

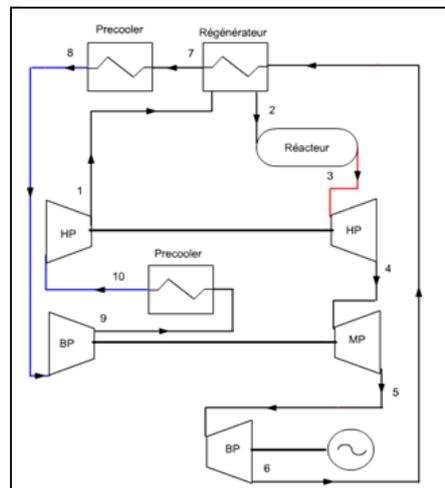
Exploration d'un cycle nucléaire à haute température

Cycle de Brayton à mélange d'hélium et d'azote avec échangeur intermédiaire

Introduction

Nous allons étudier le modèle d'un cycle nucléaire à haute température.

Parmi les réacteurs nucléaires envisagés dans l'avenir, un certain nombre permettraient de produire de l'électricité à partir d'architectures mettant en œuvre des turbines à gaz fonctionnant en cycle fermé, et non ouvert comme celles que nous avons étudiées jusqu'ici.



Ce schéma correspond à un cycle de Brayton à hélium envisagé pour des petits réacteurs PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), utilisant comme combustible des galets d'uranium faiblement enrichi enrobé dans du carbone (qui joue le rôle de modérateur) et recourant à l'hélium comme fluide caloporteur.

Ce cycle, qui conduit à d'excellentes performances, présente cependant l'inconvénient qu'on ne dispose pas aujourd'hui de turbomachines industrielles adaptées, et qu'il faudra de nombreuses années pour les développer.

Une solution alternative consiste à utiliser de l'hélium comme fluide de refroidissement du cœur du réacteur, et un autre gaz comme fluide thermodynamique, notamment un mélange d'azote et d'hélium (79 % N₂, 21 % He en volume), dont les propriétés thermodynamiques sont relativement proches de celles de l'air pour lequel la technologie industrielle est bien maîtrisée.

Cette solution impose cependant l'introduction d'un échangeur intermédiaire appelé IHX pour Intermediate Heat eXchanger (on parle alors de cycle de Brayton indirect), dont la réalisation n'est pas simple, même si elle est à peu près maîtrisée, et qui introduit des irréversibilités qui ont pour effet d'abaisser le rendement global.

Chargement du modèle de cycle de Brayton à hélium avec échangeur intermédiaire

Étudions le cycle de Brayton à hélium avec échangeur intermédiaire.

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant : [Ouvrir un fichier dans Thermoptim](#)

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (PBMR_IHX.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (PBMR_IHX.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger" un projet du menu du simulateur.

Le paramétrage de ce modèle nécessite quelques explications.

2. Paramétrage du modèle

Dans cet exemple, un débit de 700 kg/s d'un mélange d'hélium et d'azote comprimé à 70 bars (1) entre dans un régénérateur, dont il sort à 565 °C environ (2) avant de refroidir l'échangeur intermédiaire (IHX) avec le cœur du réacteur, dont il sort à 850 °C (3) et à 67,4 bars. Ce flux est détendu dans deux turbines (3–5) servant à entraîner les deux étages de compression, avant d'être détendu à 26 bars dans une seconde turbine (5–6) qui produit la puissance utile.

Le cycle est refermé par refroidissement de l'hélium en deux étapes (régénération (6–7) puis refroidissement à 28 °C environ (7–8) avant d'être comprimé.

Dans cet exemple, les rendements polytropiques des turbomachines sont supposés égaux à 0,9, ainsi que l'efficacité du régénérateur.

Chacune des turbines HP et BP est équilibrée mécaniquement avec les compresseurs correspondants.

La modélisation du circuit à hélium pur pour le refroidissement du réacteur fait appel à un compresseur destiné à vaincre les pertes de charge importantes dans l'échangeur intermédiaire, qui est un échangeur gaz-gaz dont les coefficients d'échange thermique sont faibles, ce qui demande de grandes surfaces d'échange et des sections de passage faibles.

On a supposé un écart de température moyen de 50 °C environ dans cet échangeur, mais le prix à payer est une consommation de plus de 19 MW dans le compresseur à hélium.

Tracé du cycle dans le diagramme des frigoristes du mélange d'hélium et d'azote

1. Première étape : chargement du diagramme des frigoristes du mélange d'hélium et d'azote

Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir le diagramme grâce à la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial" de l'écran du simulateur, qui ouvre une interface qui relie le simulateur et le diagramme. Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche de cette interface pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Vapeurs condensables").

Une fois le diagramme ouvert, choisissez "He-N2" dans les "autres gaz composés" proposés via le menu "Editeur de gaz/Charger un gaz de la base", et sélectionnez "(h,p)" dans le menu "Graphe".

Modifiez le paramétrage du diagramme via le menu "Graphe/Paramètres", en choisissant un intervalle de pression de 20 à 80 bar, et de température de 20 à 920 °C.

Modifiez enfin la partie visible de l'axe des ordonnées via le menu "Graphe/Axe Y", en choisissant un intervalle de pression de 20 à 80 bar.

2. Deuxième étape : chargement du cycle de Brayton indirect

Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante : dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle, et sélectionnez "PBMR_IHX.txt" dans la liste des cycles disponibles.

Vous obtenez le tracé du cycle dans le diagramme (h, ln(P)).

La compression fractionnée apparaît à gauche du diagramme, et la détente en plusieurs étapes à droite.

Les échanges de chaleur avec pertes de charge correspondent aux tracés proches des horizontales.

Exercices d'application

Vous pouvez maintenant effectuer des analyses de sensibilité des performances de ce cycle à ses différents paramètres, comme la pression de compression intermédiaire et l'efficacité du régénérateur.

Conclusion

Cette exploration vous a permis de découvrir un modèle de **cycle de Brayton avec échangeur intermédiaire** et les paramètres spécifiques auxquels il fait appel.