

# Journée d'automne de l'Ecole Doctorale IAEM Lorraine



## Modélisation harmonique pour la commande de systèmes associés appliquée à l'actionnement électrique

Nicolas BLIN - [nicolas.blin@univ-lorraine.fr](mailto:nicolas.blin@univ-lorraine.fr)

Directeur de thèse : Jamal DAAFOUZ

Co-directeur de thèse : Pierre RIEDINGER

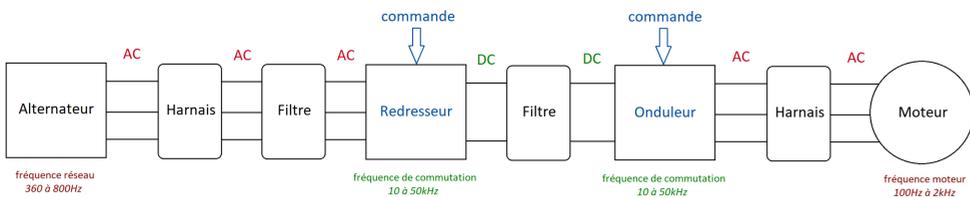


### Contexte & Motivation

#### Défis de l'industrie aéronautique

- Anticiper, comprendre et maîtriser les phénomènes de résonance et de pollution harmonique dans les chaînes d'actionnement électrique
- Réduire les dimensions et le poids des filtres d'interconnexion

#### Problématique sur les chaînes d'actionnement électrique



- Perturbation du réseau par superposition de ses fréquences électriques aux fréquences électriques moteur
- Comportements dynamiques indésirables dus aux interactions fréquentielles entre les blocs de la chaîne
- Mise en résonance des machines ou des filtres d'interconnexion, dont l'effet est possiblement déstabilisateur

La thèse est motivée par les limites des méthodes actuellement utilisées dans le cadre industriel en termes de modélisation et maîtrise du comportement harmonique

### Objectifs

Développer un modèle d'une chaîne d'actionnement électrique type de SAFRAN mettant en évidence les interactions et couplages fréquentiels entre les différents blocs ainsi que son comportement harmonique global

Les techniques harmoniques telles que les approches « Dynamic Phasors » ou « Harmonic State Space » semblent particulièrement adaptées

Concevoir à partir de ce modèle une loi de contrôle incorporant des critères sur les harmoniques ou envisageant leur suppression

Le contrôle-commande doit répondre à différents critères :

- Facteur de puissance quasi-unitaire
- Performances de la régulation de la tension du bus DC
- Performances de la régulation de la vitesse du moteur
- Respect de la norme DO-160 sur les niveaux harmoniques
- Robustesse aux incertitudes paramétriques et aux perturbations extérieures
- Complexité limitée pour permettre l'implémentation

### Méthodes harmoniques

#### Choix d'une base harmonique

- Base fonctionnelle des exponentielles complexes  $(e^{jk\omega t})_{k \in \mathbb{Z}}$  de période  $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- Choix de la période : La base contient toutes les fréquences multiples de  $f = \frac{1}{T}$

#### Changement de base

- Les variables dans la nouvelle base, appelées *phaseurs*, sont calculées par intégration des signaux sur une fenêtre glissante de longueur égale à la période de la base :

$$X_k(t) = \int_{t-T}^t x(s) e^{-jk\omega s} ds$$

- Les signaux peuvent être retrouvés à partir de leurs phaseurs par la formule :

$$\forall t > 0, \forall \tau \in ]t - T, t], \quad x(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k(t) e^{jk\omega \tau}$$

#### Modélisation harmonique

La représentation d'un système LTV (espace d'état linéaire avec des matrices temps-variantes) dans la base harmonique  $(e^{jk\omega t})_{k \in \mathbb{Z}}$  est de la forme :

$$\dot{X}(t) = (\mathcal{A}(t) - \mathcal{N})X(t) + \mathcal{B}(t)U(t)$$

$$Y(t) = \mathcal{C}(t)X(t) + \mathcal{D}(t)U(t)$$

Avec  $X(t), U(t), Y(t)$  les vecteurs contenant respectivement les harmoniques d'état, d'entrée et de sortie (leurs phaseurs),  $\mathcal{A}(t), \mathcal{B}(t), \mathcal{C}(t), \mathcal{D}(t)$  les formes de Toeplitz des matrices temporelles contenant leurs harmoniques (leurs phaseurs) selon la structure

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} A_0 & \dots & A_{-h} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_h & \dots & A_0 \end{pmatrix} \quad \text{et la matrice de différentiation } \mathcal{N} = \begin{pmatrix} -j\omega & & \\ & \ddots & \\ & & 0 \\ & & & \ddots & \\ & & & & j\omega \end{pmatrix}$$

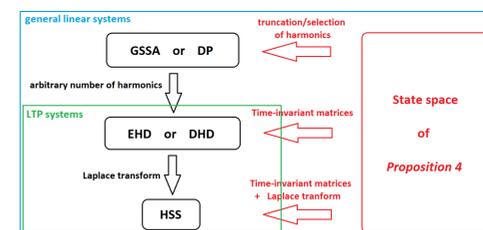
contenant toutes les dérivées des fonctions exponentielles dans la base harmonique. En pratique, le modèle doit être tronqué à un ordre maximal d'harmoniques  $h$ .

#### Avantages et limites

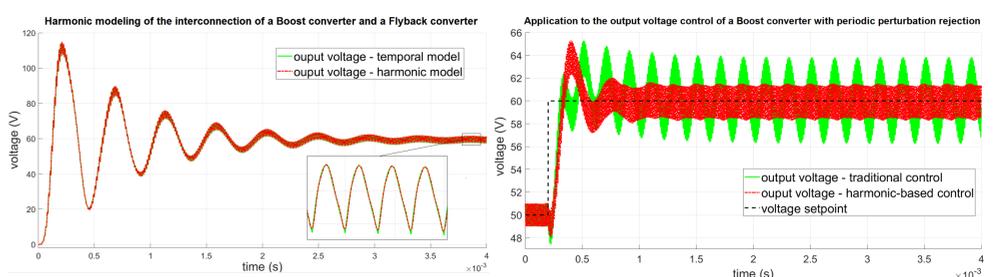
- ✓ Mise en évidence des dynamiques et des couplages harmoniques
- ✓ Représentation des systèmes LTP (espaces d'état linéaires avec des matrices  $T$ -périodiques) par des modèles LTI (matrices constantes) dans la base harmonique de même période  $T$  permettant l'utilisation des outils classiques d'analyse et de contrôle des systèmes linéaires (diagrammes de Bode, ...)
- ✓ Possibilité de contrôler directement les harmoniques des signaux
- ✗ La précision du modèle tronqué dépend de la période de la base harmonique et nécessite de connaître les fréquences fondamentales des signaux
- ✗ La complexité augmente avec le nombre d'harmoniques pris en comptes

### Résultats

- Etat de l'art des méthodes de modélisation harmonique (Generalized State-Space Averaging (GSSA); Dynamic Phasors (DP); Extended and Dynamic Harmonic Domain (EHD/DHD); Harmonic State Space (HSS)) et établissement d'une méthodologie générale unifiant les approches existantes : Proposition 4 dans l'article présenté et publié à la European Control Conference 2019<sup>1</sup>



- Démonstration des avantages pour l'interconnexion et le contrôle de systèmes, notamment commutés : papier soumis au European Journal of Control



- Modèles harmoniques des principaux blocs de la chaîne d'actionnement (alternateur-redresseur-onduleur-moteur) et de leur interconnexion

**Perspectives (Proof of concept) :** Commande de la chaîne d'actionnement avec utilisation des techniques harmoniques pour effectuer du filtrage actif côté redresseur et rejeter les harmoniques sur les courants réseaux

<sup>1</sup> N. Blin & al. (2019). A comparison of harmonic modeling methods with application to control of switched systems with active filtering. In 17th European Control Conference, ECC'19.