turbine éolienne le coefficient de puissance C_p représente:
- A. le rendement de l'éolienne.
 - B. la puissance maximale de l'éolienne.
 - C. la conversion mécanique-électrique de l'éolienne.
 - D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

13. Une turbine hydraulique a une vitesse de rotation $n = 300$ tr/min. L'eau entre dans la turbine, à $R_1 = 0.7$ m, avec une vitesse absolue $c_{u1} = 15$ m/s et sort de la turbine à $R_2 = 0.3$ m. Quel est le travail par unité de masse si $c_{u2} = 0.4$ m/s?
- A. 326 J/kg.
 - B. 0 J/kg.
 - C. 19.5 kJ/kg.
 - D. 163 J/kg.

La réponse est A.

14. La vitesse absolue c_1 à l'entrée d'une turbine hydraulique est 20.3 m/s et le travail maximum est 441.5 J/kg. Le grade de réaction est égal à:
- A. 0.53.
 - B. 0.5.
 - C. 0.95.
 - D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

15. Quel classement des turbines hydrauliques est correct:
- A. turbines à réaction: Francis et à hélice; turbines à action: Pelton.

B. turbines à réaction: Francis et Pelton; turbines à action: Kaplan.

C. turbines à réaction: Pelton; turbines à action: Francis et Kaplan.

D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.