

# Stabilité et Stabilisation d'une Machine Synchrone Alimentée par un Onduleur à Quasi Z-Source

<sup>1</sup>Alexandre BATTISTON, <sup>2</sup>El-Hadj MILIANI, <sup>1</sup>Serge PIERFEDERICI, <sup>1</sup>Farid MEIBODY-TABAR

<sup>1</sup>Université de Lorraine – Laboratoire GREEN

<sup>2</sup>IFP Energies nouvelles

**RESUME** –Ce travail traite de l'étude de la stabilité et de la stabilisation d'un système de traction électrique composé d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur à Quasi Z-source. L'onduleur à Quasi Z-source, et plus généralement les onduleurs à source impédante, sont des convertisseurs de type DC/AC éleveurs. Ils permettent d'élever la tension du bus continu de manière à ce qu'elle soit adaptée à la demande en puissance de la machine. Cela garantit la contrôlabilité du moteur sur une large plage de vitesses mais aussi la réduction des pertes dans l'onduleur. Lorsque la tension de source est suffisante pour contrôler la machine, il n'est plus nécessaire d'élever la tension du bus continu. L'onduleur à Quasi Z-source est alors assimilé à un onduleur de tension classique alimenté par un filtre passif de type LC. Certains problèmes de stabilité peuvent alors apparaître et il est nécessaire de mettre en place des systèmes de stabilisation afin de garantir un fonctionnement optimal du convertisseur.

**Mots-clés**—Onduleur à Quasi Z-source, MSAP, Stabilité, Stabilisation, Contrôlabilité.

## 1. INTRODUCTION

L'onduleur à Quasi Z-source (Fig. 1) est un convertisseur qui est apparu dans la littérature scientifique en 2008 [1]-[2]. Il fait partie de la famille des onduleurs à source impédante dont le plus célèbre est l'onduleur à Z-source [3].

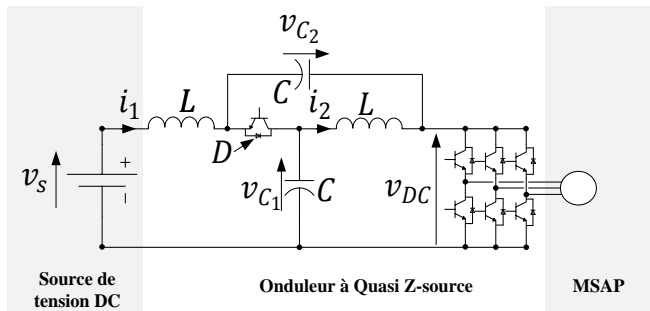
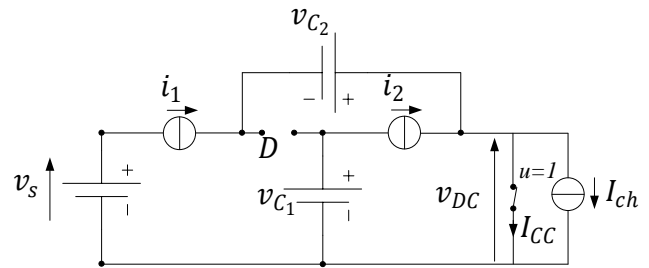


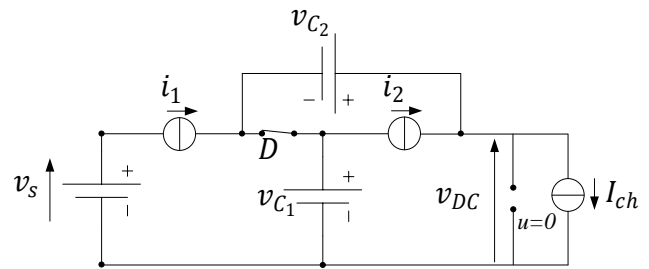
Fig.1 Système de traction électrique où la machine est alimentée par un onduleur à Quasi Z-source.

Ce convertisseur continu/alternatif permet d'élever la tension du bus continu  $v_{DC}$  en insérant dans le schéma de MLI des court-circuits de bras d'onduleur (interrupteurs haut et bas d'un même bras fermés simultanément). Cela permet la commutation de la diode  $D$  (en mode moteur) ou de l'interrupteur associé (en mode réversible) faisant intervenir un rapport cyclique  $d$  comme

variable de commande. Il est alors possible d'exprimer le rapport d'élévation  $v_{DC}/v_s$  en considérant les deux séquences de fonctionnement du convertisseur, et qui dépendent de l'état de court-circuit ou non de l'onduleur. Dans le but de simplifier l'étude, les schémas des Fig. 2(a) et Fig. 2(b) pourront être utilisés.



(a) Séquence 1 :  $u = 1$ , séquence de court-circuit.



(b) Séquence 2 :  $u = 0$ , séquence hors court-circuit.

Fig.2 Modèles équivalents par séquence de fonctionnement pour l'établissement du modèle d'état.

A partir de ces figures données sur les deux séquences de fonctionnement, il est possible d'exprimer le système d'état global (1) du convertisseur. Celui-ci est donné en fonction de la variable logique  $u$  repérant l'état de l'onduleur et dont la valeur moyenne n'est autre que le rapport cyclique  $d$  de court-circuit. Le rapport d'élévation  $v_{DC}/v_s$  du convertisseur peut être exprimé en moyennant les deux premières équations de (1). La tension aux bornes de l'onduleur  $v_{DC}$  étant discontinue, c'est sa valeur non nulle ( $\hat{v}_{DC} = v_{C1} + v_{C2}$ ) qui est prise en compte pour exprimer le rapport de tensions cherché. En effet, les court-circuits sont insérés dans le schéma de MLI lors des états zéros de l'onduleur (il s'agit des états pendant lesquels les trois interrupteurs du haut de l'onduleur ou les trois interrupteurs du

bas sont fermés) de telle sorte que la machine n'en soit pas impactée et ne voit que la valeur de tension  $\hat{v}_{DC}$  hors de ces états (2).

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} = -r i_1 + v_s - v_{C1} \cdot (1 - u) + v_{C2} \cdot u \\ L \frac{di_2}{dt} = -r i_2 - v_{C2} \cdot (1 - u) + v_{C1} \cdot u \\ C \frac{dv_{C1}}{dt} = -i_2 \cdot u + i_1 \cdot (1 - u) - I_{ond} \cdot (1 - u) \\ C \frac{dv_{C2}}{dt} = -i_1 \cdot u + i_2 \cdot (1 - u) - I_{ond} \cdot (1 - u) \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{v}_{DC} = \bar{v}_{C1} + \bar{v}_{C2} = \frac{1}{1 - 2d} \cdot v_s \quad (2)$$

$\bar{v}_{Ci}$  représente la valeur moyenne de la grandeur  $v_{Ci}$ . Ce résultat donne le rapport d'élévation bien connu de l'onduleur à Quasi Z-source avec un rapport cyclique évoluant dans l'intervalle  $[0,0.5]$ .

La plupart des auteurs dans la littérature scientifique traitant des onduleurs à source impédante ne présentent que rarement des résultats avec étude de transitoires. La stabilité n'est ainsi jamais prise en compte car ils étudient ces onduleurs en phase d'élévation de la tension [4], ce qui repousse les limites de stabilité du fait que le système est contrôlé. Dans cet article, la tension du bus continu  $v_{DC}$  n'est élevée qu'en cas de nécessité, ceci dans le but de réduire les pertes dans l'onduleur (commutation et conduction) [5], [6]. Ainsi, lorsque la tension de source est suffisante pour contrôler la machine, le rapport cyclique est maintenu à  $d = 0$  et l'onduleur à Quasi Z-source peut être assimilé à un onduleur de tension alimenté par un filtre passif. C'est dans ces états de fonctionnement de l'onduleur à Quasi Z-source que peuvent apparaître des phénomènes d'instabilité, surtout si les éléments passifs ont été réduits pour diminuer la taille du système (contrainte des systèmes embarqués). Afin de garantir une maîtrise des régimes transitoires pour l'adaptation de la tension du bus continu à la vitesse ou à la puissance absorbée par le moteur, un contrôle basé sur les propriétés de platitude différentielle [7] est implémenté. Il n'est cependant pas détaillé dans cet article.

Après une présentation de l'étude de stabilité du système et une validation par simulation sur un profil de vitesse en section 2, le stabilisateur ajouté sera présenté et validé par simulation en section 3. La section 4 se concentre sur la validation expérimentale et une conclusion de l'étude est donnée en section 5.

## 2. ETUDE DE LA STABILITE DU SYSTEME DE TRACTION

Lorsque la tension de source doit être élevée selon la caractéristique d'élévation (2), l'onduleur à Quasi Z-source est commandé. Il est ainsi difficile de trouver des zones d'instabilité pour les points de fonctionnement physiques tant le contrôle tend à s'opposer au phénomène. En revanche, quand la tension de source est suffisante pour contrôler le moteur, l'onduleur à Quasi Z-source n'est plus commandé ( $d = 0$ ) et se comporte comme un onduleur de tension classique muni d'un filtre passif d'entrée imposant la somme des tensions capacitives ( $v_{C1} + v_{C2}$ ) aux bornes de l'onduleur. Des phénomènes instables

peuvent alors survenir et il est nécessaire d'y apporter des corrections pour garantir un fonctionnement normal du système de traction.

### 2.1. Stabilité petit signal et réduction des condensateurs

Pour étudier le phénomène d'instabilité, nous pouvons faire l'hypothèse que la machine est « bien commandée », c'est-à-dire assimilable à une charge absorbant une puissance constante  $P_0$  [8], [9]. Une représentation de l'onduleur à Quasi Z-source dans ce cas et alimentant une charge à puissance constante est donnée en Fig. 3.

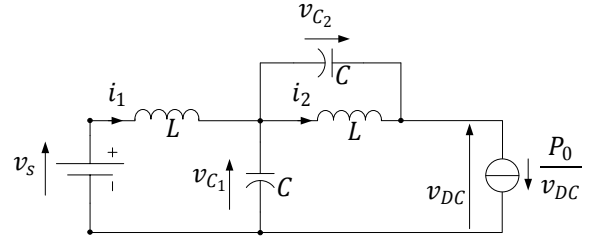


Fig.3 Schéma équivalent de l'onduleur à Quasi Z-source quand il n'est pas commandé.

Le modèle d'état du système non commandé est obtenu en annulant la variable de commande  $u$  dans le modèle (1). On obtient :

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} = -r i_1 + v_s - v_{C1} \\ L \frac{di_2}{dt} = -r i_2 - v_{C2} \\ C \frac{dv_{C1}}{dt} = i_1 - \frac{P_0}{\hat{v}_{DC}} \\ C \frac{dv_{C2}}{dt} = i_2 - \frac{P_0}{\hat{v}_{DC}} \end{cases} \quad (3)$$

L'étude de la stabilité dite « petit signal » s'effectue en étudiant le signe de la partie réelle des valeurs propres de la matrice jacobienne de (3). Cette dernière est donnée après linéarisation de (3) autour d'un point de fonctionnement par :

$$M = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & \frac{P_0}{C \cdot v_s^2} & \frac{P_0}{C \cdot v_s^2} \\ 0 & \frac{1}{C} & \frac{P_0}{C \cdot v_s^2} & \frac{P_0}{C \cdot v_s^2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Cette matrice possède deux couples de valeurs propres complexes conjuguées dont les parties réelles s'expriment ainsi :

$$\begin{cases} \Re(\lambda_{1,2}) = -\frac{r}{2L} \\ \Re(\lambda_{3,4}) = \frac{2P_0L - C r v_s^2}{2 C L v_s^2} \end{cases} \quad (5)$$

Le système (3) est dit asymptotiquement stable si et seulement si la partie réelle de toutes les valeurs propres est négative. Les

deux premières vérifiant cette contrainte, on obtient une condition sur la partie réelle des deux suivantes, soit :

$$P_0 < \frac{C r v_s^2}{2 L} \quad (6)$$

Cette relation est vérifiée en Fig. 4 où plusieurs valeurs de condensateurs sont testées (de 1 à 160  $\mu\text{F}$ ). A noter que l'évaluation de la stabilité est effectuée sur le système de la Fig. 1 et non pas sur celui simplifié de la Fig. 3. Les puissances testées correspondent aux puissances pour lesquelles la tension de source est suffisante pour le contrôle de la machine dont les paramètres sont donnés en fin d'article dans le Tableau 1.

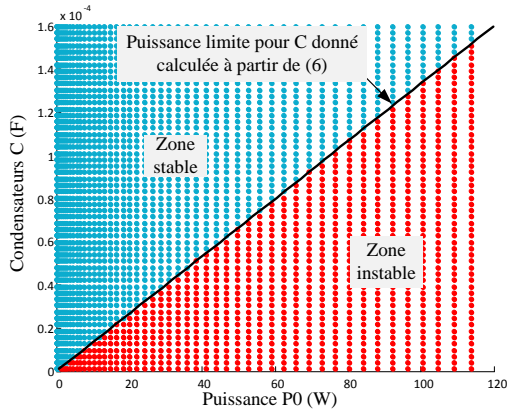


Fig.4 Etude de la stabilité du système pour différentes valeurs de condensateurs ( $v_s = 50 \text{ V}$ ,  $L = 1000 \mu\text{H}$ , et  $r = 0.5 \Omega$ ).

Une des contraintes majeures des systèmes électriques embarqués est la limite d'espace pour les intégrer. Ainsi, la réduction de la taille des éléments de filtrage tels que les condensateurs est souvent un objectif à atteindre. Mais la Fig. 4 montre que toute réduction de la valeur de ces condensateurs peut induire un comportement instable du système. C'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter des dispositifs stabilisants afin de repousser les limites de stabilité quand l'onduleur à Quasi Z-source est utilisé en filtre passif.

## 2.2. Etude de la stabilité sur l'ensemble de la zone de fonctionnement

En Fig. 5, l'étude de la stabilité est menée sur une plus grande plage de fonctionnement de la machine considérée (machine utilisée en laboratoire) avec une valeur de condensateurs de 60  $\mu\text{F}$ . Tous les paramètres en jeu sont fournis dans le Tableau 1 en fin d'article. Les résultats de l'étude sont représentés dans le plan couple de charge – vitesse mécanique. Cette figure confirme que la perte de stabilité intervient dans la zone où l'onduleur à Quasi Z-source n'élève pas la tension de source (zone où  $d = 0$ ) et où la puissance absorbée par la charge ne respecte plus la condition (6). Les zones instables ont été repérées par des points rouges. Il est intéressant de constater que dès lors que la tension de source est élevée (zones aux points bleus), le contrôle de l'onduleur à Quasi Z-source s'oppose à l'instabilité et éloigne la limite de puissance au-delà de la zone de fonctionnement de la machine. Nous cherchons alors à stabiliser la zone où le rapport cyclique de court-circuit est nul. Afin de confirmer les résultats précédents, une validation par simulation est menée.

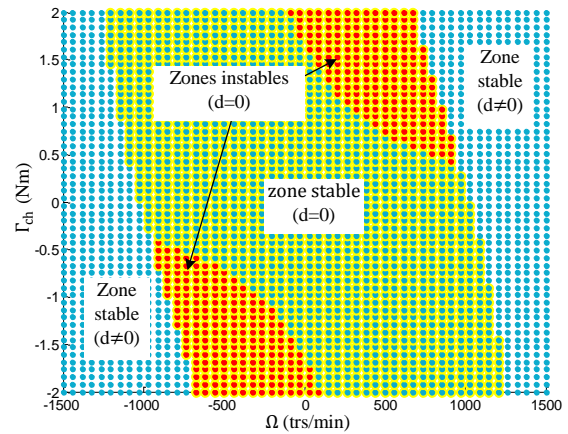


Fig.5 Etude de la stabilité du système représentée dans le plan  $\Gamma_{ch} - \Omega$  pour  $C = 60 \mu\text{F}$ .

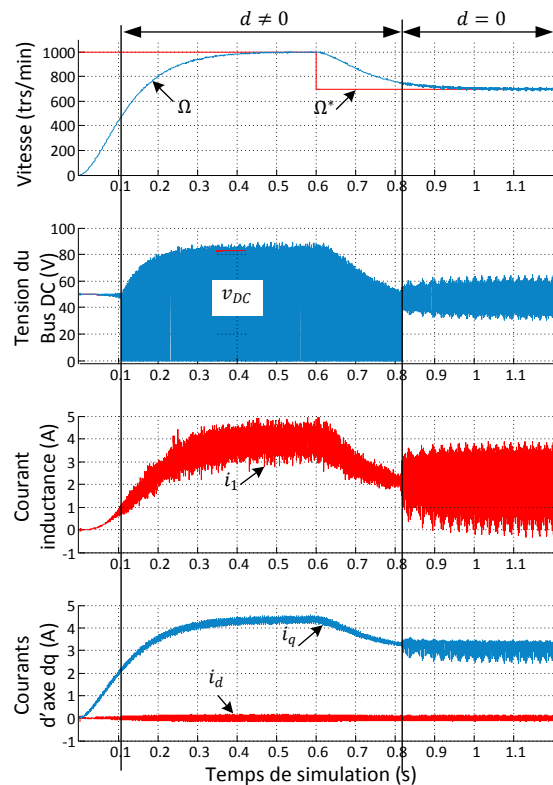


Fig.6 Validation par simulation d'une perte de stabilité sur un profil de vitesse donné.

Les résultats sont tracés en Fig. 6. De  $t = 0$  à  $t = 0.6\text{s}$ , la consigne de vitesse demandée est de 1000 trs/min. Cette première valeur de référence contraint la tension de source à être élevée par injection d'un rapport cyclique  $d$  non nul de court-circuit de bras d'onduleur. Cela est observable sur la figure précédente lorsque la tension  $v_{DC}$  devient discontinue et évolue entre une valeur maximale (valeur de tension vue par l'onduleur et la machine) et une valeur nulle lors des états de court-circuit de bras. Ainsi, on vérifie bien que lorsque  $d \neq 0$ , aucun phénomène instable n'apparaît. En revanche, pour la seconde valeur d'échelon (700 trs/min), la tension  $v_s = 50 \text{ V}$  étant

suffisante pour contrôler la machine à cette vitesse, il n'est plus nécessaire d'élever la tension et le rapport cyclique prend la valeur  $d = 0$ . Cela contraint les grandeurs d'entrée  $i_1$  et  $v_{DC}$  à évoluer librement. Le couple de charge pour cet essai étant d'environ 1 Nm, on entre d'après la Fig. 5 dans la zone où  $d = 0$  pour une vitesse de 700 trs/min. On observe ainsi l'apparition d'un phénomène instable des grandeurs d'état observées. Ce dernier se manifeste par l'éloignement et l'oscillation des grandeurs autour de leur point de fonctionnement. La fréquence de ces oscillations est donnée par la fréquence de coupure du filtre, soit :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 624 \text{ Hz} \quad (7)$$

### 3. STABILISATION DE L'ONDULEUR A QUASI Z-SOURCE QUAND $d = 0$

Dans cette partie, nous proposons une solution de stabilisation par la commande de l'ensemble du système. Elle agit en modifiant légèrement la référence de tension d'axe  $q$  de la machine en introduisant une image des ondulations instables (à la fréquence  $f_c$ ) de la tension  $v_{DC} = v_{C1} + v_{C2}$ .

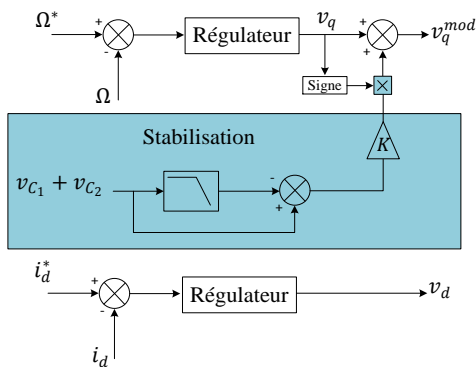


Fig.7 Synopsis de commande simplifié munie du système de stabilisation.

La Fig. 7 présente un schéma de contrôle de la machine muni du système stabilisant. Le coefficient  $K$  est un simple gain déterminé à l'aide de considération de stabilité comme nous le précisons dans la suite. Les ondulations instables de la somme des tensions aux bornes des condensateurs sont extraites à l'aide d'un filtre passe-bas comme précisé sur le schéma précédent. La modélisation de la machine en vue de son contrôle est généralement écrite dans le modèle de Park (axe  $dq$ ) après transformation de Concordia et Park. Cela permet ainsi de travailler dans le repère tournant du rotor pour la considération de signaux d'axe  $dq$  continus. Le modèle obtenu est rappelé ci-après (les paramètres intervenants sont décrits dans le Tableau 1 en fin d'article) :

$$\begin{cases} l_d \frac{di_d}{dt} = -r_s i_d + v_d + p\Omega l_q i_q \\ l_q \frac{di_q}{dt} = -r_s i_q + v_q - p\Omega (l_d i_d + \psi_f) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = p\psi_f i_q - \Gamma_{ch} - f\Omega \end{cases} \quad (8)$$

Dans une commande à deux boucles, la régulation des courants  $i_d$  et  $i_q$  génère les tensions de commande  $v_d$  et  $v_q$  à partir d'un

contrôleur linéaire (PI) ou non-linéaire (mode glissant, platitude). La boucle externe de régulation de la vitesse  $\Omega$  est mise en place en général sur l'axe  $q$ , elle permet de générer le courant  $i_q^*$  de référence pour la boucle interne de régulation du courant  $i_q$ . Dans cet article, nous faisons le choix de considérer par exemple une commande « à une boucle de régulation en vitesse ». Cela signifie que la seule boucle de régulation de la vitesse  $\Omega$  sur l'axe  $q$  permet de retourner directement la tension de référence  $v_q$  sans passer par une étape de régulation du courant  $i_q$ . Les détails d'une telle commande peuvent être trouvés dans l'article [10] qui met en œuvre une commande à une boucle basée sur les propriétés de platitude du système. Le choix de considérer une commande à une boucle permet de donner un résultat plus général puisqu'il reste valable pour une commande à deux boucles. En effet, dans la littérature scientifique, la stabilisation s'effectue sur des commandes à deux boucles en modifiant la référence du courant d'axe  $q$   $i_q^*$  pour que les régulateurs de courants rapides s'opposent à l'instabilité [11]. Dans le cas de cet article, la référence du courant d'axe  $q$  ne peut être modifiée, c'est pourquoi la stabilisation agit sur la tension d'axe  $q$ , le régulateur de vitesse permettant le retour à l'état stable.

#### 3.1. Choix du gain $K$

Afin d'étudier l'influence du stabilisateur ajouté, nous nous concentrons sur la stabilisation de la zone « moteur » de la Fig. 5 et présentons en Fig. 8 les résultats obtenus d'étude de la stabilité pour quatre valeurs du gain  $K = \{0.2, 0.3, 0.4, 0.5\}$ .

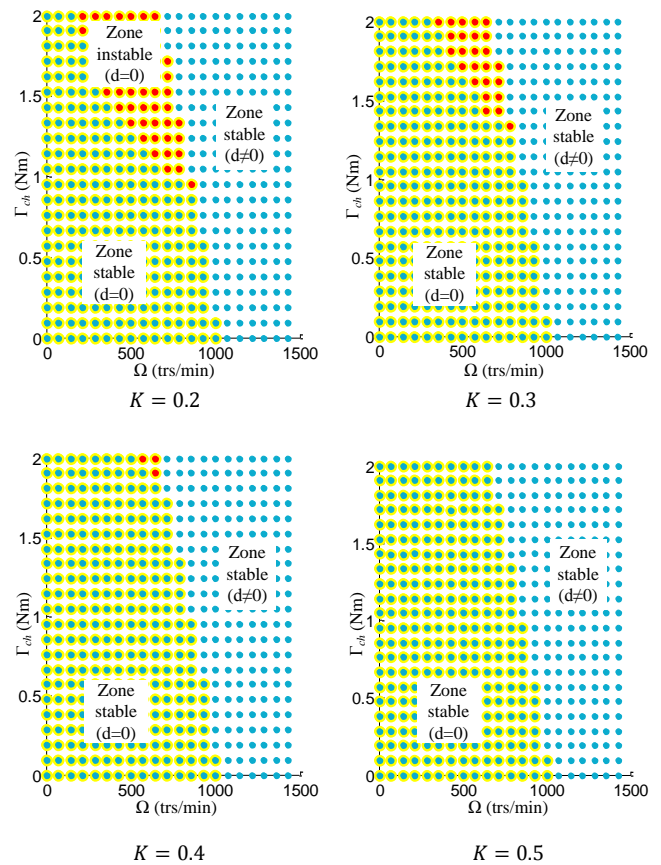


Fig.8 Etude de l'influence de la valeur de  $K$  sur la zone à stabiliser.

Les résultats présentés montrent que l'augmentation de  $K$  permet de repousser la zone instable de la Fig. 5. Le choix de  $K = 0.5$  stabilise entièrement la zone. A noter que si le modèle n'est pas parfaitement connu (erreur de modélisation par exemple ou incertitudes paramétriques), ce gain peut être légèrement surdimensionné pour étendre davantage l'aire de stabilité. Une remarque peut être ajoutée concernant la valeur de  $K$ . Il semble que plus  $K$  augmente et plus le système est stable. Or, des valeurs trop importantes de  $K$  tendent à déstabiliser le système, et donc à déplacer les zones d'instabilité d'origine. Il est ainsi nécessaire de faire une étude de stabilité comme établie précédemment pour évaluer les valeurs limites de  $K$ . Nous présentons en Fig. 9 l'évaluation de la stabilité avec une valeur de  $K$  égale à 2. On s'aperçoit que le gain  $K$  permet de stabiliser la zone moteur (puissance positive) mais déplace l'instabilité vers la zone générateur (puissance négative). Si la machine n'est utilisée qu'en moteur, cela n'a pas d'importance. En revanche, dans des applications où des modes de récupération sont envisageables, il conviendra de modifier la valeur de  $K$  ou bien de mettre en œuvre des stratégies permettant de désactiver le stabilisateur.

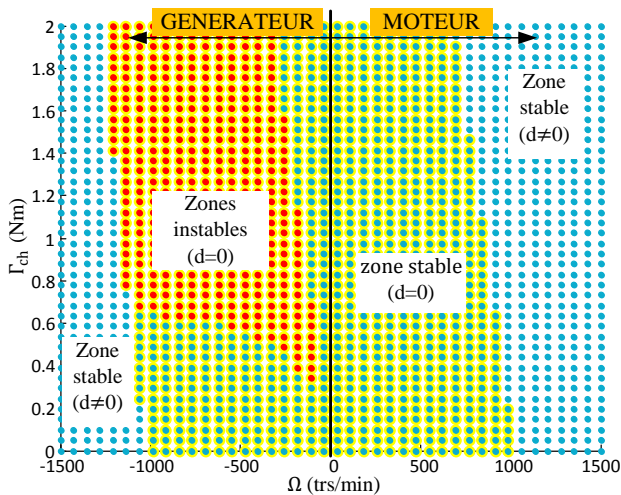


Fig.9 Etude de la stabilité du système représentée dans le plan  $\Gamma_{ch} - \Omega$  pour  $C = 60 \mu F$  et  $K = 2$ .

### 3.2. Résultats de simulation avec système stabilisant

Le même test que celui présenté en Fig. 6 est réalisé par simulation. Nous activons le système de stabilisation après la survenue du phénomène instable comme présenté en Fig. 10. Les résultats montrent qu'après activation du système stabilisant avec un coefficient  $K = 0.5$ , les grandeurs d'état du système convergent toutes vers leur point d'équilibre et les ondulations instables observables disparaissent, assurant un comportement et une qualité d'énergie accrus. La Fig. 11, qui présente les résultats obtenus pour un échelon de vitesse de  $\Omega = 0$  à 700 trs/min, permet de mettre en évidence l'effet du système de stabilisation après son activation puis après sa désactivation. Lorsque la stabilisation n'est plus active, les grandeurs retournent instantanément vers le cycle limite instable observé avant stabilisation, ce qui justifie la nécessité de l'application du stabilisateur. Il est important ici de noter que dans le cas de l'exemple considéré, l'instabilité du système n'empêche pas le contrôle de la machine et l'amplitude des ondulations instables

atteint un cycle limite qui peut être acceptable dans certains cas. Néanmoins, dans un cas où plusieurs charges sont connectées au même bus continu, les phénomènes instables peuvent se propager et créer des effets indésirables dans tout le réseau. Aussi, les ondulations du courant  $i_1$  peuvent s'avérer néfastes pour la durée de vie des éléments de stockage (batterie par exemple). C'est pourquoi il est nécessaire de chercher à atténuer, voire de supprimer ces phénomènes.

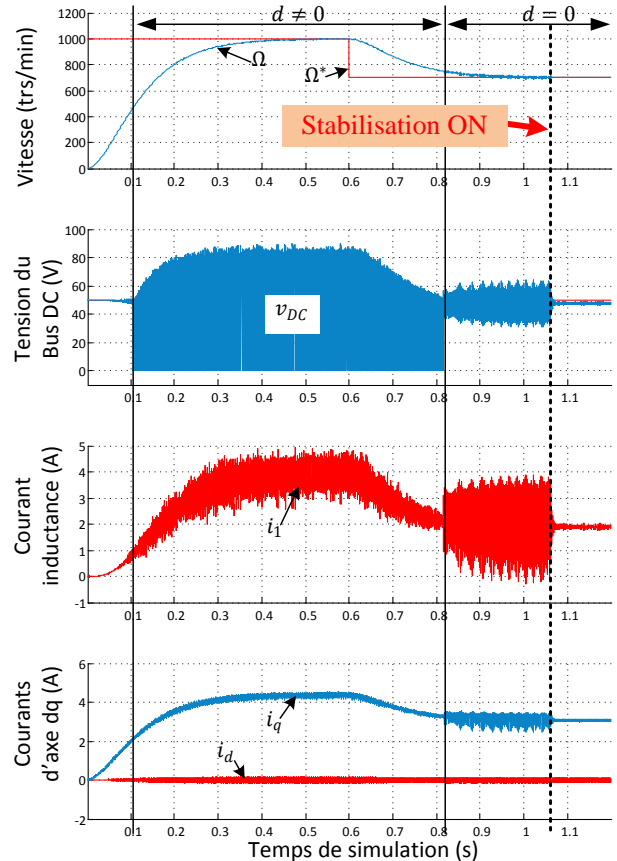


Fig.10 Validation par simulation d'une perte de stabilité et de sa stabilisation sur un profil de vitesse donné. ( $K = 0.5$ ).

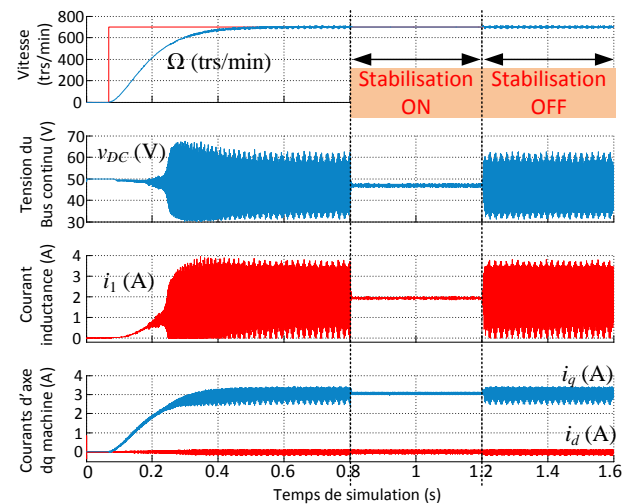


Fig.11 Effet de l'activation ou non du système stabilisant.



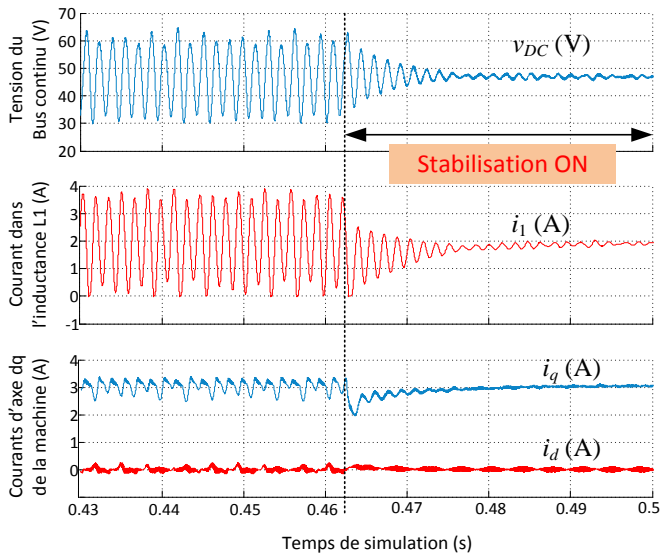


Fig.12 Mise en évidence de la stabilisation des grandeurs d'état.

En Fig. 12, un zoom temporel autour de l'instant d'activation du système stabilisant est effectué et présente la tension du bus continu  $v_{DC}$  ainsi que les courants  $i_1$ ,  $i_d$  et  $i_q$ . Ces résultats permettent tout d'abord de vérifier que la fréquence d'oscillation des ondulations lors de l'état perturbé est évaluée à environ 650 Hz, ce qui correspond à peu près à la fréquence de coupure du filtre (7). Ces résultats nous seront utiles pour la comparaison avec la validation expérimentale de la section suivante.

#### 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR BANC D'ESSAI

Afin de valider les résultats théoriques et de simulation, un banc d'essais est réalisé utilisant une machine synchrone alimentée par un onduleur à Quasi Z-source. Les valeurs des paramètres expérimentaux peuvent être trouvées dans le Tableau 1. Ils sont identiques aux paramètres de simulation. Pour que l'onduleur soit utilisé comme filtre passif, nous ne dépassons pas 800 trs/min de manière à ce que la tension de source  $v_s = 50 V$  soit suffisante pour atteindre cette vitesse. L'essai de la Fig. 13 consiste à réaliser un échelon de vitesse de 0 à 700 trs/min identique à celui de simulation dont les résultats ont été présentés en Fig. 11. L'arrivée au point de fonctionnement désiré provoque l'entrée du système en état instable. On remarque que les grandeurs d'état côté continu s'éloignent de leur point de fonctionnement. Notons que dans le but de protéger le banc expérimental et la source (source de tension stabilisée), une diode supplémentaire a été ajoutée en amont du montage empêchant le courant  $i_1$  de devenir négatif et créant ainsi un cycle limite. En Fig. 14, l'effet de la stabilisation est mis en avant, confirmant par ce fait les résultats de la Fig. 11 obtenus en simulation. Le système stabilisant permet de faire converger les grandeurs d'état vers leur point d'équilibre en s'opposant aux ondulations instables de résonance des éléments passifs  $L$  et  $C$ . La fréquence de ces ondulations est vérifiée en Fig. 15 et évaluée à 568 Hz (la précision de la mesure n'est pas optimale, la dilatation de l'échelle de temps étant faible). De plus, les valeurs des condensateurs et inductances ne sont pas connues de manières exactes). Les résultats présentés montrent ainsi que même avec des incertitudes paramétriques, le système de stabilisation reste fonctionnel.

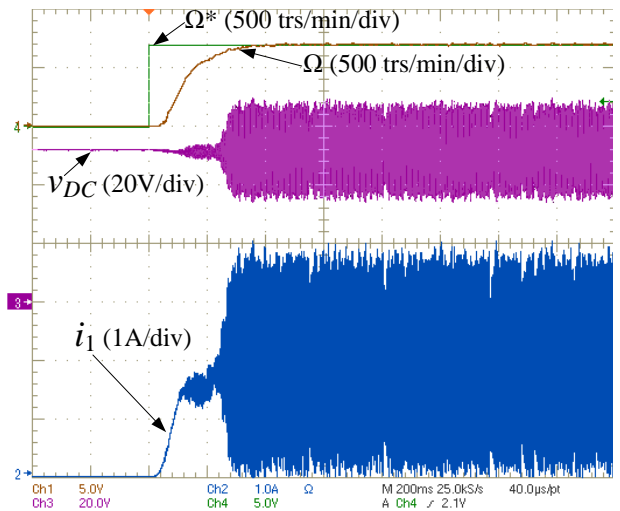


Fig.13 Résultats expérimentaux : entrée du système dans un comportement instable suite à un échelon de vitesse de 0 à 700 trs/min.

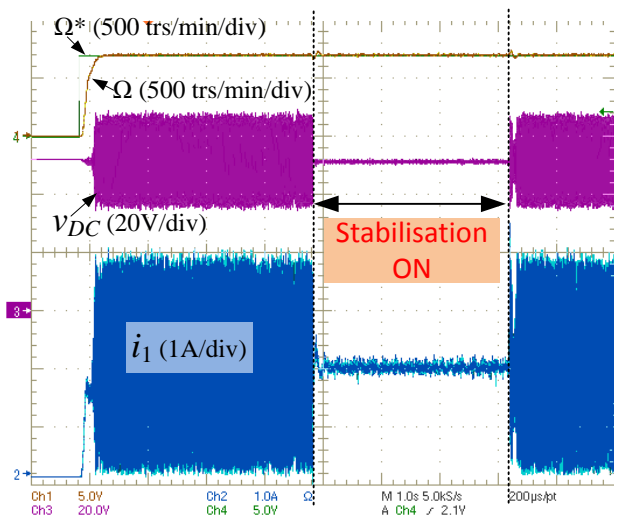


Fig.14 Résultats expérimentaux : effet du stabilisateur.

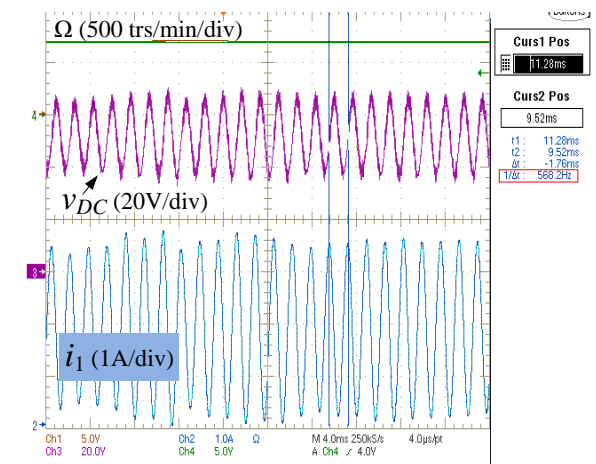


Fig.15 Résultats expérimentaux : observation en régime permanent de l'instabilité.

La Fig. 16 présente un zoom de la partie temporelle de la tension du bus continu  $v_{DC}$  et du courant d'entrée du convertisseur  $i_1$  juste avant et après la stabilisation. Ces résultats viennent appuyer ceux obtenus en simulation et présentés en Fig. 12.

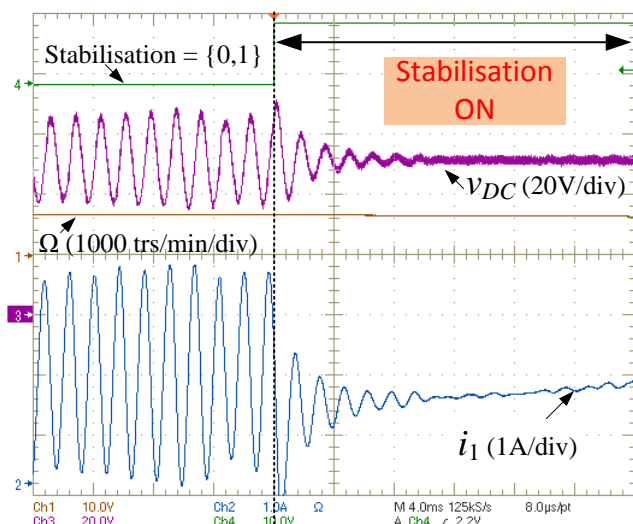


Fig.16 Résultats expérimentaux : zoom sur la stabilisation des grandeurs  $v_{DC}$  et  $i_1$ .

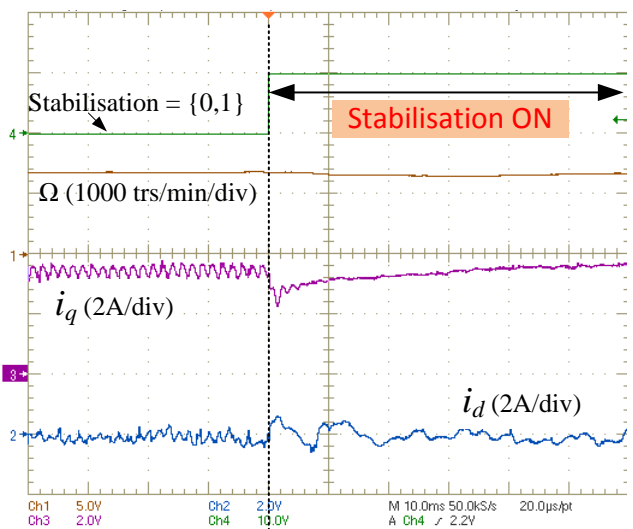


Fig.17 Résultats expérimentaux : observation des courants de machine lors de la stabilisation.

Les courants côté machine  $i_d$  et  $i_q$  sont quant à eux présentés en Fig. 17 avant et après la stabilisation. Les ondulations visibles sur le courant  $i_q$  (et donc sur le couple de la machine) sont fortement atténuées après stabilisation, ce qui valide également la Fig.12 et la stabilisation proposée.

Tableau 1. Paramètres de simulation et expérimentaux

Symbole	Description	Valeur
$C$	Condensateurs	$60 \mu F$
$L$	Inductances	$1000 \mu H$
$r$	Résistances	$0.5 \Omega$
$v_s$	Tension de source	$50 V$

$l_d = l_q$	Inductances statoriques machine	$4.7 \cdot 10^{-3} H$
$J$	Coefficient d'inertie de la machine	$490 \cdot 10^{-7} kg \cdot m^2$
$p$	Nombre de paires de pôles	4
$\psi_f$	Flux des aimants permanents	$0.082 Wb$
$f$	Frottements visqueux	$0.0135 Nms$
$P_n$	Puissance nominale de la machine	$500 W$

## 5. CONCLUSIONS

Ce travail a présenté un moyen de supprimer les phénomènes instables qui peuvent apparaître lorsque les onduleurs à Quasi-Z-source ne sont pas commandés. Ces derniers peuvent effectivement être utilisés de manière passive (sans élévation de tension) lorsque la tension de source est suffisante pour contrôler le moteur. C'est dans ces états particuliers que des phénomènes d'instabilité peuvent survenir surtout si l'utilisateur cherche à diminuer la taille des éléments passifs dans le but de réduire l'encombrement du réseau embarqué. Après avoir étudié de manière théorique la stabilité du système et repéré ses zones instables, nous avons proposé un moyen de les stabiliser par la commande par ajout d'un terme proportionnel aux ondulations de la tension du bus continu perturbée s'ajoutant à la référence de tension d'axe  $q$  de la machine. Les résultats, validés théoriquement et par simulation ont finalement été validés expérimentalement sur banc d'essai au laboratoire. Le comportement instable du système a ainsi pu être corrigé permettant de travailler avec des condensateurs peu volumineux et garantissant une maîtrise de la qualité des signaux (courant de batterie, tension du bus continu, mais aussi courants dans la machine).

## 6. REFERENCES

- [1] J. Anderson, F.Z. Peng, « Four Quasi-Z-Source Inverters », IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC) 2008, Rhodes (Grèce).
- [2] Minh-Khai Nguyen, Young-Cheol Lim, Geum-Bae Cho, « Switched-Inductor Quasi-Z-Source Inverter », IEEE Transactions on Power Electronics, 2011.
- [3] F.Z. Peng, « Z-source inverter », IEEE Industry Applications Conference 2002, Pittsburgh (USA).
- [4] A.H. Rajaei, S. Kaboli, A. Emadi, « Sliding-mode control of a z-source inverter », IEEE Industrial Electronics Conference (IECON) 2008, Orlando (USA).
- [5] W.T. Franke, M. Mohr, F.W. Fuchs, « Comparison of a z-source inverter and a voltage-source inverter linked with a dc/dc-boost-converter for wind turbines concerning their efficiency and installed semiconductor power », IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC) 2008, Rhodes (Grèce).
- [6] A. Battiston, J.P. Martin, E.H. Miliani, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, « Comparison Criteria For Electric Traction System Using Z-source/Quasi Z-source Inverter and Conventional Architectures », IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014.
- [7] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon, « Flatness and defect of non-linear systems : introductory theory and examples », Internal Journal of Control, 1995.
- [8] A.M. Rahimi, A. Emadi, « An analytical investigation of dc/dc power electronics converters with constant power loads in vehicular power systems », IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009.
- [9] Jiabin Wang, D. Howe, « A power shaping stabilizing control strategy for dc power systems with constant power loads », IEEE Transactions on Power Electronics, 2008.

- [10] A. Battiston, J.P. Martin, E.H. Miliani, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, « Control of a PMSM fed by a Quasi Z-source inverter based on Flatness Properties and Saturation Schemes », IEEE European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) 2013, Lille (France).
- [11] A.B. Awan, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, « Nonlinear Stabilization of a dc-bus Supplying a Constant Power Load », IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) 2009, Houston (USA).