

Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable. Validation expérimentale

Le chapitre deux développe dans un premier temps la modélisation des différents composants de la microcentrale hydroélectrique retenue, sous forme de Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Ensuite, en les regroupant, un système global est défini. Ce système permet de mettre en avant les différents aspects énergétiques. A partir de cette modélisation, la commande du système global est déduite. Enfin, des simulations et des résultats expérimentaux du système de conversion électromécanique sont présentés.

Les simulations et les résultats expérimentaux confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable

Chapitre II

Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable. Validation expérimentale

II.1. Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons choisi une structure originale de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique, nous nous proposons dans ce chapitre la modélisation et la simulation de celle-ci.

L'objectif de la modélisation est de remplacer l'objet physique coûteux et d'utiliser celle-ci comme outil de simulation ou de conception. L'objectif du modèle consiste à prédéterminer et à étudier le comportement de l'objet aux différentes sollicitations. Il existe différents types de modèles pour réaliser les objectifs de la modélisation.

Un système de production électrique est un système complexe qui comprend beaucoup de grandeurs physiques et d'équations mathématiques. Nous avons donc choisi le modèle graphique, et plus précisément la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Bou 00], celle-ci nous permettra d'obtenir une macro-représentation des grandeurs échangées entre la microcentrale hydroélectrique et le réseau interconnecté ou les sites isolés.

II.2. Représentation Énergétique Macroscopique (REM) de la micro centrale hydroélectrique

On présentera dans un premier temps la modélisation des différents composants de la microcentrale hydroélectrique sous forme de REM, ensuite nous allons les regrouper dans un système global afin de mettre en avant les différents aspects énergétiques.

II.2.1. Définition de la REM

La REM permet la représentation des systèmes énergétiques complexes en vue de leur commande. Elle est la continuité du modèle Graphique Informationnel Causal (GIC) [Hau 96]. Cette représentation est un compromis entre une « description matricielle » (vision physique) et « fonctionnelle » (pour l'inversion). Elle est basée sur la systémique (description externe par action – réaction) et par une description interne causale. La modélisation par REM repose donc sur une mise en avant des aspects énergétiques, mais aussi sur la nécessité d'imbriquer des modèles de niveaux différents.

II.2.2. Notations

Le produit d'une entrée et d'une sortie d'un élément constitutif donne une puissance. Par exemple, si l'entrée est une tension, alors la sortie sera obligatoirement un courant. Les variables sont soit des scalaires (pression, débit) soit des vecteurs, mais l'entrée et la sortie correspondante doivent avoir la même nature.

II.3. Modélisation et simulation d'une microcentrale hydroélectrique

La modélisation et la simulation du fonctionnement sur site isolé, respectivement sur réseau puissant, seront traitées.

La figure 2.1 représente la structure de la microcentrale hydro électrique à vitesse variable étudiée.

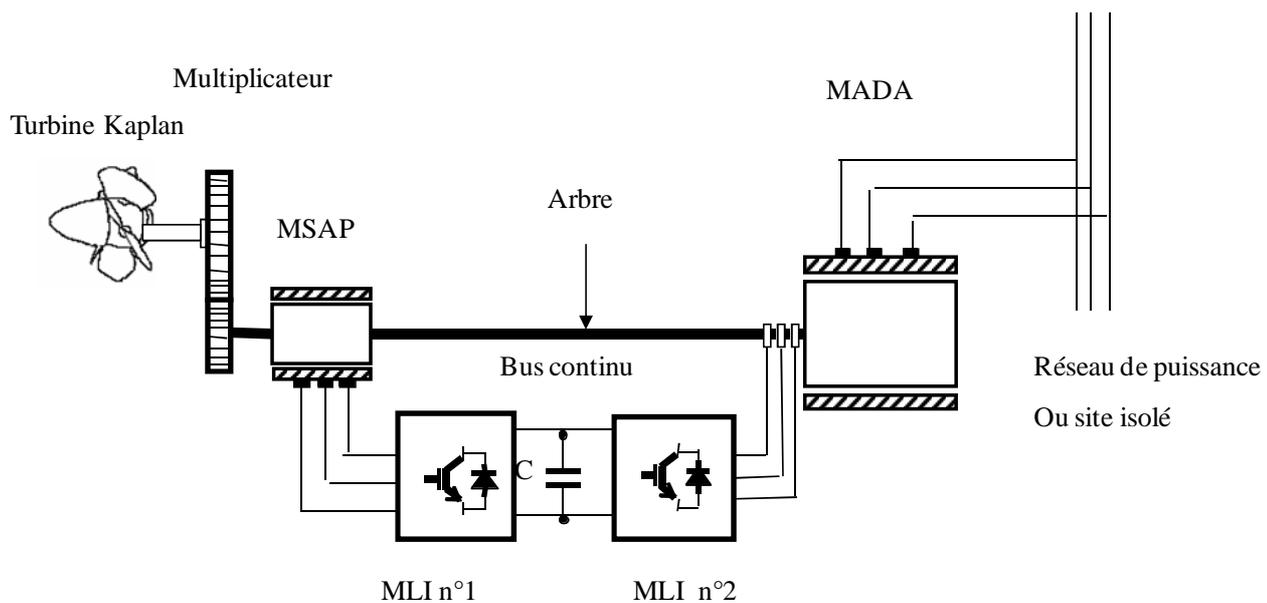


Figure 2.1 Structure de la microcentrale hydro électrique à vitesse variable étudiée

On présentera dans un premier temps la modélisation des différents composants de la source hydroélectrique sous forme de REM.

II.3.1. Modélisation de la source d'énergie primaire

La source mécanique du modèle SM à savoir l'eau, fournit un débit hydraulique q et en réaction reçoit une pression p exercée par la turbine. Le produit de ces deux quantités est égal à la puissance hydraulique P_{hyd} . La figure 2.2 fait apparaître la source mécanique du modèle. L'expression de la puissance hydraulique est:

$$P_{hyd} = pq \quad (2.1)$$

Il faut faire attention de dissocier source et générateur. En effet, une source est aussi bien un récepteur d'énergie qu'un générateur.

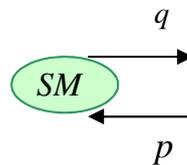


Figure 2.2 REM de la Source mécanique

II.3.2. Modélisation de la turbine hydraulique

La puissance mécanique P_{mec} en sortie de la micro turbine hydraulique est obtenue à partir de la puissance hydraulique P_{hyd} et le rendement η_t de celle-ci. L'expression de la puissance mécanique est :

$$P_{mec} = \eta_t P_{hyd} = C_{turbine} \Omega_{arbre} \quad (2.2)$$

La figure 2.3 fait apparaître le modèle de la turbine hydraulique.

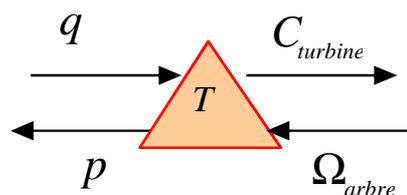


Figure 2.3 REM de la turbine hydraulique

Modélisation de l'arbre de transmission

Le modèle dynamique simplifié de l'arbre mécanique repose sur les équations suivantes.

$$\frac{d\Omega_{arbre}}{dt} = \frac{1}{J} C_{arbre} \quad (2.3)$$

$$C_{arbre} = C_{turbine} + C_{em-ms} + C_{em-mada} \quad (2.4)$$

Où J représente l'inertie totale, qui apparaît sur le rotor du générateur, C_{arbre} est le couple total, C_{em-ms} est le couple électromagnétique de la machine synchrone à aimant permanent MSAP, $C_{em-mada}$ est le couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

La figure 2.4 fait apparaître le modèle de l'arbre.

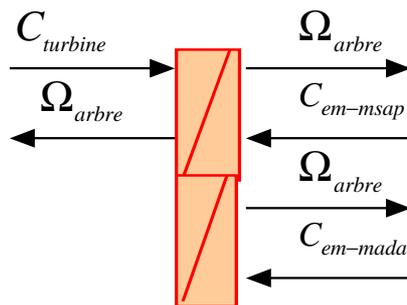


Figure 2.4 REM de l'arbre

II.3.3. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone (MSAP) est représentée (figure 2.5) par le modèle de Park dans un référentiel lié au champ tournant.

L'induit de l'alternateur synchrone est relié, via les convertisseurs de puissance, au rotor de la génératrice asynchrone. La machine synchrone joue donc à la fois le rôle d'excitatrice de la machine principale, la rendant ainsi autonome, et celui de régulateur de la tension du bus continu représenté par un condensateur à la (figure 2.2). En conséquence, il est possible de ne dimensionner cette machine que pour la puissance de glissement de la MADA

II.3.3.1. Modélisation des circuits de l'induit

Les équations classiques de la MSAP sont:

$$v_{dms} = R_{ms} i_{dms} + L_d \frac{di_{dms}}{dt} - \omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.5)$$

$$v_{qms} = R_{ms} i_{qms} + L_d \frac{di_{qms}}{dt} + \omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f) \quad (2.6)$$

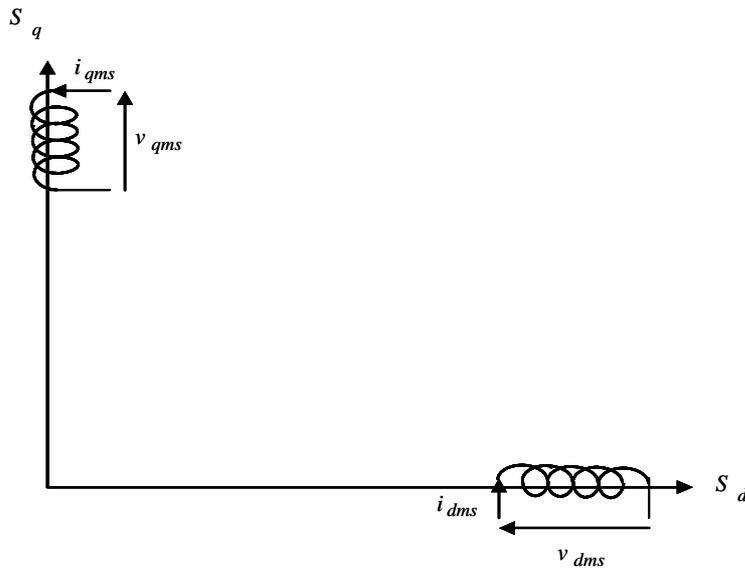


Figure 2.5 Représentation des enroulements dans les axes d et q

Dans ces équations, l'indice "ms" est relatif à la machine synchrone. v_{dms} et v_{qms} sont les composantes de Park des tensions du stator de la machine, ω_{ms} est la pulsation des tensions, i_{dms} et i_{qms} représentent les courants du stator. R_{ms} , L_d et L_q modélisent respectivement la résistance d'enroulement, l'inductance d'axe direct et l'inductance d'axe en quadrature de l'alternateur. La quantité Φ_f désigne quant à elle le flux d'excitation engendré par les aimants permanents.

Nous constatons que les termes $\omega_{ms} L_q i_{qms}$ et $\omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f)$ sont des forces électromotrices mettant en évidence un couplage entre les axes d et q . Nous convenons alors de noter :

$$e_{dms} = \omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.7)$$

$$e_{qms} = \omega_{ms} (L_d i_{dms} + \Phi_f) \quad (2.7a)$$

La figure 2.6 fait apparaître le modèle des circuits de l'induit.

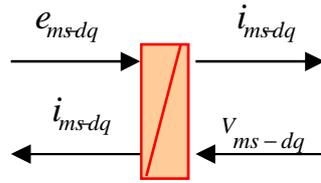


Figure 2.6 REM de l'induct de la MSAP

II.3.3.2. Modélisation de la partie électromécanique

L'expression du couple de la machine synchrone est la suivante :

$$C_{ms} = \frac{3}{2} p_{ms} [(L_d - L_q) i_{dms} i_{qms} + \Phi_f i_{qms}] \quad (2.8)$$

p_{ms} est le nombre de paire de pôles de la machine synchrone

Ce modèle de la conversion électromécanique est vu comme un système dynamique avec la vitesse et les courants comme entrées et le couple électromagnétique et les forces électromotrices comme sorties.

Ce modèle est représenté par la figure 2.7.

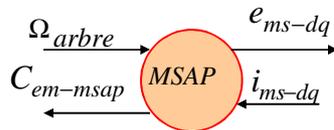


Figure 2.7 REM de la partie électromécanique de la MSAP

II.3.4. Modélisation de la chaîne de conversion électronique

II.3.4.1. Modélisation des convertisseurs statiques

Deux convertisseurs statiques MLI n°1 et MLI n°2 sont utilisés (figure 2.8) .L'un est appelé redresseur (MLI n°1) il est connecté à l'induit de la MSAP et l'autre (MLI n°2) est appelé onduleur et il est connecté au rotor de la MADA.

Les convertisseurs de puissance, dont le fonctionnement est basé sur les commutations d'interrupteurs semi-conducteurs, sont par nature des systèmes discrets. Prendre en compte ces phénomènes dans la modélisation s'avère intéressant dans le cadre d'une étude d'impact des convertisseurs sur le spectre des courants et tensions, mais ceci conduit à opter pour un pas de calcul très faible dépendant de la fréquence de commutation des composants électroniques. Les temps de simulation deviennent alors importants. Pour pallier à ce problème, nous adoptons un modèle continu équivalent des convertisseurs, modèle décrit notamment dans [Lab 98] et [Rob 01], et qui permet de retenir dans l'analyse du système uniquement les composantes utiles des signaux électriques. Ce modèle permet également d'aborder plus simplement le problème de la commande.

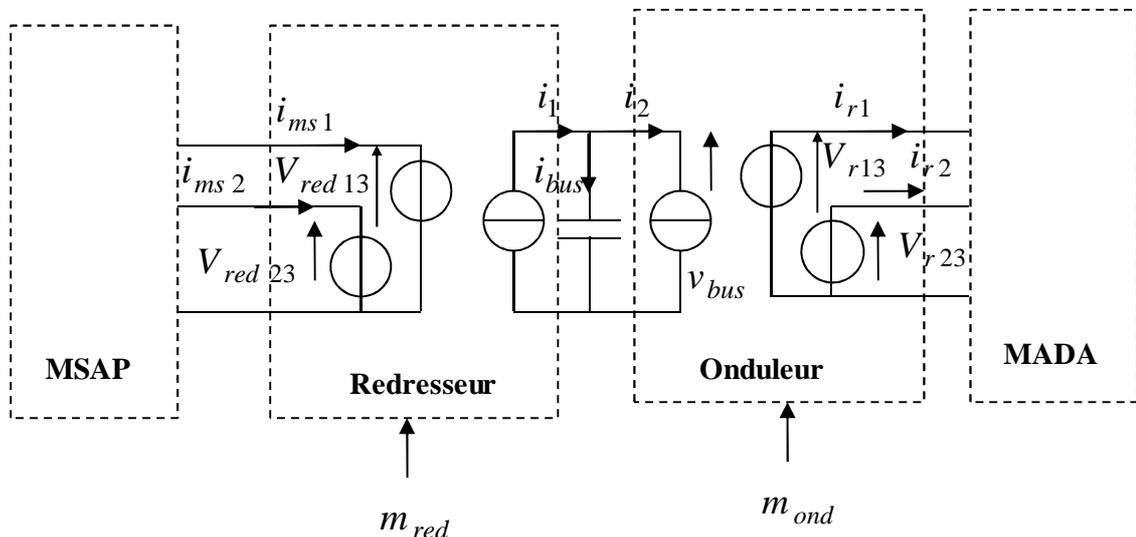


Figure 2.8 Représentation schématique des convertisseurs statiques

Pour le redresseur:

$$i_1 = m_{red} i_{ms} \quad (2.9a)$$

$$V_{red} = m_{red} V_{bus} \quad (2.9b)$$

Pour l'onduleur :

$$V_r = m_{ond} V_{bus} \quad (2.9c)$$

$$i_2 = m_{ond} i_r \quad (2.9d)$$

m_{red} et m_{ond} sont les fonctions de conversion pour le redresseur et pour l'onduleur, en prenant des valeurs comprises entre $-\sqrt{\frac{3}{2}}$ et $\sqrt{\frac{3}{2}}$. V_{red} , V_r sont les tensions composées dépendantes de la tension du bus continu V_{bus} et i_1 , i_2 sont les sources du courant dépendantes des courants alternatifs i_{ms} , i_r .

Le modèle de ce convertisseur est alors décrit, dans le référentiel de Park [Rob 01].

Les figures 2.9a et 2.9b présentent la modélisation REM respectivement du convertisseur MLI 1 et du convertisseur MLI 2. Où v_{rdq} et i_{rdq} font référence aux tensions et courants du rotor de la MADA.

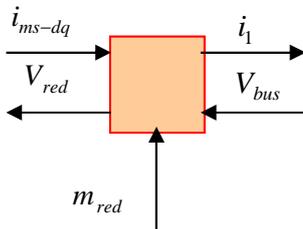


Figure 2.9a REM du redresseur

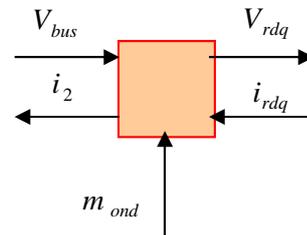


Figure 2.9b REM de l'onduleur

II.3.4.2. Modélisation du bus continu

L'évolution de la tension du bus continu v_{bus} est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dv_{bus}}{dt} = \frac{1}{C_{bus}} i_{bus} \quad (2.10)$$

$$i_{bus} = -i_1 - i_2 \quad (2.11)$$

Le bus continu est modélisé par un condensateur (figure 2.10)

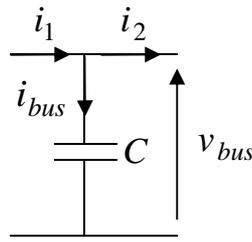


Figure 2.10 Schéma électrique du bus continu

Son modèle est présenté par le bloc REM du Bus continu à la figure 2.11.

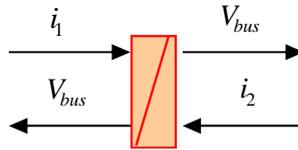


Figure 2.11 REM du bus continu.

II.3.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.3.5.1. Modélisation de la partie électrique

Cette machine est également modélisée dans le référentiel de Park (figure 2.12), les axes d et q étant solidaires du champ tournant. Dans ces conditions, les équations de la machine (2.12) à (2.15) font intervenir directement la pulsation des grandeurs du stator ω_s et celle de la vitesse mécanique de l'ensemble de la masse tournante Ω_{arbre} .

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (2.12)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (2.13)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - p_{mada}\Omega)\Phi_{rq} \quad (2.14)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - p_{mada}\Omega)\Phi_{rd} \quad (2.15)$$

Dans ces équations, R_s et R_r modélisent la résistance des enroulements respectivement du stator et du rotor, v_{sd} et v_{sq} désignent les tensions du stator respectivement d'axe direct et en quadrature alors que v_{rd} et v_{rq} font référence aux tensions du rotor. i_{sd}, i_{sq}, i_{rd} et i_{rq} représentent les composantes des courants au stator et au rotor. De même, $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}$ et Φ_{rq} désignent les composantes de flux qui s'expriment en fonction des inductances de la machine suivant les équations :

$$\Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (2.16a)$$

$$\Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (2.16b)$$

$$\Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \quad (2.17a)$$

$$\Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \quad (2.17b)$$

L_s, L_r et M représentent les inductances cycliques respectivement du stator, du rotor et la mutuelle entre armatures.

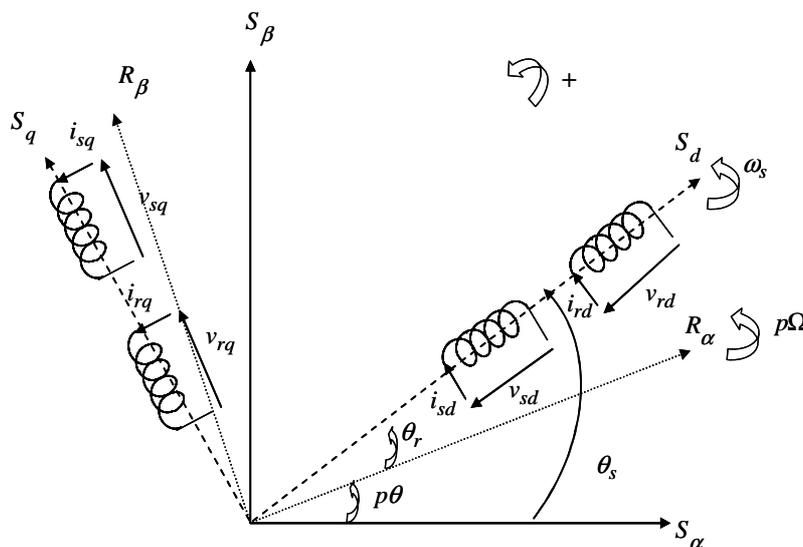


Figure 2.12 Représentation des enroulements dans les axes d et q

Une machine électrique, en fonctionnement génératrice, peut être considérée comme une source du courant en raison de sa nature inductive. Puisque la MADA doit fournir une puissance électrique aux charges inductives, un conflit apparaît entre les dispositifs inductifs des deux composants, basés sur la loi physique d'alternance de source, par conséquent la MADA ne devrait pas être considérée comme une source de tension. Pour résoudre ce problème, on propose une approche

intermédiaire. Elle consiste à considérer la MADA comme source des forces électromotrices décrites ci-dessous. Les relations (2.16a) et (2.16b) peuvent être modifiées avec l'aide de (2.17a) et (2.17b), conduisant à deux nouvelles expressions (2.19a) et (2.19b) de Φ_{sd} et Φ_{sq} .

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{rd} - Mi_{sd}) \quad (2.18a)$$

$$i_{rq} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{rq} - Mi_{sq}) \quad (2.18b)$$

$$\Phi_{sd} = \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} \quad (2.19a)$$

$$\Phi_{sq} = \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rq} \quad (2.19b)$$

Où $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ est le coefficient de dispersion de la MADA

En accord avec (2.19a) et (2.19b) les équations (2.12) et (2.13) deviennent:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + \left(\frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_s \Phi_{sq} \right) \quad (2.20)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \left(\frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \omega_s \Phi_{sd} \right) \quad (2.21)$$

Puis, les f.é.m. e_{sd} et e_{sq} sur l'axe d et q peuvent être définies:

$$e_{sd} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (2.22a)$$

$$e_{sq} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (2.22b)$$

Les figures 2.13a présente la modélisation REM du stator de la MADA.

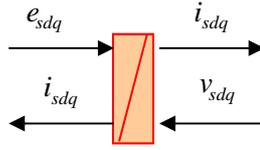


Figure 2.13a REM du stator de la MADA

Ceci mène à changer (2.20) comme suit :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + e_{sd} \quad (2.23)$$

De la même manière (2.21) peut être modifié et donne

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + e_{sq} \quad (2.24)$$

Par conséquent, la MADA est alors considérée comme une source de tension (e_{sd} et e_{sq}) alimentant sa propre impédance du stator et l'impédance de la charge isolée. Ce choix est approprié pour modéliser la machine et également pour la commande vectorielle de celle-ci.

De la même manière, on peut établir les nouvelles expressions pour les tensions du rotor:

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_{rd} \quad (2.25)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_{rq} \quad (2.26)$$

Avec :

$$e_{rd} = \frac{M}{L_s} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - (\omega_s - p_{mada} \Omega) \Phi_{rq} \quad (2.27)$$

$$e_{rq} = \frac{M}{L_s} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + (\omega_s - p_{mada} \Omega) \Phi_{rd} \quad (2.28)$$

Les figures 2.13b présente la modélisation REM du rotor de la MADA.

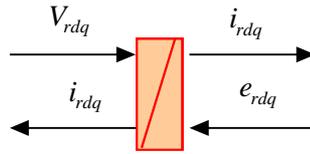


Figure 2.13b REM du rotor de la MADA

L'expression de couple produit par la MADA est alors:

$$C_{mada} = \frac{3}{2} p_{mada} (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad (2.29)$$

II.3.5.2. Modélisation de la partie électromécanique

La figure 2.14 fait apparaître le modèle électromécanique de la MADA.

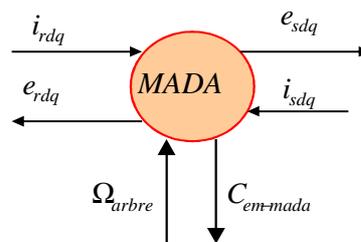


Figure 2.14 REM de la conversion électromécanique de la MADA

II.3.6. Modèle graphique du système complet de génération hydroélectrique

La REM du modèle du système complet de génération hydroélectrique est obtenue en associant l'ensemble des graphiques. Elle donne une macro-représentation des grandeurs échangées entre la microcentrale hydroélectrique et le réseau interconnecté ou les sites isolés.

Ce modèle graphique met en évidence la complexité du système caractérisée par trois couples mécaniques différents appliqués sur l'axe, et la liaison électrique dont le composant principal est le condensateur du bus continu. Les expressions (2.23) et (2.24) prouvent que la commande de tension du stator de MADA implique les f.é.m. L'expression (2.22) souligne que les flux du rotor de la MADA, participeront nécessairement au processus de commande. Afin d'adapter la représentation classique de la REM aux besoins de notre structure, nous proposons de la modifier afin d'améliorer le modèle de la MADA en ajoutant les flux du rotor.

L'approche précédemment décrite mène à l'introduction des flux du rotor ou des courants magnétisants du rotor qui sont des combinaisons linéaires des courants du stator et du rotor. En conséquence, cette proposition implique à considérer ces flux ou les courants magnétisants comme variables d'état du rotor.

Ce modèle comprend un élément hexagonal, appelé le «commutateur de variable d'état», qui permet de choisir les variables d'état les plus appropriées de notre structure. Puisque la microcentrale doit réguler ses tensions, les flux semblent être des variables d'état les mieux adaptés. Dans notre cas, la commande de flux du rotor est considérée. En fait la présence du flux dans la REM implique naturellement le couplage magnétique.

Le «commutateur de variable d'état», est représenté par un hexagone (orange), proposé par [Ans 06a].

La figure 2.15 présente la REM du commutateur de variables

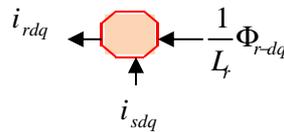


Figure 2.15 Éléments de commutation de variables

Pour effectuer cette amélioration l'équation (2.17) peut être modifiée comme suit:

$$\frac{1}{L_r} \Phi_{rd} = i_{rd} + \left(\frac{M}{L_r} \right) i_{sd} \quad (2.30a)$$

$$\frac{1}{L_r} \Phi_{rq} = i_{rq} + \left(\frac{M}{L_r} \right) i_{sq} \quad (2.30b)$$

En effet, comme $\left(\frac{M}{L_r} \right)$ est le rapport des courants de la MADA, $\left(\frac{\Phi_{rd}}{L_r} \right)$ et $\left(\frac{\Phi_{rq}}{L_r} \right)$ sont le courant magnétisant direct et en quadrature du rotor appelés respectivement i_{rmd} et i_{rmq} , alors les f.é.m. du stator peuvent être exprimées en fonctions de ces courants à l'aide de (2.19a) et (2.19b):

$$e_{sd} = M \frac{d}{dt} i_{rmd} - \omega_s M i_{rmq} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \quad (2.31)$$

$$e_{sq} = M \frac{d}{dt} i_{rmq} - \omega_s M i_{rmd} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} \quad (2.32)$$

Elles peuvent être exprimées aussi en fonction des flux du rotor :

$$e_{sd} = \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_s \frac{M}{L_r} \left(\Phi_{rq} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \right) \quad (2.33)$$

$$e_{sq} = \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - \omega_s \frac{M}{L_r} \left(\Phi_{rd} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sd} \right) \quad (2.34)$$

La figure 2.16 présente la REM du modèle global de la microcentrale hydroélectrique

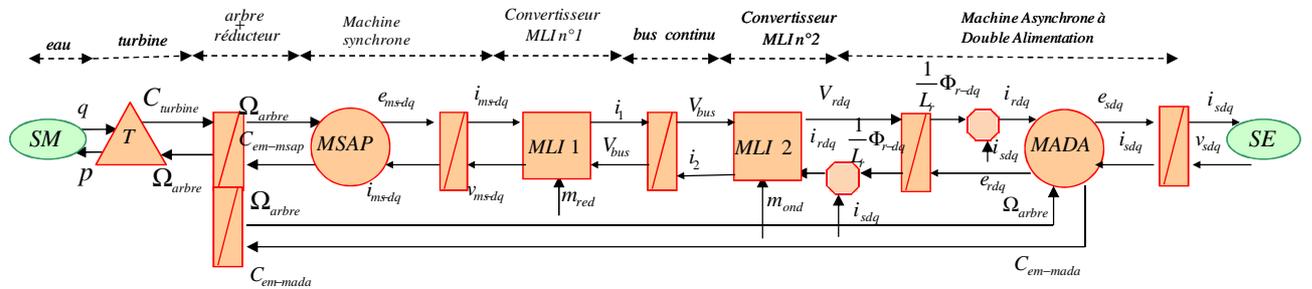


Figure 2.16 REM du modèle global de la microcentrale hydroélectrique

II.4. Stratégie de commande de la microcentrale hydroélectrique connectée sur un site isolé [Bre 07], [Ans 06a]

Dans un premier temps, on procèdera à la commande du convertisseur MLI 2 afin de piloter la MADA par le rotor avec orientation du flux du rotor. On réalisera ensuite la commande du convertisseur MLI 1 en vue de réguler la tension du bus continu.

II.4.1. Stratégie de commande de la MADA

L'architecture du dispositif de commande est obtenue en inversant la REM du modèle. La figure 2.17 présente la commande de la tension de la MADA déduite de la REM.

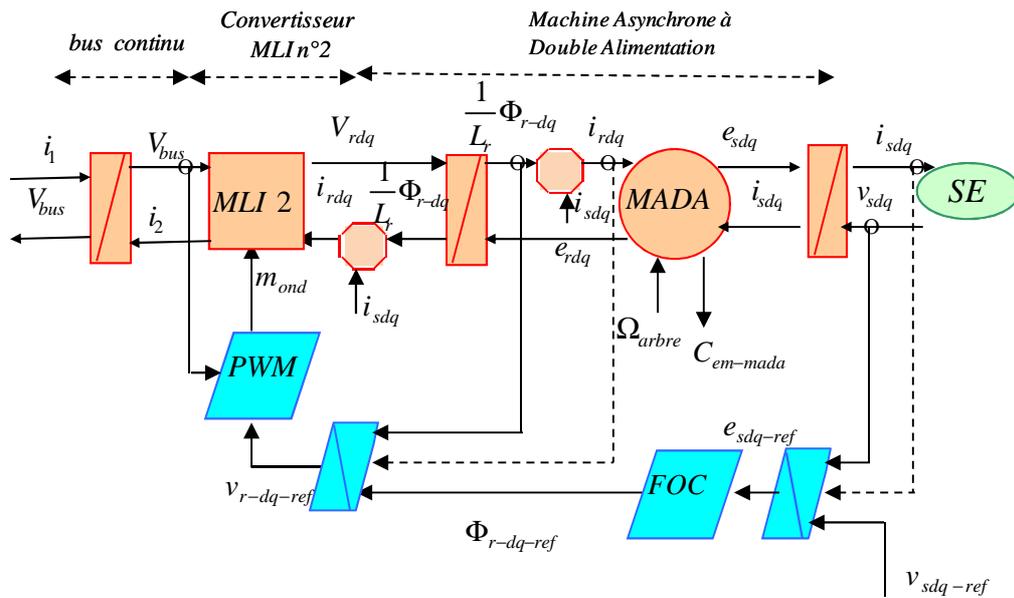


Figure 2.17 Commande de la tension de la MADA déduit de la REM

La microcentrale hydroélectrique étudiée alimente des charges isolées dont les tensions évaluées entre phases ont une valeur efficace de 400V et une fréquence de 50 hertz. En conséquence, la commande du système doit réguler ces deux grandeurs pour les garder aux valeurs souhaitées quelle que soit la charge. Ceci est assuré par le convertisseur MLI 2. D'ailleurs, la tension du bus continu doit être constante pour assurer le bilan énergétique entre le rotor de la MADA et la machine synchrone MSAP. Ceci est assuré par le convertisseur MLI 1. On peut noter que la détermination de la stratégie de commande est effectuée en supposant que le système a atteint le régime permanent. Ceci implique que $\frac{d}{dt}\Phi_{rd}$ et $\frac{d}{dt}\Phi_{rq}$ sont considérés nuls dans les équations (2.33) et (2.34). Évidemment, cette hypothèse n'est pas employée pour la synthèse de la boucle de contrôle des flux. Pour déterminer la stratégie générale de commande, une méthode directe est d'inverser le graphe du processus de la REM, comme représenté dans la figure 2.17, supposant que toutes les grandeurs peuvent être mesurées ou estimées. L'indice « réf » indique la valeur de référence.

Chaque rectangle barré est un élément de stockage, alors celui-ci est associé à une boucle de réaction afin de réguler sa sortie en fonction d'une des deux variables de ses entrées, la deuxième variable étant considérée comme une perturbation représentée par une ligne pointillée. Toutefois on peut noter que la loi causale implique que la tension v_s ne soit pas un résultat mais une entrée qui doit être régulée. L'action sur les courants du stator de la MADA serait une solution théorique valable, mais, ces courants sont imposés par la charge isolée. La seule possibilité qui reste est de commander la

f.é.m. du stator, considérant les courants du stator comme perturbations. Le résultat de la boucle de réaction de tension du stator est alors une valeur de référence de la f.é.m. e_{sref} comme représenté dans figure 2.17. Les équations (2.23) et (2.24) nous montrent qu'en régime permanent, la différence entre la f.é.m. e_s et la tension v_s est uniquement due à la chute de tension de la résistance d'enroulement du stator. En conséquence, un PI est choisi comme correcteur de cette boucle extérieure. La régulation de la f.é.m. du stator est obtenue par la commande vectorielle de flux (CVF ou FOC) qui permet de déterminer le flux de référence du rotor souligné par la REM en inversant le processus. Par conséquent, le flux du stator est orienté sur l'axe direct d du repère de Park. Les flux de référence du rotor sont obtenus avec l'aide de (2.16) et (2.17) menant aux équations suivantes :

$$\Phi_{sqref} = 0, i_{rq} = -\frac{L_s}{M} i_{sq} \text{ et } \Phi_{rqref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \quad (2.35)$$

Si le champ de stator est correctement orienté c'est-à-dire $\left(\Phi_{rqref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sq} \right)$, alors, d'après les équations (2.33) et (2.35), e_{sd} est nulle en régime permanent, $v_{sd} \approx 0$ si on néglige la chute de tension ohmique. Par conséquent, d'après l'équation (2.34) la f.é.m. du stator e_{sq} est régulée par Φ_{rd} dont la valeur de référence est donnée par l'équation (2.36).

$$\Phi_{rdref} = \frac{L_r}{\omega_s M} e_{sqref} - \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{sd} \quad (2.36)$$

La figure 2.16 montre que les flux du rotor peuvent être régulés par v_{rd} et v_{rq} tensions de rotor. En vue de décrire les boucles internes, les équations (2.14) et (2.15) peuvent être modifiées comme suit avec l'aide de l'équation (2.18).

$$\Phi_{rd} = \left(\frac{T_r}{1 + T_r s} \right) (v_{rd} + C_{rd}) \quad (2.37)$$

$$\Phi_{rq} = \left(\frac{T_r}{1 + T_r s} \right) (v_{rq} + C_{rq}) \quad (2.38)$$

s est l'opérateur de Laplace, $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ la constante de temps du rotor de la MADA et :

$$C_{rd} = \frac{MR_r}{L_r} i_{sd} + \omega_r \phi_{rq} \quad (2.39)$$

$$C_{rq} = \frac{MR_r}{L_r} i_{sq} - \omega_r \phi_{rd} \quad (2.40)$$

C_{rd} et C_{rq} représentent la somme de chute de tension produite par les courants i_{sd} et i_{sq} de stator et les f.é.m. dû au couplage d'axe d et q du repère de Park. Dans les boucles de commande, ces termes doivent être compensés. La commande en modulation de largeur d'impulsion du convertisseur MLI 2 permet l'application des tensions calculées $(v_{rd}; v_{rq})$ aux enroulements de rotor. La figure 2.18 récapitule cette commande présentée sous forme de schéma bloc. Dans ce schéma, $C_d(\Phi)$, $C_q(\Phi)$ et $C(v)$ sont des correcteurs consacrés respectivement à Φ_{rd} , Φ_{rq} et v_{sq} . Ils permettent de contrôler l'orientation des axes. Dans ce schéma, les grandeurs avec tilde représentent une estimation des valeurs des variables précédemment présentées et déterminées par des mesures des courants du stator et du rotor. D'une part, la commande de Φ_{rq} est dédiée à l'orientation de flux du stator, pour assurer partiellement le découplage des axes d et q; d'autre part la commande de Φ_{rd} est dédiée à la f.é.m. de l'axe q e_{sq} et par conséquent la régulation de tension v_s du stator. La figure 2.17 et la figure 2.18 sont donc deux représentations complémentaires. ω_r est la pulsation des courants du rotor.

La figure 2.18 présente la commande de la tension du stator de la MADA sous forme de schéma bloc.

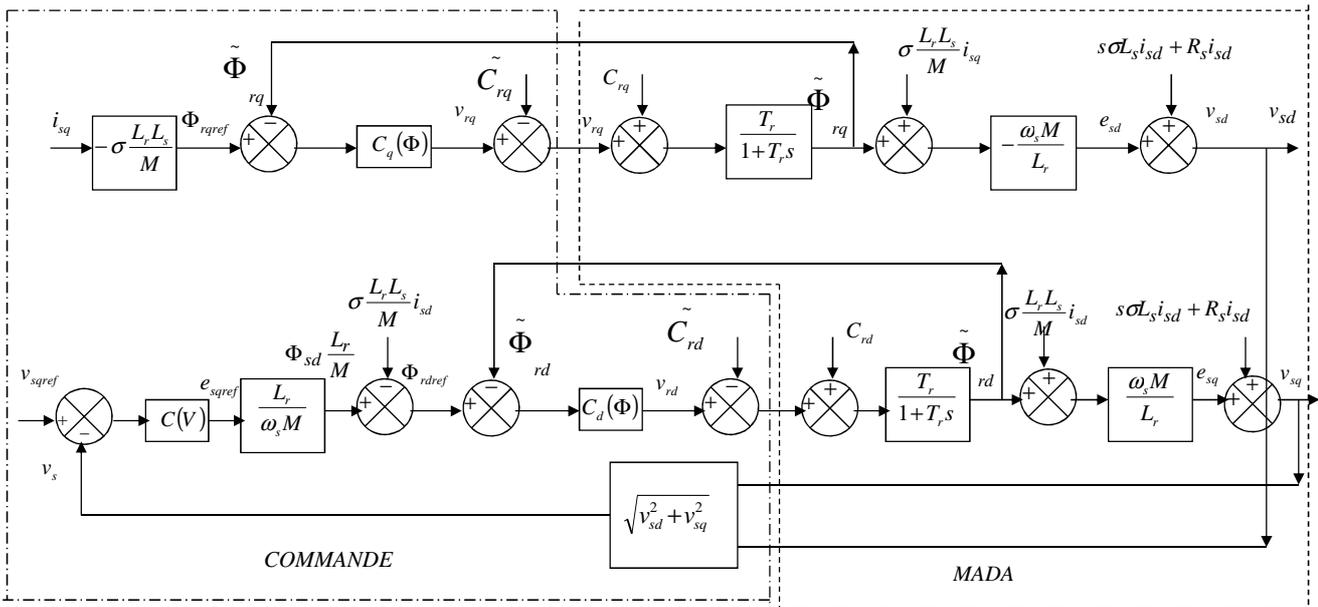


Figure 2.18 Commande détaillée de la tension du stator de la MADA en schéma bloc.

La fréquence de tension du stator doit être maintenue à la valeur de 50Hz malgré les variations de ce point. Pour une machine à double alimentations, la fréquence du stator f_s est liée à la fréquence du rotor f_r et la vitesse de rotation Ω par la relation suivante :

$$f_r = \left| f_s - \frac{p_{MADA} \Omega}{2\pi} \right| \quad (2.41)$$

p_{MADA} : désigne le nombre de paires de pôles de la MADA

II.4.2. Stratégie de commande de la MSAP

L'architecture du dispositif de commande est obtenue en inversant la REM du modèle. La figure 2.19 présente la commande de la MSAP et du bus continu déduit de la REM

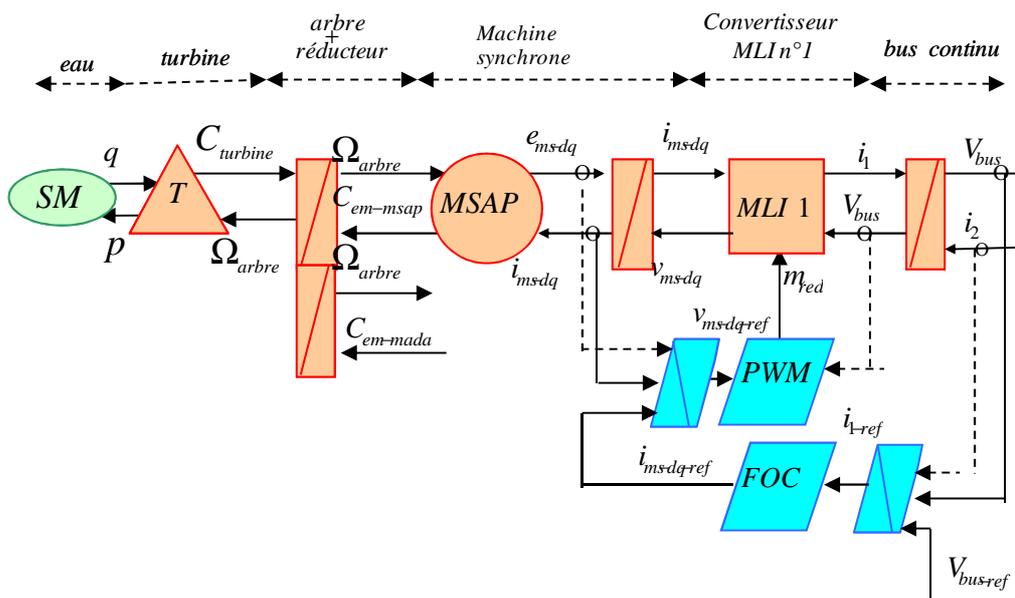


Figure 2.19 Commande de la MSAP et le bus continu déduit de la REM

Cette commande est effectuée par le convertisseur MLI n°1 afin de maintenir la tension du bus continu à sa valeur nominale. La MSAP est représentée comme une source de tension f.é.m. reliée à un élément de stockage inductif et le convertisseur MLI n°1, le condensateur du bus continu (élément de stockage capacitif) est relié au convertisseur MLI n°2 et est considéré comme une source de tension.

La figure 2.10 est une représentation schématique du bus continu; il définit les courants utilisés dans la REM de la figure 2.19. La stratégie de commande est alors déduite de ce modèle macroscopique. Le processus est représenté dans la figure 2.20 qui montre deux boucles de commande interne et externe ainsi que la tension du bus continu. Une boucle calcule le courant continu i_1 en sortie du convertisseur MLI 1. Le courant de la MSAP doit être régulé à sa valeur de référence, ceci est obtenu grâce à la commande vectorielle qui permet de déterminer i_{msref} .

II.4.3 Régulation de la tension du bus continu

Cette régulation est réalisée par le convertisseur MLI 1 connecté au stator de la machine synchrone comme représenté dans la figure 2.19. En admettant que le courant i_2 du bus continu soit considéré comme une perturbation, la régulation de la tension v_{bus} passe par le contrôle du courant i_1 en sortie du convertisseur MLI 1.

On établit en premier lieu un asservissement du courant i_{dms} à 0 de sorte que, en régime permanent et en négligeant la chute de tension due à R_{ms} , les expressions (2.6) et (2.7) deviennent :

$$v_{dms} = -\omega_{ms} L_q i_{qms} \quad (2.42a)$$

$$v_{qms} = \omega_{ms} \Phi_f \quad (2.42b)$$

La relation (2.42a) montre que la variable de régulation est v_{dms} . Pour déterminer la valeur de référence de i_{qms} , on pose l'égalité entre les puissances électriques au stator de la MSAP et sur le bus continu, les pertes dans le convertisseur étant négligées ceci mène à :

$$\frac{3}{2} v_{qms} i_{qmsref} = v_{bus} i_1 \quad (2.43)$$

$$i_{qmsref} = \frac{3}{2} \frac{v_{bus} i_1}{\omega_{ms} \Phi_f} \quad (2.44)$$

La deuxième boucle du courant produit alors la tension de la MSAP suivant le schéma de la figure 2.19. L'étape suivante est la détermination du schéma détaillé de commande représenté en schéma bloc dans la figure 2.20.

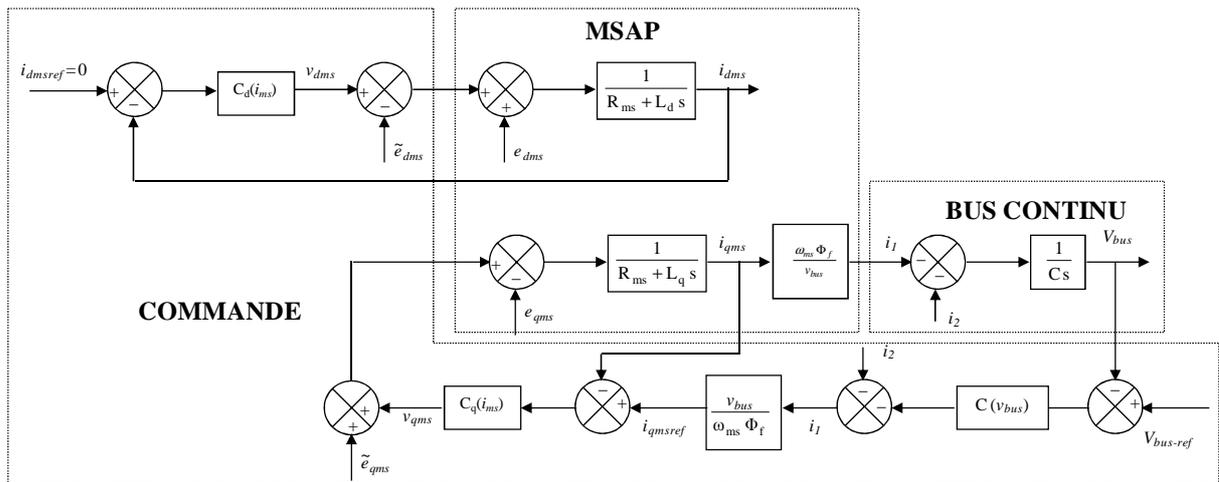


Figure 2.19 Schéma bloc de commande du bus continu

Dans la figure 2.19 $C_d(i_{ms})$, $C_q(i_{ms})$ et $C(v_{bus})$ sont des correcteurs dédiés respectivement à i_{dms} , i_{qms} et le contrôle de la tension du bus continu V_{bus} .

II.4.4. Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté sur sites isolés

Le modèle graphique de la commande du système complet de génération hydroélectrique est obtenu en associant les deux graphiques précédents. La figure 2.21 présente le modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté à un site isolé.

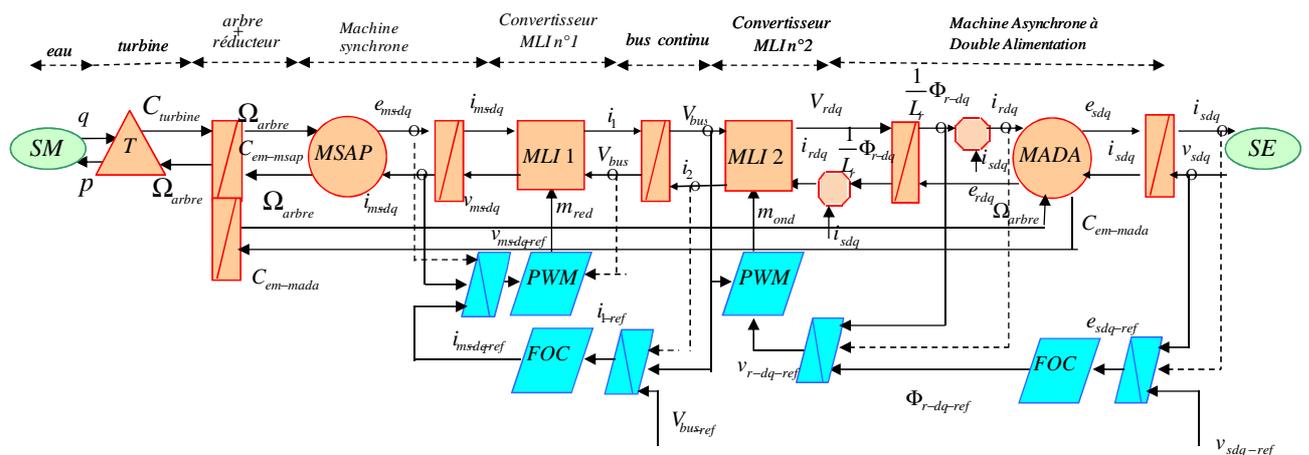


Figure 2.21 Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique connecté sur sites isolés

II.4.5. Simulations

Caractéristiques des éléments simulés

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel SimulinkTM. On considère une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 300 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe. Le système est basé sur une MADA de quatre pôles, alimentant une charge isolée avec un facteur de puissance de 0.8. Le scénario simulé est le suivant : A $t = 0 \text{ sec}$, $P_S = 0 \text{ kW}$; à $t = 1 \text{ sec}$, $P_S = 50 \text{ kW}$ à $t = 50 \text{ sec}$, $P_S = 190 \text{ kW}$, à $t = 100 \text{ sec}$, $P_S = 300 \text{ kW}$, $t = 150 \text{ sec}$, $P_S = 190 \text{ kW}$, $t = 200 \text{ sec}$, $P_S = 50 \text{ kW}$.

Les courbes présentées de la figure 2.22 à la figure 2.24 correspondent aux résultats de simulation.

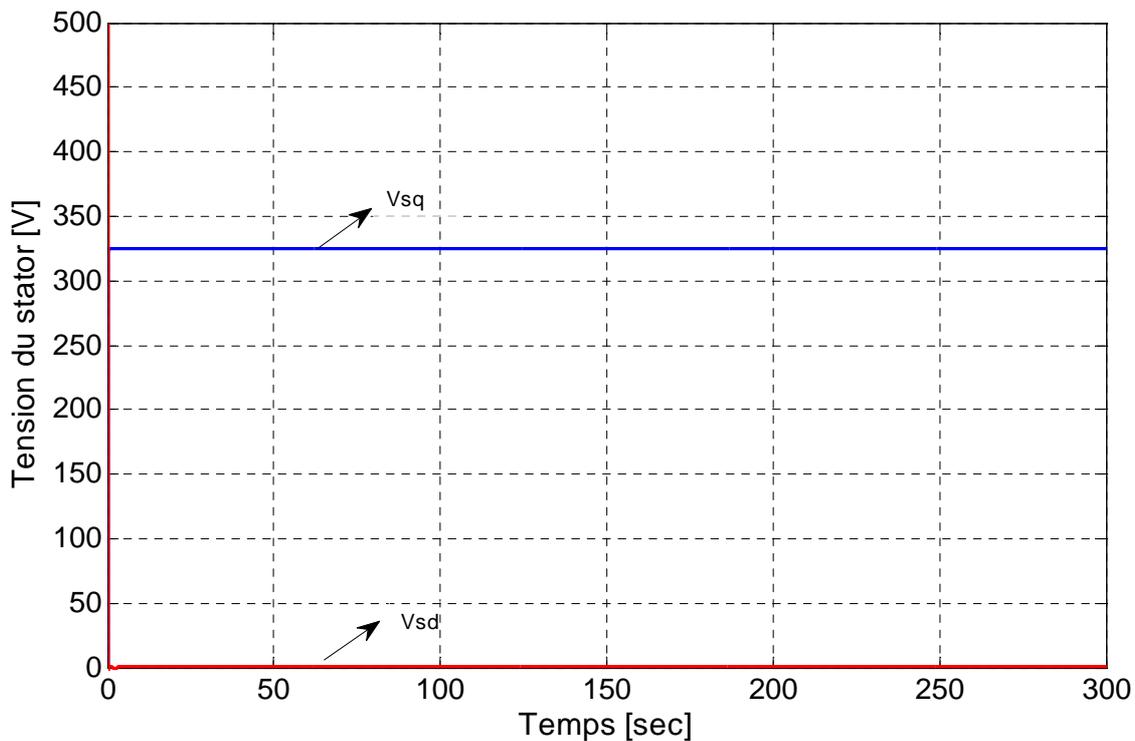


Figure 2.22 Tension du stator v_{sd} et v_{sq}

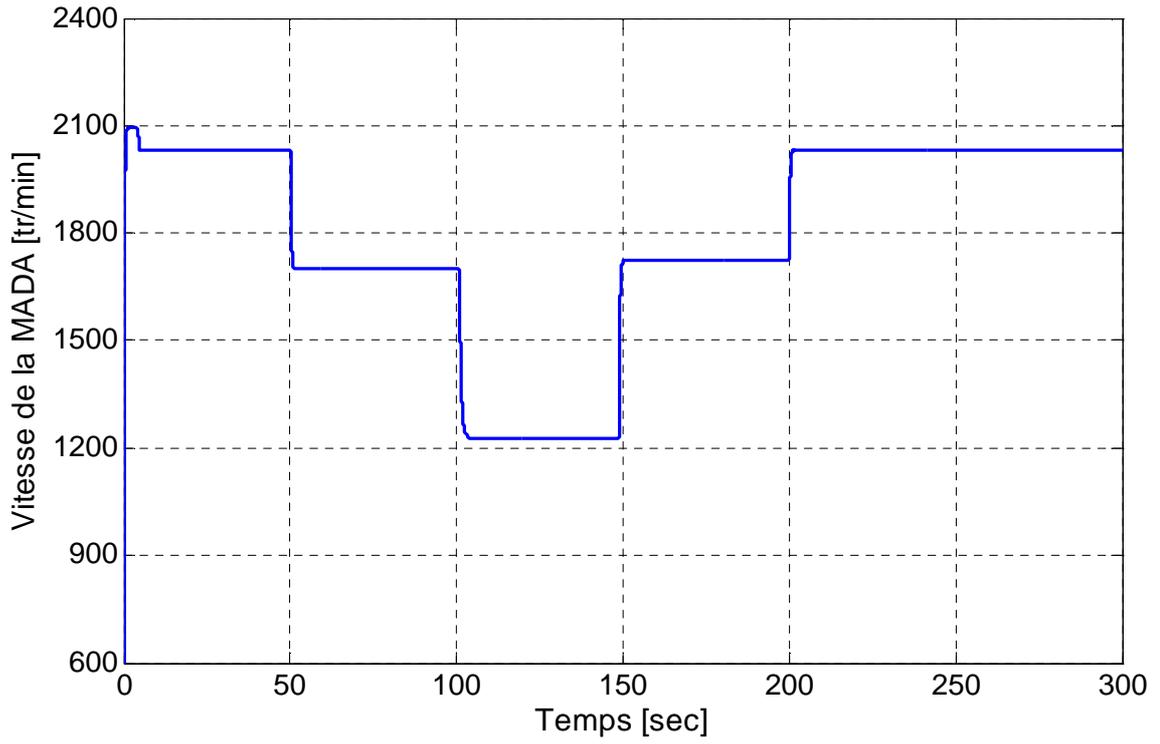


Figure 2.23 Vitesse de rotation de la MADA

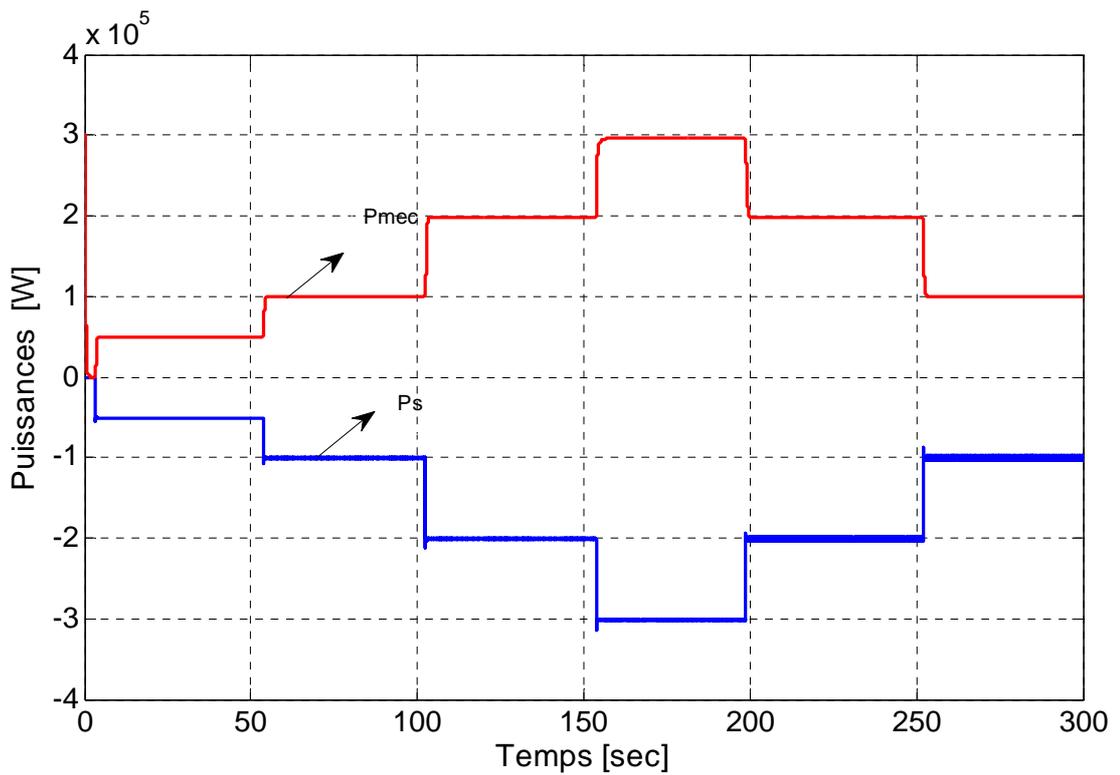


Figure 2.24 Puissances de la turbine P_m et de la MADA P_s

II.4.6. Interprétation

La figure 2.22 montre que malgré la variation de la charge, v_{sd} est nulle et v_{sq} est régulée. La figure 2.23 montre que la vitesse de rotation baisse lorsque la charge augmente. En effet, la vitesse de rotation de l'ensemble tournant dépend des puissances et des caractéristiques mécaniques de chaque machine. Pour $0 < t < 100$ sec, la MADA fonctionne en mode hypersynchrone (la vitesse de la turbine dépasse 1500 tr/min). Pour $100 < t < 150$ sec, la MADA fonctionne en mode hyposynchrone (sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à 1500 tr/min). En accord avec la figure 2.23, la MADA a la capacité de fonctionner en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. La figure 2.24 montre la puissance mécanique P_m fournie par la turbine hydraulique, elle est égale à P_s si on néglige les pertes des machines.

II.4.7. Conclusion

Les simulations confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. On peut obtenir le point de fonctionnement optimum du générateur à n'importe quelle vitesse. La tension du stator est maintenue à sa valeur nominale malgré l'évolution de la puissance appelée par la charge. La fréquence du générateur est régulée autour de 50 Hz.

La phase suivante est la validation expérimentale des lois de commande étudiées.

II.5. Validation expérimentale

II.5.1. Présentation de la plateforme d'essais

Un banc d'essai est disponible dans le laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de puissance (L2EP) de Lille, dans les bâtiments de l'école des Hautes Études d'Ingénieurs (HEI) de Lille [Annexes 1 et 2]. Celui-ci est flexible et il comporte un maximum d'éléments produits en série. J'ai participé à la création de la plateforme expérimentale et aux essais du système de conversion électromécanique de la microcentrale hydroélectrique. Le développement de ce banc d'essai a permis d'évaluer et d'étudier les différentes stratégies de commande des générateurs hydro/éoliens associés à un système de stockage d'énergie. Dans la suite, la microcentrale hydroélectrique sera examinée expérimentalement sur réseau interconnecté ou sur un site isolé.

Cette plateforme d'essais comporte un émulateur de turbine hydraulique (ETH), représentant le comportement d'une turbine hydraulique réelle, basé sur une machine à courant continu (MCC), une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) et une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dont le fonctionnement en génératrice permet de convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, ensemble mécaniquement couplé. Deux convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI font le lien entre le rotor de la MADA et le stator de la MSAP. Le troisième convertisseur MLI alimente la (MCC). Les interrupteurs des convertisseurs utilisés sont de marque SEMIKRON, construit autour d'IGBT 1200V/50A, ils sont commandés par des cartes DSPACE.

II.5.1.1. Émulateur de la turbine hydraulique (ETH)

La base de cet émulateur est une machine à courant continu (MCC) de 3 kW, 1500 tr/min, alimenté par un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI n°3). L'induit de la machine est alimenté par deux bras du convertisseur (hacheur à quatre quadrants) et l'excitation par le troisième bras. Ce dernier point a son importance, car lorsque le banc sera amené à travailler en fonctionnement hypersynchrone, il sera nécessaire de réduire l'excitation de la MCC afin de lui permettre d'atteindre des vitesses supérieures à 1500 tr/min. La commande de cet ensemble est assurée par une carte DSPACE™ 1104. Une interface de commande est placée entre cette carte et les drivers des IGBT, afin d'adapter les signaux reçus des organes de commande et de réaliser de façon matérielle les ordres complémentaires de commutation des interrupteurs. Une interface de mesure composée d'un capteur de tension et de trois capteurs de courants LEM permet les relevés nécessaires à la commande de la machine. Enfin, une mesure de vitesse est réalisée grâce à un codeur incrémental implanté sur la MSAP, connecté à un port dédié sur la carte DSPACE™ 1104.

II.5.1.2. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La MSAP (2,8 kW, 3000 tr/min) comporte 3 paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine hydraulique (ETH). L'énergie qu'elle fournit est envoyée vers le bus de tension continue. Son induit est relié au bus de tension continu 400 V par un convertisseur MLI n°1. Ce dernier est contrôlé par une carte DSPACE™ 1103. Un codeur incrémental est nécessaire à la capture de la vitesse de la MSAP. Celui-ci est directement connecté à un slot dédié sur la borne d'extension de la carte DSPACE™ 1103.

II.5.1.3. La machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La MADA (3 kW, 1500 tr/min) comporte deux paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine hydraulique (ETH). L'énergie qu'elle fournit par son stator est envoyée soit vers le réseau électrique soit vers une charge isolée. Son rotor est relié au bus de tension continue 400 V par un convertisseur MLI n°2. Ce dernier est contrôlé par une carte DSPACE™ 1104.

II.5.1.4. Les convertisseurs statiques

Deux convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI font le lien entre le rotor de la MADA et le stator de la MSAP. Les interrupteurs des convertisseurs utilisés sont de marque SEMIKRON™, construit autour d'IGBT 1200V/50A, ils sont commandés par des cartes DSPACE.

La figure 2.25 montre la structure mise en jeu pour cette étude. Comme les enroulements du stator et du rotor de la MADA sont en couplage étoile, la mesure de deux courants du rotor et du stator est nécessaire et suffisante.

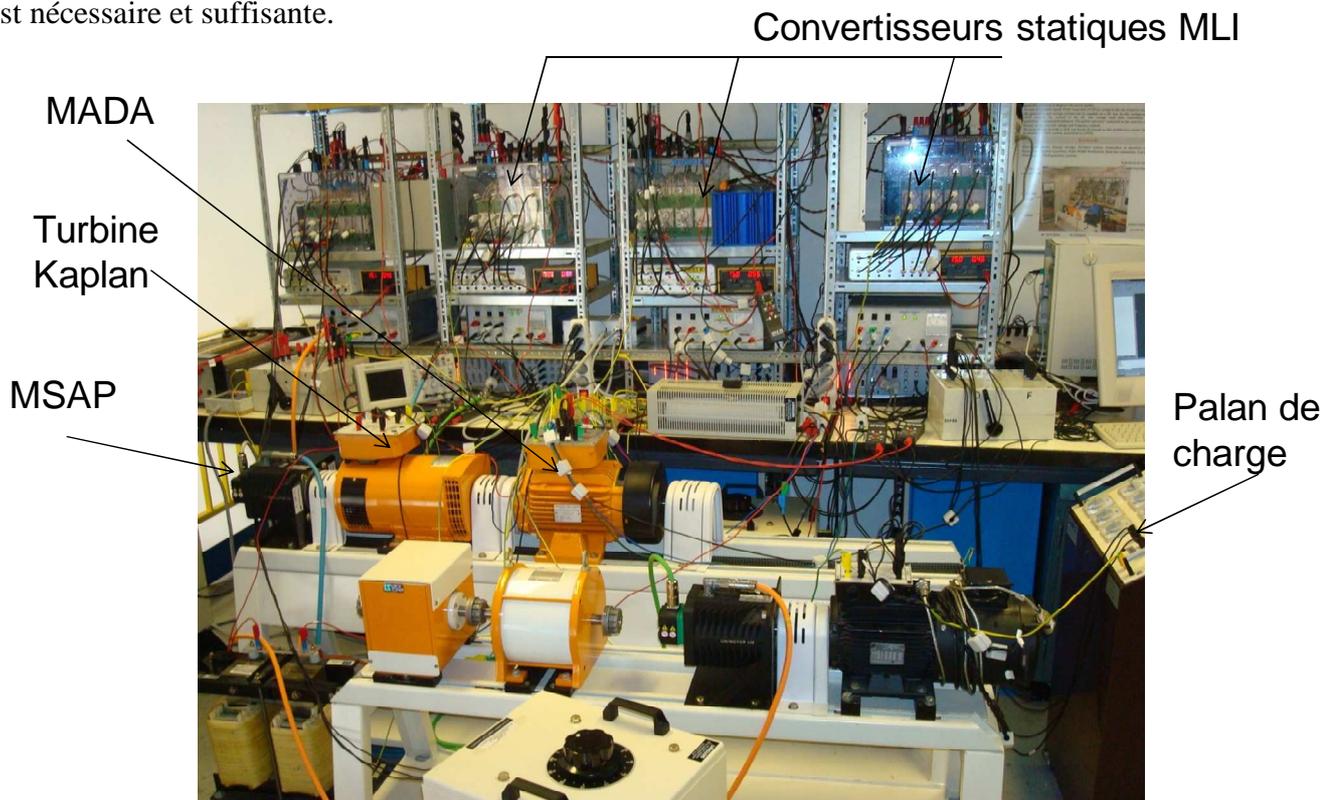


Figure 2.25 Banc d'essai adapté à l'étude du générateur hydroélectrique connecté sur sites isolés

En effet les valeurs des courants du stator sont nécessaires pour évaluer les termes de perturbation de la MADA, ceux de couplage et les flux du rotor commandés comme décrits dans les sections précédentes. Les valeurs des courants du rotor sont aussi bien utiles pour calculer les flux du rotor. La tension instantanée du stator est également mesurée pour calculer les puissances active et réactive transmises par le générateur, quand la machine débite sur charge isolée, afin de maintenir la valeur efficace de la tension constante et réguler la fréquence.

II.5.2. Essais expérimentaux sur un site isolé [Bre 07]

La microcentrale hydroélectrique est examinée expérimentalement sur un site isolé (figure 2.26).

Des essais ont été réalisés sur un intervalle de 300 secondes comme suit :

L'émulateur de la turbine est placé de telle sorte que le débit fixe est de 0.9 p.u. À $t = 157 \text{ sec}$, le débit est diminué à une valeur de 0.8 p.u. et ensuite à $t = 190 \text{ sec}$ il est augmenté jusqu'à sa valeur initiale.

La MADA est branchée sur une charge résistive variable dont la variation peut être traitée seulement point par point et non pas de manière continue. La tension (composée) efficace de référence entre phases de la charge est de 225 V.

La tension de référence du bus continu est fixée à 200 V, afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

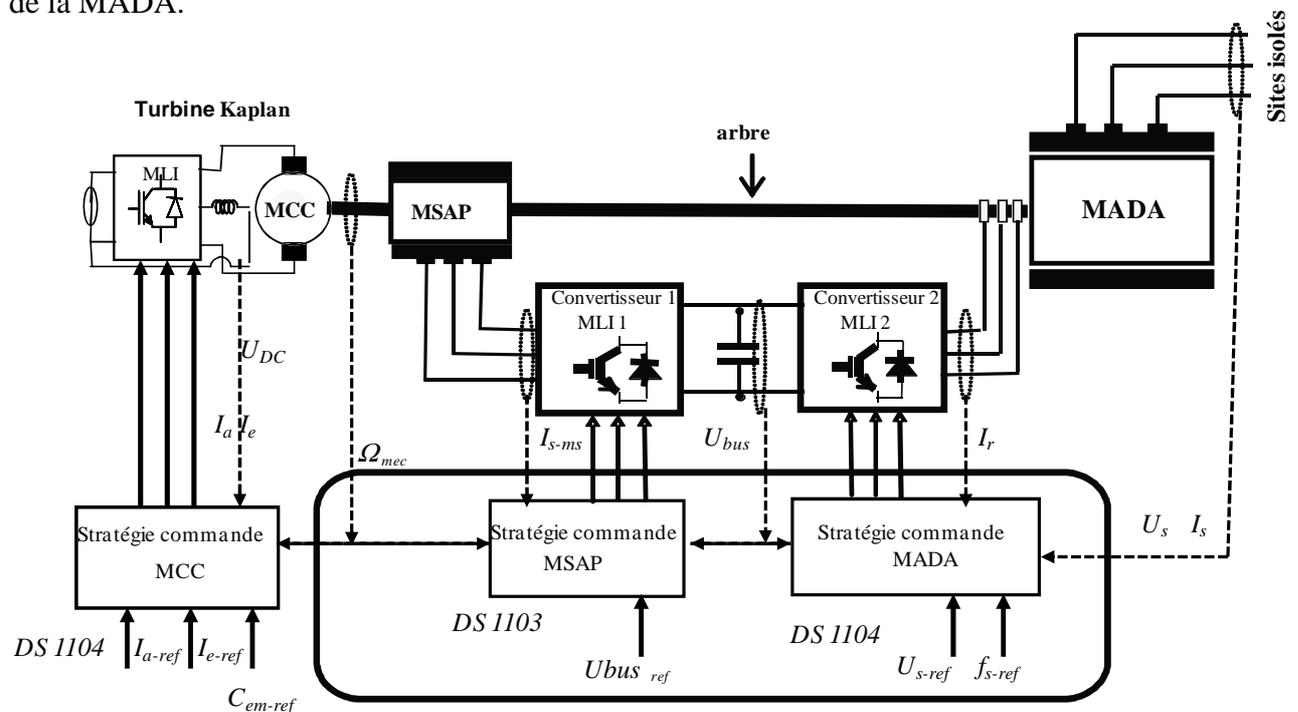


Figure 2.26 Schéma de banc d'essai

II.5.3. Interprétation

Les courbes présentées de la figure 2.27 à la figure 2.33 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental. Ils montrent respectivement le débit simulé de la turbine, la vitesse de rotation, la fréquence de tension du stator de la MADA, la tension efficace entre phases du stator de la MADA, la puissance active fournie à la charge par la MADA (on peut remarquer que les puissances sont positives contrairement aux résultats de la simulation), la tension du bus continu et la puissance mécanique transmise de la turbine (émulateur).

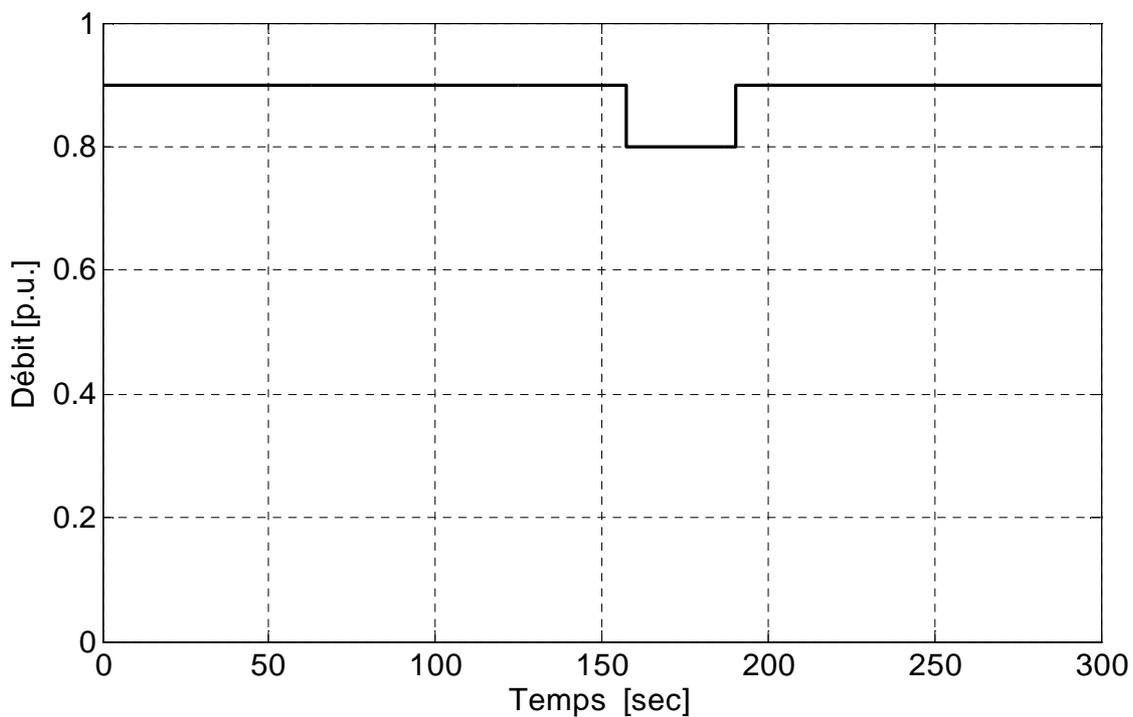


Figure 2.27 Débit d'écoulement d'eau.

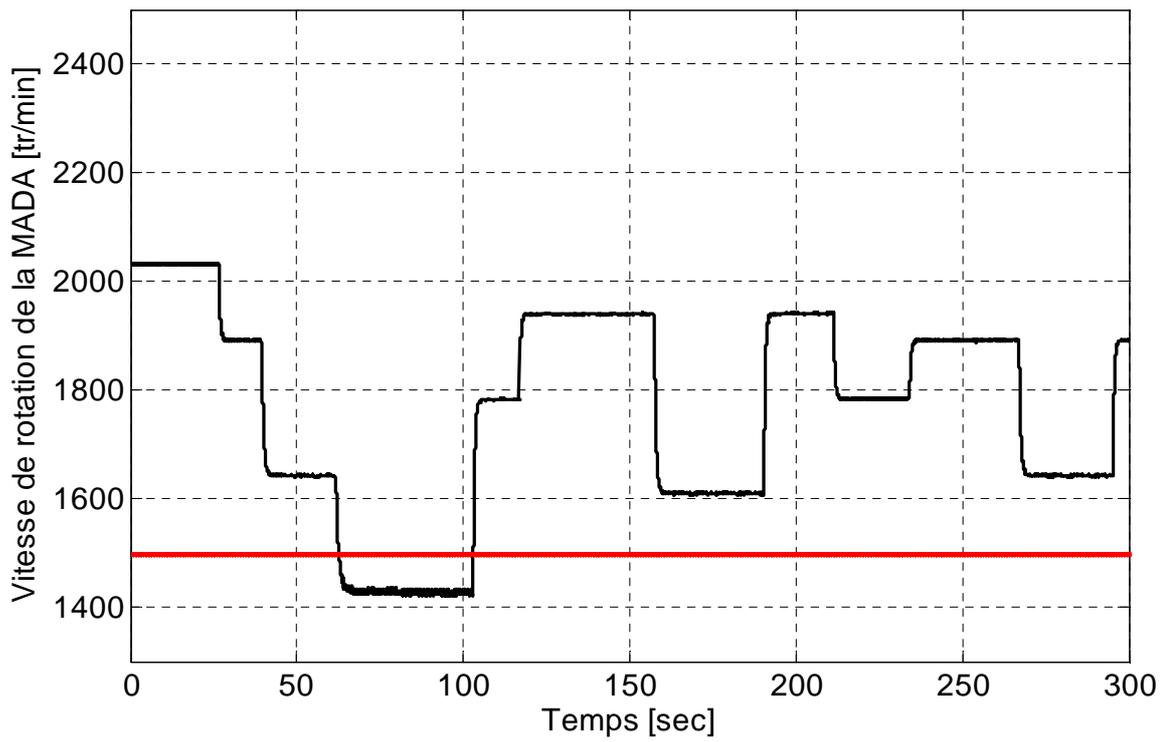


Figure 2.28 Vitesse de rotation de la MADA.

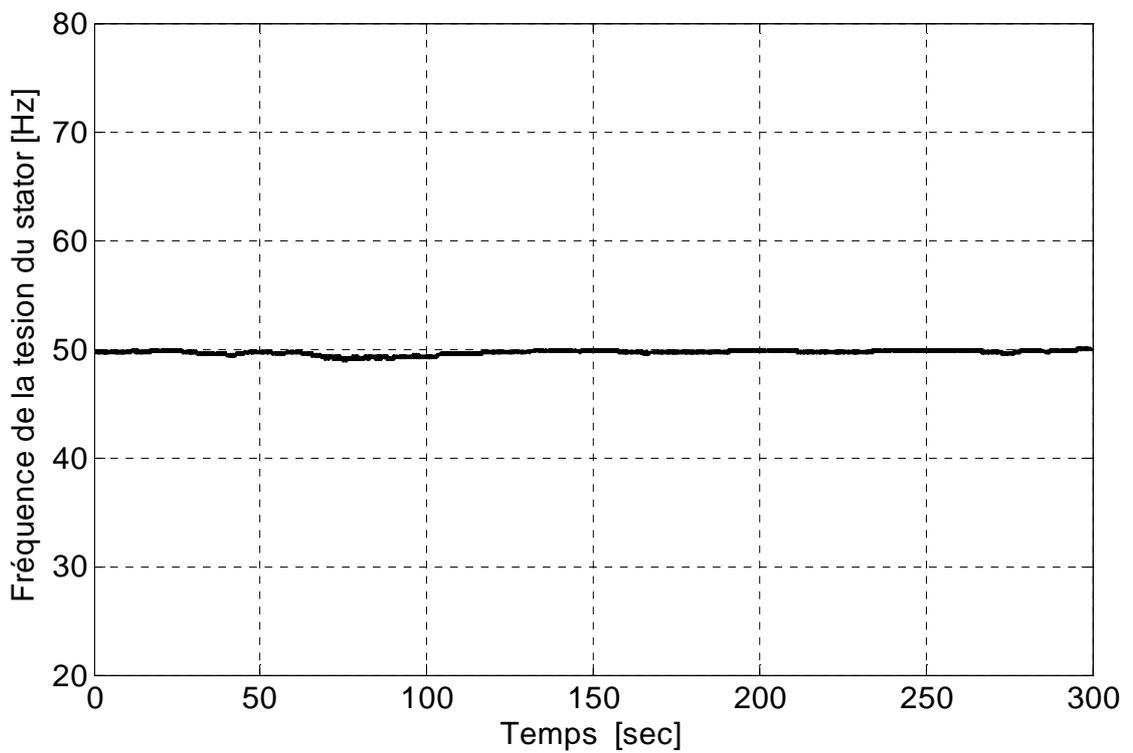


Figure.2.29 Fréquence de la tension du stator de la MADA.

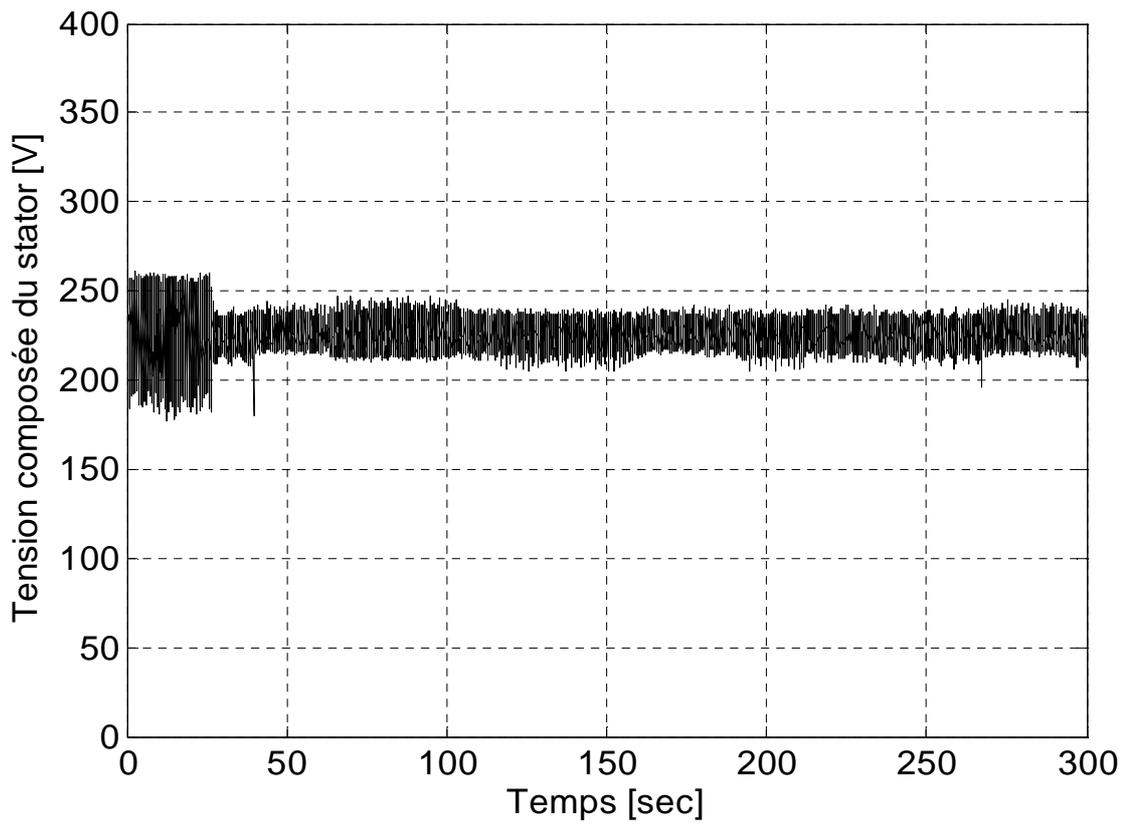


Figure 2.30 Tension composée efficace au stator de la MADA.

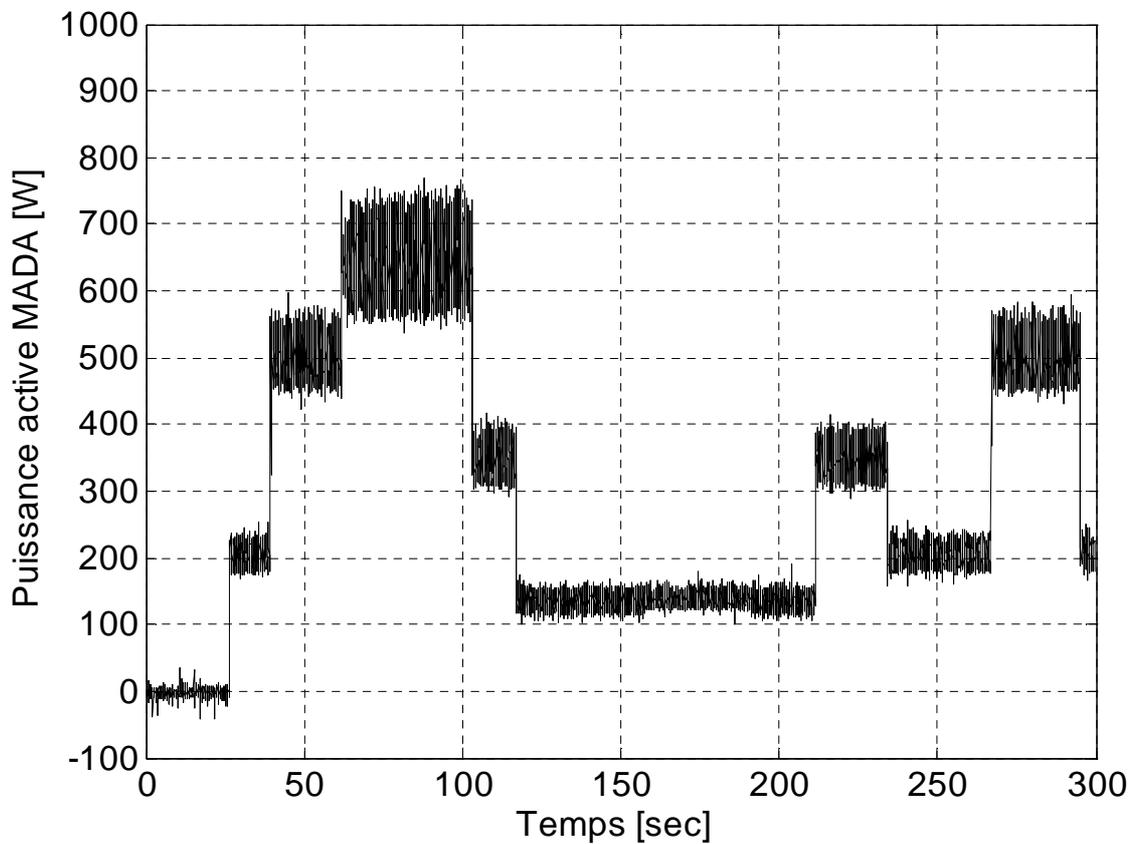


Figure 2.31 Puissance active fournie par la MADA

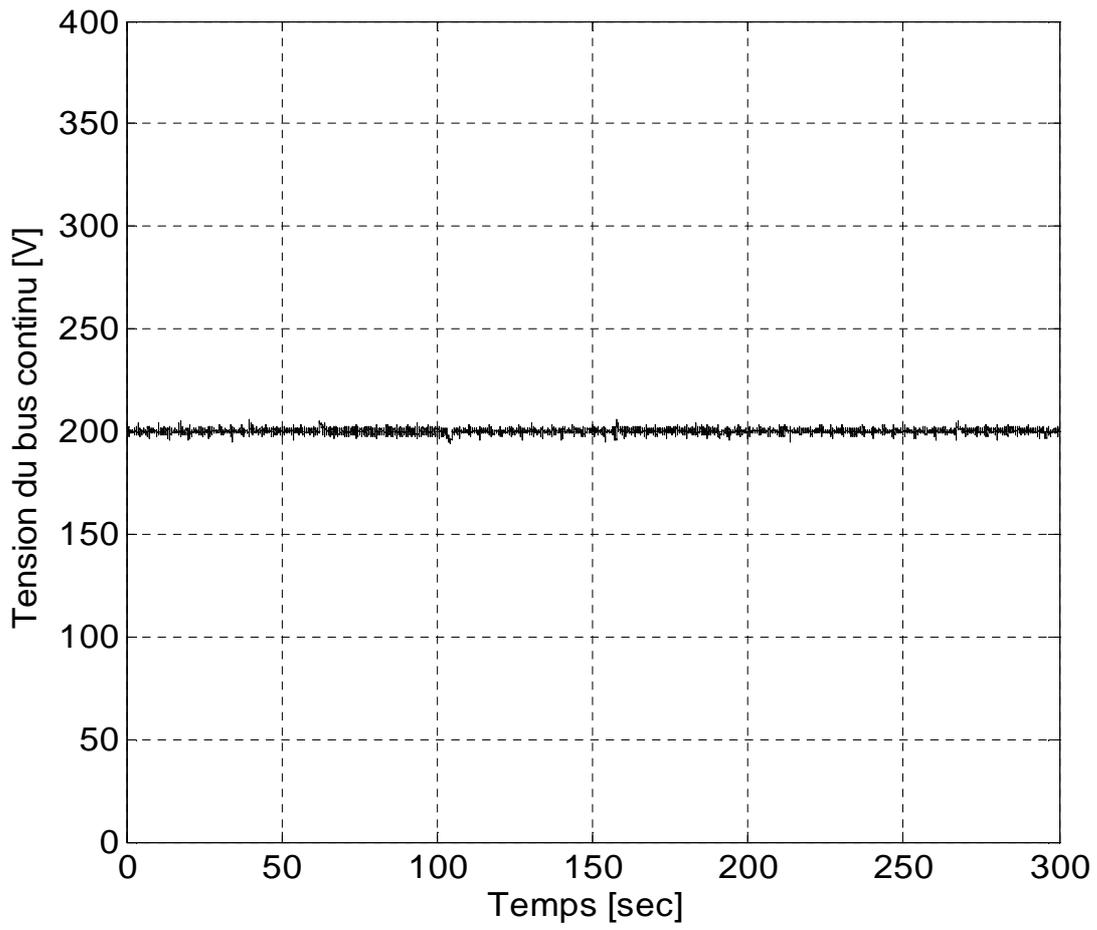


Figure 2.32 Tension de bus continu DC

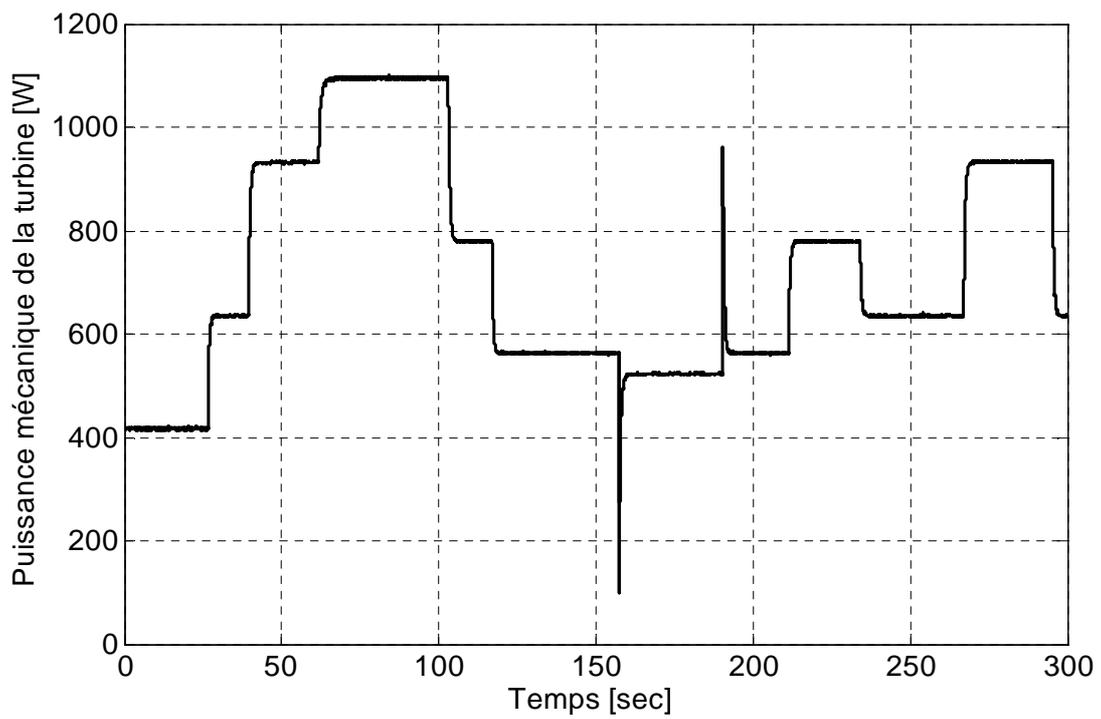


Figure 2.33 Puissance mécanique de la turbine hydraulique

Ces résultats confirment la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner le système à vitesse variable en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme comme montré à la figure 2.28 et à fréquence fixe côté charges isolées. Cette dernière grandeur (fréquence) est bien régulée quel que soit la charge, comme montré dans figure 2.29, et malgré les variations intempestives de la charge. La figure 2.30 montre la tension efficace du stator de la MADA, elle est relativement stable malgré les oscillations significative de l'amplitude en fonctionnement à vide au moment de démarrage à $t = 27$ sec . Les fluctuations de la tension peuvent être observées aussi dans le graphique de puissance de la figure 2.31. La figure 2.32 montre que la tension du bus continu est bien régulée pour toutes les valeurs de la charge. Dans la figure.2.33, on peut noter que la puissance mécanique transmise de la turbine est supérieure à la puissance électrique fournie à la charge à cause de toutes les pertes produites dans le système, comme les pertes mécaniques, les pertes fer et Joules du stator de la MADA et de la MSAP, les pertes fer et Joules du rotor de la MADA et les pertes des convertisseurs de puissance. Les pertes fer et Joule du rotor de la MADA sont significatives seulement quand le glissement l'est aussi. D'autre part, la figure 2.33 souligne que, quand le débit est soudainement modifié, une variation rapide de la vitesse mécanique se produit en raison d'un changement de la caractéristique mécanique de turbine. Comme confirmé par la figure 2.33, la puissance électrique n'est pas influencée par cette coupure, seulement le point de réglage mécanique est modifié : la vitesse diminue de manière significative et la puissance mécanique transmise atteint une valeur légèrement plus faible que précédemment alors que les pertes mécaniques et les pertes dans le rotor de la MADA deviennent plus petites. Ceci montre la capacité du système à travailler dans une condition où le débit est variable. Pour conclure, ces résultats expérimentaux permettent de valider la stratégie de commande en mode de fonctionnement sur charges isolées.

II.5.4. Conclusion

Les résultats expérimentaux confirment la capacité du système de conversion électromécanique de fonctionner à vitesse variable en hypersynchronisme et aussi en hyposynchronisme. Cela permet d'utiliser toute la plage de vitesse de la caractéristique mécanique de la turbine. Malgré l'évolution du point de fonctionnement, la microcentrale hydroélectrique arrive à maintenir la tension efficace du site isolé à une valeur constante. La fréquence est bien régulée autour de 50 Hz. Au niveau du couplage entre les deux convertisseurs, la tension du bus continu est bien régulée à 200 V.

II.6. Modélisation et simulation de la microcentrale hydroélectrique débitant sur un réseau interconnecté

II.6.1. Stratégie de commande en mode de fonctionnement sur réseau interconnecté [Bre 06], [Ans 06a]

Dans le cas du raccordement sur un réseau de puissance, les flux du stator sont fixés par le réseau et ne sont par conséquent pas réglables; en régime permanent et en négligeant les chutes de tensions, (2.12) et (2.13) deviennent:

$$v_{sd} = -\omega_s \Phi_{sq} \quad (2.45)$$

$$v_{sq} = +\omega_s \Phi_{sd} \quad (2.46)$$

Dans cette configuration, il est nécessaire de prendre en considération dans le modèle de la MADA l'expression de la puissance active P_s , fournie par la MADA, et la puissance réactive Q_s , fournie ou consommée, P_s et Q_s sont exprimées comme suit :

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (2.47)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}) \quad (2.48)$$

On note que la transformation de Park initiale permet de conserver l'amplitude efficace du courant et non pas la puissance apparente. Alors on choisit le repère d-q attaché au stator en orientant le flux du stator sur l'axe d afin d'éliminer l'une des deux composantes de tension du stator de la MADA, ici v_{sd} .

Ainsi, si V_s représente la valeur efficace de la tension du réseau, alors, on peut écrire, à l'aide de (2.12) et (2.45) :

$$\Phi_{sq} = 0 \quad (2.49)$$

$$i_{sq} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rq} \quad (2.50)$$

$$v_{sd} \approx 0 \quad (2.51)$$

$$v_{sq} \approx V_s \sqrt{2} \quad (2.52)$$

Ceci nous conduit à de nouvelles expressions de P_s et de Q_s :

$$P_s = -\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{MV_s}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rq} \quad (2.53)$$

$$Q_s = -\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{MV_s}{\sigma L_s L_r} \Phi_{rd} + \frac{3V_s^2}{\sigma L_s \omega_s} \quad (2.54)$$

Les formules (2.33), (2.34), (2.53) et (2.54) impliquent une approche unifiée de la commande de la microcentrale hydroélectrique utilisant uniquement les flux du rotor pour le fonctionnement sur réseau interconnecté ou sur îlotage. Cette considération explique pourquoi on a choisi d'écrire (2.33) et (2.34) en fonction des flux du rotor et non pas du stator.

On suppose que la fréquence et la valeur efficace de la tension du réseau ne changent pas dans cette configuration. Le but de la stratégie de commande de ce système est alors de fournir au réseau la puissance active et la puissance réactive demandée pour sa gestion. On suppose aussi que les références de puissance ont été calculées par un algorithme de supervision qui doit coordonner plusieurs générateurs décentralisés. Les expressions (2.53) et (2.54) montrent que chaque type de puissance peut être commandé par un axe menant à un découplage parfait des deux puissances. Là où la puissance active dépend de Φ_{rq} la puissance réactive dépend de Φ_{rd} . On peut rappeler que cette considération est valable si le flux du stator est orienté sur l'axe d et si R_s est négligeable. La stratégie de commande de la MADA est alors basée sur le même principe qu'en mode de fonctionnement sur sites isolés.

On obtient la commande en inversant le processus de la REM représenté dans la figure 2.34. Ce schéma est semblable à celui représenté dans la figure 2.20, la différence est située sur les calculs de référence de flux du rotor. Supposant que la microcentrale fournit au réseau électrique une puissance et est soudainement débranchée suite à un incident, le système de commande est capable de commuter la MADA sur un site isolé à condition de détecter le défaut.

La figure 2.34 présente le modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté.

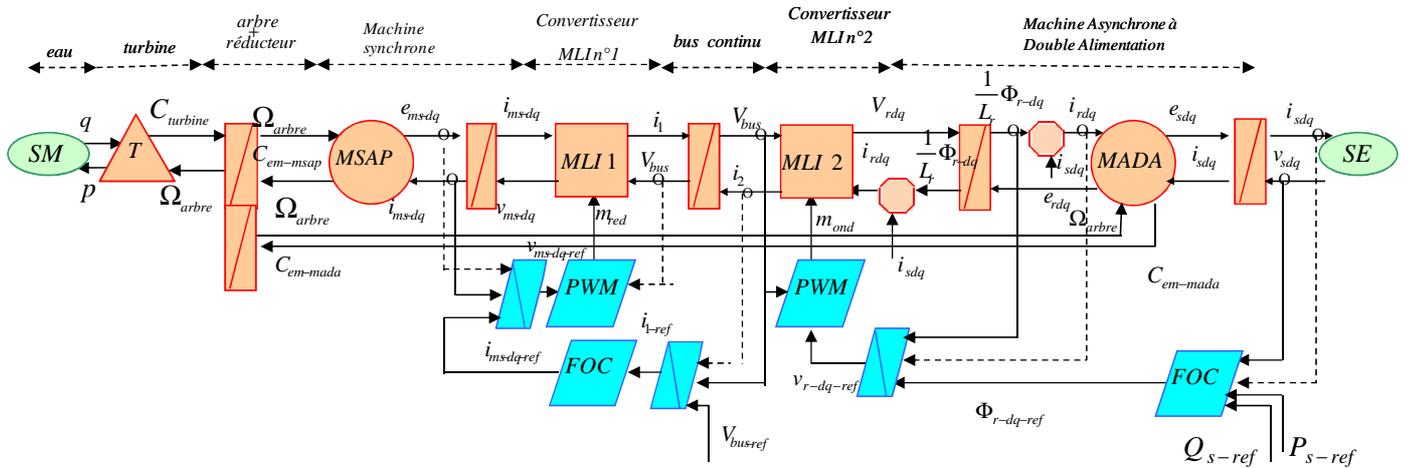


Figure 2.24 Modèle graphique global de la commande du système hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté.

II.6.2. Simulations

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel SimulinkTM. On considère une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 300 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe. Le système est basé sur une MADA de quatre pôles, 1500 tr/min et une turbine de Kaplan. Le scénario simulé est le suivant : A $t = 0$ sec , $P_s = 0kW$; à $t = 1$ sec , $P_s = 50kW$ à $t = 50$ sec , $P_s = 190kW$, à $t = 100$ sec , $P_s = 300kW$, à $t = 150$ sec , $P_s = 190kW$, à $t = 200$ sec , $P_s = 50kW$.

Les courbes présentées de la figure 2.35 à la figure 2.38 correspondent aux résultats de simulation.

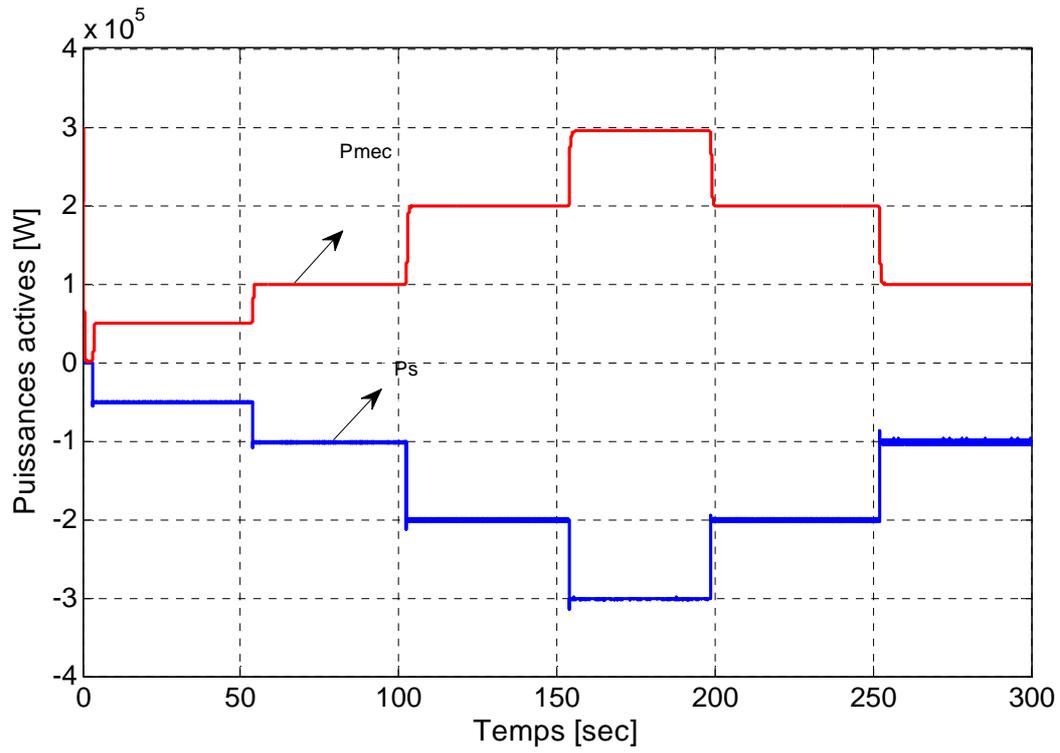


Figure 2.35 Puissance active (P_s) fournie par la MADA et Puissance mcanique (P_m) fournie par la turbine.

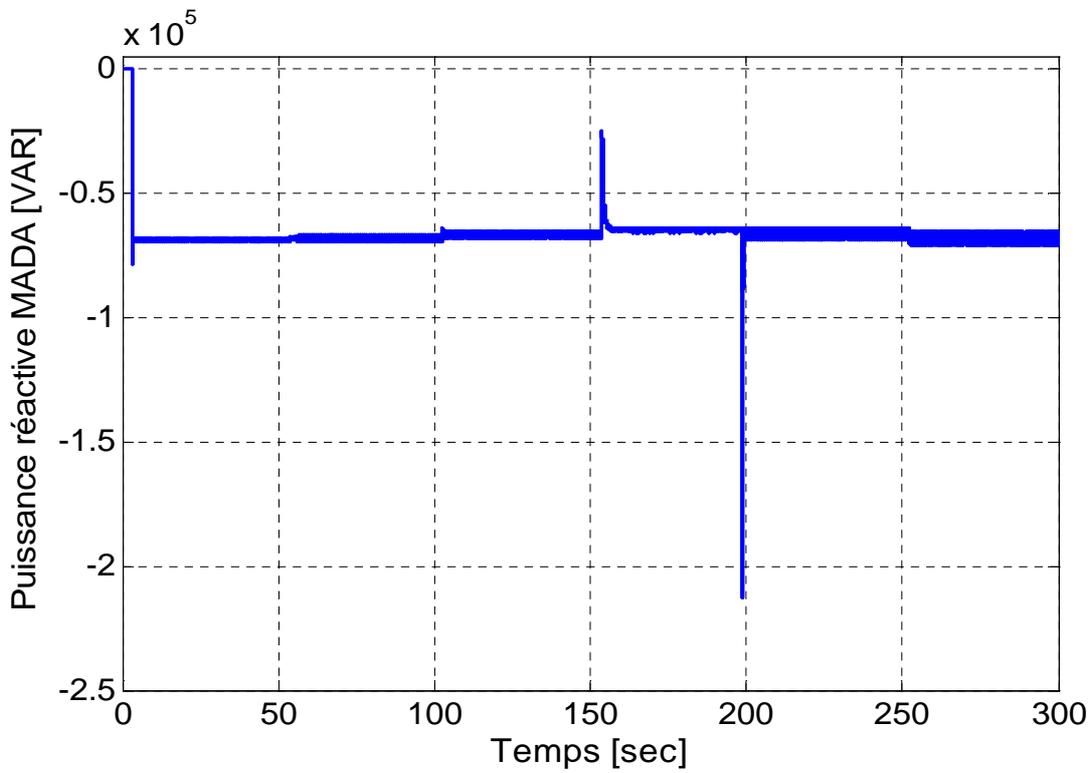


Figure 2.36 Puissance ractive (Q_s) du stator de la MADA

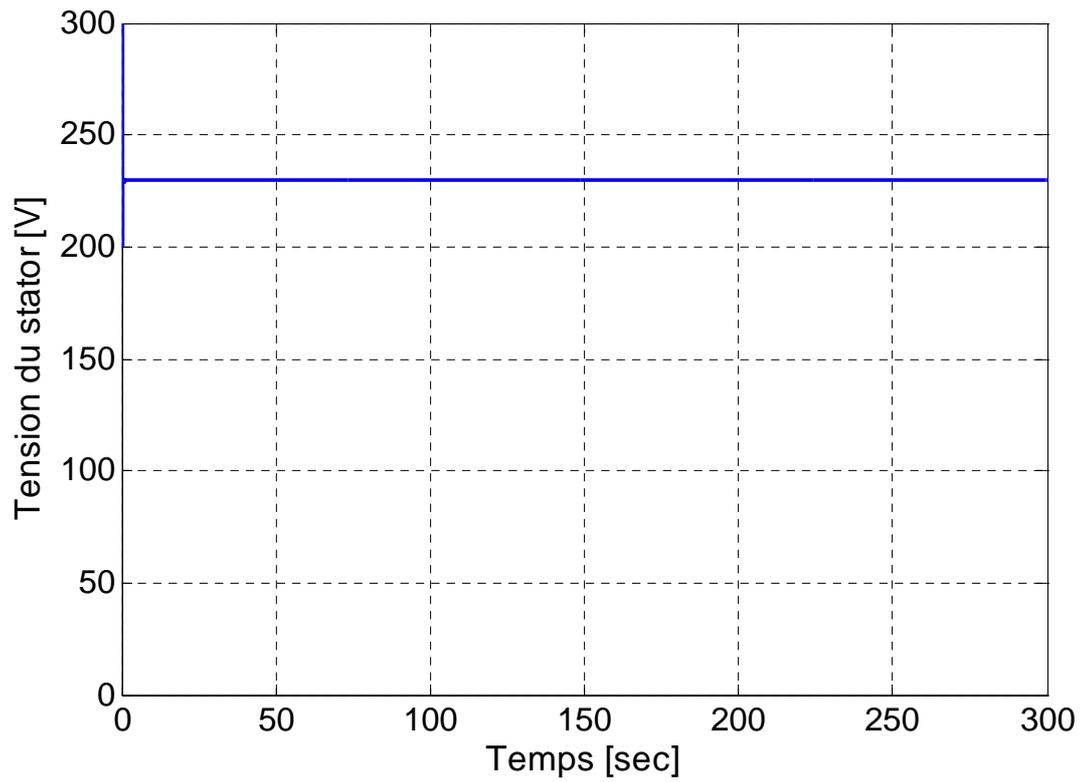


Figure 2.37 Tension simple du stator de la MADA

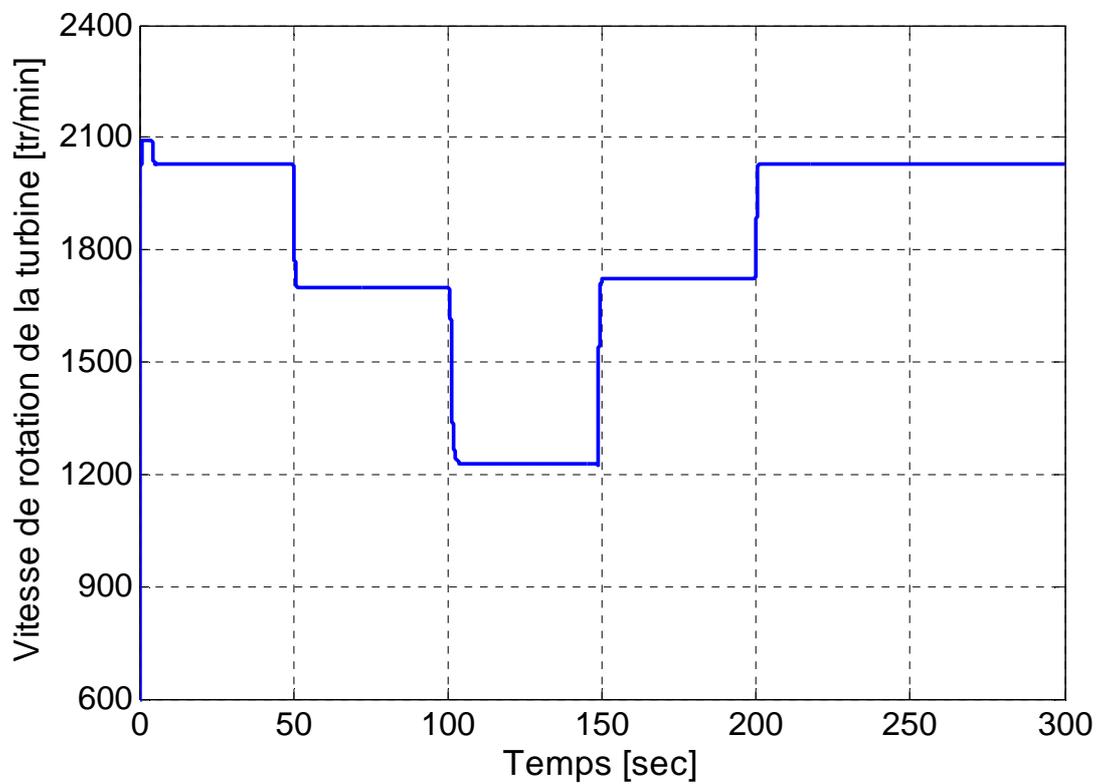


Figure 2.38 Vitesse de rotation de la turbine.

II.6.3. Interprétation

La figure 2.35 montre la puissance active fournie par la MADA (P_s) et la puissance mécanique assurée par le système de turbine/multiplicateur de vitesse (P_m). Les courbes présentées de la figure 2.36 à figure 2.38 montrent respectivement la puissance réactive de la MADA, la tension efficace entre phase et neutre du stator et la vitesse de rotation de la turbine qui change selon la puissance active fournie. Cette vitesse peut être supérieure ou inférieure à la vitesse synchrone. En mode hypersynchrone (la vitesse de la turbine dépasse 1500 tr/min), la puissance active du rotor alimente la MSAP qui fonctionne par conséquent comme moteur. Tandis que, dans le fonctionnement hyposynchrone la MSAP fonctionne en générateur.

II.6.4. Conclusion

Les simulations confirment la capacité de la microcentrale hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable étant connectée sur réseau puissant. Les consignes de puissances modifient les points de fonctionnement de la MADA. La tension et la fréquence du stator sont imposées par le réseau électrique.

II.6.5. Essais expérimentaux sur réseau interconnecté [Bre 07], [Ans 06a]

La microcentrale hydroélectrique est examinée expérimentalement sur réseau interconnecté (figure 2.39). Des essais ont été réalisés sur un intervalle de 300 secondes, de plus, l'émulateur de la turbine est placé de telle sorte que le débit fixe est de 0.9 p.u. La MADA est branchée directement sur un réseau puissant. La tension (composée) efficace entre phases est de 225 V et la fréquence est de 50 Hz. Enfin, la tension de référence du bus continu est fixée à 200 V afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

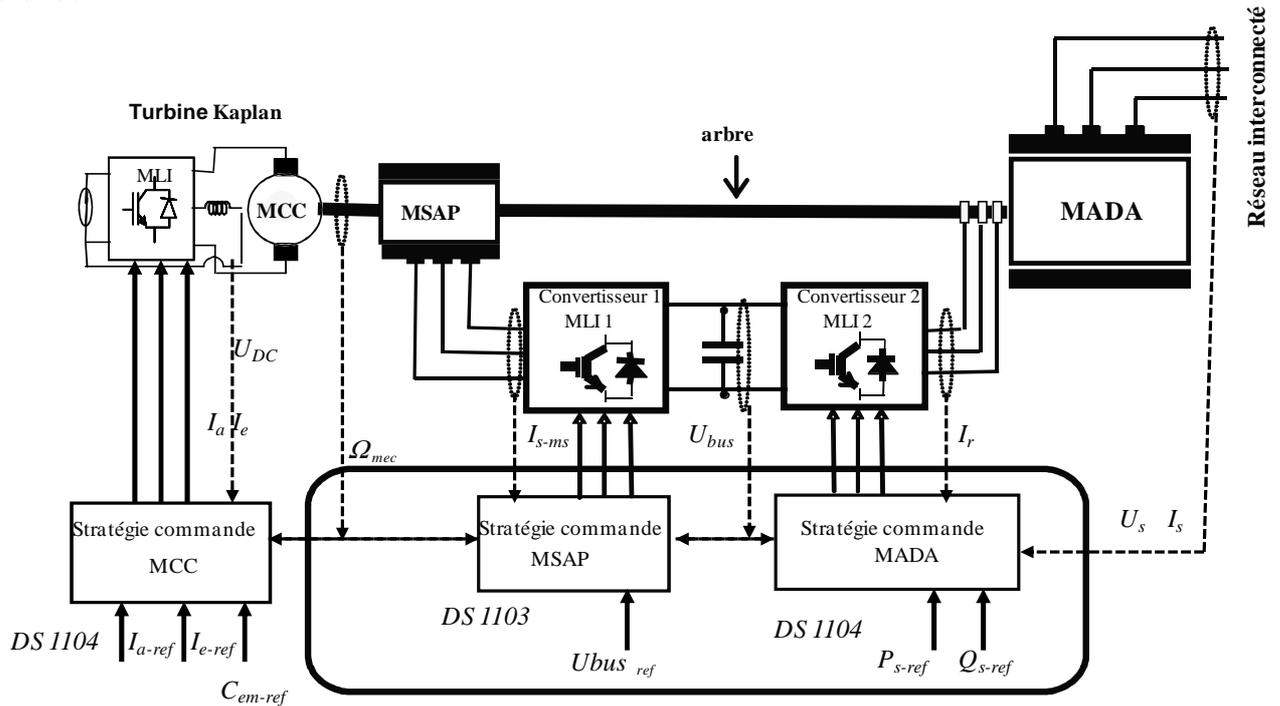


Figure 2.39 Banc d'essai adapté à l'étude du générateur hydroélectrique débitant sur réseau interconnecté

II.6.6. Interprétation

Les courbes présentées de la figure 2.40 à la figure 2.43 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental [Annexes 1 et 2].

La figure 2.40 montre la capacité de la microcentrale hydroélectrique de contrôler les puissances débitées sur le réseau. On voit aussi que, selon les besoins, on peut générer ou absorber de la puissance réactive. La figure 2.41 présente la puissance mécanique transmise de la turbine (émulateur), cette puissance est proche de celle fournie par la MADA aux pertes près. La figure 2.42 présente la vitesse de rotation mécanique de la turbine qui varie en deçà et au-delà de la vitesse de synchronisme et la figure 2.43 présente la tension du bus continu qui est bien régulée à 200 V.

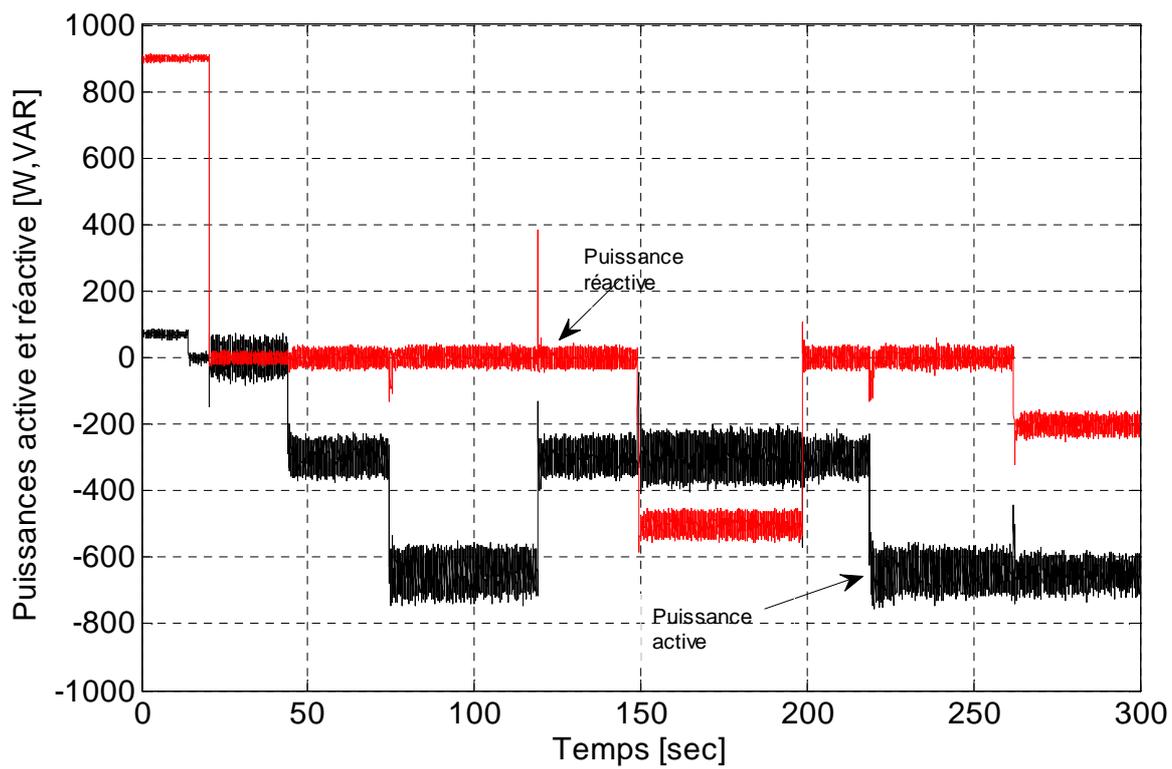


Figure 2.40 Puissances active et réactive fournies au réseau

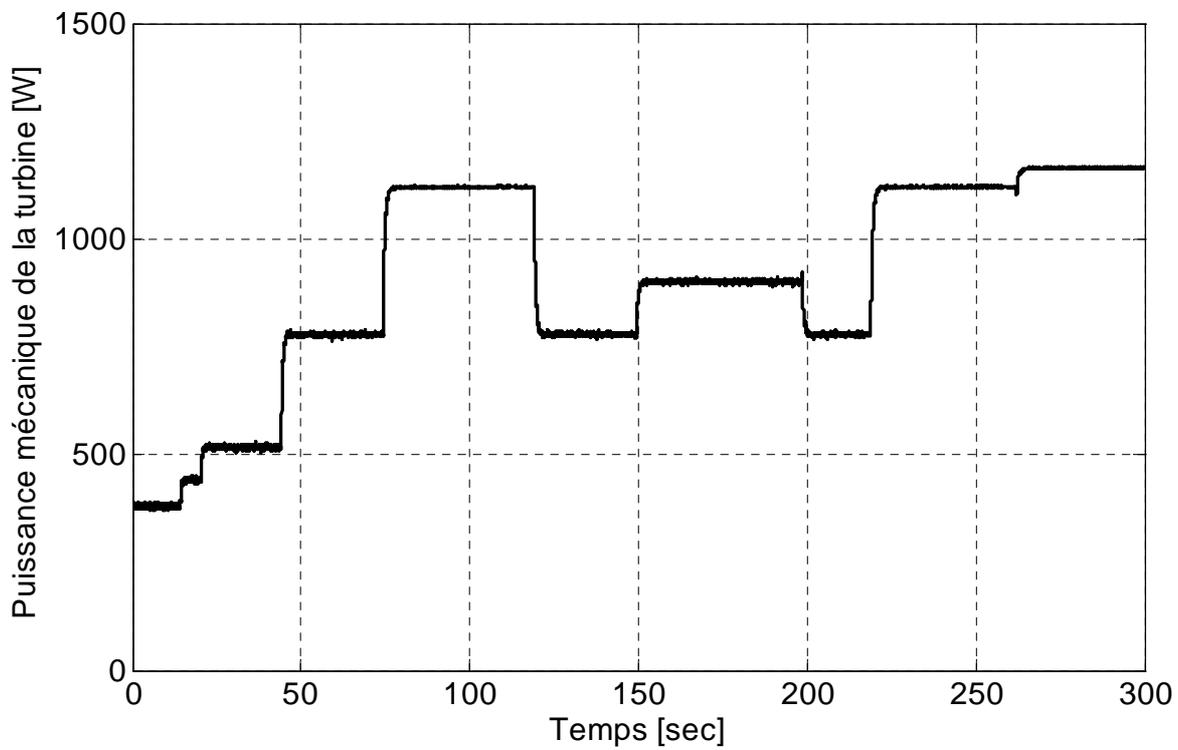


Figure 2.41 Puissance mécanique de la turbine.

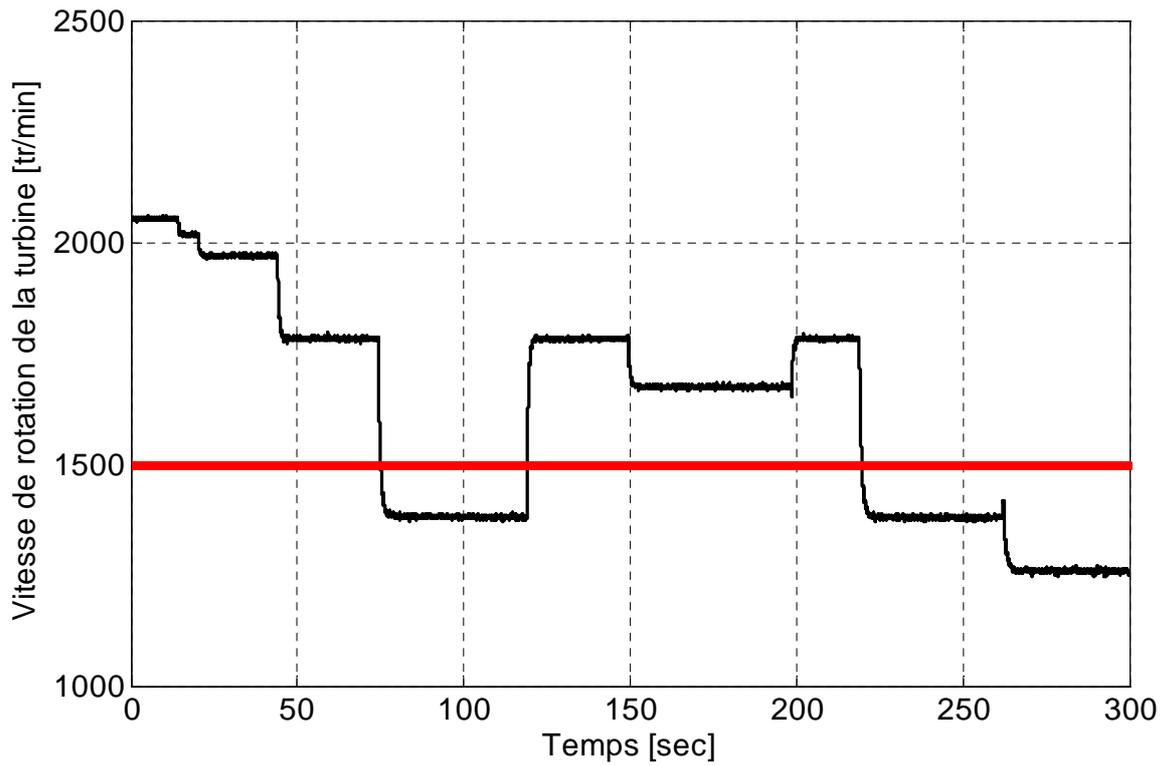


Figure 2.42 Vitesse de rotation de la MADA

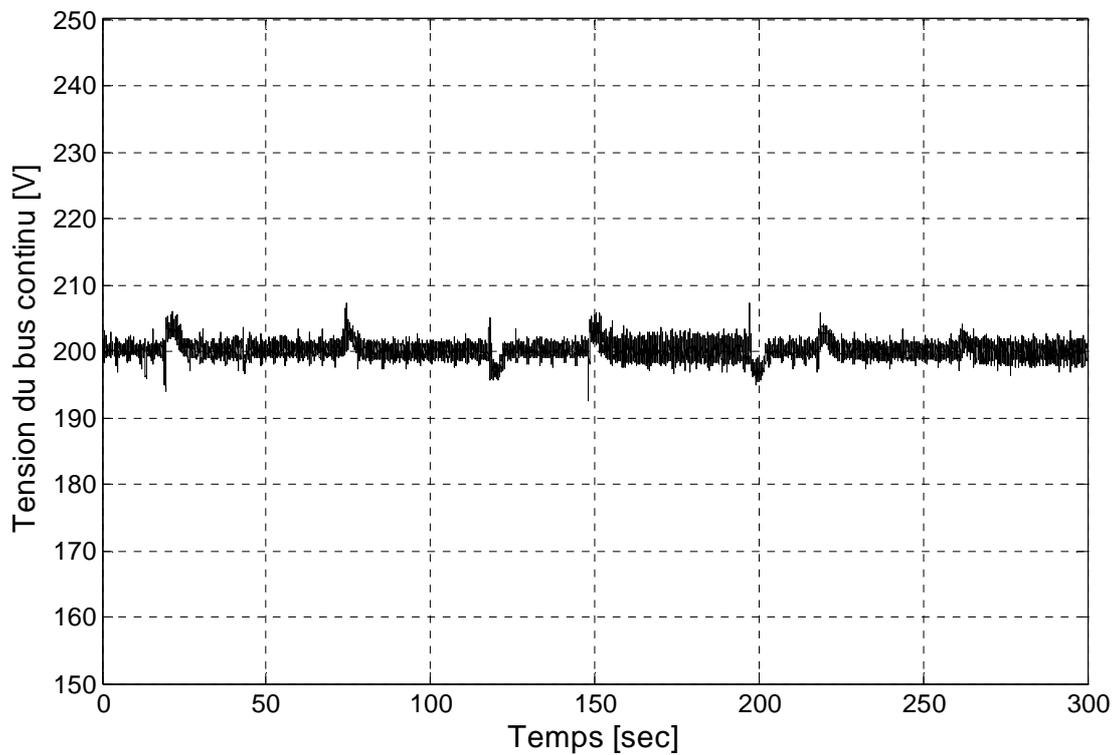


Figure 2.43 Tension du bus continu

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des différents composants de la microcentrale sous forme de REM est proposée. La simulation et la validation expérimentale d'une microcentrale hydro électrique à vitesse variable capable de fonctionner sur site isolé ou sur réseau électrique puissant ont été présentées. Selon la configuration étudiée, une approche unifiée de commande du système impliquant le contrôle du flux du rotor de la MADA est déterminée. Des simulations ont été effectuées conduisant à une analyse de la transition du mode connecté sur réseau au mode connecté sur site isolé. Des résultats expérimentaux obtenus sur un banc d'essai de 3 kW, sur deux cas possibles sur sites isolés ou sur réseau interconnecté ont été validés.

Les simulations et les résultats expérimentaux confirment la capacité de la source hydroélectrique de fonctionner à vitesse variable.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'association de la microcentrale hydraulique étudiée avec une centrale éolienne. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé.

II.8. Bibliographie

- [Ans 06a] A. Ansel, B. Robyns, "Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 71, n°. 4-6, pp. 320-332, june 2006.
- [Ans 06b] A. Ansel, B. Robyns, "Small hydroelectricity: from fixed to variable speed electromechanical drives," *Electromotion*, vol.13, n°2, April 2006 pp. 111-126.
- [Bou 00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, "Macro modélisation des conversions électromécaniques. Application à la commande des machines électriques », *Revue International de Génie Electrique* 3 (2000), N° 2, p. 257-282.
- [Bre 07] S. Breban, M. Nasser, A. Ansel, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, "Variable speed small hydro power plant connected to AC grid or isolated loads". *EPE Journal*, vol.17, n°4, 2007, pp.29-36.
- [Hau 96] J. P. Hautier, J. Faucher, 'Le Graphe Informationnel Causal, outil de modélisation et de synthèse des commandes des processus électromécanique', *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 785, Cahier Spécial de l'Enseignement Supérieur, 1996 pp. 167-189.
- [Lab 98] F. Labrique, H. Buyse, G. Séguier, R. Bausière, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Commande et comportement dynamique", Tome 5, *Technique et Documentation*, Lavoisier, 1998.

- [Pac 95a] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques –le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 3-905232-55-3.
- [Rob 01] B. Robyns, M. Nasser, F. Berthereau, F. Labrique, "Equivalent continuous model of a variable speed wind generator", ELECTROMOTION, vol.8, n°4, 2001, pp. 202-208.

