

# *Régulation De La Tension De Sortie Et De La Vitesse De Rotation De L'ensemble Turbine-Générateur Pour Une Centrale Géothermique*

Vololomihaja Andriamifidisoa, Julien Rajomalahyet Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, Laboratoire Exergie & Géoingénierie, BP 1500  
Antananarivo 101, Madagascar,

vololomihaja@gmail.com,julienrajomalahy@gmail.com,aandrianaivoo@gmail.com



**Résumé** - L'étude présentée dans cet article porte sur la modélisation et la régulation de la tension et de la vitesse du turboalternateur afin d'assurer la stabilité du système d'alimentation et la qualité de service. Le problème le plus important dans l'analyse de ces systèmes est sans aucun doute leur stabilité. Ce modèle est basé sur les équations électriques et mécaniques du système, ce qui nous donne une idée de la façon dont l'alternateur se comporte sous des perturbations de charge. Ce modèle a été implémenté sur Matlab/Simulink, dans le but d'établir un système de contrôle basé sur un contrôleur pour la tension et la vitesse. Les résultats de la simulation sont satisfaisants.

**Mots clés** – Géothermie, Production d'énergie, Turbo-générateur, PID, Matlab Sumilink

**Abstract** - The study presented in this article focuses on the modeling and regulation of the voltage and speed of the turboalternator in order to ensure power system stability and quality of service. The most important problem in the analysis of these systems is undoubtedly their stability. This model is based on the electrical and mechanical equations of the system, which gives us an idea of how the alternator behaves under load disturbances. This model was implemented on Matlab/Simulink, with the aim of establishing a controller-based control system for voltage and speed. The simulation results are satisfactory.

**Key words** – Geothermal, Power generation, Turbo-Generator, PID, Matlab Sumilink

## I. INTRODUCTION

Dans les grands systèmes d'alimentation, il est important de maintenir la fréquence et la tension à leurs valeurs nominales pour assurer le bon fonctionnement et l'équilibre entre la puissance générée et consommée.

En effet, le plus gros problème avec l'énergie électrique est son stockage, donc les quantités nécessaires pour faire face aux variations de la demande et aux incidents doivent être produites instantanément au moment où elles sont nécessaires [1].

Une augmentation de la demande d'énergie provoque des chutes de tension et une réduction de la vitesse de rotation, et donc de la fréquence du réseau. À l'aide de capteurs, la vitesse est mesurée et corrigée automatiquement par des régulateurs de vitesse, en agissant sur la vapeur ou l'admission de gaz à la turbine. Il en va de même pour la tension de sortie, qui est régulée par l'excitateur.

La production d'énergie géothermique repose sur l'exploitation, principalement dans les régions de volcanisme actif, de gisements contenant des ressources à des températures comprises entre 100 °C et 350 °C. la vapeur produite au sommet du forage

alimente une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Le fluide condensé est ensuite réinjecté dans le réservoir pour optimiser sa durée de vie [2].

## II. DESCRIPTION DU SYSTEME

L'énergie géothermique est une ressource renouvelable qui peut être utilisée dans deux grands secteurs énergétiques : - la production de chaleur et - la production d'électricité [3]. Le principe de la centrale à fluide binaire illustré à la figure 01 est le suivant :

- Le fluide géothermique extrait est introduit dans un échangeur de chaleur où il transfère une partie de son énergie à un fluide organique qui se vaporise
- Pour la même pression, ce type de fluide a la particularité de se vaporiser à des températures plus basses.

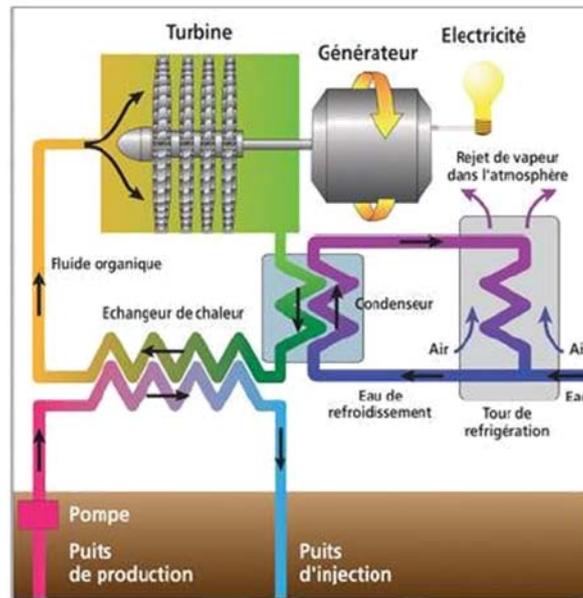


Figure 01 : Principe de fonctionnement d'une centrale à vapeur

- Les vapeurs produites sont ensuite expansées dans une turbine et condensées au contact du circuit d'eau de refroidissement du condenseur.
- Le liquide résultant est ensuite pompé vers l'échangeur de chaleur, où il subit un nouveau cycle : vaporisation, expansion, condensation et pressurisation.
- Le fluide de travail (fluide organique) fonctionne dans un circuit totalement fermé, tandis que le fluide géothermique est réinjecté dans le réservoir. Les plantes de ce type sont de taille unitaire modeste (quelques unités ou dizaines de MWe).

## III. MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA RÉGULATION

### 3.1. Systèmes de contrôle

Les systèmes de contrôle se composent de deux dispositifs essentiels, comme le montre la figure 02.

- Le premier, un dispositif utilisé pour réguler la tension de sortie de l'alternateur à travers son excitateur, la tension de sortie doit être maintenue à environ 18,5 kV quelle que soit la perturbation de charge.

- Le second, un dispositif utilisé pour réguler la vitesse de rotation et la maintenir à une valeur constante en adaptant la puissance mécanique. La vitesse de fonctionnement du générateur dépend de la fréquence du réseau ( $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $p = 1$ ).

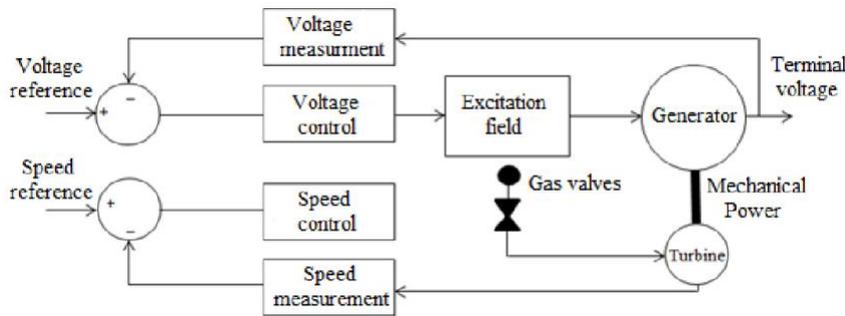


Figure 02 : Circuit de commande [4]

### 3.2. Régulation de la tension de sortie de l'alternateur

Le contrôle de la tension est un concept fondamental qui assure la continuité du service, fournit une bonne qualité d'énergie aux consommateurs et, surtout, crée un équilibre entre la puissance produite et celle consommée. Pour assurer cette régulation, il est nécessaire d'introduire un régulateur appelé régulateur automatique de tension, dont la tâche principale est de maintenir l'amplitude de tension à travers le générateur synchrone à un niveau spécifié. Cela garantit l'équilibre de la puissance réactive à fournir ou à absorber en fonction des exigences de charge. Ce contrôleur représente un moyen très important d'assurer la stabilité transitoire du système d'alimentation. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur et régule le flux magnétique dans la machine, ajustant ainsi la tension de sortie à une valeur spécifiée [2], [5]. La figure 03 montre un modèle simplifié du régulateur utilisé.

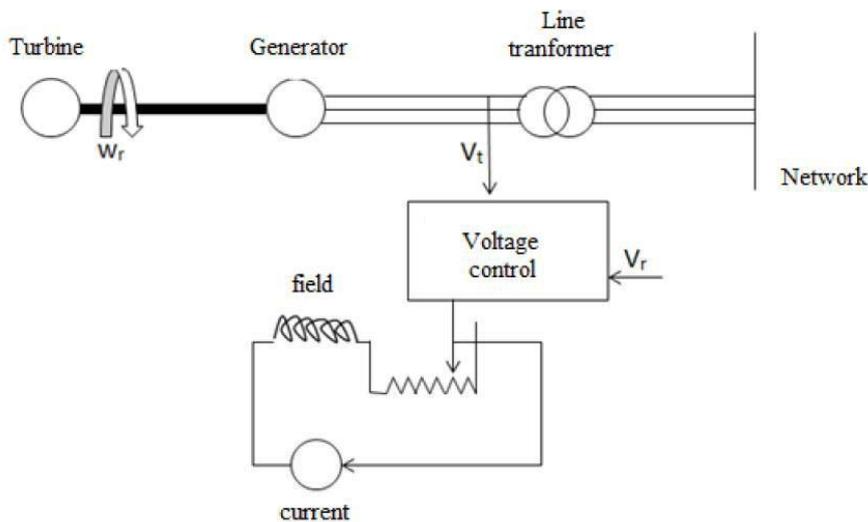


Figure 03 : Représentation de l'unité de contrôle

Le modèle schématique utilisé dans notre étude est illustré à la figure 04 et consiste essentiellement en un capteur de tension, un comparateur, un amplificateur, un régulateur PID et un système de limitation de tension.

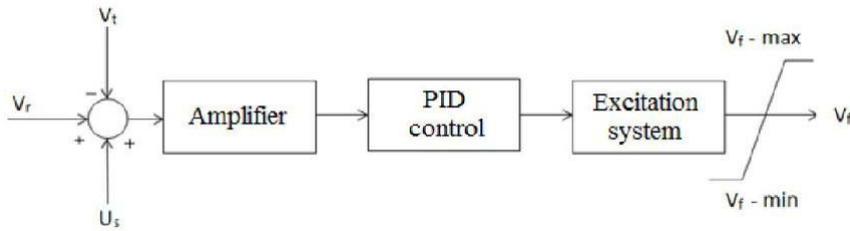


Figure 04 : Modèle schématique d'un contrôleur

où :

La variable  $V_r$  présente le point de consigne de tension utilisé comme référence qui satisfait aux conditions d'état stationnaire. Le régulateur de tension compare initialement la valeur de la tension de sortie de l'alternateur  $V_t$  avec celle du point de consigne  $V_r$ . La différence (erreur) est amplifiée pour donner la tension d'excitation  $V_f$  required pour maintenir l'équilibre désiré, qui est limité entre deux valeurs par un système limitant ( $V_{f-min}$ ,  $V_{f-max}$ ).

Un signal complémentaire  $U_{scan}$  doit être ajouté au nœud de sommation. Il s'agit d'un signal de commande appelé stabilisateur de puissance. Il ajoute un signal de tension proportionnel à la vitesse de rotation à l'entrée du régulateur de tension du générateur pour produire un couple qui est en phase avec la variation de la vitesse du rotor. Le stabilisateur de puissance corrige la décroissance du couple d'amortissement et neutralise toute oscillation faible en forçant le système d'excitation à varier rapidement et au bon moment [6].

Diverses études ont été menées par un groupe IEEE dans le domaine de la modélisation d'éléments de systèmes de puissance concernant les systèmes d'excitation. Trois types de systèmes d'excitation sont fréquemment utilisés [3] :

- Le système d'excitation statique de source potentielle, dans lequel le temps de réponse de tension d'excitation est très court,
- Le système d'excitation de diode-redresseur statique excité séparément, qui existe sous deux formes, le premier appelé système d'excitation de réponse nominale et le second appelé réponse initiale élevée (HIR). Le temps de réponse de tension d'excitation pour le premier est entre 0.2 et 0.5s qui est beaucoup plus lent que celui du HIR.
- Le système d'excitation sans balais a une réponse similaire au second modèle. Cependant, les modèles mathématiques de ces trois types de systèmes d'excitation sont disponibles comme suit : Type IEEE ST1 pour le premier modèle, le type IEEE AC1 est choisi pour le modèle Brushless Excitation System et le type IEEE AC2 pour le modèle HIR.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle de système IEEE ST1, car il est le plus largement utilisé. Ce système se caractérise principalement par sa réponse rapide et sa sensibilité.

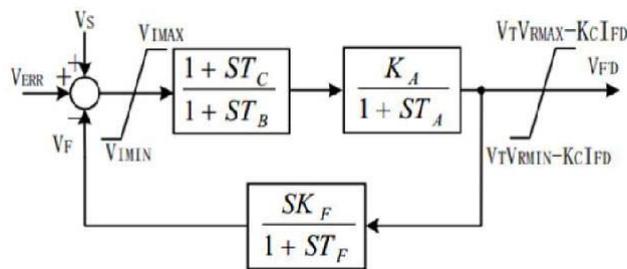


Figure 05 : Modèle du système d'excitation ST1 de type IEEE

Afin de contrôler la tension d'excitation, un modèle simplifié, dans lequel nous avons négligé les constantes de temps ( $T_c$ ,  $T_B$ ,  $T_F$ ), est représenté comme suit :

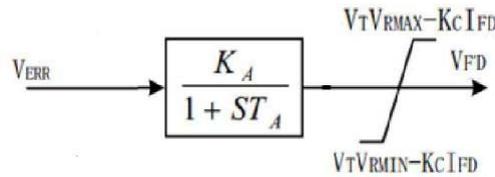


Figure 06 : Modèle simplifié du système d'excitation ST1 de type IEEE [7]

La substitution du modèle simplifié du système d'excitation au modèle d'un régulateur de tension automatique donne le modèle suivant :

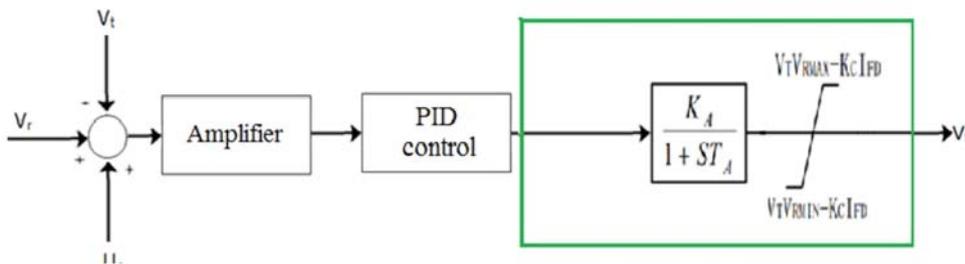


Figure 07 : Modèle schématique d'un contrôleur

### 3.3. Contrôle de la vitesse de l'ensemble turbine-générateur

Le contrôle de la vitesse de rotation de l'ensemble turbo-alternateur est nécessaire pour assurer la stabilité de la fréquence secteur de 50 Hz et pour protéger l'alternateur du décrochage. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire un contrôleur PID dont la tâche principale est de maintenir la vitesse de rotation à environ 3000 rpm. La boucle de contrôle se compose principalement d'un contrôleur PID, d'un servomoteur et d'une turbine. La figure 08 montre le principe du contrôle de vitesse.

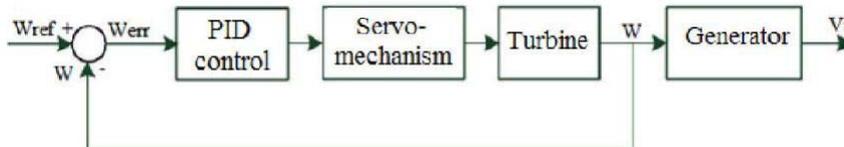


Figure 08 : Principe de contrôle de la vitesse

Le contrôleur PID agit sur la position de la vanne de la turbine en fonction de la variation de vitesse par rapport à sa valeur nominale. Il assure également le bon fonctionnement de la turbine [7].

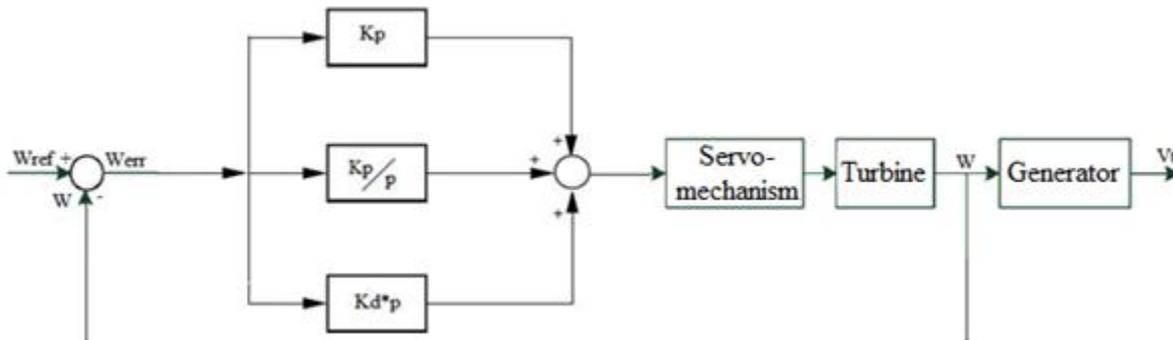


Figure 09 : Contrôleur PID et servomoteur [8]

### 3.4. Détermination des paramètres du contrôleur

La mise en place d'un PID implique de déterminer les valeurs des coefficients, et , qui permettent d'obtenir la réponse de processus souhaitée avec les caractéristiques suivantes : robustesse, vitesse et précision.

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

Chaque coefficient affecte la réponse du système comme suit :

$K_p$ : Les influences augmentent le temps. La diminution du temps de montée entraîne un dépassement plus important avec une erreur statique améliorée.

$T_i$ : Définit la vitesse à laquelle l'erreur est intégrée. Plus le  $T_i$  est petit, plus le signal de correction augmente rapidement.

$T_d$  : Il définit le temps d'application pour chaque "saut" du signal d'erreur.

#### 3.4.1. Détermination des paramètres au moyen de la méthode d'approche successive

Cela implique de modifier les actions du contrôleur et d'observer les effets sur la mesure enregistrée jusqu'à obtenir la réponse optimale. Nous commençons par ajuster l'action proportionnelle, puis l'action dérivée et ensuite l'intégrale.

Cette technique a l'avantage d'être simple et peut être utilisée sur tout type de système, sauf que sa nature itérative le rend difficile à utiliser sur des processus à forte inertie.

#### 3.4.2. Procédure

Nous commençons avec un très petit et annulons les actions D et I. Une étape de consigne est appliquée. Si le gain est suffisamment faible, la réponse doit être bien amortie, puis augmenter le gain et appliquer un autre pas de consigne, en répétant jusqu'à ce que des dépassements apparaissent sur la sortie. Régler à la moitié de la valeur obtenue lorsque le dépassement se produit.

Appliquer la même procédure pour le retour de  $T_i$  and à 2 fois la valeur provoquant le dépassement. Il en va de même pour  $T_d$ , et nous revenons à un tiers de la valeur à l'origine des dépassements [9].

Après application de la méthode d'approche successive, les paramètres optimaux qui répondent aux critères de stabilité et de vitesse sont les suivants :

Les paramètres du contrôleur PID pour réguler la tension de sortie résultante sont les suivants :

$$K_p = 200 ; T_i = 0.014 \text{ s et } T_d = 0.025 \text{ s}$$

Les paramètres du contrôleur PID pour réguler la vitesse de l'ensemble turbine-générateur sont les suivants :

$$K_p = 20 ; T_i = 0.01 \text{ s et } T_d = 0.013 \text{ s}$$

Ces résultats sont satisfaisants, le dépassement en termes de résultats obtenus ayant été significativement amélioré (30%).

### 3.5 Diagrammes fonctionnels de simulation

La procédure de simulation consiste à associer l'alternateur avec le schéma fonctionnel de la commande de tension, figure 10, et le schéma fonctionnel de la commande de vitesse, figure 12, et à les assembler comme indiqué à la figure 11.

Ce système donne une idée du comportement des quantités de machine telles que les tensions de sortie ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ), les courants ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), la vitesse ( $\omega_r$ ) et l'angle interne ( $\delta$ ).

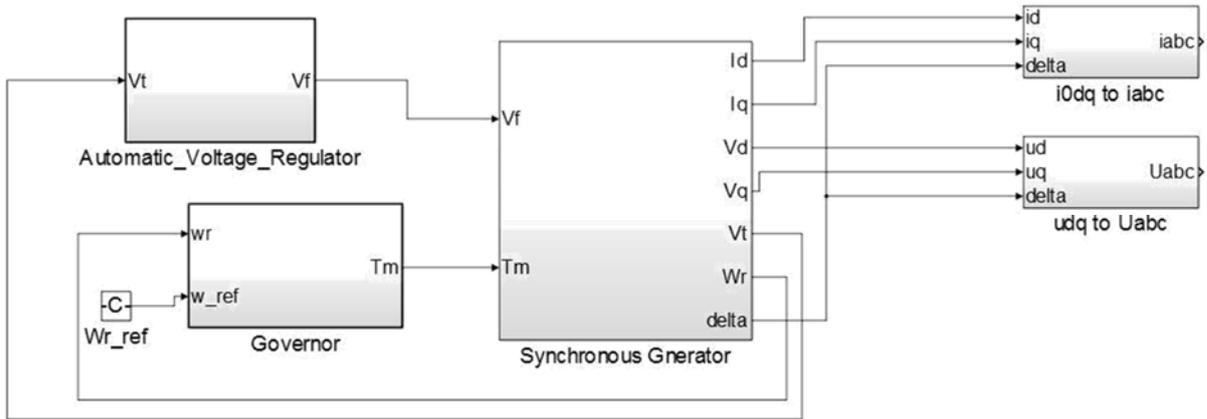


Figure 10 : Structure combinée du générateur et blocs de contrôle dans Simulink

Le schéma fonctionnel de régulation de la tension de sortie dans Matlab/Simulink est :

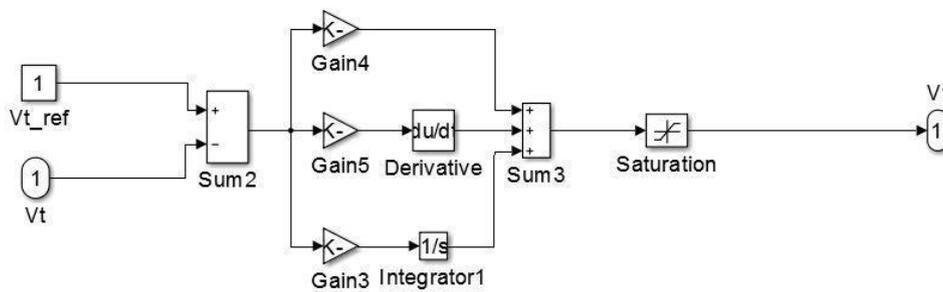


Figure 11 : Structure du régulateur de tension de sortie dans Simulink

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse dans Matlab/Simulink est le suivant :

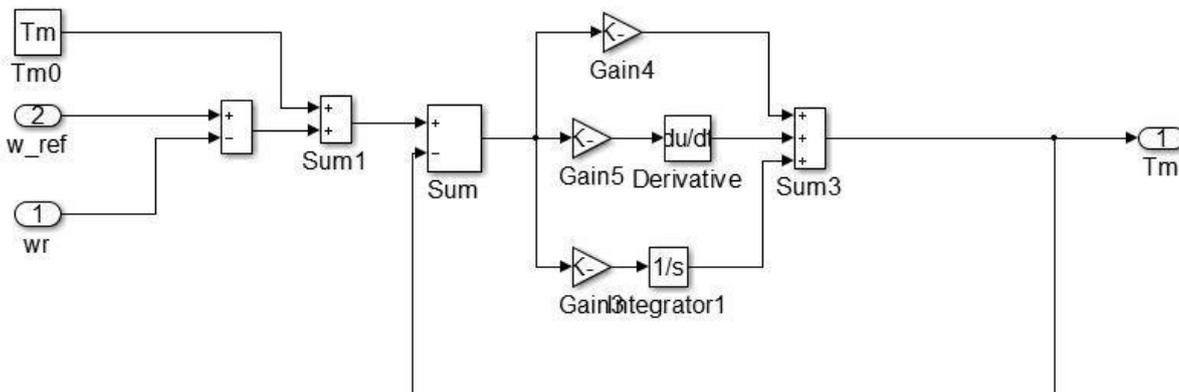


Figure 12 : Structure du régulateur de vitesse ( $\omega_r$ ) dans Simulink

#### IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

##### 4.1. Courant triphasé et tension de sortie

Commutation sur une charge à l'heure  $t = 0s$

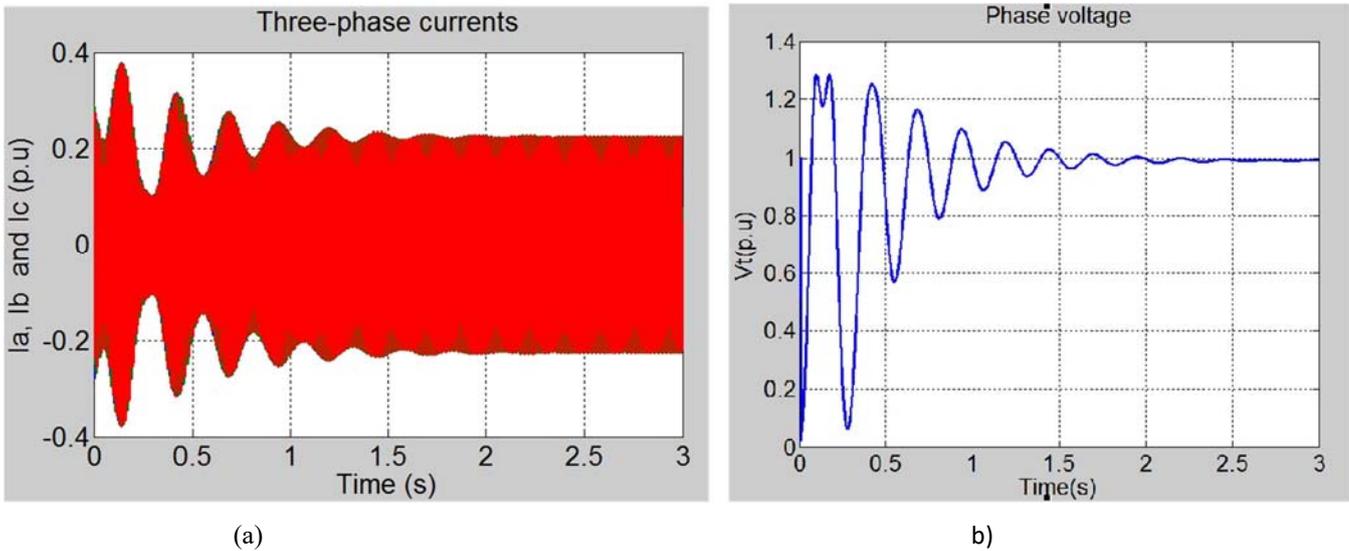


Figure 13 : (a) Courants des trois phases à  $t = 0s$ , (b) Tension d'une phase à  $t = 0s$

Les courants et les tensions des trois phases sont indiqués à la figure 13. Quand l'alternateur est à aucune charge, aucune puissance active n'est exigée de la charge, ainsi tous les courants sont zéro. Lorsque l'alternateur commute sur une charge au temps  $t = 0$  s, cela provoque une augmentation des courants ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ). La période transitoire dure environ 1,5 s, après quoi ces courants atteignent un nouvel état stationnaire. La charge provoque une perturbation de la tension de sortie, qui varie rapidement et culmine à 1,3 (p.u) (Figure 13 b). Le temps de récupération est d'environ 1,5 s, après quoi la tension oscille légèrement autour de la valeur nominale avant de se stabiliser.

##### 4.2. Vitesse de rotation ( $\omega_r$ ) et angle interne ( $\delta$ )

L'ajout d'une charge entraîne une perturbation de la vitesse. Le contrôleur PID intervient sur le couple d'entraînement pour le ramener à sa valeur initiale après une période transitoire de 1,5 s. Il en va de même pour l'angle interne, qui prend une nouvelle valeur en raison de l'appel de courant. Cette valeur est atteinte après une perturbation causée par le système de contrôle de vitesse d'une durée de 1,5 s (figure 14).

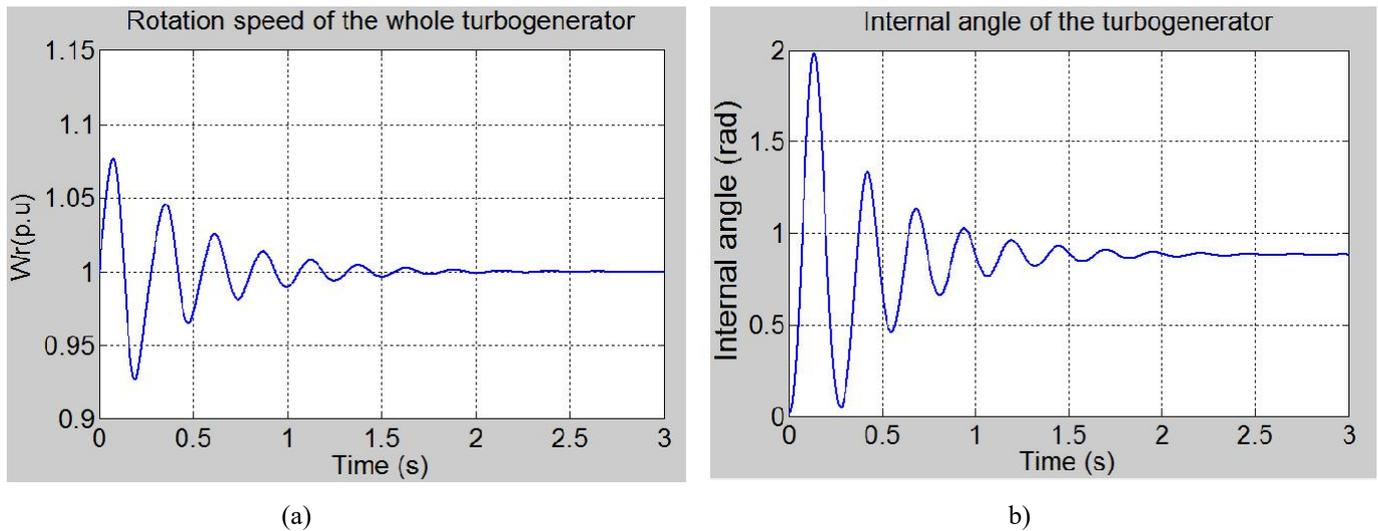


Figure 14 : (a)Vitesse de rotation de l’alternateur à  $t = 0$ , (b) angle interne de l’alternateur  $\delta$  à  $t = 0$

La perturbation de charge provoque une variation de tension. Cette variation est rapidement éliminée par le système de contrôle. Il en va de même pour la vitesse. Le temps de récupération par rapport aux valeurs nominales est de l’ordre de 0,2 s pour la tension et de 0,5 s pour la vitesse (figure 14).

#### 4.3. Angle interne ( $\delta$ ) et glissement de l’alternateur

La figure 15 montre l’angle interne et le glissement de l’alternateur après une perturbation au temps  $t = 2$  s. L’angle interne prend une nouvelle valeur, qui est atteinte après une perturbation causée par le système de contrôle de vitesse d’une durée de 0,8 s. Le glissement est perturbé pendant la période de contrôle (transitoire) et retourne à sa valeur zéro.

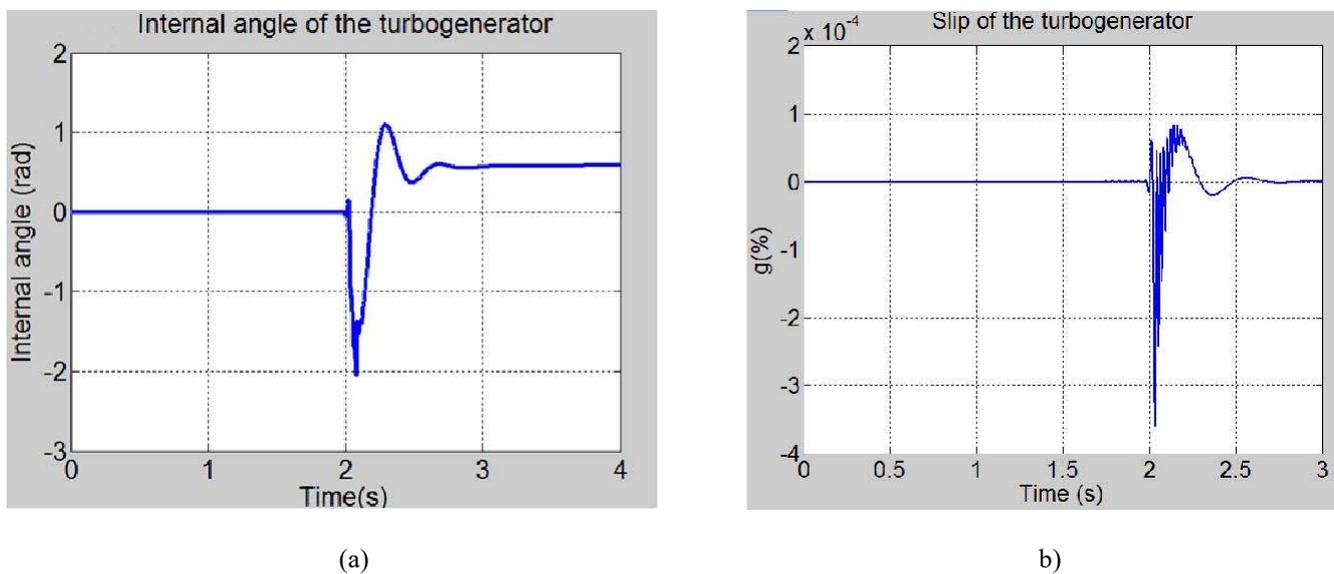


Figure 15 : (a)Angle interne de l’alternateur ( $\delta$ ) à  $t=2s$ ; (b) Glissement de l’alternateur à  $t=2s$

## V. DISCUSSION ET CONCLUSION

Le paragraphe précédent montre les résultats sur les trois principaux schémas fonctionnels essentiels de l’ensemble turbine-générateur, et qui ont été choisi pour mettre en œuvre la modélisation et la simulation du système.

Pour exécuter ce modèle, des données disponibles ont été nécessaires. Ces données couvrent les paramètres avec lesquels nous avons pu développer un modèle mathématique de l'alternateur.

Ce modèle est basé sur les équations du turboalternateur.

Les résultats essentiels sont obtenus à partir du fonctionnement attendu du modèle global. En effet, afin d'améliorer la tension de sortie et la vitesse de rotation, ce modèle global a été utilisé pour étudier des systèmes de régulation et de contrôle robustes pour les générateurs synchrones. Les graphes et les courbes de la figure 13 pour les courants des trois phases (a) et pour la tension d'une phase (b) montrent des allures semblables.

De plus, pour fixer les idées, un autre modèle utilisant le système d'excitation IEEE STI a été également développé avec tous ses composants. Néanmoins, concernant la régulation de tension, un régulateur automatique appelé AVR au système d'excitation a été utilisé, pour obtenir des résultats plus ou moins fiables. Un système de contrôle PID pour réguler la vitesse de l'alternateur a également été mis en œuvre selon la figure 14a et b. On voit que les courbes montrent des similitudes, suggérant ainsi la validation du modèle.

Enfin, dans la figure 15, un modèle global de simulation de performance dynamique a été développé.

Les courbes présentent des allures plus ou moins identiques, on peut suggérer ainsi la fiabilité de ce modèle. Ce modèle assemble les trois principaux schémas fonctionnels essentiels de l'ensemble turbine-générateur sous la forme de schémas fonctionnels Matlab/Simulink.

Il convient de signaler que cette étude s'intéresse particulièrement aux alternateurs haute puissance. Cela nous a permis de développer une synthèse pour les régulateurs afin de contrôler la tension de sortie et la vitesse de l'ensemble turbine-générateur.

Notre étude était basée sur des valeurs nominales. Les résultats obtenus à partir du modèle global que nous avons établi sont satisfaisants. Dans l'ensemble, ce projet nous a permis le développement d'un modèle d'état de l'excitateur basé sur le modèle de référence IEEE, le contrôle de vitesse basé sur un modèle de turbine idéal et d'effectuer la régulation de tension sur le système d'excitation statique IEEE.

### REFERENCES

- [1] A. Kazemi, M.R. Jahed Motlagh, A.H. Naghshbandy \*, ' Application of a new multi variable feedback linearization method for improvement of power systems transient stability', *Electrical Power and Energy Systems* 29 (2007) pp. 322–328.
- [2] J. Rajomalaly, L. Andrianaivo "Technique de prise de décision dans la gestion de maintenance sur la production d'électricité géothermique : cas du système binaire," *Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Petroleum Engineering Department, Laboratoire Exergie et Geoingenierie*
- [3] Rajomalaly J, Andrianaivo L, Ranoarivony H, Andriamifidisoa V, Ramamonjisoa H : 2017 - Simulation numérique d'une mini centrale géothermique à faible enthalpie fonctionnant en ORC (Rankine Organic Cycle) et optimisation des composants du système. *Mada-Hary ISSN 2410-0315, volume 6.*
- [4] Juste Tsotie Wamba, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale hydro-québec', PhD Thesis, Université du Québec en Abitibi-témiscamingue, déc.2013, pp 26-27
- [5] A.L. Elshafei\*, K.A. El-Metwally, A.A. Shaltout, ' A variable-structure adaptive fuzzy-logic stabilizer for single and multi-machine power systems', *Control Engineering Practice* 13 (2005), Elsevier Ltd, pp 413–423..
- [6] M. A. M. Hassan , 0.P.Malik, G. S. Hope, 'A fuzzy logic based stabilizer for a synchronous machine', *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 6, No 3, September 1991.
- [7] IEEE committee report, ' Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, DOI: 10.1109/TPAS.1973.293570 1973, Vol.PAS-92, N°6, Pages : 1904 - 1915,
- [8] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance

Studies, 'Hydraulic Turbine and turbine control models for system dynamic studies', Transactions on Power Systems, Vo1.7, no.1, Feb. 1992, pp 167 - 179.

[9] RajomalahyJ, Ranoarivony H, Andrianaivo L, Rakotovao B et Voahanginirina J. Ramasiarino : 2014 - Production automatisée de ciment en utilisant la technologie des poudres. *Mada-Hary*2410-0315, volume 2 (5), pp. 33 – 53