



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

Alexandre Battiston, El-Hadj Miliani, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar

## ► To cite this version:

Alexandre Battiston, El-Hadj Miliani, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar. Stabilité et Stabilisation d'une Machine Synchrone Alimentée par un Onduleur à Quasi Z-source. SGE 2014, Symposium de Génie Electrique, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065254

**HAL Id: hal-01065254**

**<https://hal.science/hal-01065254>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Stabilité et Stabilisation d'une Machine Synchrone Alimentée par 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 Énergies 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 est un convertisseur de type DC-AC élévateur. Il permet 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 de la machine sur une large plage de vitesse mais permet également de réduire les 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. Certains problèmes de stabilité peuvent alors apparaître et il est nécessaire de mettre en place des systèmes de stabilisation pour garantir un fonctionnement optimal du convertisseur.

**MOTS-CLES** –Onduleur à Quasi Z-source, MSAP, Stabilité, Stabilisation, Contrôlabilité, Platitude.

## 1 Introduction

L'onduleur à Quasi Z-source (figure 1) est un convertisseur qui est apparu dans la littérature scientifique en 2011 [1]. Il fait partie de la famille des onduleurs à *source impédante* dont le plus célèbre est l'onduleur à Z-source [2]. Ce convertisseur DC-AC 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 la caractéristique statique d'élévation ( $v_{DC}/v_s$ ) en considérant

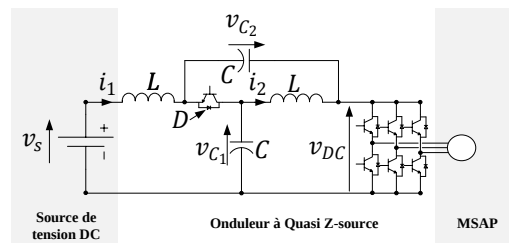


FIGURE 1 – Système de traction électrique où la machine est alimentée par un onduleur à Quasi Z-source

les deux séquences de fonctionnement du convertisseur, et qui dépendent de l'état de court-circuit ou non de l'onduleur. Afin de simplifier l'étude, les schémas équivalents des figures 2(a) et 2(b) pourront être utilisés. Les détails ne seront pas donnés dans ce résumé, mais le rapport d'élévation de ce convertisseur est donné par :

$$\frac{v_{DC}}{v_s} = \frac{1}{1 - 2.d} \quad \text{avec} \quad d \in \left[0, \frac{1}{2}\right] \quad (1)$$

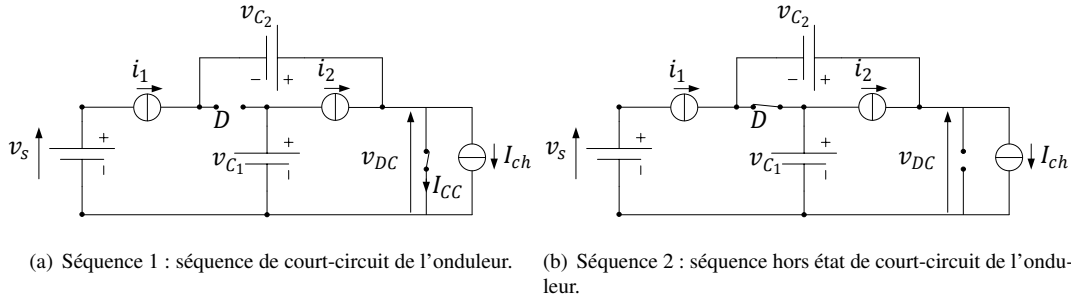


FIGURE 2 – Modèles équivalents par séquence de fonctionnement pour l'établissement du modèle d'état.

La plupart des auteurs dans la littérature scientifique traitant des onduleurs à source impédante ne présentent que rarement des résultats avec étude de transitoires et cycles de fonctionnement. La stabilité n'est ainsi jamais prise en compte car ils étudient ces onduleurs en phase d'élévation de la tension [3], ce qui repousse les limites de stabilité. Dans cet article, la tension du bus continu ne sera élevée qu'en cas de nécessité, ceci dans le but de réduire les pertes dans l'onduleur (commutation et conduction) [4, 5]. 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 instables, 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, un contrôle basé sur les propriétés de platitude différentielle [6] sera implémenté. Il ne sera cependant pas détaillé dans cet article. Après une présentation de l'étude de stabilité du système et une validation en simulation sur un profil de vitesse en section 2, le stabilisateur ajouté sera présenté et validé en section 3 avant une conclusion de l'étude donnée en section 4.

## 2 Étude de la stabilité du système de traction

Lorsque la tension de source doit être élevée selon la caractéristique statique (1), 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 la machine, l'onduleur à Quasi Z-source n'est plus contrôlé ( $d = 0$ ) et il se comporte comme un onduleur de tension classique muni d'un filtre passif d'entrée imposant la somme des tensions capacitives ( $v_{C1} + v_{C2}$ ) en entrée d'onduleur. Des phénomènes d'instabilité 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

Cet état particulier où l'onduleur à Quasi Z-source n'est plus commandé pour élever la tension de source influe sur la stabilité de l'ensemble. Elle peut être étudiée en considérant la machine bien commandée, c'est-à-dire vue comme une charge absorbant une puissance constante  $P_0$  [7, 8](voir figure 3). L'étude *petit signal* de ce système par étude des valeurs

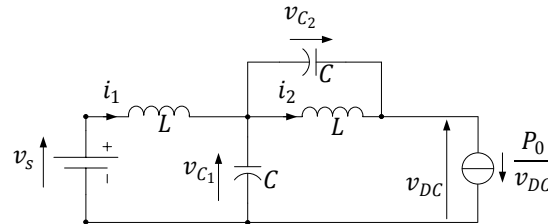


FIGURE 3 – Schéma équivalent de l'onduleur à Quasi Z-source quand il n'est pas commandé.

propres de sa matrice jacobienne mène à la relation (2) bien connue et qui permet de garantir une matrice jacobienne définie négative (valeurs propres à partie réelle négative).

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

où  $r$  représente la résistance interne des bobines d'inductance  $L$ . Cette relation est vérifiée en figure 4 où plusieurs valeurs de condensateurs sont testées (de 100 à 500  $\mu\text{F}$ ). À noter que l'évaluation de la stabilité est effectuée sur le système de la figure 1 et non pas sur celui simplifié de la figure 3. Dans les systèmes embarqués de traction électrique, le but

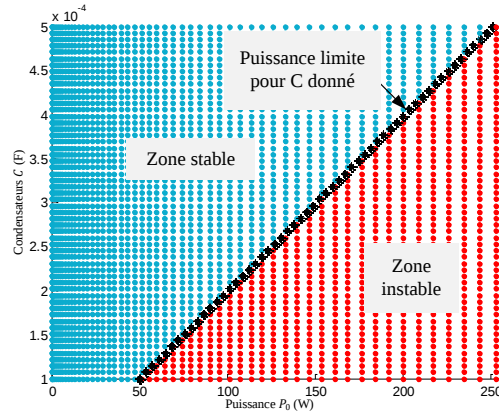
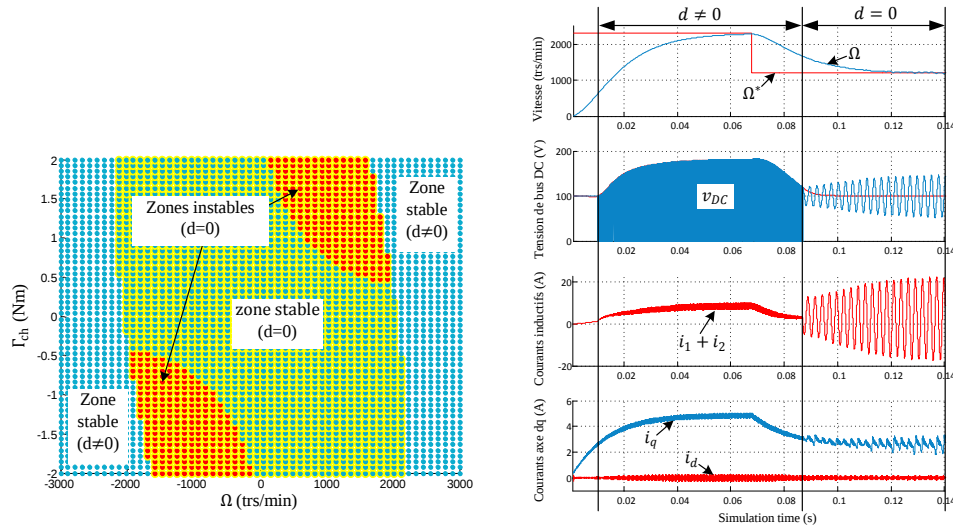


FIGURE 4 – Étude de la stabilité du système pour différentes valeurs de condensateurs.

étant de minimiser la taille des filtres et de leurs éléments passifs, la figure 4 montre que toute réduction de la valeur de condensateurs de l'onduleur à Quasi Z-source doit s'accompagner d'un dispositif stabilisant pour repousser les limites de stabilité quand la tension de source n'est pas élevée.

## 2.2 Étude de la stabilité sur l'ensemble de la zone de fonctionnement

En figure 5(a), l'étude de stabilité est menée sur une plus grande plage de fonctionnement de la machine considérée (machine utilisée en laboratoire) avec une valeur de condensateur de 180  $\mu\text{F}$ . Les résultats de l'étude sont représentés dans le plan couple de charge - vitesse mécanique. Cette figure témoigne de la perte de stabilité dans la zone où l'onduleur



(a) Étude de la stabilité du système représenté dans le plan  $\Gamma_{ch} - \Omega$  pour  $C = 180 \mu\text{F}$ . (b) Validation par simulation de la perte de stabilité sur un profil de vitesse à deux valeurs de consigne.

FIGURE 5 – Étude de la stabilité du système sur la zone de fonctionnement de la machine.

à Quasi Z-source n'élève pas la tension de source ( $d = 0$ ). Les zones instables sont représentées par des points rouges. Elles correspondent au fait que la puissance limite a été franchie, ce qui coïncide avec l'étude précédente. 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. Il est donc nécessaire de stabiliser uniquement la zone où le rapport cyclique est nul. Un résultats de simulation est donné en figure 5(b). Un profil de vitesse est donné avec deux valeurs de consigne : 2300 trs/min et 1200 trs/min. La première contraint la tension de source à être élevée par injection d'un rapport cyclique et court-circuits de bras d'onduleur. Cela

s'observe lorsque la tension  $v_{DC}$  est *découplée* et évolue entre une valeur maximale (valeur de tension vue par l'onduleur et la machine) et une valeur nulle lors des court-circuits. Ainsi, on vérifie bien que lorsque  $d \neq 0$ , aucun phénomène instable n'apparaît. En revanche, pour la seconde valeur d'échelon (1200 trs/min), la tension  $v_s = 100 \text{ V}$  étant suffisante pour contrôler la machine à cette vitesse, le rapport cyclique est maintenu à zéro. Cela contraint les grandeurs d'entrée  $i_L = i_1 + i_2$  et  $v_{DC}$  à n'être plus contrôlées. On entre ainsi dans une zone instable du fait que la puissance demandée dépasse la puissance limite.

### 3 Stabilisation de l'onduleur à Quasi Z-source quand $d = 0$

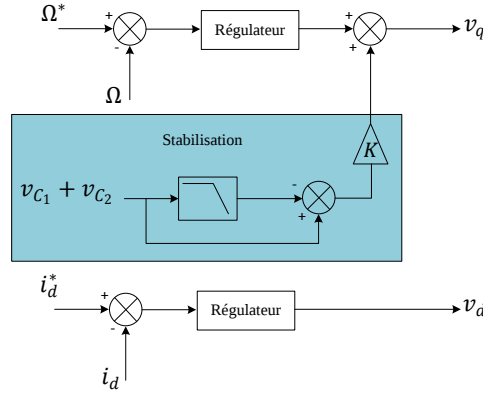
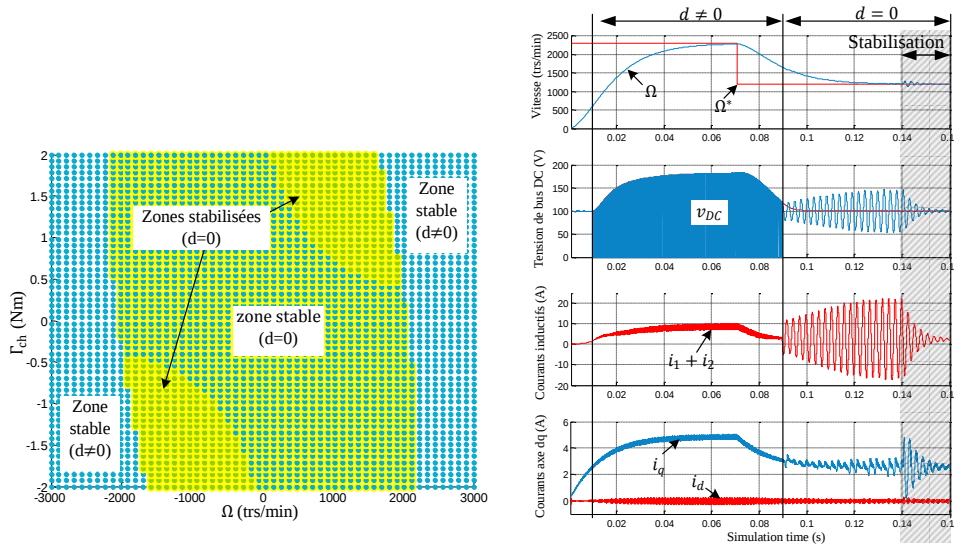


FIGURE 6 – Synopsis de commande simplifié munie du stabilisateur.

Dans cette partie est proposé un moyen de stabilisation par la commande de l'ensemble du système. Il agira en modifiant légèrement la référence de tension d'axe  $q$  de la machine en introduisant une image des ondulations de la somme des tensions capacitives provoquées par l'instabilité (voir figure 6). Le paramètre  $K$  est défini par étude de la stabilité (non détaillée ici) afin de stabiliser les régions instables. Des détails seront donnés dans l'article final. Le choix d'agir sur la tension  $v_q$  se justifie par le fait que la commande considérée est une commande par platitude à une boucle, et qui permet de contrôler l'ensemble du système {onduleur à Quasi Z-source + MSAP}. Les détails de cette commande ne seront pas donnés dans ce résumé mais peuvent être trouvés dans l'article [9]. Généralement, dans les structures de commande à deux boucles (boucles internes de régulation des courants  $i_d$  et  $i_q$  et boucle externe de régulation de la vitesse  $\Omega$ ), c'est la référence du courant d'axe  $q$  qui est modifiée pour que les régulateurs rapides de courant s'opposent à l'instabilité [10]. Ici, c'est le régulateur de vitesse, qui assurera le retour à l'état stable. En figure 7(a), le même diagramme que précédemment



(a) Étude de la stabilisation du système représenté dans le plan  $\Gamma_{ch} - \Omega$  pour  $C = 180 \mu F$ . (b) Validation par simulation de la stabilisation du système après perte de stabilité.

FIGURE 7 – Étude de la stabilité et de la stabilisation du système sur la zone de fonctionnement de la machine.

est tracé et l'effet de la stabilisation est mis en avant. Les zones qui étaient instables ont été stabilisées et le domaine pour lequel l'onduleur à Quasi Z-source n'est pas commandé est à présent toujours stable. Les résultats de simulation présentés en figure 7(b) mettent en lumière l'effet de la stabilisation sur le système. L'essai réalisé est identique à celui de la figure 5(b) et la stabilisation est activée à  $t = 0.14$ s. La stabilisation permet de faire converger toutes les grandeurs à leur point d'équilibre de régulation. Le système retrouve un état stable de fonctionnement. Des résultats sur cycle de vitesse seront donnés dans l'article final ainsi que des résultats expérimentaux.

## 4 Conclusion

Dans cet article a été présenté un système de traction électrique où la machine électrique est alimentée par un onduleur à Quasi Z-source. Ce type d'onduleur est intéressant en ce sens qu'il permet d'élever une tension de source afin d'élargir le domaine de fonctionnement du moteur (survitesse par exemple) sans recourir à des stratégies de type défluxage. Lorsque la source de tension est suffisante pour assurer la contrôlabilité de la machine, il n'est pas nécessaire de commander l'onduleur à Quasi Z-source (c'est-à-dire insérer des états supplémentaires de court-circuits de bras) et la source impédante amont se comporte comme un filtre passif du second ordre. C'est lors de ces phases où aucun rapport cyclique n'est injecté qu'il peut survenir la perte de stabilité du système, surtout si les condensateurs ont été réduits pour diminuer l'encombrement du système dans des applications de type embarqué. Il est alors proposé dans cet article d'ajouter à la commande un moyen de stabilisation de l'ensemble du système agissant sur la tension d'axe  $q$  de la machine. Les résultats de simulation présentés seront validés expérimentalement sur cycle de fonctionnement en vitesse et introduits dans l'article final.

## Références

- [1] Minh-Khai Nguyen, Young-Cheol Lim, and Geum-Bae Cho. Switched-inductor quasi-z-source inverter. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(11) :3183–3191, nov. 2011.
- [2] F.Z. Peng. Z-source inverter. In *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, volume 2, pages 775–781 vol.2, oct. 2002.
- [3] A.H. Rajaei, S. Kaboli, and A. Emadi. Sliding-mode control of z-source inverter. In *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, pages 947–952, 2008.
- [4] W.-T. Franke, M. Mohr, and 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. In *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, pages 1814–1820, june 2008.
- [5] A. Battiston, J.-P. Martin, E.-H. Miliani, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar. Comparison criteria for electric traction system architectures. In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE*, pages 1–6, 2013.
- [6] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of non-linear systems : introductory theory and examples. *International Journal of Control*, 61(6) :1327–1361, 1995.
- [7] A.M. Rahimi and A. Emadi. An analytical investigation of dc/dc power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(6) :2689–2702, 2009.
- [8] Jiabin Wang and D. Howe. A power shaping stabilizing control strategy for dc power systems with constant power loads. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 23(6) :2982–2989, 2008.
- [9] A. Battiston, J.P. Martin, E.H. Miliani, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar. Control of a pmsm fed by a quasi z-source inverter based on flatness properties and saturation schemes. In *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, pages 1–10, 2013.
- [10] A.-B. Awan, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar. Nonlinear stabilization of a dc-bus supplying a constant power load. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE*, pages 1–8, 2009.