



EE-588

ADVANCED LAB IN ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS

Générateur Synchrone en Ilot
Modélisation d'une turbine Pelton
à l'aide d'une machine à courant continu

André Hodder

Nicolas Bornet

Jérémie Pochon

Version 2

Contents

1	Préambule	1
2	Introduction	2
3	Modélisation de l'installation hydraulique	3
3.1	Théorie des turbines Pelton - partie mécanique	3
3.1.1	Caractéristique d'une turbine Pelton	3
3.1.2	Bilan d'énergie spécifique	3
3.1.3	Triangle des vitesses dans l'auget	4
4	Donnée	7
4.1	Objectifs	7
4.2	Adaptation à la caractéristique recherchée	8
4.3	Mise en équations du système complet	8
4.4	Vérification expérimentale	9
4.5	Matlab/Simulink/Simscape	9
4.6	Abréviations	10

1 Préambule

Le but de ce laboratoire, EE-588 Advanced Lab In Electrical Energy System, est de mettre en oeuvre, pratiquement, l'ensemble des connaissances acquises pour la mise en place d'une unité de production en îlot. Une fois l'unité de production en îlot fonctionnelle, plusieurs unités de productions seront inter-connectées pour créer un mini réseau îloté.

Une unité de production hydroélectrique typique, de haute chute, est constituée d'une turbine Pelton et d'une génératrice synchrone à pôles saillants.

Dans le cadre de ce TP, la modélisation (simulation) de la turbine Pelton, se fera à l'aide d'une machine à courant continu alors qu'une vraie machine synchrone à pôles saillant sera utilisée.

Un réseau de distribution d'énergie électrique demande la mise en oeuvre du réglage primaire et du réglage secondaire, qui correspondent :

- pour le réglage primaire : au réglage de la fréquence, qui garanti l'équilibre des échanges de puissance active produite et consommée.

Une génératrice synchrone sert à la production de l'énergie électrique et nous savons que :

$$n = f/p$$

où n est la vitesse de la turbine en [tr/s], f est la fréquence électrique en [Hz] et p est le nombre de paires de pôles.

Ainsi, pour générer une certaine fréquence (50 Hz dans le cadre de ce TP), un réglage en vitesse de la turbine doit être effectué.

- pour le réglage secondaire : au réglage de la tension et plus précisément de son amplitude, qui garanti l'équilibre des échanges de puissance réactive produite et consommée.

Pour la génératrice synchrone nous savons que :

$$U_i = k_{if} I_f \Omega$$

où U_i est la tension induite générée au stator (appelée tension induite synchrone et notée U_s dans les cours que vous avez eu avec moi), k_{if} le coefficient du courant d'excitation, I_f le courant d'excitation et Ω la vitesse, dans le monde mécanique, en [rad/s].

Ainsi, pour une vitesse constante (voir le point précédent), agir sur le courant d'excitation nous permet de changer l'amplitude de la tension induite. Pour ce faire, un régulateur de tension industriel de chez ABB, appelé Unitrol, sera mis en service.

A partir de là, l'unité de production pourra être testée sur différents type de charges :

- résistive : résistances
- capacitive : banc de condensateurs
- résistive et inductive : machine asynchrone

Finalement, plusieurs unités de productions seront inter-connectées et testées sur différentes charges.

2 Introduction

Comme mentionné au chapitre précédent, l'unité de production est constituée d'une machine à courant continu (MCC) et d'une machine synchrone (MS).

Le but de cette première partie du TP est de modéliser (simuler) le comportement d'une turbine Pelton, à l'aide d'une machine à courant continu. Dans un deuxième temps, le réglage en vitesse de cette machine sera développé.

La caractéristique typique d'une turbine Pelton sera étudiée dans un premier temps, afin de justifier la modélisation proposée.

Le comportement dynamique de la turbine Pelton sera alors reproduit par la MCC, dont le choix pour cette application spécifique sera expliqué plus en détail dans la section correspondante.

Le comportement du système dans sa globalité sera ensuite analysé et le comportement des machines prédits, pour différents points de fonctionnement.

Enfin, des mesures seront prises sur le système réel et comparées avec les résultats théoriques obtenus.

3 Modélisation de l'installation hydraulique

Merci à Nicolas Bornet pour l'écriture de cette section qui est un condensé/résumé d'une partie du cours du Prof. François Avellan et de la Dr Elena Vagnoni, portant sur les turbines [1].

3.1 Théorie des turbines Pelton - partie mécanique

3.1.1 Caractéristique d'une turbine Pelton

Les principales parties d'une turbine Pelton sont représentées ci-après:

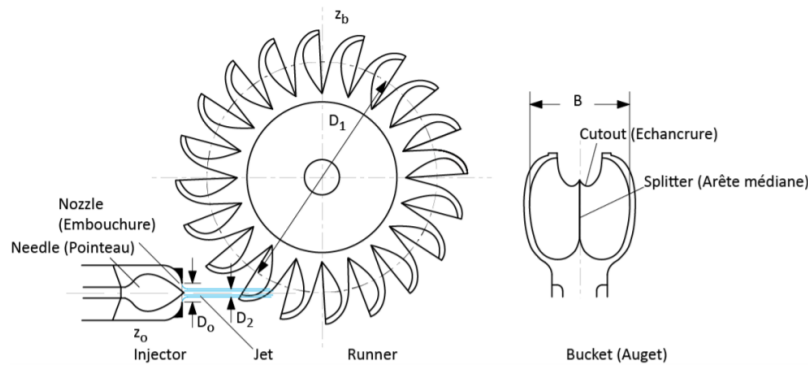


Figure 1: Roue d'une turbine Pelton [1]

Cette nomenclature sera utilisée au long du rapport.

3.1.2 Bilan d'énergie spécifique

Pour représenter correctement une installation hydroélectrique, il faut en maîtriser les caractéristiques techniques. La caractéristique couple-vitesse est intéressante en particulier, car ce type de diagramme est également très utilisé dans le domaine des machines électriques. Il sera plus aisé de faire correspondre une de nos machines avec une turbine Pelton une fois ce diagramme déterminé pour la Pelton. En hydraulique, le point de départ de la plupart des raisonnements est un bilan d'énergie spécifique. L'énergie spécifique transférée à une turbine hydraulique s'écrit comme:

$$E_t = \left(\frac{p_1}{\rho} - \frac{p_{\bar{1}}}{\rho} \right) + \left(\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_{\bar{1}}^2}{2} \right) + (gZ_1 - gZ_{\bar{1}}) - E_{1-\bar{1}} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (1)$$

On reconnaît quatre termes dans l'équation 1 reliés aux notions:

- de déplacement
- d'impulsion
- de différence de potentiel gravitationnel
- de pertes

Une turbine Pelton est une turbine à impulsion, c'est-à dire qu'elle convertit l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique.

La plupart des turbines Pelton sont disposées de manière à mettre en rotation un arbre vertical. Ainsi la différence de potentiel gravitationnel entre le fluide frappant l'auget et le liquide expulsé de l'auget est nulle. Une autre caractéristique des turbines Pelton est d'opérer à pression atmosphérique, ce qui annule également la différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'auget.

De l'équation 1 ne reste alors plus que:

$$E_t = \left(\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_{\bar{1}}^2}{2} \right) - E_{1-\bar{1}} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (2)$$

Avec les points 1 et $\bar{1}$ de l'équation 2 représentant l'entrée et la sortie de l'auget.

3.1.3 Triangle des vitesses dans l'auget

Le bilan énergétique se fait à l'aide du triangle des vitesses. L'idée derrière cette représentation est de travailler avec deux référentiels différents, l'un constant, l'autre tournant avec la roue. Ces deux référentiels définissent alors trois vitesses en $[ms^{-1}]$:

- \vec{U} : la vitesse due à la rotation de la roue ($\omega_{roue} \cdot R$)
- \vec{W} : la vitesse du fluide relativement à la rotation de la roue
- \vec{C} : la vitesse absolue du fluide

Avec R la distance entre le point observé et le centre de la roue. Ces vitesses sont représentées sur l'image ci-dessous:

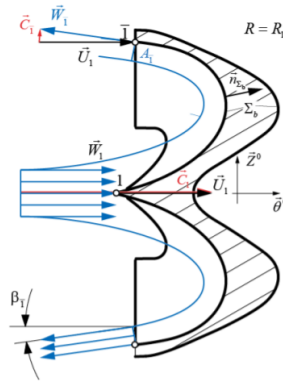


Figure 2: Triangle des vitesses dans l'auget [1]

De par leur définition, ces vitesses satisfont en tout point: $\vec{C} = \vec{U} + \vec{W}$, d'où la dénomination de *triangle* de vitesses.

L'idée physique derrière une turbine à impulsion devient plus claire en faisant attention à la figure 2. L'auget sert à réceptionner le jet de fluide et le dévier pour en modifier sa direction. Il apparaît alors clairement de par la relation vectorielle précédemment énoncée, que la vitesse absolue sera modifiée.

Le but étant de la réduire au maximum afin de maximiser le terme d'impulsion de l'équation 2 que l'on peut maintenant exprimer ainsi:

$$E_t = \left(\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_{\bar{1}}^2}{2}\right) - E_{1-\bar{1}} = \left(\frac{(\vec{U}_1 + \vec{W}_1)^2}{2} - \frac{(\vec{U}_{\bar{1}} + \vec{W}_{\bar{1}})^2}{2}\right) - E_{1-\bar{1}} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (3)$$

En faisant les hypothèses que:

- Le fluide est soumis à la pression atmosphérique en tout point
- La différence de rayon entre le point 1 et le point $\bar{1}$ est négligeable, aussi: $R_1 = R_{\bar{1}}$ et donc $\vec{U}_1 = \vec{U}_{\bar{1}}$
- L'énergie mécanique est constante
- Le jet frappe l'auget de manière à ce que $\vec{C}_1 // \vec{U}_1$

On peut alors conclure de par la conservation de la rothalpie que $|\vec{W}_1| = |\vec{W}_{\bar{1}}|$. L'énergie transférée ne dépend alors que de l'angle de sortie $\beta_{\bar{1}}$, de la vitesse de rotation de la roue et de la vitesse du jet en entrée, comme le montre le raisonnement suivant:

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{(\vec{U}_1 + \vec{W}_1)^2}{2} - \frac{(\vec{U}_{\bar{1}} + \vec{W}_{\bar{1}})^2}{2} - E_{1-\bar{1}} \\ &= \frac{\cancel{|\vec{U}_1|^2} + 2\vec{W}_1 \cdot \vec{U}_1 + \cancel{|\vec{W}_1|^2}}{2} - \frac{\cancel{|\vec{U}_{\bar{1}}|^2} + 2\vec{W}_{\bar{1}} \cdot \vec{U}_{\bar{1}} + \cancel{|\vec{W}_{\bar{1}}|^2}}{2} - E_{1-\bar{1}} \\ &= |\vec{W}_1||\vec{U}_1| - \cos(\beta_{\bar{1}})|\vec{W}_{\bar{1}}||\vec{U}_{\bar{1}}| - E_{1-\bar{1}} \\ &= (1 - \cos(\beta_{\bar{1}}))(|\vec{C}_1| - |\vec{U}_1|)|\vec{U}_1| - E_{1-\bar{1}} \quad [J \cdot kg^{-1}] \end{aligned} \quad (4)$$

En négligeant les pertes, on peut multiplier cette dernière expression par un débit d'eau pour trouver la puissance transférée (avec D_1 le diamètre du jet au moment de frapper l'auget):

$$P_t = \rho \frac{\pi D_1^2}{4} (1 - \cos(\beta_{\bar{1}})) (|\vec{C}_1| - |\vec{U}_1|) |\vec{U}_1| |\vec{C}_1| \quad [J \cdot s^{-1} = W] \quad (5)$$

L'équation 5 permet de déterminer le diagramme d'opération typique d'une turbine Pelton, représenté en figure 3. La courbe de puissance est en cloche, comme le laissait deviner l'équation 5. Connaissant également la relation mécanique reliant couple, vitesse et puissance mécanique ($\Omega_{meca} \cdot T_{meca} = P_{meca}$), le couple à l'arbre peut également être représenté sur le même diagramme en divisant l'équation 5 par Ω_{meca} :

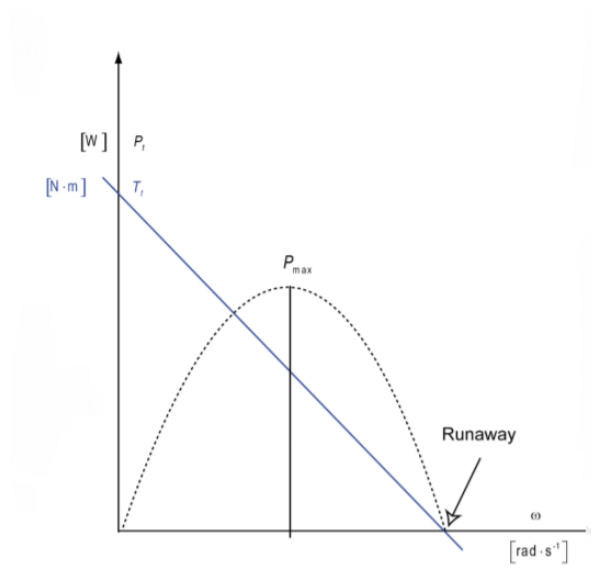


Figure 3: Diagramme d'opération d'une turbine Pelton [1]

L'allure typique du couple à l'arbre d'une turbomachine Pelton peut donc être approximé par une fonction affine décroissante, ce qui correspond également à la caractéristique de couple fournie par une machine à courant continu à excitation séparée.

4 Donnée

4.1 Objectifs

Le but est de simuler, à l'aide d'un moteur à courant continu (MCC) et d'une machine synchrone (MS), une installation hydroélectrique de production d'énergie. Nous supposons de la haute chute et donc l'utilisation d'une turbine est de type Pelton. La caractéristique couple-vitesse $T(\Omega)$ simplifiée est donnée à la Figure 4 (cf chapitre précédent).

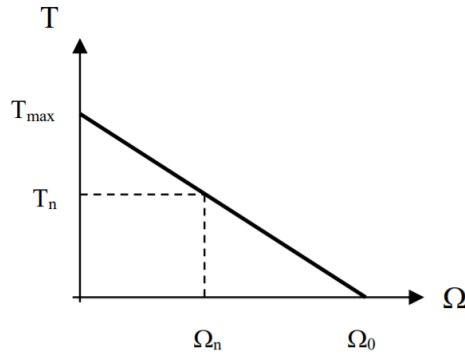


Figure 4: Caractéristique couple-vitesse désirée [1]

Les caractéristiques de la turbine et d'une machine à courant continu à excitation séparées, étant similaires, cette dernière sera donc utilisée pour simuler la turbine.

La caractéristique intrinsèque de la MCC du banc n'étant pas forcément exactement la même que celle de la Figure 4, une résistance est ajoutée en série avec l'induit. En ajustant la valeur de cette résistance R_{add} ainsi que la tension d'alimentation de l'induit U_{MCC} , la caractéristique donnée ci-dessus peut être obtenue.

4.2 Adaptation à la caractéristique recherchée

1. Mesurer le facteur k_{phiMCC} de la machine à courant continu pour un courant d'excitation I_{exMCC} de 0.2A et mesurer la résistance de l'induit R_{ind} .
2. Calculer la tension d'alimentation U_{MCC} à appliquer, ainsi que la valeur de la résistance additionnelle R_{add} à insérer en série avec l'induit de la MCC, pour obtenir la caractéristique couple-vitesse recherchée.

Données :

- $T_n = 5$ [Nm]
- $N_n = 1500$ [tr/min]
- $N_0 = 2000$ [tr/min]

4.3 Mise en équations du système complet

Le système complet est maintenant considéré, constitué de la machine synchrone (MS) entraînée par la MCC et débitant dans une charge résistive.

1. Calculer la résistance de charge (R_{ch}) nécessaire pour obtenir un couple mécanique de 5 Nm sous $U = U_n = 230$ V et 50 Hz.

Puis déterminer :

- le coefficient k_{phiMS} de tension induite du MS
- l'angle δ pour ce cas de charge.

Hypothèses :

- Résistance du stator de la MS négligeable ($R_s \ll X_d$).
- Le rotor de la MS est un rotor à pôles lisses ($x_d = x_q$).

Données :

- $x_d = 1.5$ p.u.
 - $P_0 = P_{fer} + P_{fv} = 200$ W
2. La charge est brusquement réduite de 10% ($R'_{ch} = 1.1R_{ch}$). Calculer, en régime stabilisé, les nouvelles valeurs de : n - U - I - δ

4.4 Vérification expérimentale

1. Refaire la mesure de k_{phiMCC} sans utiliser la machine à induction.
2. Mesurer k_{phiMS} .
3. Vérifier que la caractéristique couple-vitesse de la MCC correspond à la caractéristique désirée. Pour ce faire, entraîner, avec la MCC, la MS débitant sur une charge résistive variable.
Relever la caractéristique du couple en fonction de la vitesse pour une variation de couple de 0 à $1.5 T_n$ et comparer avec les valeurs attendues.
Attention : La tension de phase de la MS ne doit pas dépasser 265V. Celle-ci devra être adaptée au moyen du courant d'excitation I_{exMS} .
4. Vérifier expérimentalement les valeurs de R_{ch} , U et δ (?)
Attention à utiliser le courant d'excitation générant la tension induite (U_i) calculée au point 2, mais ne pas oublier de diminuer ce courant d'excitation si la vitesse dépasse 1500 tr/min.
5. Vérifier expérimentalement les valeurs du point 2 de la section 4.3 et enregistrer les variations de n et de I lors du saut de charge.

4.5 Matlab/Simulink/Simscape

1. Modéliser, dans Simscape, le banc d'essai. La MCC sera modélisée par un moteur à aimant permanent.
Utiliser une inertie de $J = 0.1[kgm^2]$.
Notez que l'inertie n'est pas importante pour les mesures "steady state". L'inertie de chaque banc sera mesurée dans un prochain travail.
2. Ajuster les paramètres nécessaires afin de corréliser au mieux la simulation et la réalité. Ce sont ces paramètres qui seront utilisés par la suite.

4.6 Abréviations

- MCC : Machine à courant continu
- MS : Machine synchrone
- T_n : Couple nominal
- Ω_n : Vitesse nominale
- U_{MCC} : Tension de la machine à courant continu
- I_{exMCC} : Courant d'excitation de la machine à courant continu
- k_{phiMCC} : Coefficient de la machine à courant continu
- I_{exMS} : Courant d'excitation de la machine synchrone
- k_{phiMS} : Coefficient de la machine synchrone
- R_{ind} : Résistance ajoutée à l'induit de la machine à courant continu
- R_{ch} : Résistance de charge côté machine synchrone
- P_{fer} : Pertes fer
- P_{fv} : Pertes frottement-ventilation
- U_i : Tension induite au stator de la machine synchrone

References

- [1] François Avellan and Elena Vagnoni. *Hydropower plants: generating and pumping units, learning material L4 Pelton Turbines*. 2019.