

Commande du système multi-actionneurs piézoélectriques

L'objectif de ce chapitre est de proposer une structure de commande pour le modèle développé dans le chapitre précédent par des règles d'inversion des différents sous-systèmes d'un système dynamique. Chaque sous système correspond à certaines propriétés et relations entre les grandeurs d'états : gains, couplages, relation intégrale. Du point de vue macroscopique, les règles d'inversion considèrent que la commande consiste à synthétiser les bonnes entrées à appliquer au procédé pour obtenir les bons effets sur les sorties du système (figure 5.1) en respectant les causalités [44, 45, 47, 111, 112].

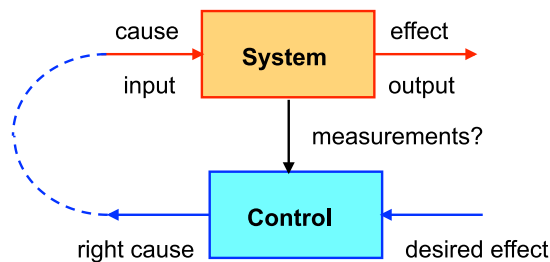


Figure 5.1: Principe d'inversion [113]

A partir de la REM du système, la structure de commande sera réalisée en deux étapes :

- Élaboration d'une Structure Maximale de Commande (SMC) par inversion des chaînes de réglage, qui relie des entrées de commande du système et les sorties, avec l'hypothèse que toutes les variables sont directement mesurables ;
- Développement d'une Structure Pratique de Commande (SPC) à partir de la SMC, avec estimation des variables non-mesurables, et éventuellement regroupement des correcteurs.

Au préalable, nous explicitons la stratégie de gestion d'énergie au niveau du bus continu de l'alimentation des actionneurs.

5.1 Définition d'une stratégie de commande pour l'alimentation

La topologie du circuit d'alimentation proposée (fig 4.11), comme il l'a été montré par les simulations précédentes (chapitre 4), est capable d'effectuer simultanément le transfert de charge depuis la source continue vers la capacité de tête de l'onduleur, et de générer la forme d'onde aux bornes des actionneurs. Ce fonctionnement peut être qualifié de mixte. En principe, ce fonctionnement est transitoire, cependant en présence de pertes, ce mode est maintenu en régime permanent.

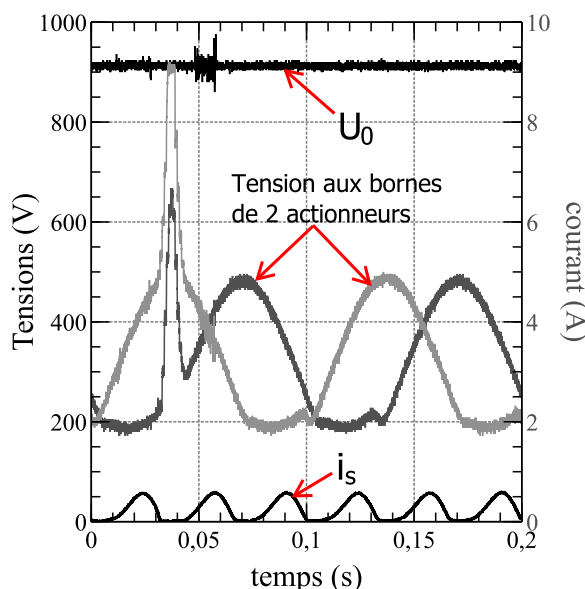


Figure 5.2: Chronogrammes des tensions et courants en fonctionnement mixte (chargement et génération d'ondes)

La figure 5.2 montre un relevé durant un essai à haute tension (tension $U_0 = 900$ V, visible sur la trace supérieure). On peut voir au bas du chronogramme le courant délivré par l'alimentation i_s à une fréquence triple des sinusoïdes qui correspond à une recharge périodique et visiblement à un régime permanent. L'une des causes identifiées de ce comportement est la décharge de la capacité C_0 .

Le relevé de la figure 5.3 montre l'évolution de cette tension. Dans ce test, la tension d'alimentation continue est $U_S = 50$ V, la tension de bus initialement de 200 V, la tension des actionneurs est maintenue à 100 V, il n'y a donc pas de phase de recharge. On constate une décharge de la capacité C_0 (courant de fuite ou présence d'une résistance de saignée)

résultant en une décroissance de la tension U_0 de 5 V/s pour ce régime.

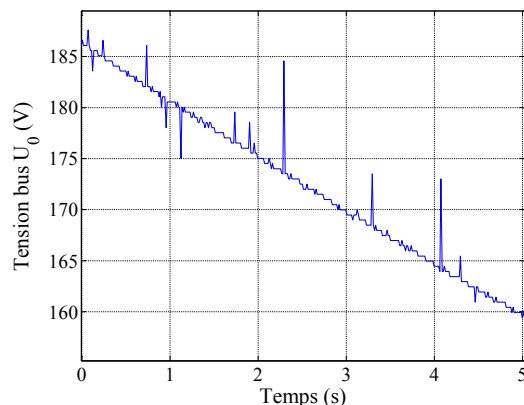


Figure 5.3: Diminution de la tension bus

Le second problème rencontré est la présence de temps morts non négligeables à la fréquence de découpage choisie. On constate (figure 5.2) que la déformation des formes d'onde appliquées aux actionneurs est considérable. Contrairement à ce qui avait été initialement imaginé, il ne sera pas possible d'y remédier efficacement. En effet, on voit sur les courbes que pour pallier ce problème, les rapports cycliques doivent être plus faibles que ceux appliqués en boucle ouverte dès que la tension désirée passe sous la tension de l'alimentation continue (200 V dans ce test, les rapports cycliques sont donc inférieurs à 0,25). Or cela n'aura qu'un effet limité compte tenu des temps morts, car ils introduisent une saturation progressive du rapport cyclique effectif. Ce comportement risque de se montrer déstabilisant pour la commande.

Puisque la commutation des diodes peut être déclenchée par le choix du rapport cyclique moyen (m_0), il est possible d'élaborer une stratégie qui permettra de découpler le problème. Elle consistera à gérer indépendamment les deux phases :

recharge la commande des oscillations du plateau est neutralisée en appliquant des consignes nulles pour les rotations, la boucle du déplacement vertical est ouverte. Le rapport cyclique est réduit pour imposer une tension aux bornes des actionneurs inférieures à la tension d'alimentation continue.

génération de vibrations les tensions aux bornes des actionneurs sont asservies pour réaliser les vibrations. Ces vibrations sont réalisées autour d'une position moyenne telle que $(m_0 - m_a)U_0 > U_s$ ce qui garantit le maintien dans ce mode.

5.2 Génération de vibrations

5.2.1 Structure maximale de commande

La chaîne de réglage est surlignée en jaune sur la figure 5.4. Elle connecte les variables de réglage et de sortie du système selon la chaîne d'action qui respecte la causalité du système. A noter que nous avons ici affaire à des vecteurs de dimension 3. On identifie ainsi les entrées du système qui sont les rapports cycliques de l'onduleur et les sorties qui sont les vitesses du guidage mécanique. A partir de cette chaîne d'action, la chaîne de réglage est déduite par inversion, ce qui permettra d'obtenir la chaîne maximale de commande (SMC).

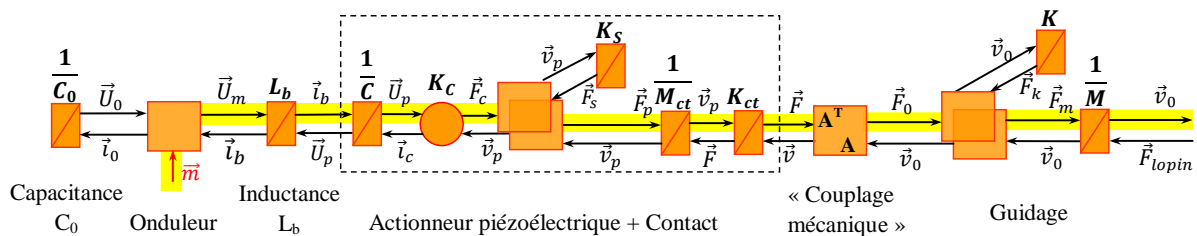


Figure 5.4: Chaîne de réglage de la commande

Le principe d'inversion consiste à faire correspondre à chaque élément de la chaîne d'action un élément de la chaîne de réglage qui soit symétrique en terme d'entrées et de sorties. Si la relation entre entrées et sorties est définie par une relation algébrique, ou par une causalité intégrale, cette inversion sera réalisée par une relation algébrique inverse ou par un correcteur.

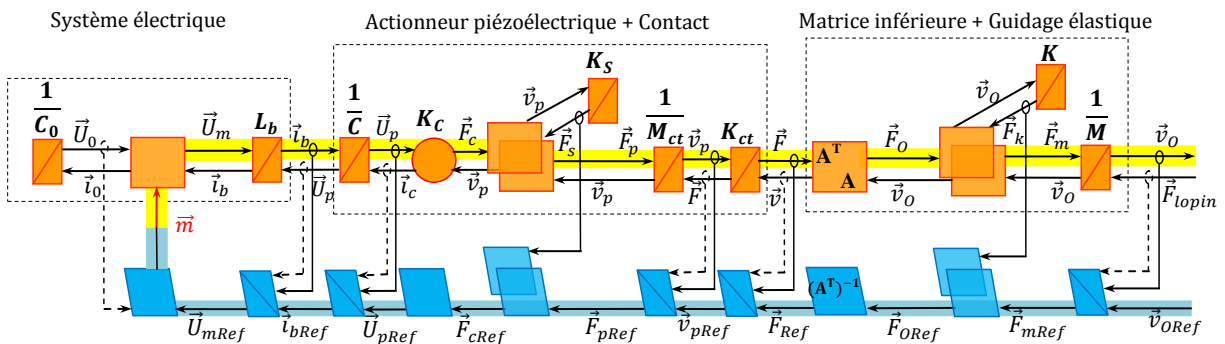


Figure 5.5: Structure Maximale de Commande

Sur la figure 5.5, on trouve des éléments de conversion qui peuvent être inversés directement. L'entrée (ou la sortie) d'un élément de conversion sur la chaîne d'action devient la sortie (ou l'entrée) de l'élément inversé sur la chaîne de commande. Par exemple,

pour inverser l'élément de conversion électromécanique K_C entre l'entrée \vec{U}_p et la sortie \vec{F}_c , la sortie \vec{U}_{pRef} s'exprime à partir de l'entrée \vec{F}_{cRef} par la relation :

$$\vec{U}_{pRef} = \frac{1}{K_C} \vec{F}_{cRef} \quad (5.1)$$

L'inversion est également appliquée pour la conversion mécanique entre le vecteur des forces \vec{F} appliquées par les actionneurs et la force \vec{F}_O appliquée à la matrice inférieure par multiplication par la matrice inverse de \mathbf{A}^T :

$$\vec{F}_{Ref} = (\mathbf{A}^T)^{-1} \vec{F}_{ORef} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{2}{3R} & 0 \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3R} & -\sqrt{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3R} & \frac{3R}{3R} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3R} & \frac{\sqrt{3}}{3R} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3R} & \frac{3R}{3R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{zRef} \\ M_{xRef} \\ M_{yRef} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Le couplage des forces dans la REM de l'actionneur est aussi inversé directement puisqu'il traduit la relation algébrique reliant F_s , F_p , et F_c . Ainsi, pour trouver la sortie \vec{F}_{cRef} à partir de l'entrée \vec{F}_{pRef} et de la valeur \vec{F}_s , qui est supposée mesurable, on utilise la relation :

$$\vec{F}_{cRef} = \vec{F}_{pRef} + \vec{F}_{sMes} \quad (5.3)$$

où \vec{F}_{sMes} est la valeur mesurée de la force \vec{F}_s .

Les éléments d'accumulation sont régis par des relations causales qui ne sont pas inversibles directement, car leurs entrées sont reliées aux sorties par intégration temporelle. Un asservissement sera utilisé pour inverser indirectement ces éléments. De plus, l'entrée de réaction qui n'appartient pas à la chaîne de réglage devient une entrée de perturbation de la commande. Donc, l'inversion d'un élément d'accumulation nécessite deux mesures : d'une part, celle de la sortie (opération principale représentée par une ligne continue de mesure) et d'autre part, celle de l'entrée de réaction (opération facultative symbolisée par une ligne en pointillé de mesure). En général, l'inversion des éléments d'accumulation consiste en un asservissement : les entrées de ces éléments d'inversion comprennent la valeur de référence de la sortie désirée, la mesure de la sortie et la mesure de la réaction. Par exemple (figure 5.4), pour asservir la sortie \vec{i}_b de l'inductance L_b à partir de la consigne \vec{i}_{bRef} , la mesure principale est le vecteur courant \vec{i}_b et la mesure facultative le vecteur tension \vec{U}_p des actionneurs.

Pour réaliser la SMC déduite par inversion, les variables de mesure principales sont essentielles mais dans certains cas, ces variables sont non-mesurables pour des raisons physiques ou par choix économique. Dans notre cas par exemple, les forces \vec{F} et vitesses \vec{v} des contacts sont difficilement mesurables pour des raisons pratiques, et la force d'élasticité \vec{F}_s des actionneurs est inaccessible. Dans certains cas, ces valeurs peuvent être estimées à

partir d'autres variables mesurables. A défaut, il faut simplifier la structure de la commande. Ceci peut être aussi délibérément fait pour limiter le nombre de capteurs afin de réduire le coût du système de mesure et la complexité du système de commande qui sera alors reportée sur la complexité du correcteur. A l'issue de cette démarche de simplification, une structure pratique de commande (SPC) est définie.

5.2.2 Structure pratique de commande

A partir des conceptions mécanique et électrique proposées, les variables choisies pour les mesures sont des tensions des actionneurs \vec{U}_p et des vitesses de la matrice inférieure \vec{v}_o . Ces variables ont été sélectionnées pour des raisons pratiques. De plus, les mouvements des contacts sont négligeables (comme nous l'avons montré dans la partie 3.4) ; les mesures au niveau des contacts ne seront donc pas prises en compte pour la commande.

L'acquisition de \vec{U}_p et \vec{v}_o permet d'asservir les tensions de sortie des actionneurs et les vitesses du plateau. Le premier asservissement permet de maîtriser une grandeur qui peut être potentiellement destructrice pour les actionneurs et le second correspond aux grandeurs souhaitées pour le procédé. Le courant i_b n'est pas choisi comme mesure pour des raisons pratiques, mais peut être une potentielle voie d'amélioration. La SPC du système complet doit donc être réduite en fonction de ces choix, résultant en une nouvelle structure dont le schéma est représenté sur la figure 5.6.

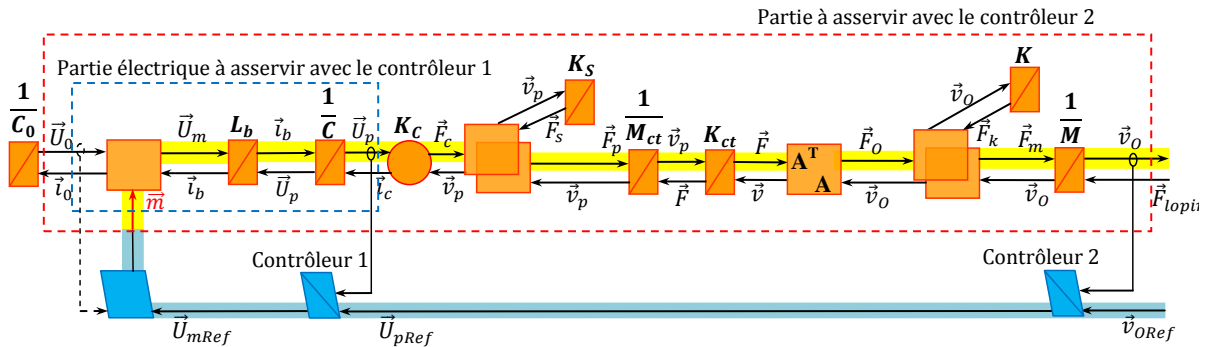


Figure 5.6: Structure Pratique de Commande

De ces choix, et de considérations physiques sur les différentes constantes de temps dans le chapitre précédent, il découle que l'inversion se ramène à deux contrôleurs en cascade car les variables non-mesurables \vec{F}_s , \vec{v}_p , \vec{F}_k entraînent l'abandon de variables qui leur sont associées dans une inversion, par exemple \vec{F}_o pour le dernier cas.

5.2.2.1 Structure de commande de la partie électrique

Structure de commande dans un repère tournant

Pour générer une onde progressive, une alimentation triphasée est appliquée aux trois actionneurs :

$$\begin{cases} U_{r1}(t) = U \cos(\omega t + \alpha) \\ U_{r2}(t) = U \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ U_{r3}(t) = U \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \alpha) \end{cases} \quad (5.4)$$

où ω correspond à la vitesse de rotation de l'onde, α est la phase à l'origine des temps et U est l'amplitude de la tension . Ces deux derniers paramètres définissent l'inclinaison initiale du plateau supérieur dans le repère fixe.

Afin de superposer une vibration selon Oz, une tension $U_h(t)$ est ajoutée aux trois tensions précédentes. Les tensions des actionneurs dans le cas général sont donc exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_1(t) = U_{r1}(t) + U_h(t) = U \cos(\omega t + \alpha) + U_h(t) \\ U_2(t) = U_{r2}(t) + U_h(t) = U \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) + U_h(t) \\ U_3(t) = U_{r3}(t) + U_h(t) = U \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \alpha) + U_h(t) \end{cases} \quad (5.5)$$

L'utilisation de la transformée de Concordia (non-normée), suivie d'une rotation dans un repère fictif lié à l'onde progressive, appelée transformée de Park, permet de simplifier les expressions. La relation de passage entre les tensions précédentes (5.5) dans ce repère (noté dqh) peut se trouver par factorisations successives et s'exprime par :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \end{bmatrix}}_{\vec{U}_{abc}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Transformée de Concordia}} \underbrace{\begin{bmatrix} U \cos(\omega t + \alpha) \\ U \sin(\omega t + \alpha) \\ U_h(t) \end{bmatrix}}_{\vec{U}_{\alpha\beta h}} \quad (5.6)$$

$$\Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \end{bmatrix}}_{\vec{U}_{abc} \equiv \vec{U}_{pRef}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Transformée de Park } \mathbf{P}_{da}} \underbrace{\begin{bmatrix} U \cos \alpha \\ U \sin \alpha \\ U_h(t) \end{bmatrix}}_{\vec{U}_{dqh}} \quad (5.7)$$

Elle est inversible, la relation de passage s'écrivant alors :

$$\vec{U}_{dqh} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \vec{U}_{pRef} \quad (5.8)$$

Par l'équation (5.8), le vecteur des tensions de référence \vec{U}_{pRef} est transformé en un vecteur de tensions de référence \vec{U}_{dqh} dont les deux premières composantes sont constantes dans le nouveau repère. Le vecteur de mesure des actionneurs \vec{U}_p est aussi transformé en régime permanent, dans le repère (dqh). La structure de commande prenant en compte la transformation est résumée sur la figure 5.7. La transformation permet également de faire travailler le correcteur sur des grandeurs constantes en régime permanent.

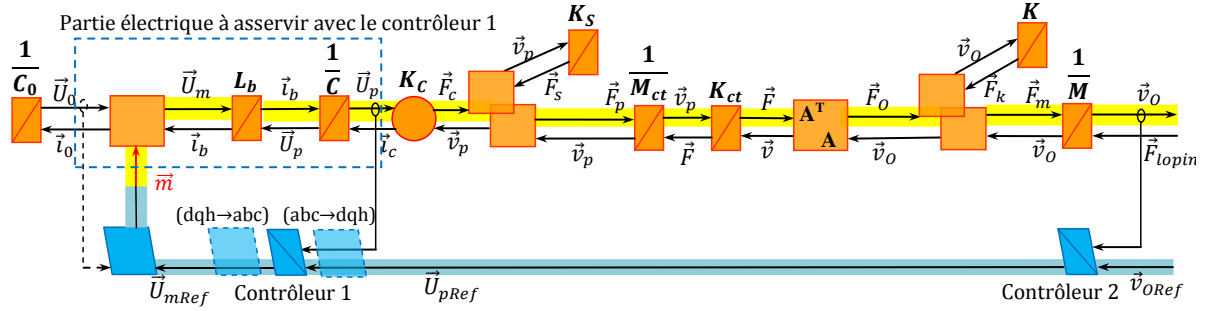


Figure 5.7: Structure Pratique de Commande avec la transformation dans le repère dqh pour la partie électrique

Les sorties des correcteurs dans le repère (dqh) $\vec{U}_{mRef(dqh)}$ doivent être transformées dans le repère d'origine en utilisant une transformation similaire à celle de l'équation (5.7) comme suit :

$$\vec{U}_{mRef(abc)} = \mathbf{P}_{da} \vec{U}_{mRef(dqh)} \quad (5.9)$$

Par la suite, on choisira des correcteurs PI pour assurer le suivi des consignes de tension.

Analyse des couplages dans le repère tournant

Les équations dynamiques dans le repère *dqh* du circuit électrique sont données par l'application des lois de Kirchhoff en considérant que la tension U_0 est constante. Les tensions \vec{U}_m sont donc appliquées à trois circuits indépendants constitués par les inductances L_b en série avec les capacités des actionneurs. Les courants \vec{i}_c sont considérés comme des perturbations et ne sont pas pris en compte. Ceci se justifie par leur faibles amplitudes aux fréquences considérées. Les équations s'écrivent sous forme matricielle :

$$\dot{\mathbf{X}}_{123} = \mathbf{A}_{123} \mathbf{X}_{123} + \mathbf{B}_{123} \mathbf{U}_{123} \quad (5.10)$$

avec :

- $\mathbf{X}_{123} = [i_{b1}, i_{b2}, i_{b3}, U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}]^T$, le vecteur d'état ;
- $\mathbf{U}_{123} = [U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, 0, 0, 0]^T$, les entrées ;

- la matrice d'état $\mathbf{A}_{123} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{1}{L_s} \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \frac{1}{C_p} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ où $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ est la matrice nulle et $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ la matrice identité.
- la matrice des commande $\mathbf{B}_{123} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$

En introduisant la transformation :

$$\dot{\mathcal{P}}_{dqh} \mathbf{X}_{dqh} + \mathcal{P}_{dqh} \dot{\mathbf{X}}_{dqh} = \mathbf{A}_{123} \mathcal{P}_{dqh} \mathbf{X}_{dqh} + \mathbf{B}_{123} \mathcal{P}_{dqh} \mathbf{U}_{dqh} \quad (5.11)$$

où la matrice $\mathcal{P}_{dqh} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{da} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{P}_{da} \end{bmatrix}$ est la transformation de Park appliquée au système. En multipliant à gauche après calcul et en remarquant que les matrices d'état et de commande ne sont pas modifiées dans cette opération, il vient après simplifications :

$$\dot{\mathbf{X}}_{dqh} = (\mathbf{A}_{123} - \mathcal{P}_{dqh}^{-1} \dot{\mathcal{P}}_{dqh}) \mathbf{X}_{dqh} + \mathbf{B}_{123} \mathbf{U}_{dqh} \quad (5.12)$$

La nouvelle matrice d'état devient :

$$\mathcal{A}_{dqh} = \mathbf{A}_{123} - \mathcal{P}_{dqh}^{-1} \dot{\mathcal{P}}_{dqh} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_c & \frac{1}{L_s} \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \frac{1}{C_p} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{Q}_c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

où :

$$\mathbf{Q}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & \dot{\theta} & -\dot{\theta} \\ -\dot{\theta} & 0 & \dot{\theta} \\ \dot{\theta} & -\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Un couplage apparaît donc au sein de la matrice \mathcal{A}_{dqh} entre les tensions et les courants (dqh) introduit par la vitesse de rotation. Ce sera en pratique un couplage qui devra être rejeté par les correcteurs. Il reste cependant peu problématique pour les basses fréquences.

5.2.2.2 Structure de commande de la partie mécanique

La variable à commander dans la partie mécanique avec le contrôleur 2 est la vitesse au centre O de la matrice inférieure \vec{v}_O . D'après l'étude cinématique, le vecteur vitesse de référence du guidage dans le cas de la superposition d'une onde progressive avec une vibration selon Oz peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\vec{v}_O = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ v_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_0 \cos(\omega t + \Phi) \\ \Omega_0 \sin(\omega t + \Phi) \\ v_z(t) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

L'équation (5.15) montre que la vitesse est déjà sous forme d'un système diphasé de vitesse avec une composante homopolaire. On peut à nouveau faire disparaître la modulation en considérant un vecteur tournant en synchronisme avec les deux premières composantes du vecteur vitesse soit :

$$\vec{v}_{O(dqh)} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \vec{v}_{O(\alpha\beta h)} = \begin{bmatrix} \Omega_0 \cos \Phi \\ \Omega_0 \sin \Phi \\ v_z(t) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

On modifie donc le schéma pratique de commande pour faire apparaître cette transformation (figure 5.8). Pour corriger la différence entre la valeur de référence de vitesse $\vec{v}_{O(dqh)}$ et la

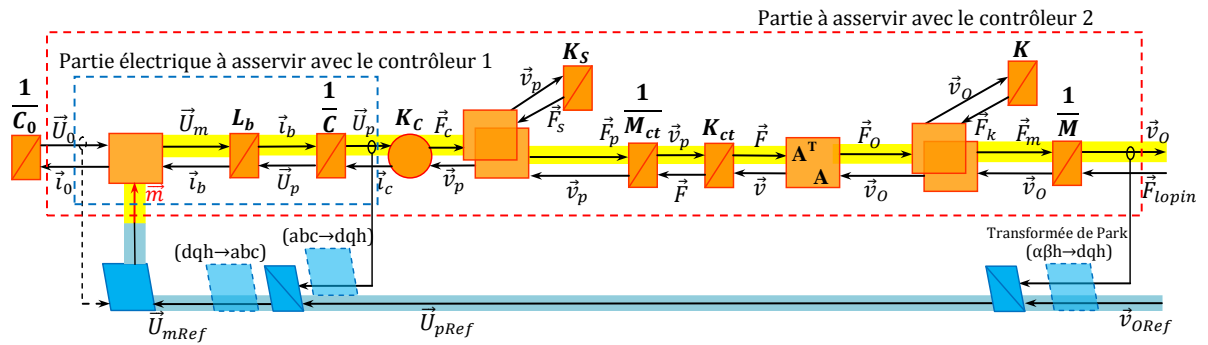


Figure 5.8: Structure Pratique de Commande du système complet avec la transformation

mesure de vitesse (aussi transformée dans le repère (dqh)), trois correcteurs PI peuvent être utilisés comme dans le cas de la commande de la partie électrique. A noter que la sortie des correcteurs étant dans le repère tournant, elle peut aussi servir directement à la boucle de la partie électrique. La méthode de commande proposée est similaire à celle utilisée largement dans le domaine de la commande vectorielle des machines alternatives triphasées [46, 114], qui permet de commander les machines en vitesse.

5.3 Charge de la capacité du bus continu

La structure de commande proposée est appliquée lorsque la tension bus est maintenue supérieure à une certaine valeur définie. Comme il a été expliqué, à cause des différentes pertes dans le système, la tension de bus se décharge relativement rapidement (cf figure 5.3). Comme il a été expliqué, en paragraphe 5.1, une stratégie a donc été mise en place, qui permet de maintenir la tension de bus et de contrôler celle des actionneurs en séquençant les phases.

La capacité de bus est chargée par les diodes pour atteindre la valeur de tension de bus demandée. Celle-ci est définie par la plage de fonctionnement des actionneurs.

Précédemment, nous avons montré que la période de chargement est commencée lorsque la tension des actionneurs U_p est inférieure à la valeur de la tension continue U_s . Quand la tension de bus U_0 est inférieure à une valeur prédéterminée, la tension moyenne U_p est donc réduite jusqu'à une valeur plus basse que la valeur de la tension continue U_s pour réaliser le chargement intermittent de la tension de bus. Dans la phase de chargement, le courant fourni à l'actionneur est très faible en comparaison avec le courant de charge de la capacité, en raison d'une capacité équivalente très grande (de l'ordre $\frac{C_0}{m^2}$, cf figure 4.15). On ne considère donc pour cette phase que le chargement de la capacité C_0 , pour en établir la REM (figure 5.9).

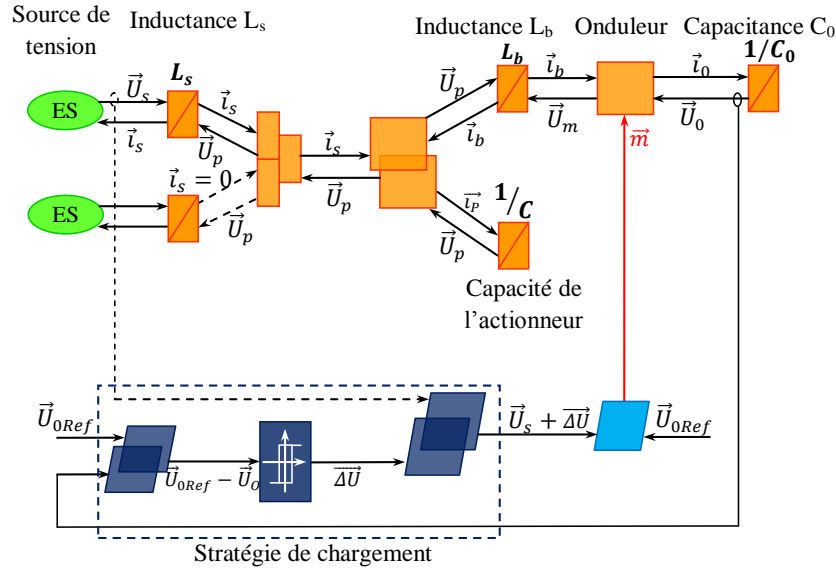


Figure 5.9: Schéma du chargement du système

Pour tirer partie du comportement non-linéaire de la diode, le chargement de la tension de bus est réalisé quand la tension de bus mesurée \vec{U}_0 est inférieure à une tension limite \vec{U}_{0Ref} inférieure. Dans cette configuration, la modulation est stoppée ainsi que la vibration verticale. Le rapport cyclique $m(t) = m_0$ est maintenu suffisamment bas en imposant une consigne adéquate. Ainsi la tension délivrée par l'onduleur est constante et inférieure à la tension continue U_s (voir figure 5.10b), ce qui maintient les diodes conductrices. Cette configuration est maintenue jusqu'à ce que la tension U_0 atteigne une valeur également prédéterminée. La charge est interrompue alors en réactivant le contrôle des vibrations des actionneurs et en maintenant la valeur minimale de la tension U_p des actionneurs au dessus de la tension de l'alimentation continue U_s (figure 5.10a). En somme, une fonction relais est utilisée pour commander le chargement qui peut se formaliser selon les équations ci-après :

$$\begin{cases} \Delta U = 0 & \text{si } U_0 \geq U_{0Ref} + U_1 \quad (U_1 > 0); \\ \Delta U = [U_n \quad U_n \quad U_n]^T & \text{si } U_0 \leq U_{0Ref} - U_2 \quad (U_2 > 0); \end{cases}$$

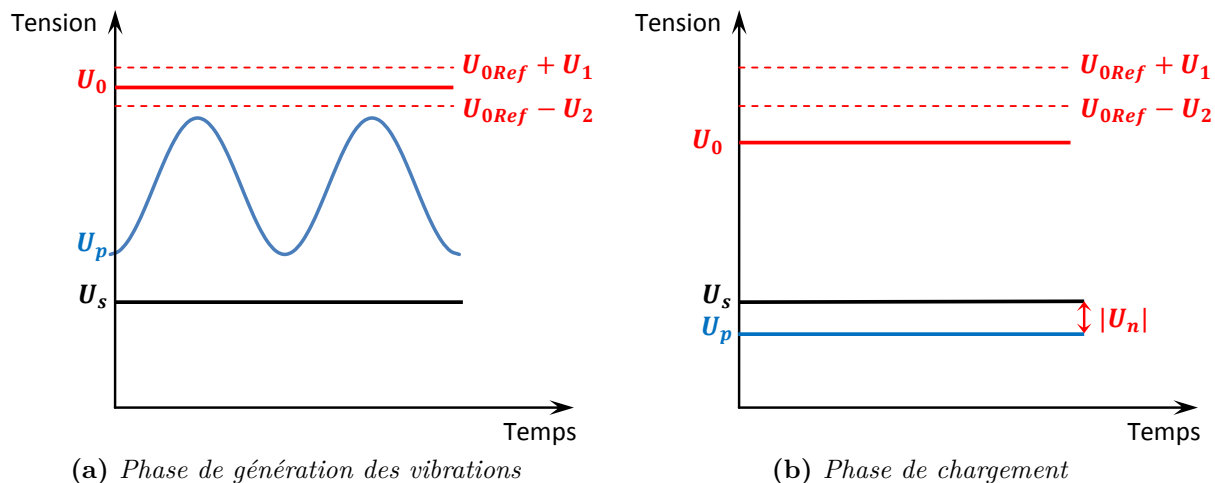


Figure 5.10: Tension des actionneurs dans deux phases de fonctionnement

où U_1, U_2 sont des valeurs de seuil du relais, et U_n est une valeur négative ($|U_n| < U_s$) qui doit être choisie en fonction du temps de chargement de la tension de bus : plus grande est la valeur de $|U_n|$, plus rapide est le chargement de tension de bus. Avec cette stratégie, la tension de bus est maintenue $U_{0Ref} - U_2 < U_0 < U_{0Ref} + U_1$.

5.4 Validation expérimentale sur la maquette

5.4.1 Identification de la partie électrique

Un premier test est effectué pour identifier les fonctions de transfert en boucle ouverte de la partie électrique du démonstrateur (figure 5.11). Cette étape d'identification est nécessaire pour trouver la fonction de transfert du système réel. En effet, l'implémentation pratique comporte de nombreux éléments qui ne sont pas pris en compte par le modèle.

La commande est réalisée à partir d'une carte DSpace 1104® qui permet de simuler rapidement des algorithmes de commande à partir du schéma réalisé dans Simulink®. Cependant, la carte est trop lente pour générer les commandes rapprochées des interrupteurs de l'onduleur. Cette tâche est déléguée à un DSP TMS320F2812 qui gère la modulation de largeur d'impulsion et des fonctions dédiées à cet usage. La MLI est réalisée à partir d'une porteuse à 30 kHz. Une telle fréquence est nécessaire en raison de la nature capacitive des actionneurs qui amplifie les harmoniques de courant. Il faut donc avoir un index de modulation important pour séparer autant que possible les fréquences de la modulatrice de celle de la porteuse. Le filtre constitué par l'inductance L_s et la capacité des actionneurs C présente une fréquence de résonance à 3 kHz. Le rapport des fréquences choisies garantit donc une atténuation de 20 dB autour de la fréquence de la porteuse.

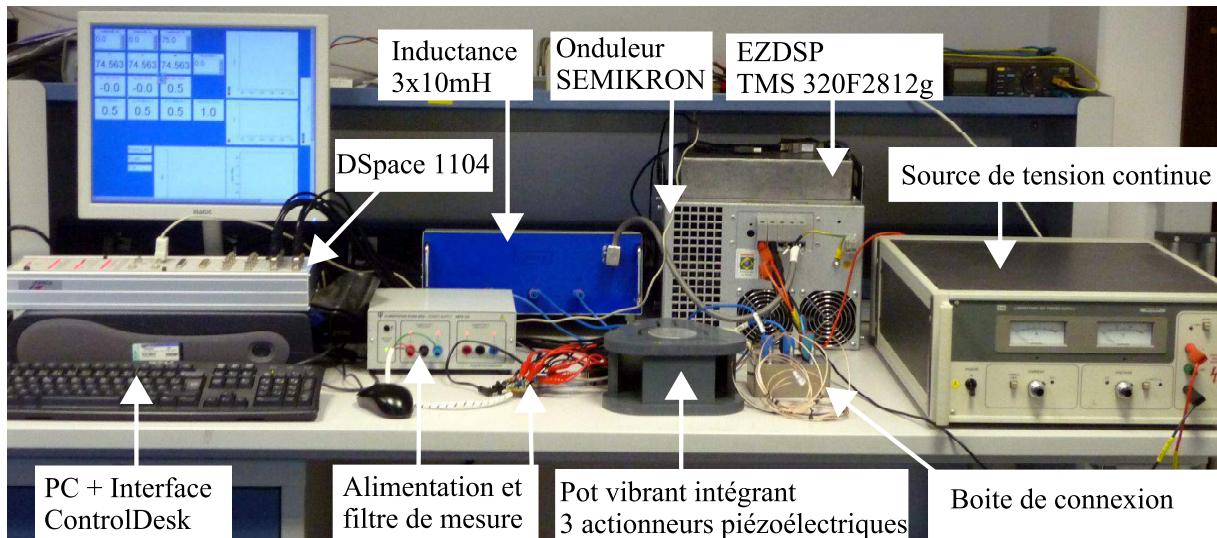


Figure 5.11: Schéma du système de commande

Entre la carte DSpace® et le DSP, une communication RS232 est utilisée pour transmettre les 3 consignes de rapport cyclique. La fréquence maximale de transmission, liée à la longueur des messages à transmettre et à la vitesse de transmission de la liaison série a été identifiée comme étant légèrement supérieure à 1280 Hz *. Il a été décidé de fixer cette fréquence à 1201 Hz pour éviter le fonctionnement synchrone des deux boucles.

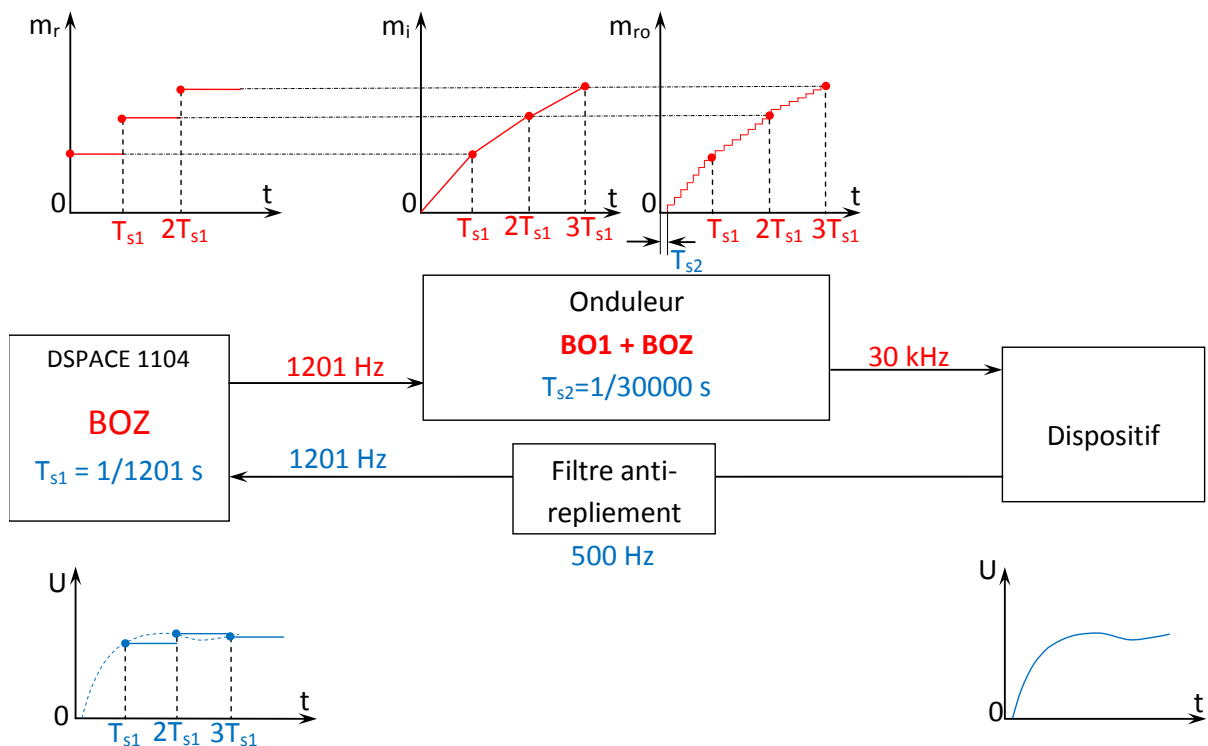


Figure 5.12: Schéma de communication

Pour éviter des variations trop brutales auxquelles le système mécanique est sensible

*. Les messages consistent en 9 caractères, et la liaison est limitée à 115200 bit/s

en raison des résonances mécaniques, un bloqueur d'ordre un est implémenté en entrée du DSP. Le schéma bloc de la figure 5.12 reprend les différents éléments évoqués. Cette architecture introduit donc un retard d'un pas d'échantillonnage qui doit être compensé lors de la transformation dans le repère fictif dqh .

Durant les tests, pour garantir une tension U_0 constante pendant le fonctionnement des actionneurs et éviter des commutations en mode de rechargement, la source de tension continue est connectée directement à la capacité C_0 .

L'identification est réalisée directement dans le repère dqh . On cherche les fonctions de transfert $F_{Ed}(z) = \frac{U_{pd}(z)}{U_{md}}$, $F_{Eq}(z) = \frac{U_{pq}(z)}{U_{mq}}$ et $F_{Eh}(z) = \frac{U_{ph}(z)}{U_{mh}}$ et on vérifie que les couplages mis en évidence précédemment (cf équations (5.12) et (5.13)) sont effectivement négligeables. Les réponses des tensions pour des échelons d'entrée de 30 V sont présentées sur la figure 5.13.

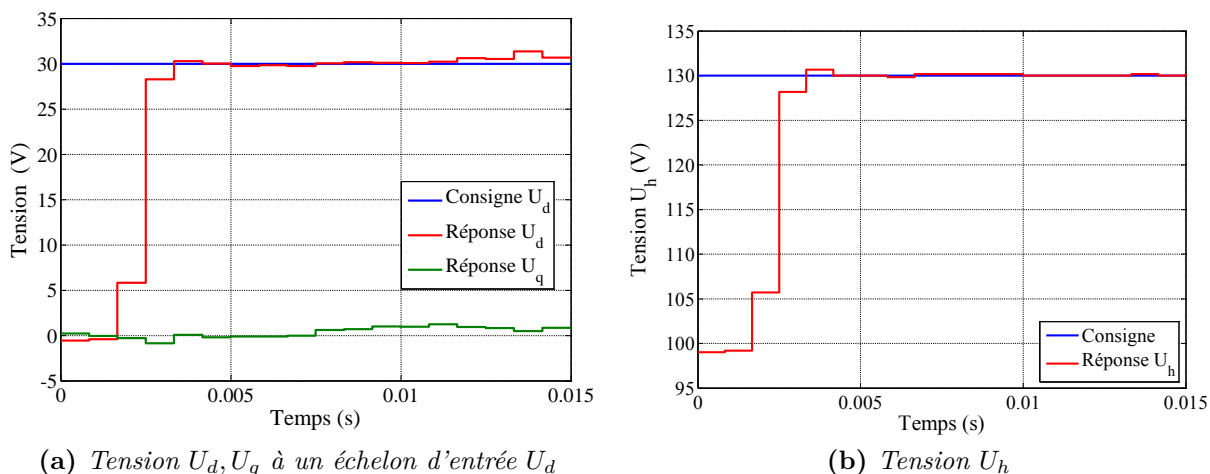


Figure 5.13: Réponse expérimentale des tensions dans le repère dqh à des échelons de rapports cycliques en boucle ouverte

On remarque que les comportements des tensions sont presque identiques pour les tensions U_{pd} , U_{pq} et que U_{ph} est également très similaire. Un modèle théorique unique pour les 3 fonctions de transfert est obtenu par discrétisation des équations et avec la prise en compte des filtres anti-remplissage :

$$H(z) = \mathcal{Z} \left[\frac{1 - \exp(T_s s)^2}{s^2} \underbrace{\frac{1}{L_b C s^2 + R_b C s + 1}}_{\text{circuit}} \underbrace{\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_f^2} + 2 \frac{s}{\omega_f} + 1}}_{\text{filtre}} \right] \quad (5.17)$$

La réponse représentée sur la figure 5.14 pour U_q seule à un échelon de rapport cyclique et obtenue avec cette fonction de transfert est en bonne adéquation avec les mesures également mais est d'ordre 8, ce qui est peu exploitable.

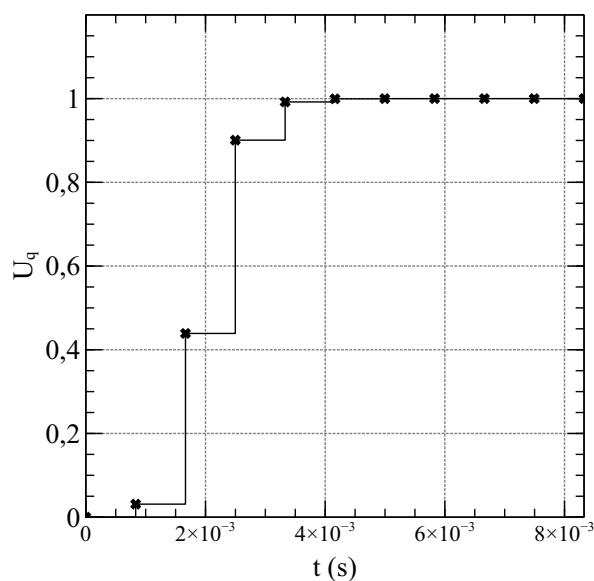


Figure 5.14: Réponse théorique de la tension U_q à un échelon de rapport cyclique

Compte tenu de ce problème, un autre modèle est identifié, à partir de la réponse indicielle (figure 5.13), plus simple, pour présenter un système avec 2 retards. Il a été ainsi possible d'obtenir un modèle d'ordre 3 :

$$y(z) = \frac{0,465z + 0,465}{z^3 - 0,1014z^2 + 0,02796z - 0,01475} u(z) \quad (5.18)$$

5.4.2 Commande en boucle fermée de la partie électrique avec chargement intermittent de la tension de bus DC

Une boucle fermée avec des correcteurs PI est utilisée pour rejeter les perturbations électriques liées à la décharge du bus DC et aux couplages entre les voies d, q, h . Les phases de chargement sont effectuées en neutralisant les boucles d'asservissement des tensions. Un aiguilleur est utilisé pour changer l'état du système entre les phases de rechargement et de génération des vibrations. La sortie de l'aiguilleur et la commutation entre les deux états sont déterminées par la valeur réelle de la tension du bus U_0 , en comparaison avec les valeurs des seuils du relais selon les équations ci-après :

$$U_a = \begin{cases} U_{mRef} & \text{si dans la phase de génération de vibrations;} \\ U_s + \Delta U & \text{si dans la phase de rechargement;} \end{cases}$$

La REM de cette fonction est présentée la figure 5.15. En fin de chargement, les commandes des actionneurs sont réactivées simultanément ce qui constitue un potentiel risque de déstabilisation. Afin de tester ce fonctionnement, les tensions U_d, U_p, U_h sont observées durant la transition des phases de chargement.

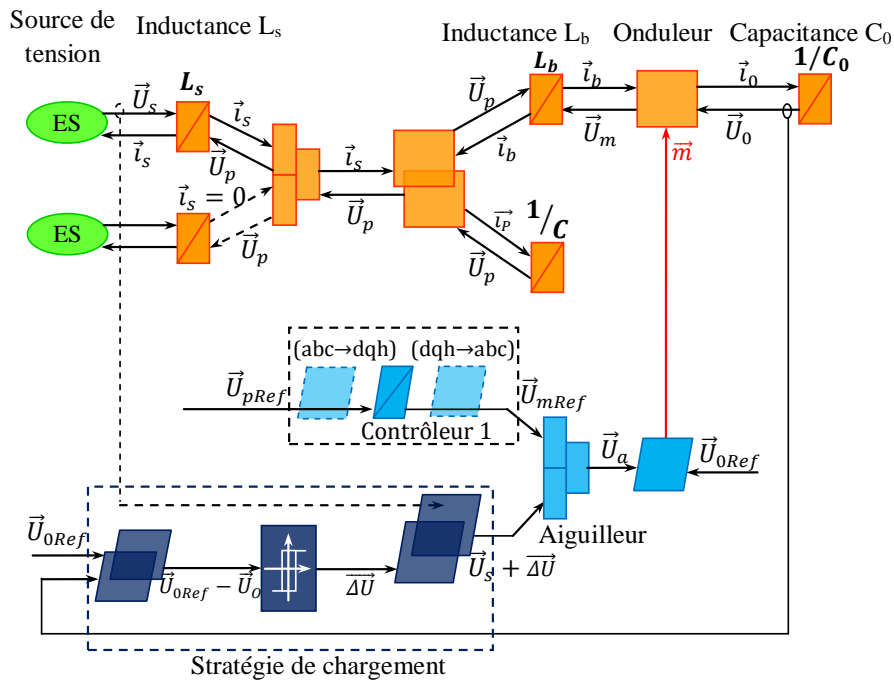


Figure 5.15: REM du changement entre la phase de chargement et de déchargement

Choix des coefficients pour le correcteur PI

Les paramètres K_p et K_i du correcteur PI sont choisis pour avoir une réponse optimale. A partir de la fonction 5.18, une étude d'optimisation sous Matlab a permis de déterminer les coefficients qui minimisent le temps de réponse et le dépassement. Par simulation, on trouve : $K_p = 0,33$ et $K_i = 383$. Le paramètre K_i a dû cependant être adapté en pratique ($K_i = 340$) à cause de dépassements trop importants dus à une différence entre le système réel et le modèle identifié. Les réponses de la boucle fermée en tension pour une entrée en échelon sont présentées la figure 5.16. On remarque que les réponses mesurées sont similaires, et assez proches des valeurs simulées.

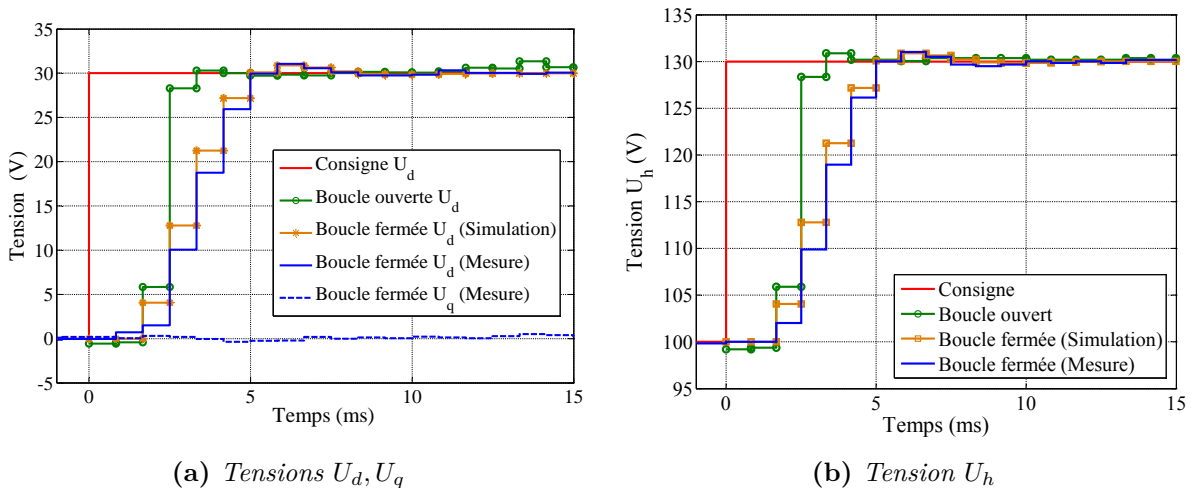


Figure 5.16: Réponse des tensions de sortie pour une entrée en échelon en boucle fermée

Chargement de tension bus

Un chargement intermittent est réalisé pour obtenir une tension de bus : $300 \text{ V} \pm 20 \text{ V}$ ($U_1, U_2 = 20 \text{ V}$) comme le montre la figure 5.17 dans le cas où la tension continue U_s est égale à 100 V .

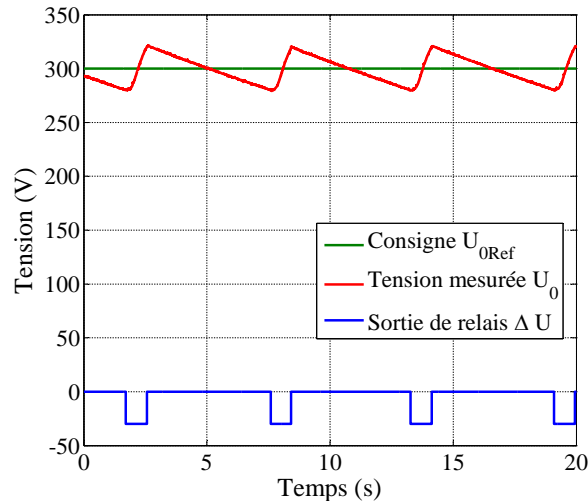


Figure 5.17: *Chargement de la tension bus*

La valeur de seuil de la fonction relais (la fonction pour la stratégie de chargement sur la figure 5.9) est réglée à $\Delta U = -30 \text{ V}$ dans la phase de chargement. La valeur sortie de cette fonction est présentée sur la figure 5.17 (ligne en bleu). Ainsi, lorsque la tension U_0 est inférieure à 280 V , la tension des actionneurs est réduite à la valeur de 70 V pour démarrer un chargement. L'intervalle de temps qui correspond à la valeur négative ($\Delta U = -30 \text{ V}$) correspond au chargement de la tension de bus. La tension U_0 est donc maintenue autour d'une valeur plus élevée que la tension continue fournie. Avec les valeurs choisies, le temps de chargement est d'environ $0,8 \text{ s}$ et le temps de déchargement de 5 s .

Génération d'une onde progressive en combinaison avec une vibration verticale

Pour valider la commande de la partie électrique, il reste maintenant à générer les vibrations (une onde progressive et une vibration verticale) pendant les intervalles de temps complémentaire aux temps de chargement.

La traduction de la génération des vibrations au niveau des tensions amène à des consignes sur U_d, U_q et U_h explicitées comme suit :

- Une onde progressive à 10 Hz correspond aux tensions $U_d = 30 \text{ V}$, $U_q = 0$ et $U_{h1} = U_s + U_d = 130 \text{ V}$ (pour que les tensions des actionneurs soient toujours supérieures à la tension continue U_s afin d'éviter une déformation des formes d'ondes) ;
- Une vibration verticale, soit carrée soit triangulaire, avec l'amplitude crête à crête $U_{h2} = 50 \text{ V}$

La tension homopolaire maximale U_{hmax} est égale à $U_{hmax} = U_{h1} + U_{h2} = 180 \text{ V}$. Pendant la phase de recharge du bus, cette tension est 70 V . A la commutation entre les phases de chargement et de génération des vibrations, un échelon de 110 V est appliqué à la tension U_h .

Un dépassement important des tensions U_d, U_q, U_h peut être constaté dans les deux cas de l'application de tension U_{h2} de forme triangulaire (figure 5.18a) ou carrée (figure 5.18b). Mais ce dépassement est réduit par les correcteurs en un temps court d'environ 10 ms et les formes d'onde des vibrations verticales sont correctement générées comme on peut le voir sur la tension U_h . De plus, le couplage entre les tensions U_d, U_q, U_h n'a pas d'influence significative en boucle fermée.

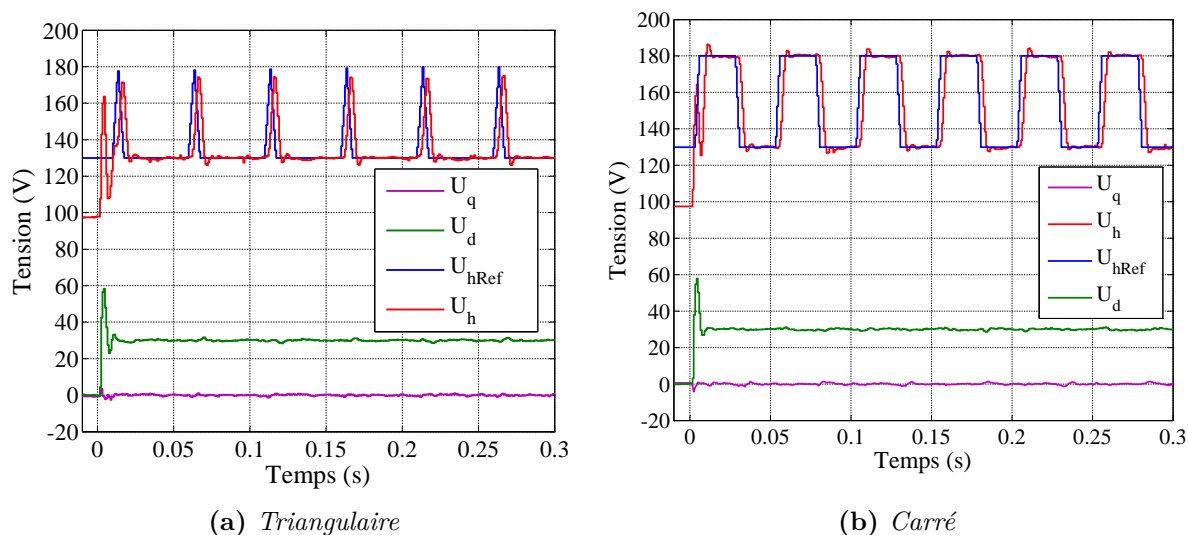


Figure 5.18: Tensions mesurées U_d, U_q, U_h pour différentes vibrations verticales

Les tensions des actionneurs U_p et les déplacements correspondants sont présentés sur la figure 5.19 dans le cas de vibrations triangulaires. Les déplacements montrés sont les déplacements estimés à partir des 3 mesures de déplacement du guidage. On peut retrouver une superposition des vibrations triangulaires avec la fréquence de 20 Hz et les formes d'onde triphasé de 10 Hz , constituant d'une onde progressive, sur les deux sorties de tension et déplacement des actionneurs.

A noter que pour réduire le dépassement de la tension U_d , une solution possible est de réduire le gain du correcteur PI pour la voie d . En effet, le temps pour établir une vibration à l'origine de la production de l'onde progressive peut être choisi relativement plus long que celui pour établir les formes d'onde de vibrations verticales (en triangulaire ou carré). Par exemple, la figure 5.20 montre une réduction significative du dépassement (60%) si un temps d'établissement plus long est accepté (environ 20 ms comparé à 6 ms dans le cas précédent). Cependant, dans ce cas une influence du couplage entre des tensions devient

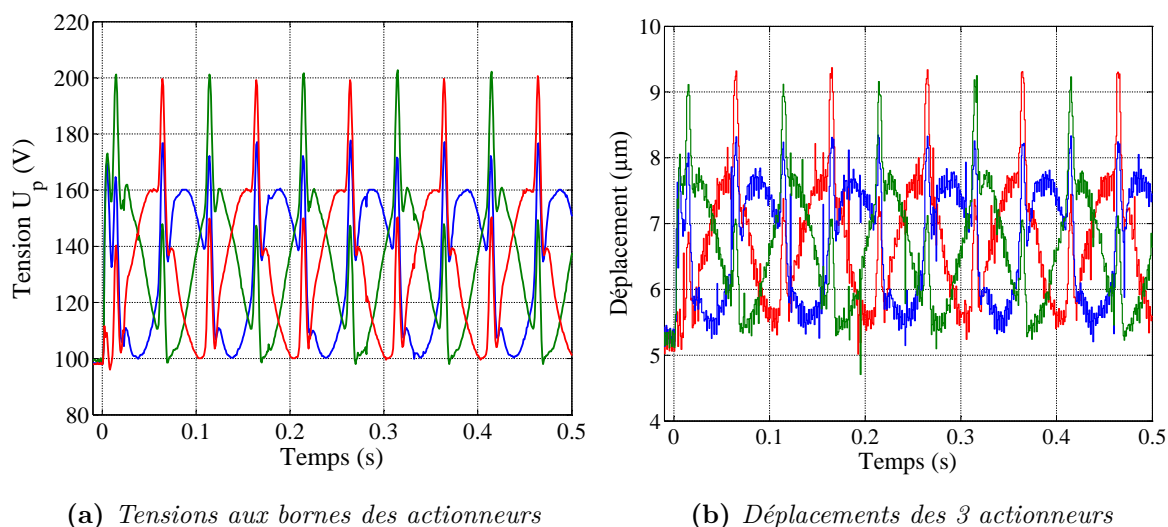


Figure 5.19: Tensions et déplacements mesurés des actionneurs

sensible comme on peut le voir sur les tension U_d, U_q en raison des variations de la tension U_h .

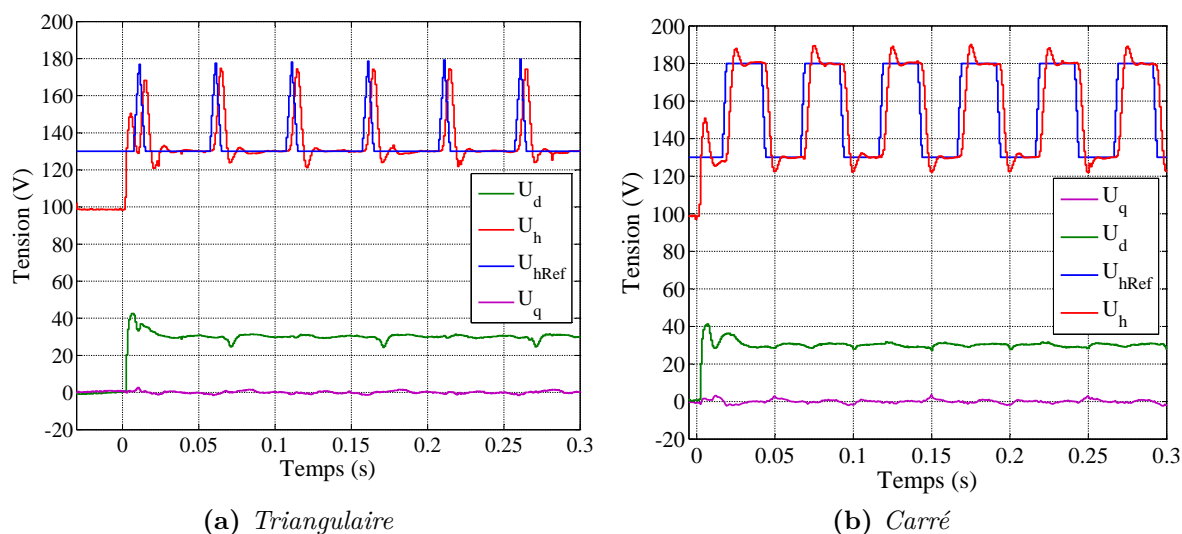


Figure 5.20: Tensions mesurées U_d, U_q, U_h avec temps d'établissement plus long

5.4.3 Commande en boucle fermée de la partie mécanique

Pour la commande en boucle fermée de la partie mécanique, une mesure des vitesses des trois actionneurs est indispensable. A partir de trois déplacements mesurés par trois capteurs de position, les vitesses sont obtenues par une dérivation en fonction du temps. Les trois vitesses des actionneurs $\vec{v}_p = [v_{p1} \ v_{p2} \ v_{p3}]^T$ sont alors calculées par la transformation donnée en annexe D. Les vitesses de rotation autour des deux axes Ox, Oy et de déplacement

selon z sont liées à ces vitesses \vec{v}_p par la matrice \mathbf{A} (cf l'équation (4.33)) et sont calculées comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R & 0 \\ 1 & -\frac{R}{2} & -\frac{R\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{R}{2} & \frac{R\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \vec{v}_p \quad (5.19)$$

Les composantes des vitesses dans le repère (dqh) sont ensuite déterminées par l'application d'une rotation :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & 0 & 1 \\ -\frac{R}{2} & -\frac{R\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{R}{2} & \frac{R\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \vec{v}_p \quad (5.20)$$

Réponse de la boucle ouverte

Les vitesses v_d, v_q doivent être constantes pour une onde progressive en régime établi. Pour déterminer leur valeurs, un filtre passe-bas de 10 Hz est utilisé en raison des mesures bruitées des déplacements (comme le montre la figure 5.19b). En raison de la complexité de la chaîne à asservir comme le montre la figure 5.8 et l'ordre élevé de la fonction transfert de l'équation (5.17), il est très difficile de travailler sur la fonction de transfert discrète de la partie mécanique. On a donc recours à une identification. Un relevé des vitesses v_d, v_q lors de l'application de tensions d'entrée U_d, U_q en échelon, successivement appliquées aux deux voies, correspondant à une onde progressive de 10 Hz, est présenté sur la figure 5.21. Dans ce test, la tension de bus est maintenue à 300 V par une tension continue réglée à 100 V. On remarque que les deux vitesses v_d, v_q sont stables dans les deux cas et que le couplage entre les deux vitesses n'est pas important, comme cela avait déjà démontré dans la partie modélisation.

Ces vitesses sont estimées à partir des trois déplacements mesurés de la matrice inférieure et des transformations. Nous avons souhaité vérifier leur valeurs à partir d'une mesure directe par vibromètre laser. Cependant, la mesure de vitesse à cette fréquence (10 Hz) avec un vibromètre est également trop bruitée pour obtenir une estimation raisonnable de la vitesse. Dans ce cas, nous avons fait un essai à fréquence plus élevée. Par exemple, les vitesses aux trois points situés à l'aplomb des actionneurs mesurées par vibromètre dans le cas d'une onde progressive à 50 Hz avec une tension de consigne $U_d = 50$ V sont présentés sur la figure 5.22.

Cette mesure nous montre que les vitesses forment un système triphasé équilibré au niveau de la matrice inférieure. A partir de ces vitesses de la matrice inférieure à l'aplomb des actionneurs, la vitesse de rotation estimée par l'application de l'équation (5.20) est

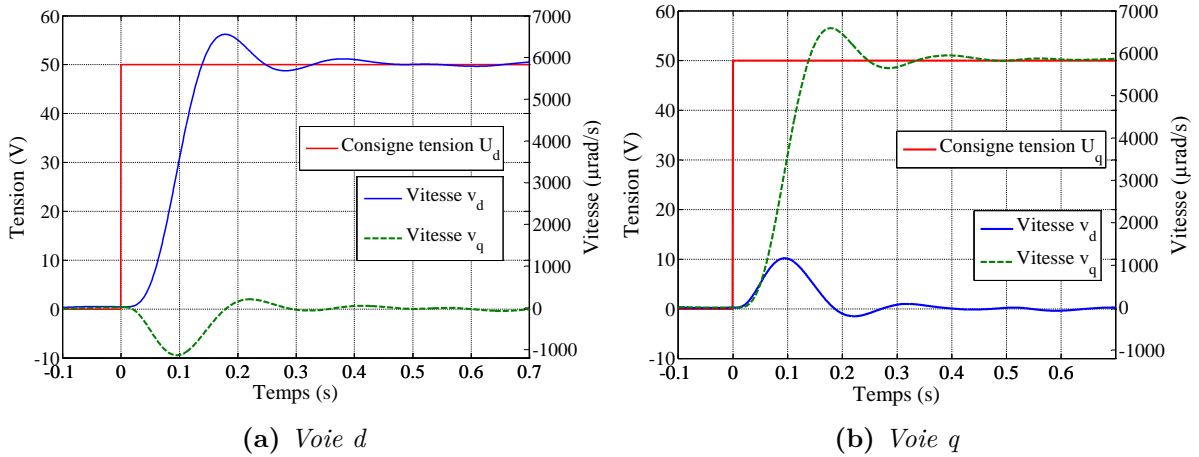


Figure 5.21: Réponses expérimentales filtrées des vitesses v_d, v_q en boucle ouverte suite à des échelons de tension U_d (a) et U_q (b)

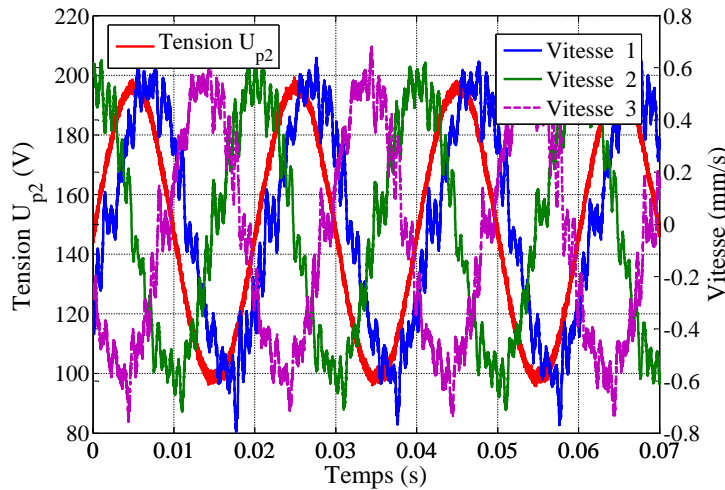


Figure 5.22: Vitesse mesurées à l'aplomb des trois actionneurs sous une tension triphasée

environ $\omega_x = \omega_y = 28\,000 \mu\text{rad/s}$. Pour une onde progressive de fréquence 10 Hz, la vitesse de rotation est donc égale à $\omega_x = \omega_y = \frac{28000}{5} = 5600 \mu\text{rad/s}$ (divisée par 5 pour une onde progressive avec la fréquence 10 Hz par rapport à la valeur mesurée à la fréquence 50 Hz). La vitesse v_d donnée à partir des mesures de capteurs de déplacement des actionneurs est environ $5800 \mu\text{rad/s}$, assez proche de la valeur estimée par vibromètre. ($5800 \mu\text{rad/s}$ par rapport à $5600 \mu\text{rad/s}$)

Dans cette première étude de la commande des vitesses du mécanisme, on considère seulement l'asservissement des vitesses de rotation nécessaire à l'onde progressive dont la dynamique est plus lente que celle de la vibration verticale. La transformation dans le repère dq permet en effet l'utilisation d'un filtre ayant une fréquence de coupure basse capable d'éliminer ainsi le bruit des mesures sur les vitesses v_d, v_q qui sont constantes en régime permanent. La fréquence de coupure du filtre entraîne alors des transitoires plus lents, mais n'influe pas sur la vitesse de l'onde progressive, obtenue à partir de la

modulation une fois la rotation inverse appliquée sur les sorties des contrôleurs.

Cette méthode n'est pas applicable à la composant v_h car le filtrage est incompatible avec la dynamique des vibrations verticales : un filtre trop lent déformerait trop les mesures. En l'état actuel, la mesure devient très bruitée, et ne peut pas être exploitée pour un retour de vitesse. Ainsi les vibrations verticales sont appliquées en boucle ouverte. La tension U_h étant asservie, les formes d'onde du déplacement vertical sont correctement réalisées. De plus, cette limite n'a pas de conséquences pour la commande des vitesses v_d, v_q parce que ce mouvement est théoriquement découplé des rotations autour des deux axes.

Réponse de la boucle fermée avec le correcteur PI

Un correcteur PI est utilisé pour réduire le dépassement des vitesses v_d, v_q . Les paramètres $K_p = 0,095$ et $K_i = 0,0005$ ont été déterminés par identification puis des essais pour obtenir une réponse présentant un temps d'établissement plus faible et moins de dépassement qu'en boucle ouverte.

L'influence du correcteur PI est démontrée par un test sur chaque voie d, q avec une même entrée d'échelon de vitesse de référence $v_{d,q} = 5000 \mu\text{rad/s}$, la fréquence de l'onde progressive étant de 10 Hz. La tension de bus DC est maintenue comme dans le cas de la boucle ouverte. L'évolution de la vitesse à commander v_d (v_q) est présentée dans les deux cas sur la figure 5.23. On remarque que les réponses sont similaires et que les dépassements sont réduits significativement (de 12 % à 2 %). Les perturbations dues aux couplages sont aussi réduites en comparaison avec la réponse en boucle ouverte. Le temps d'établissement des vitesses est amélioré (passant de 0,25 s à 0,17 s).

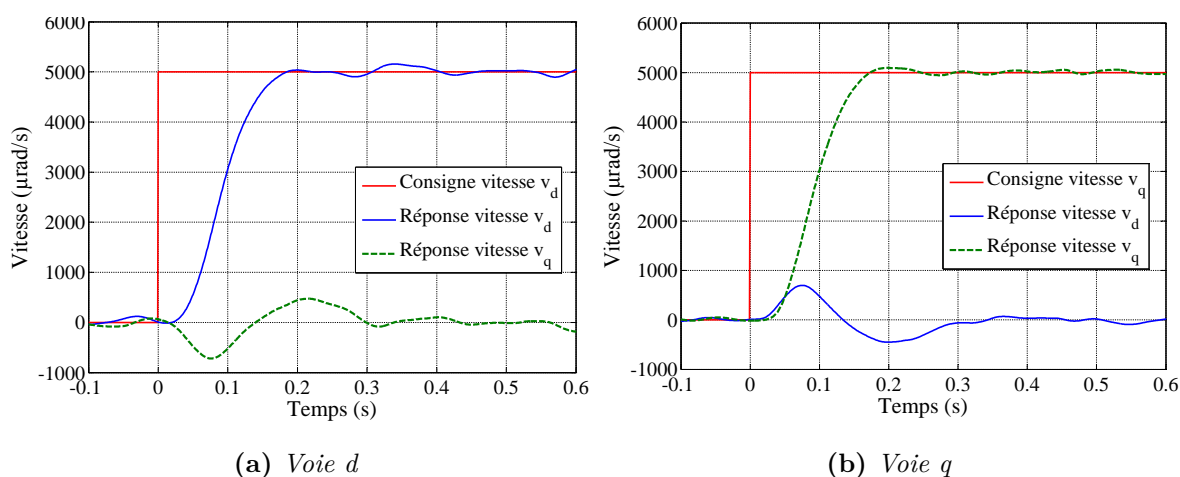


Figure 5.23: Réponses des vitesses v_d, v_q en boucle fermée

Les tensions correspondant U_d, U_q aux deux cas sont présentées sur la figure 5.24. Le résultat nous montre que les tensions suivent correctement les consignes correspondantes.

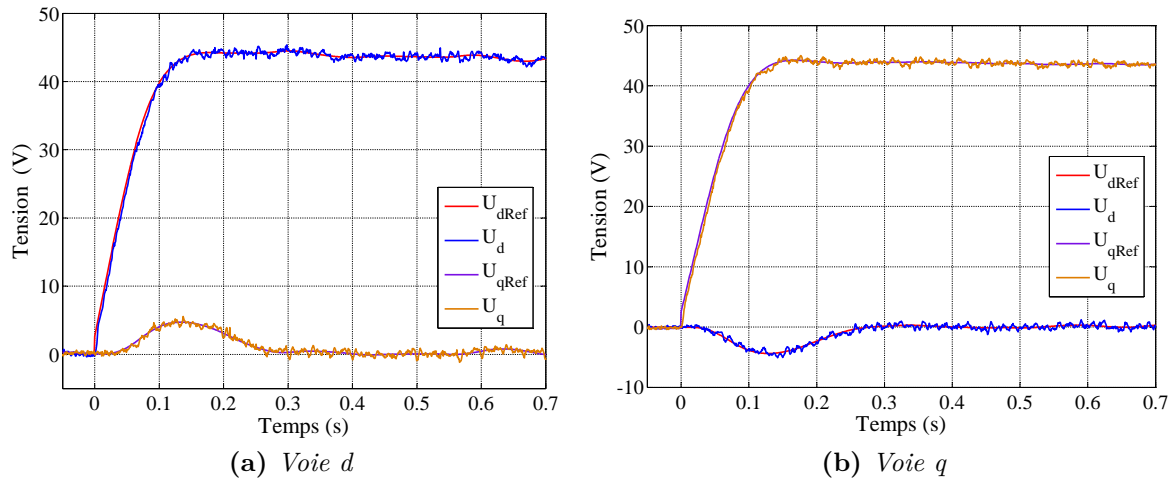


Figure 5.24: Réponses des tensions U_d, U_q en boucle fermée de vitesse

Influence des transitions durant le chargement de la tension de bus

La perturbation brutale provenant de la transition entre les phases de chargement/as-servissement des vibrations est observée sur les vitesses v_d, v_q comme le montre la figure 5.25a. Un dépassement important (70% d'amplitude) est provoqué par cette transition. Ce dépassement est causé par l'élévation verticale de la matrice inférieure lors d'une augmentation de la tension U_h . Malgré cette perturbation, les vitesses v_d, v_q sont stabilisées assez rapidement (après 0,17s) ainsi que les tensions U_d, U_q (voir la figure 5.25b)

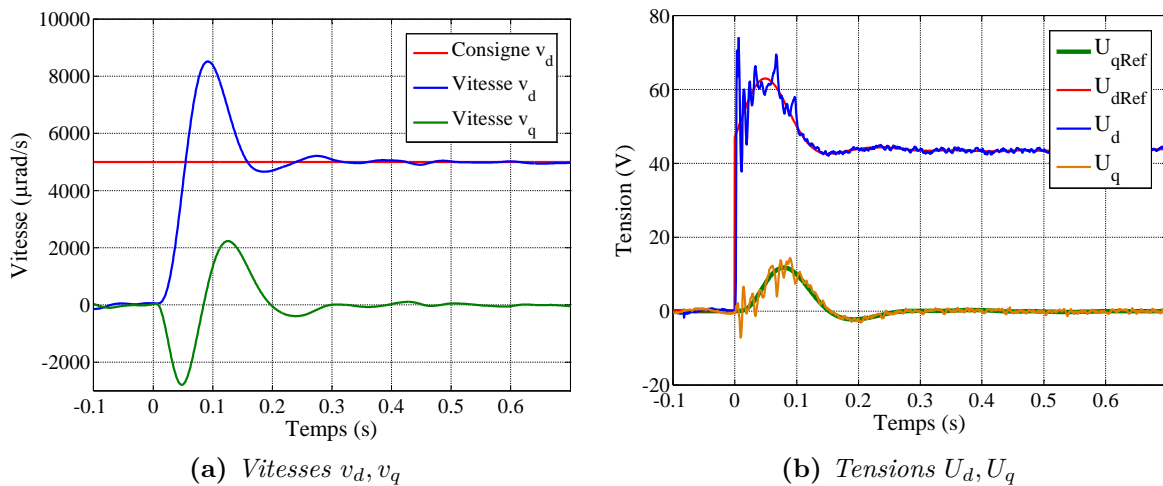


Figure 5.25: Réponses de vitesse et de tension lors d'un chargement de tension de bus

5.4.4 Discussion

Les résultats expérimentaux nous permettent de valider la structure de commande pratique présentée (figure 5.8) pour la génération d'un mouvement complexe résultant

de la combinaison d'une onde progressive et d'une vibration verticale quelconque. Les commandes en boucle fermée des tensions des actionneurs et des vitesses de rotation de la matrice inférieure sont réalisées avec des phases de chargement intermittent de la tension de bus. Les résultats nous montrent une influence significative de la transition des phases de chargement de tension bus. Cette influence peut être évitée par deux approches différentes :

- **Redémarrage retardé du système** : les asservissements sont réactivés avec un retard de quelques périodes d'échantillonnage, après une phase de chargement de la tension de bus. Cette méthode nous permet d'éviter l'influence perturbante de la tension U_h sur les tensions U_d, U_q ;
- **Chargement permanent** : une autre méthode possible est de charger le bus de façon permanente. La commande n'est pas alors interrompue par une phase de chargement de tension et le problème de dépassement des tensions est aussi réduit par une élimination des chutes de tension U_h durant la transition des phases de chargement. Pour réaliser cette méthode, la valeur moyenne de tension U_h est réduite à la valeur $U_h - \Delta U$ pour que $\min(U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}) < U_s$. Le chargement de la tension de bus est donc effectué pendant la période où $\min(U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}) < U_s$. L'énergie électrique de chargement périodique compense les pertes électriques et mécaniques du système. La valeur de ΔU peut être trouvée par un test empirique. Par exemple, pour le test de la commande en boucle fermée de vitesse précédent, cette valeur ΔU est choisie à 15 V pour obtenir un chargement permanent. Les tensions et courants des actionneurs sont présentés sur la figure 5.26. Ils nous montrent un chargement périodique du système chaque fois que la tension de l'actionneur est inférieure à la tension $U_s = 100$ V. La vitesse v_d est maintenue à la valeur de consigne 5000 $\mu\text{rad/s}$.

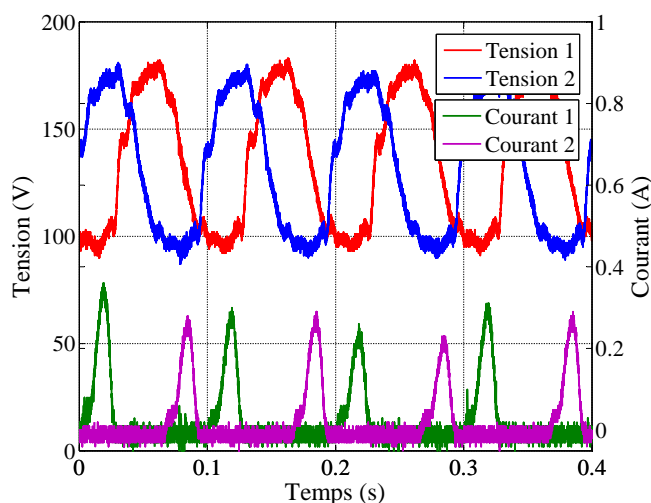


Figure 5.26: Tensions et courants mesurés durant le chargement permanent

Cependant, les temps d'établissement des grandeurs sont encore limités : environ 6 ms pour la boucle fermée de tension et 170 ms pour la boucle fermée de vitesse. En considérant le cahier des charges établi pour le système en acier (dont la fréquence maximale avoisine 100 Hz), il faut réduire le temps d'établissement. Cette caractéristique peut être améliorée par certaines solutions techniques :

- Le temps d'échantillonnage du système est limité par la communication RS422 ou RS485 entre DSpace® et le DSP. La liaison RS485 pouvant communiquer jusqu'à 35 Mbit/s, cette solution peut améliorer ce point (la RS232 étant limitée à 115 200 bits/s).
- Un système de capteurs plus robuste avec une dynamique élevée (capteurs à courant de Foucault ou capacitifs) doit être utilisé pour une mesure plus performante.
- L'étude approfondie d'un contrôleur plus complexe, de type RST, permettrait la prise en compte plus précise du système et pourrait ainsi améliorer sa réponse dynamique.

Une autre solution possible pour les vitesses est d'utiliser un estimateur pour estimer les vitesses de déplacement des actionneurs à partir de variables internes des actionneurs [115]. L'estimateur est déduit à partir de REM de l'actionneur piézoélectrique comme sur la figue 5.27. La chaîne de réaction relie la vitesse v_p à l'entrée mesurable de l'actionneur s'exprime (ligne jaune).

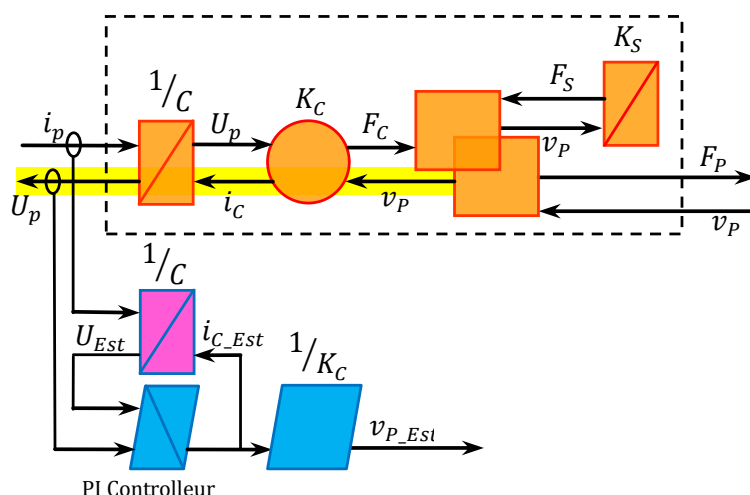


Figure 5.27: Schéma d'estimation de vitesse et force d'élasticité

Si le courant i_C sur cette chaîne est connu, la vitesse de l'actionneur est donc calculée par l'équation : $v_p = \frac{1}{K_C} i_C$. Mais le courant i_C est une grandeur interne de l'actionneur et non-mesurable. Ce courant peut être estimé à partir de la relation des entrées et sortie de

l'accumulateur $\frac{1}{C}$ de l'actionneur :

$$i_C = i_p - \frac{dU_p}{dt} \quad (5.21)$$

Afin d'éviter la dérivation de la tension U_p , un condensateur virtuel (le pictogramme en magenta) est utilisé. La tension de sortie U_{Est} du condensateur est donnée par :

$$U_{Est} = \frac{1}{C} \int^t (i_p - i_{C_Est}) dt \quad (5.22)$$

Un contrôleur PI est utilisé pour estimer le courant i_{C_Est} à partir de l'équation (5.21) :

$$i_{C_Est} = \left(K_{Pe} + \frac{K_{Ie}}{s} \right) (U_{Est} - U_p) \quad (5.23)$$

Le courant i_{C_Est} s'exprime en fonction du courant i_c :

$$i_{C_Est} = \frac{sK_{Pe} + K_{Ie}}{Cs^2 + sK_{Pe} + K_{Ie}} i_C \quad (5.24)$$

Le temps de réponse du contrôleur doit être plus court que celui de l'actionneur. La vitesse de l'actionneur est alors estimée par le calcul : $v_{p_Est} = \frac{1}{K_C} i_{C_Est}$.

Un exemple de l'estimation de vitesse est montré la figure 5.28. Le courant mesuré et la tension estimée sont présentés sur la figure 5.29.

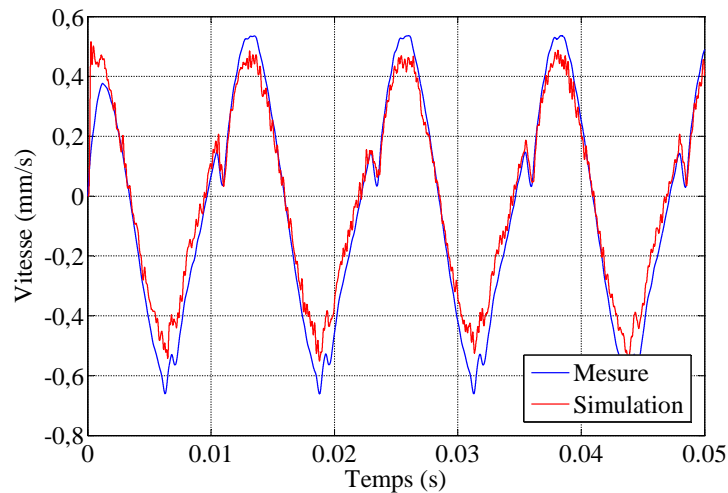


Figure 5.28: Estimation de la vitesse de l'actionneur

On remarque que la tension estimée de l'actionneur U_{Est} est identique à la valeur mesurée et la vitesse estimée est assez proche de la valeur mesurée. Cependant, cette méthode dépend de la précision des paramètres de l'actionneur et de la mesure du courant d'entrée. De ce fait, l'utilisation de capteurs de courant robustes est primordiale pour cette méthode.