

Contrôle adaptatif des systèmes affines commutés soumis à une entrée exogène périodique inconnue par synthèse harmonique.

Encadrant P. Riedinger J. Daafouz

Historiquement, en électronique de puissance, les premiers modèles établis dans les domaines fréquentiels permettaient de représenter l'analyse harmonique du système uniquement en régime stationnaire [Middlebrook 1976]. Par la suite, des efforts importants ont été menés pour tenir compte du régime transitoire et ont conduit au développement de deux méthodes bien connues dans la littérature : « Generalised state space averaging » [Sanders 1991] et « Dynamic Phasors » [Mattavelli 1997], [Stankovic 2000]. Avec des hypothèses similaires, ces méthodes s'intéressent à l'évolution temporelle des signaux et considèrent une fenêtre glissante de leur série de Fourier en temps variant. Grâce à une linéarisation autour d'un point de fonctionnement et à une troncature de cette série, ces méthodes peuvent être exploitées pour l'analyse de stabilité et la synthèse de lois de commande. Néanmoins, l'efficacité de ces approches dépend d'un nombre d'harmoniques pris en compte et de la validité des hypothèses de simplification (linéarisation).

Plus récemment, plusieurs méthodes ont été développées pour les systèmes périodiques : « Extended Harmonic Domain, (EHD) » [Rico 2003], « Dynamic Harmonic Domain, (DHD) » [Chavez 2008], [Chavez 2010], [Ramirez 2001] et enfin « Harmonic state space (HSS) » [Wireley 1991], [Möllerstedt 2000]. Dans le cas linéaire périodique, l'idée revient à utiliser une transformation qui conduit à une représentation de la dynamique des harmoniques sous la forme d'un système linéaire temps invariant (LTI) de dimension infinie. L'analyse de stabilité et la synthèse de lois de commande sont grandement facilitées. Dès la phase de conception du contrôleur, des critères portant à la fois sur le comportement dynamique du système ainsi que sur le contenu harmonique des signaux peuvent être envisagés [Hwang 2013, Ghita 2017].

Grâce à un formalisme unifié entre toutes les méthodes citées plus haut, une avancée notable sur le contrôle de ces systèmes a été rendue possible par l'établissement de conditions nécessaires et suffisantes pour le contrôle harmonique des systèmes dynamiques [Blin 2020a], [Thèse Blin 2020]. Ces conditions nécessaires et suffisantes induisent un choix particulier sur la structure du contrôleur harmonique et permettent de garantir l'existence d'un contrôle équivalent dans le domaine temporel. Ce point est fondamental car de nombreux travaux de la littérature ne permettent pas cette équivalence et les garanties de stabilité annoncées ne sont pas démontrées. La prise en compte de cette CNS permet d'établir une fonction de Lyapunov harmonique [Zhou 2008] et permet aussi d'aboutir à des lois de contrôles stabilisantes en régime périodique pour le système original.

Objectifs de la thèse :

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux développés dans la thèse de N. Blin (CIFRE SAFRAN). Elle porte sur un sujet qui relève d'une recherche théorique dont les retombées dépassent le cadre de cette collaboration industrielle.

La modélisation harmonique offre un changement de paradigme pour l'étude des systèmes dynamiques caractérisés par des régimes permanents périodiques ou quasi périodiques car elle offre des possibilités d'analyses et de contrôles des harmoniques d'un système sans limite sur l'ordre d'approximation (ordre infini). Elle est également générique au sens où le modèle harmonique (exacte) ne dépend pas d'un choix particulier sur la période de la fenêtre glissante utilisée ; le modèle est valable quel que soit la longueur de cette fenêtre contrairement à des outils classiques utilisés par exemple dans le pilotage des machines électriques (transformée de Park, repère $lq0$) qui dépendent d'un point de fonctionnement et qui sont des approximations à l'ordre 1.

Le premier objectif de cette thèse est de développer une méthode de synthèse de lois de contrôle stabilisantes sur un équilibre harmonique pour la classe des systèmes affines commutés soumis à une entrée exogène périodiques ou quasi périodiques. La stabilisation sur un équilibre harmonique signifie que l'équilibre est caractérisé dans le domaine temporel par un régime permanent périodique. Une attention particulière sur l'établissement de critère permettant d'effectuer un choix sur ces équilibres sera nécessaire et pourra par exemple être guidé par la minimisation du taux de distorsion harmonique en plus des objectifs principaux du contrôle (poursuite d'une trajectoire, valeur moyenne de référence, etc).

En fonction des conditions d'utilisation de ces systèmes, des variations de l'entrée exogène et de certains paramètres doivent être envisagées. La dépendance des équilibres à ses variations motive le second objectif qui porte sur l'adaptation du contrôleur. Un parallèle important dans le domaine temporel avec les travaux de G. Beneux sur la commande adaptative des systèmes affines commutés peut être fait et sera une piste privilégiée de recherche. La différence avec ces travaux antérieurs est que l'entrée exogène n'est plus supposée constante et inconnue mais quasi périodique et inconnue.

Les cibles applicatives privilégiées concernent les conversions d'énergies AC-DC et DC_AC sur lesquelles les algorithmes adaptatifs développés pourront être testés.

Ce sujet théorique requiert de la part du candidat de solides connaissances en automatique et mathématiques (contrôle par fonction de Lyapunov, analyse fonctionnelle, transformée de Fourier).

Bibliographie:

[Chavez 2008] Chavez, J. and Ramirez, A. (2008), 'Dynamic harmonic domain modeling of transients in three-phase transmission lines', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, pp. 2294–2301.

[Chavez 2010] Chavez, J., Ramirez, A., Dinavahi, V., Irvani, R., Martinez, J., Jatskevich, J. and Chang, G.W. (2010), 'Interfacing techniques for time-domain and frequency-domain simulation methods', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1796–1807

[Ghita 2017] Ion Ghita, Pedro Kvieska, Dominique Beauvois, Emmanuel Godoy, Harmonic state space feedback control for AC/DC power converters, 2017 American Control Conference

[Hwang 2013] Sheng-Pu Hwang, Harmonic State-Space Modelling of an HVdc Converter with Closed-Loop Control, PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand 2013.

[Kwon 2016] Jun Bum Kwon, Xiongfei Wang, Frede Blaabjerg, Claus Leth Bak, Alan R. Wood, and Neville R. Watson, Harmonic Instability Analysis of a Single-Phase Grid-Connected Converter Using a Harmonic State-Space Modeling Method, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 52, n° 5, 2016

[Mattavelli 1997] Mattavelli, P., Verghese, G. and Stankovic, A. (1997), 'Phasor dynamic of thyristorcontrolled series capacitor systems', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, pp. 1259–1267.

[Middlebrook 1976] Middlebrook, R. and Cuk, S. , 'A general unified approach to modelling switchingconverter power stages', In Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1976.

[Mollerstedt 2000a] Mollerstedt, E. (2000a), Dynamic Analysis of Harmonics in Electrical Systems, PhD thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

[Mollerstedt 2000b] Mollerstedt, E. (2000b), 'Out of control because of harmonics-an analysis of the harmonic response of an inverter locomotive', IEEE Control Systems, Vol. 20, pp. 70–81.

[Ormrod 2013] Ormrod, J.E. (2013), Harmonic state space modelling of voltage source converters, PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

[Ramirez 2011] Ramirez, A. (2011), 'The modified harmonic domain: interharmonics', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, pp. 235–241.

[Rico 2003] Rico, J., Madrigal, M. and Acha, E. (2003), 'Dynamic harmonic evolution using the extended harmonic domain', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, pp. 587–594.

[Sandberg 2005] Sandberg, H., Mollerstedt, E. and Bernhardsson, Frequency-domain analysis of linear time-periodic systems, Automatic Control, IEEE Transactions on, Vol. 50, No. 12, December, pp. 1971-1983, 2005.

[Sanders 1991] Sanders, S., Noworolski, J., Liu, X. and Verghese, G. (1991), 'Generalized averaging method for power conversion circuits', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 2, April, pp. 251–259.

[Stankovic 2000] Stankovic, A., Mattavelli, P., Caliskan, V. and Verghese, G. (2000), 'Modeling and analysis of facts devices with dynamic phasors', In Power and Energy Society Winter Meeting, Singapore

[Wireley 1991] N. Wereley, "Analysis and control of linear periodically time varying systems," Ph.D. dissertation, Dept. Aero. Astro., Mass. Inst. Technol., Cambridge, MA, 1991.

[Zhou 2008] Jun Zhou, Derivation and Solution of Harmonic Riccati Equations via Contraction Mapping Theorem, Trans. of the society of instrument and Control Engineers, Vol.44,No.2,156/163(2008).

Quelques publications récentes en lien avec le sujet :

[Thèse Blin 2020] Nicolas Blin Modélisation par techniques harmoniques pour la commande et le filtrage actif de systèmes commutés associés appliquée à l'actionnement électrique, PhD Université de Lorraine, Décembre 2020.

[Blin 2020a] N. Blin, P. Riedinger, J. Daafouz, L. Grimaud, F. Feyel, Necessary and Sufficient Conditions for Harmonic Control, IEEE TAC en cours.

[Blin 2020b] Nicolas Blin, Pierre Riedinger, Jamal Daafouz, Louis Grimaud, Philippe Feyel. A comparison of harmonic modeling methods with application to the interconnection and the control of switched systems. European Journal of Control, Elsevier, In press, pp. In Press, Corrected Proof 2020

[Blin 2019] Nicolas Blin, Pierre Riedinger, Jamal Daafouz, Louis Grimaud, Philippe Feyel. A comparison of harmonic modeling methods with application to control of switched systems with active filtering. 17th European Control Conference, ECC'19, Jun 2019, Naples, Italy.

[Beneux 2018] G. Beneux, P. Riedinger, J. Daafouz, L. Grimaud-Salmon, Adaptive stabilization of switched affine systems with unknown equilibrium points: Application to power converters. Automatica 99 (2019) 82–91, Elsevier 2019.

[Beneux 2017a] Gaëtan Beneux, Pierre Riedinger, Jamal Daafouz, Louis Grimaud, Robust stabilization of switched affine systems with unknown parameters and its application to DC/DC Flyback converters, IEEE ACC 2017, 24-26 May, Seattle 2017.

[Beneux 2017b] Gaëtan Beneux, Pierre Riedinger, Jamal Daafouz, Louis Grimaud, Stabilisation of power converters with uncertain equilibrium: an adaptive switched approach with guarantee of stability in continuous and discontinuous conduction modes, 20th IFAC World Congress, IFAC 2017, Jul 2017, Toulouse, France. 2017.