

Modélisation & Conception d'un Modulateur Auto-Oscillant Adapté à l'Émulation d'Organes de Puissance

Jean-Christophe Olivier

Institut de Recherche en Électronique et Électrotechnique de Nantes Atlantique
Université de Nantes

Encadrant: J.C. Le Claire
Directeur de thèse: L. Loron

5 Décembre 2006

Thèse réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE avec ELECTRONAVALÉ INDUSTRIE

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Contexte de l'étude

Emulation d'organes de puissance

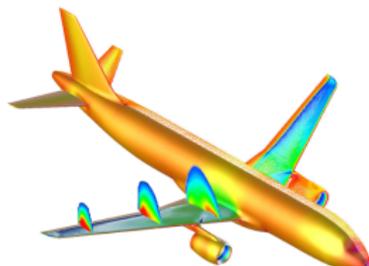
Pour qui ?

- Secteurs fortement concurrentiels (automobile, aéronautique, ...)
- Systèmes électriques complexes & évolutifs



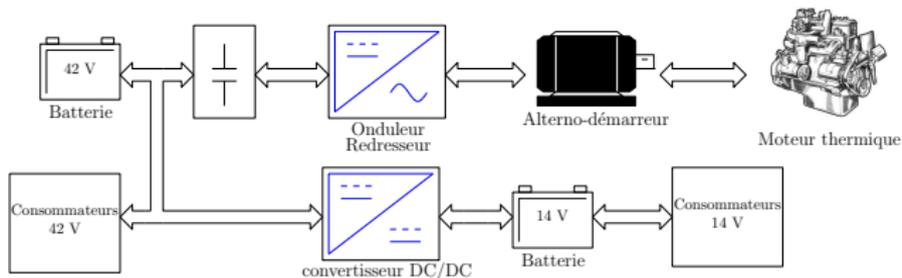
Pourquoi ?

- Diminuer les temps et coûts de développement
- Éviter la présence d'organes "dangereux"
- Rester au plus proche du système réel



Exemple

Véhicule automobile



Éléments à tester

- L'onduleur/redresseur
- Convertisseur DC/DC
- Échanges d'NRJ entre organes

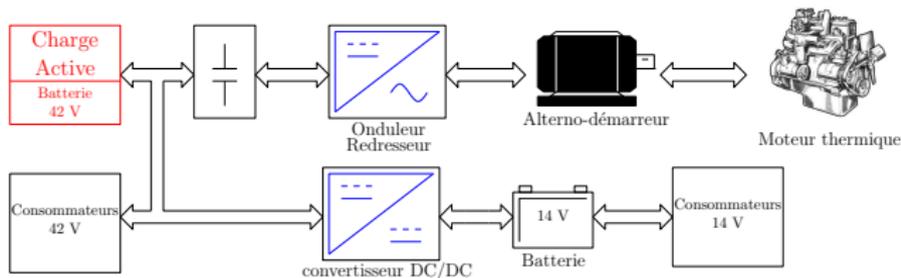
SYSTÈME COMPLEXE. BANC D'ESSAI LOURD À
METTRE EN PLACE

De nombreux organes

- Composants électrochimiques (batteries)
- Machines tournantes (démarrage, alternateur)
- Charges auxiliaires

Exemple

Véhicule automobile



Éléments à tester

- L'onduleur/redresseur
- Convertisseur DC/DC
- Échanges d'NRJ entre organes

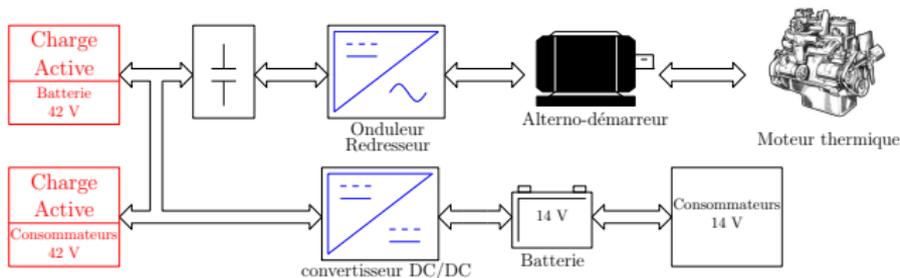
De nombreux organes

- Composants électrochimiques (batteries)
- Machines tournantes (démarreur, alternateur-démarreur)
- Charges auxiliaires

SYSTÈME COMPLEXE. BANC D'ESSAI LOURD À METTRE EN PLACE

Exemple

Véhicule automobile



Éléments à tester

- L'onduleur/redresseur
- Convertisseur DC/DC
- Échanges d'NRJ entre organes

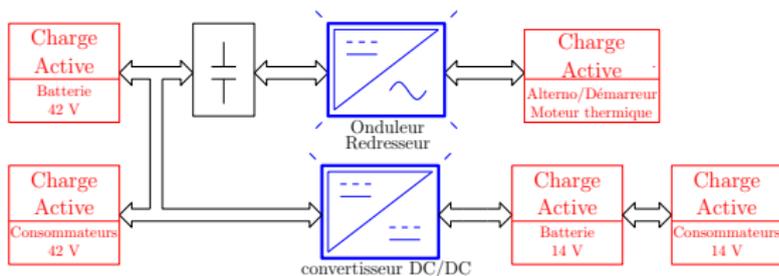
De nombreux organes

- Composants électrochimiques (batteries)
- Machines tournantes (démarreur, alternateur-démarreur)
- Charges auxiliaires

SYSTÈME COMPLEXE. BANC D'ESSAI LOURD À METTRE EN PLACE

Exemple

Véhicule automobile



Éléments à tester

- L'onduleur/redresseur
- Convertisseur DC/DC
- Échanges d'NRJ entre organes

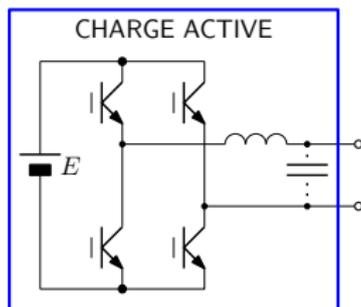
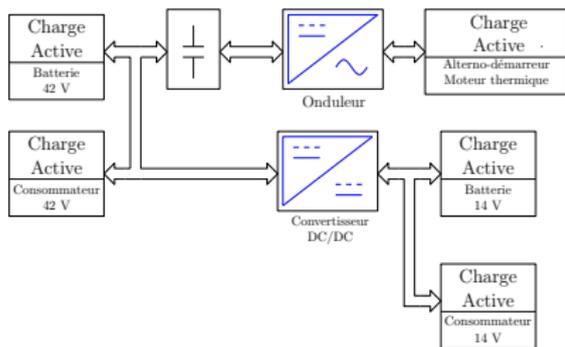
De nombreux organes

- Composants électrochimiques (batteries)
- Machines tournantes (démarreur, alterno-démarreur)
- Charges auxiliaires

SYSTÈME COMPLEXE. BANC D'ESSAI LOURD À METTRE EN PLACE

Exemple

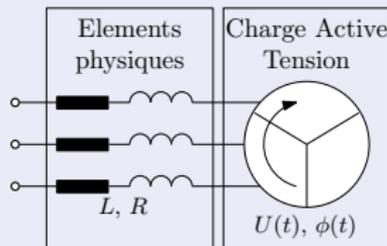
Remplacement par des C.A.



ORGANES À ÉMULER DE NATURES TRÈS DIFFÉRENTES : BATTERIE \neq MOTEUR ÉLECTRIQUE

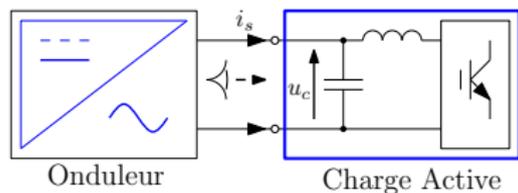
Émulation de machines

NOTRE PRINCIPALE PROBLÉMATIQUE



Problème pour l'émulation de f.e.m.

Emulation de machines

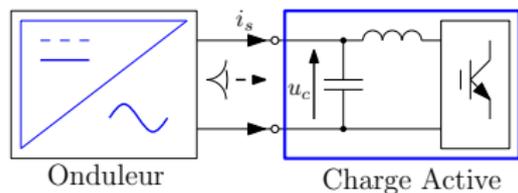


Contraintes

- Reproduire des f.e.m de plusieurs dizaines de volts et de quelques kHz
- Paramètres importants : Puissances actives/réactives échangées

Problème pour l'émulation de f.e.m.

Emulation de machines



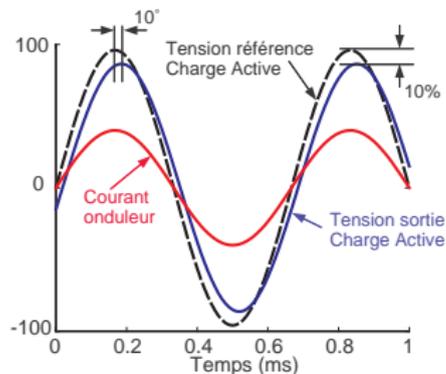
Contraintes

- Reproduire des f.e.m de plusieurs dizaines de volts et de quelques kHz
- Paramètres importants : Puissances actives/réactives échangées

Erreurs de régulation

- Erreur de 10 % sur le module
- Erreur de 10° sur la phase

Emulation de résistance (1500 Hz)



Erreurs d'émulation

- $P_{desiree} = 5 \text{ kW} \rightarrow P_{emulee} = 4.4 \text{ kW} (\varepsilon = 11 \%)$
- $Q_{desiree} = 0 \text{ VAR} \rightarrow Q_{emulee} = 780 \text{ VAR}$

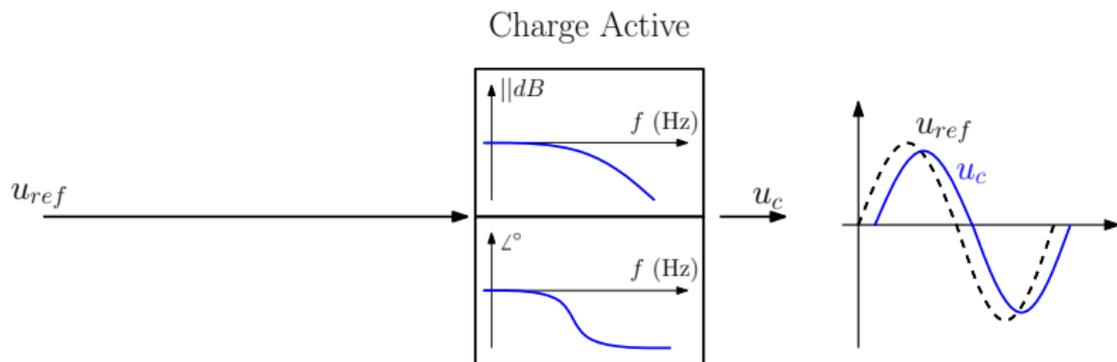
Problème pour l'émulation de f.e.m.

Ce qui peut nous sauver...

Si la Charge Active se comporte comme un système linéaire

En régime permanent sinusoïdal ou lentement variable (glissant)

- Comportement simple à prédire (indépendant de l'amplitude des signaux)
- Compensation possible Module/Argument



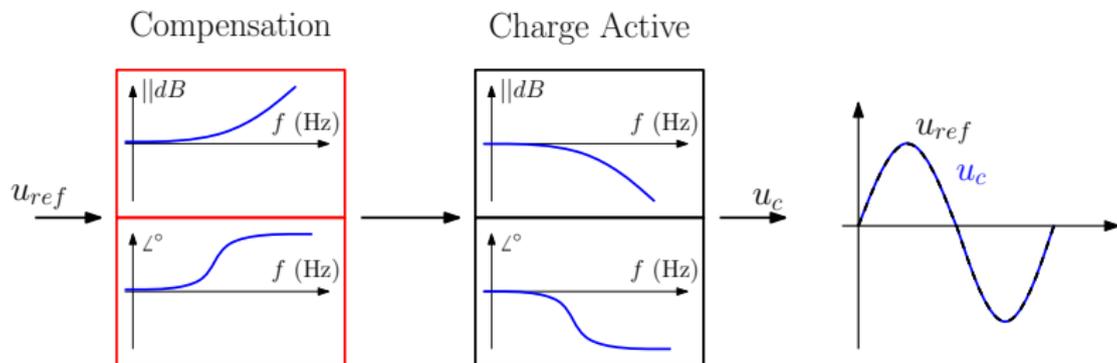
Problème pour l'émulation de f.e.m.

Ce qui peut nous sauver...

Si la Charge Active se comporte comme un système linéaire

En régime permanent sinusoïdal ou lentement variable (glissant)

- Comportement simple à prédire (indépendant de l'amplitude des signaux)
- Compensation possible Module/Argument



- Bonne compensation = Bien connaître le modèle de la Charge Active
- Quel procédé utiliser pour la régulation ?

Conditions à remplir

Ce qu'il faudrait...

Cahier des charges

- Puissances : $\simeq 5$ kW
- Bande passante : quelques kHz
- Comportement en régulation le plus constant possible
 - ▶ Précision sur le déphasage de quelques degrés
 - ▶ Précision sur le module de quelques %
- Fréquence de commutation maximale des interrupteurs bien contrôlée (< 20 kHz)

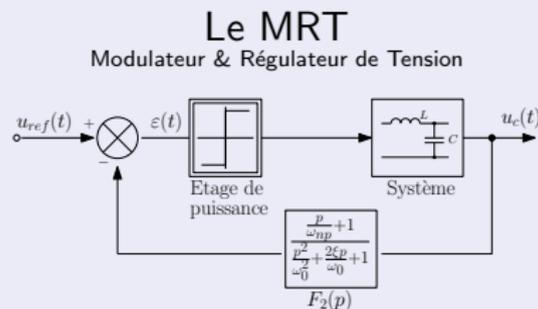
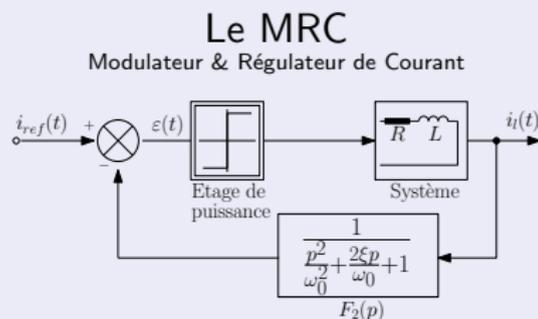
Conditions à remplir

Ce qu'il faudrait...

Cahier des charges

- Puissances : $\simeq 5 \text{ kW}$
- Bande passante : quelques kHz
- Comportement en régulation le plus constant possible
 - ▶ Précision sur le déphasage de quelques degrés
 - ▶ Précision sur le module de quelques %
- Fréquence de commutation maximale des interrupteurs bien contrôlée ($< 20 \text{ kHz}$)

Proposition (J.C. Le Claire, 1999)



Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

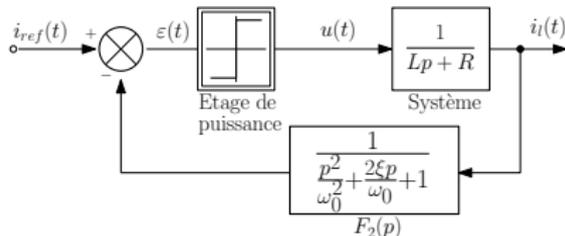
- Conclusion
- Perspectives

Régulateur auto-oscillant : Le MRC

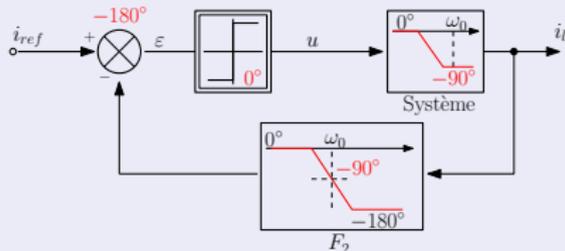
Mise en oscillation

Objectifs

- Réalise à la fois la fonction de régulation & de modulation
- Être indépendant des paramètres du système
- Fonctionnement sur charges inductives



Mise en Oscillation



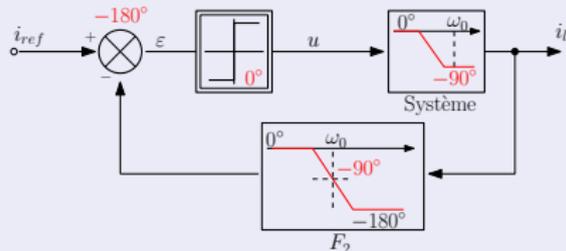
Régulateur auto-oscillant : Le MRC

Mise en oscillation

Objectifs

- Réalise à la fois la fonction de régulation & de modulation
- Être indépendant des paramètres du système
- Fonctionnement sur charges inductives

Mise en Oscillation



Condition d'oscillation

Passage par -180° de la partie linéaire du système

Bande passante de la charge $\ll \omega_0$

$$\omega_{osc} = \omega_0$$

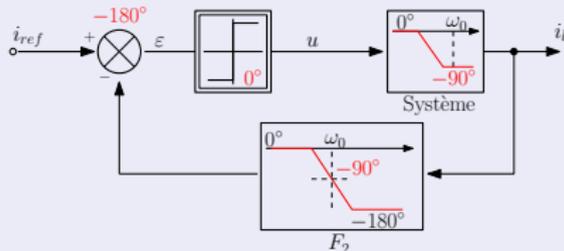
Régulateur auto-oscillant : Le MRC

Mise en oscillation

Objectifs

- Réalise à la fois la fonction de régulation & de modulation
- Être indépendant des paramètres du système
- Fonctionnement sur charges inductives

Mise en Oscillation



Condition d'oscillation

Passage par -180° de la partie linéaire du système

Bande passante de la charge $\ll \omega_0$

$$\omega_{osc} = \omega_0$$

Une comparaison

MLI hystérésis

MRC

$$f_c = \frac{E}{4 L d}$$

$$f_c = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

Avantages

- Régulation quasi-indépendante des paramètres du système
 - ▶ Résistance de charge
 - ▶ Inductance de charge
 - ▶ Tension d'alimentation
- Fréquence max. des interrupteurs connue
- Structure simple sans réglages

Inconvénients

- Système de nature fortement non-linéaire
- Comportement en boucle fermée ???
- Dépendance Régulation/Modulation = Problème de la synthèse

Avantages

- Régulation quasi-indépendante des paramètres du système
 - ▶ Résistance de charge
 - ▶ Inductance de charge
 - ▶ Tension d'alimentation
- Fréquence max. des interrupteurs connue
- Structure simple sans réglages

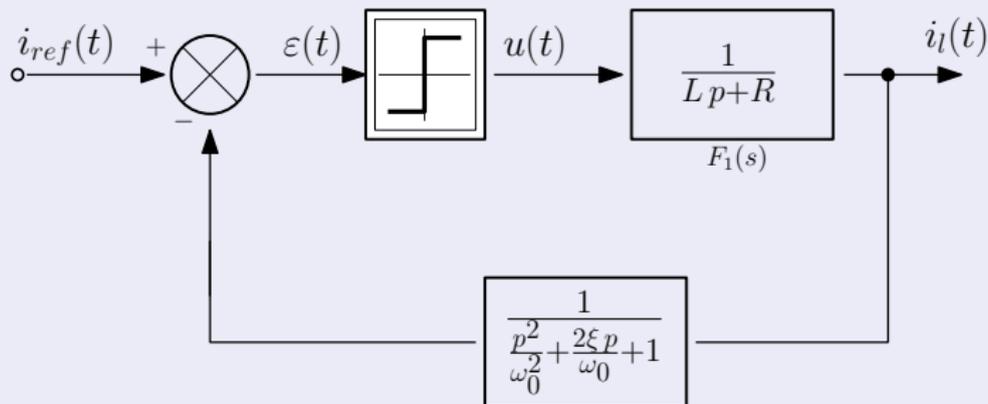
Inconvénients

- Système de nature fortement non-linéaire
- Comportement en boucle fermée ???
- Dépendance Régulation/Modulation = Problème de la synthèse

Charge Active → Bien connaître le modèle en boucle fermée

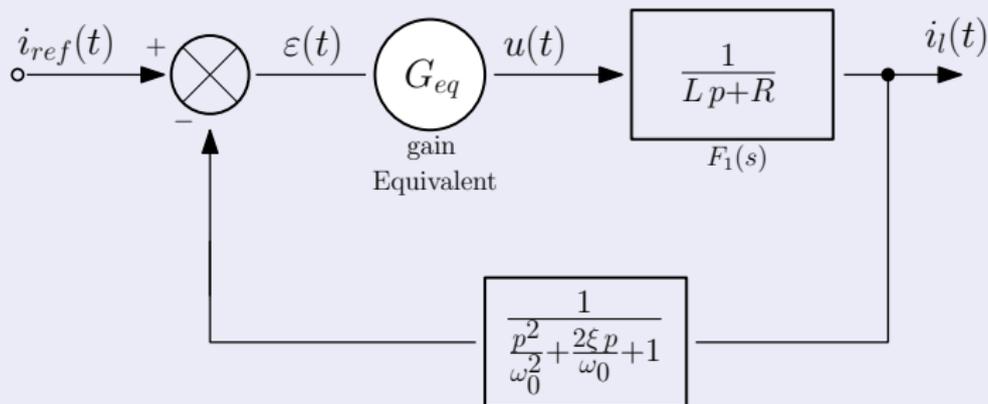
Approximation à un modèle linéaire, (J.F. Yhuel, 2002)

- Remplacement de l'étage de puissance par un gain équivalent :



Approximation à un modèle linéaire, (J.F. Yhuel, 2002)

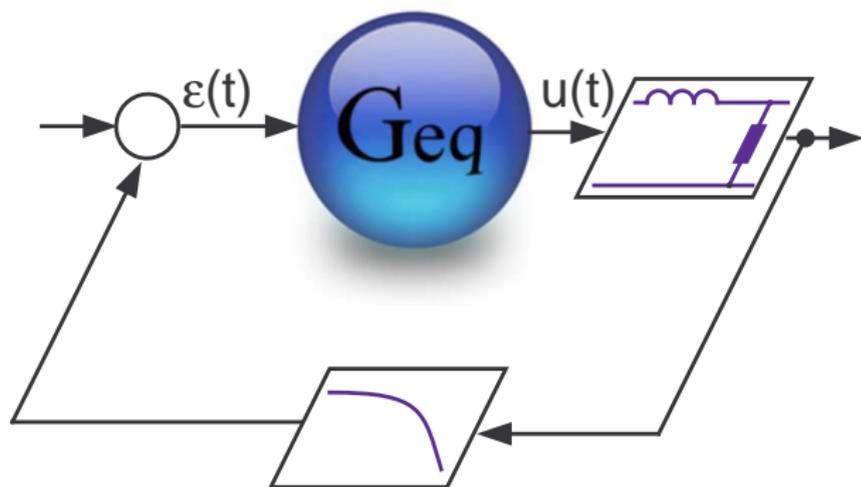
- Remplacement de l'étage de puissance par un gain équivalent :



SYSTÈME TOTALEMENT LINÉAIRE = BONNE PRÉDICTION SUR LE COMPORTEMENT DE LA CHARGE ACTIVE

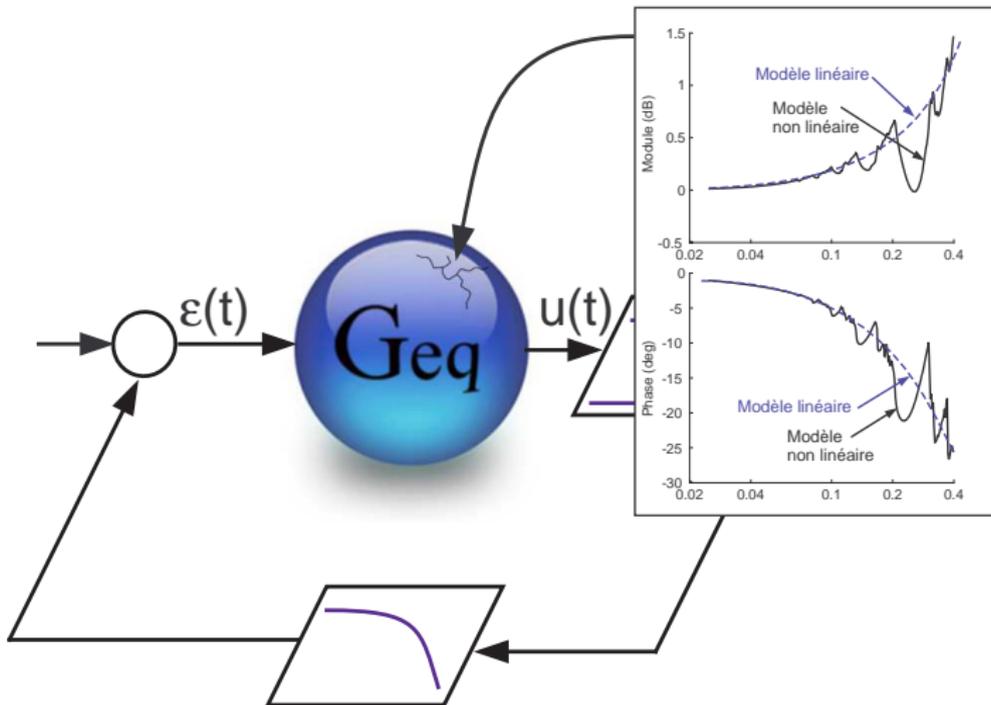
MRC & MRT

Limites du modèle linéaire



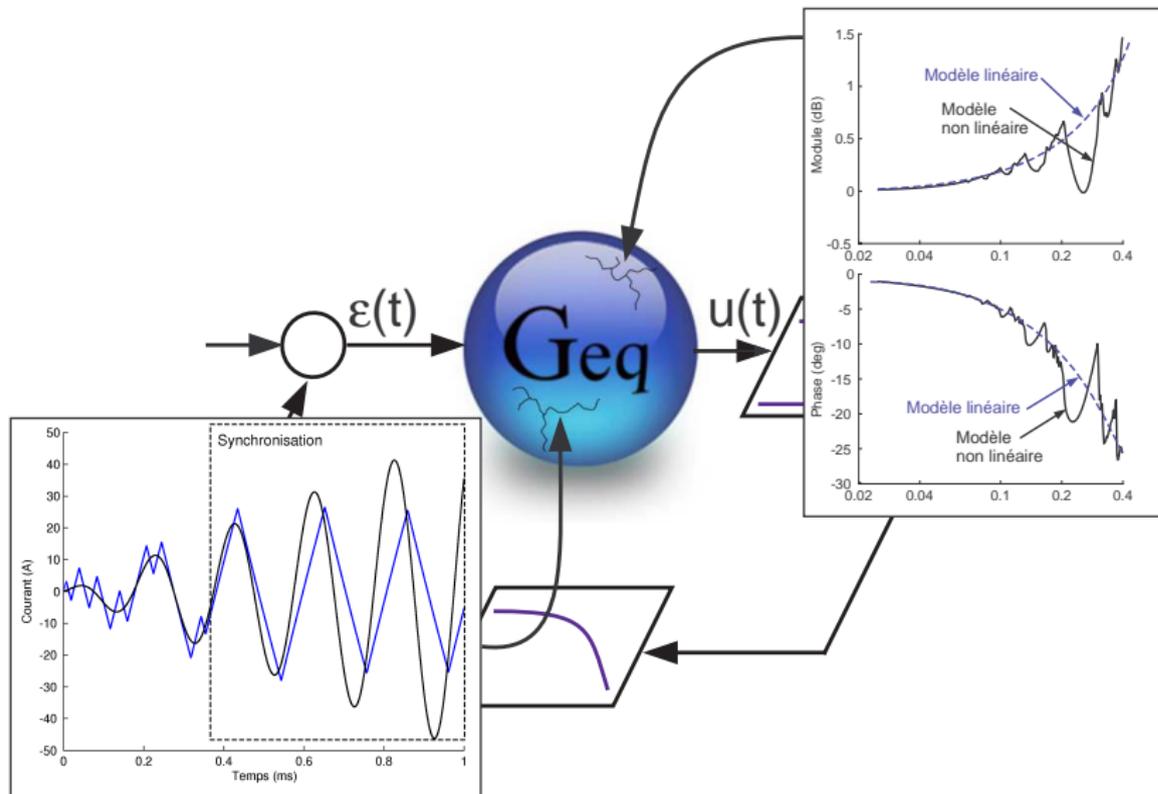
MRC & MRT

Limites du modèle linéaire



MRC & MRT

Limites du modèle linéaire



- Identifier les phénomènes non-linéaires invalidant le modèle linéaire du MRC & du MRT
- Amener un outil de synthèse général pour répondre au problème du couplage Régulation/Modulation

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

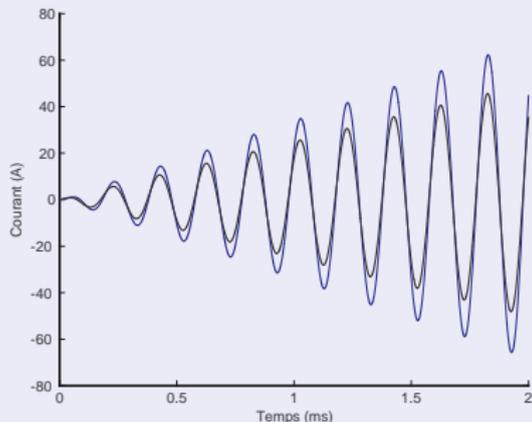
- Conclusion
- Perspectives

Phénomène de synchronisation harmonique

Système excité par un signal externe

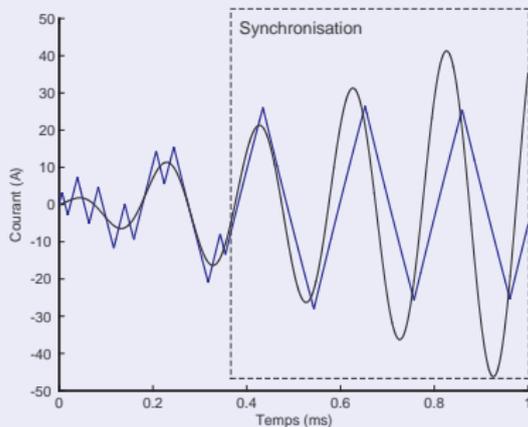
système linéaire

- Caractéristique entrée/sortie indépendante de l'amplitude des signaux



système à relais

- Caractéristique entrée/sortie dépendante de l'amplitude des signaux
- Auto-oscillations étouffées → **Synchronisation**
- Changement du comportement du système



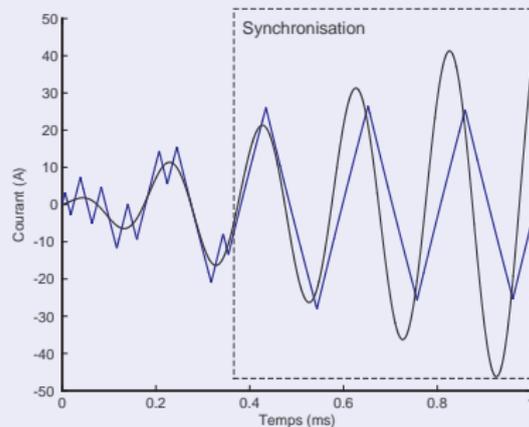
Phénomène de synchronisation harmonique

Système excité par un signal externe

CONDITIONS D'APPARITION ?
INFLUENCE SUR LE MODÈLE BASSE
FRÉQUENCE DU SYSTÈME ?

système à relais

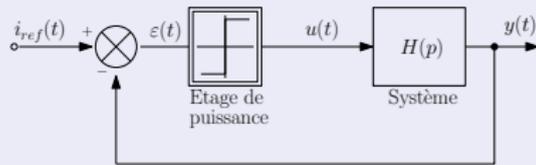
- Caractéristique entrée/sortie dépendante de l'amplitude des signaux
- Auto-oscillations étouffées → **Synchronisation**
- Changement du comportement du système



Phénomène de synchronisation harmonique

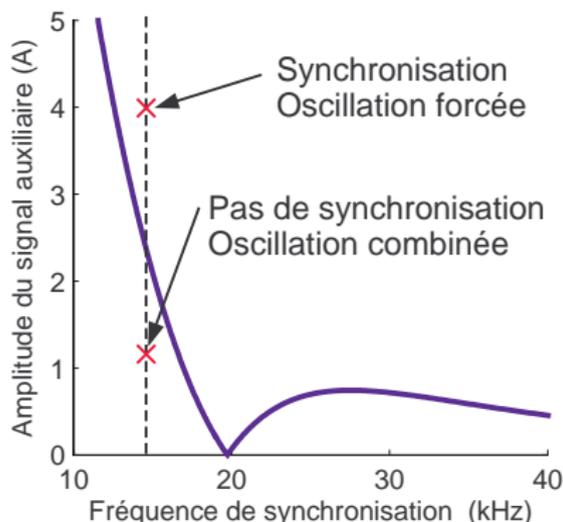
Système excité par un signal externe

Seuil de synchronisation du MRC (Tsytkin, 1962)



$$H(p) = \frac{1}{Lp + R} \frac{1}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi p}{\omega_0} + 1}$$

$$i_{ref}(t) = A_f \sin(\omega_f t + \phi_f)$$



Conditions de l'étude

- Régime permanent
- Oscillation purement sinusoïdale

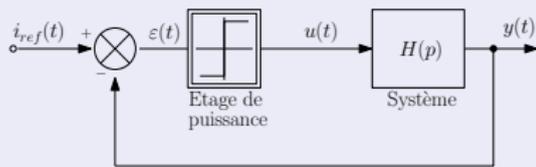
Lecture du résultat

- **Au dessus de la courbe** : Système synchronisé
- **En dessous de la courbe** : Système libre
→ Oscillations combinées

Phénomène de synchronisation harmonique

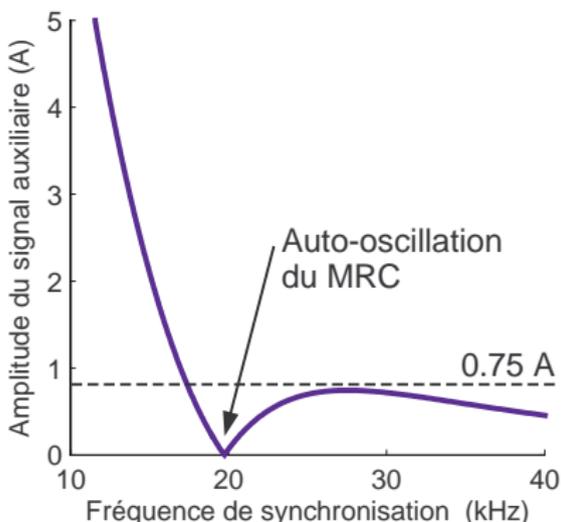
Système excité par un signal externe

Seuil de synchronisation du MRC (Tsytkin, 1962)



$$H(p) = \frac{1}{Lp + R} \frac{1}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi p}{\omega_0} + 1}$$

$$i_{ref}(t) = A_f \sin(\omega_f t + \phi_f)$$



MRC(MRT) sensible pour des fréquences proches de l'auto-oscillation et supérieures



Influence de la synchronisation du MRC sur le modèle linéaire équivalent

Phénomène de synchronisation harmonique

Influence sur le gain équivalent

Sans synchronisation (J.A. Tsytkin, J.F. Yhuel)

En continu & Approximation au 1er harmonique :

$$G_{eq} \simeq \frac{1}{-2 \operatorname{Re}\{H(j\omega_c)\}}, \quad \omega_c : \text{Fréquence de l'auto-oscillation}$$

- Indépendant de la tension d'alimentation
- Indépendant de l'amplitude des signaux

Synchronisation

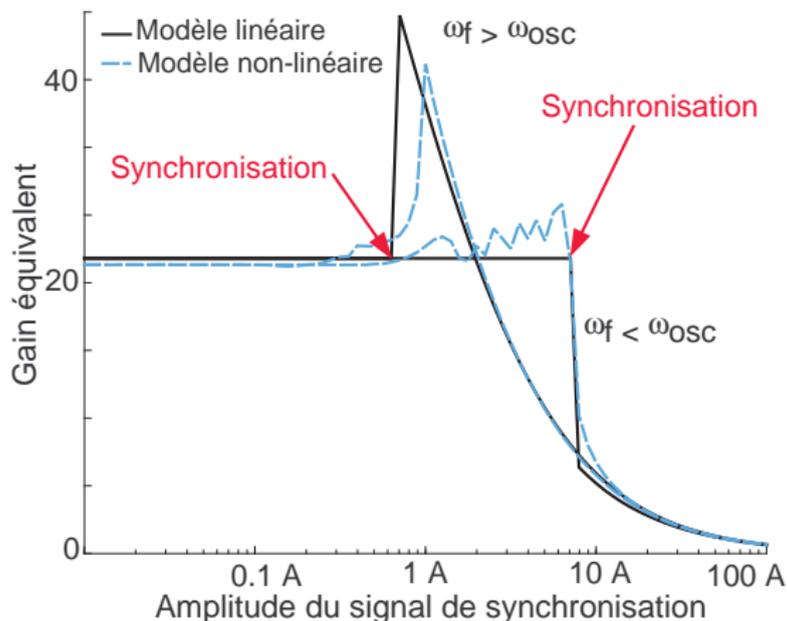
En continu & Approximation au 1er harmonique :

$$G_{eq} \simeq \frac{E}{-2E \operatorname{Re}\{H(j\omega_f)\} + A_f \pi \cos(\phi_f)}, \quad \omega_f : \text{Fréquence du signal de forçage}$$

- Dépend de la tension d'alimentation E
- Dépend de la pulsation du signal de forçage ω_f
- Dépend de l'amplitude du signal de forçage A_f

Phénomène de synchronisation harmonique

Résultats



Bilan

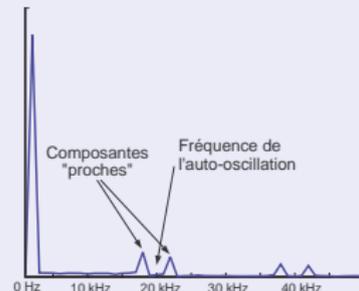
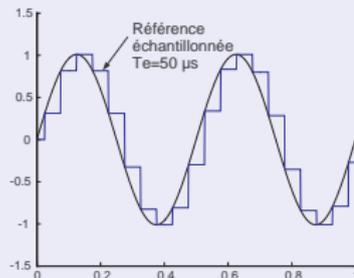
- Synchronisation = Modification brutale du comportement du MRC
- synchronisation = Gain équivalent fonction de nombreux paramètres (difficile à prédire)

Phénomène de synchronisation harmonique

Cas possibles de synchronisation

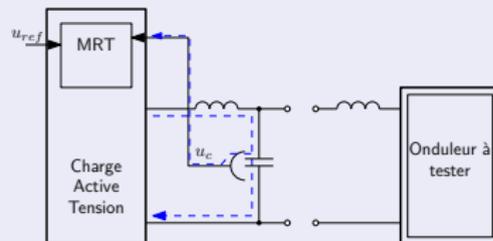
1ère possibilité

- Signal de référence échantillonné
- Synchronisation sur un harmonique proche de l'auto-oscillation
- **Solution : Filtrage**



2ème possibilité : Le MRT

- Fonctionnement normal à vide
- En charge : ondulation de découpage de l'onduleur sous test
- **Solution : ...**

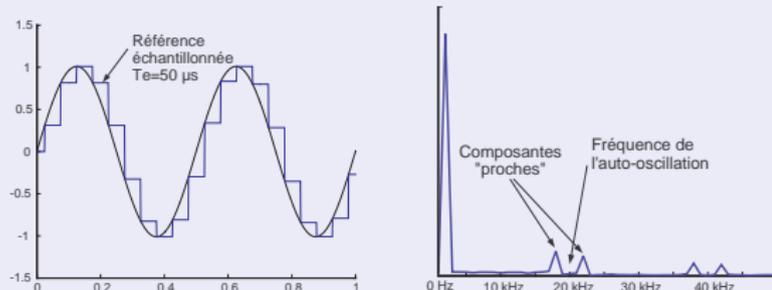


Phénomène de synchronisation harmonique

Cas possibles de synchronisation

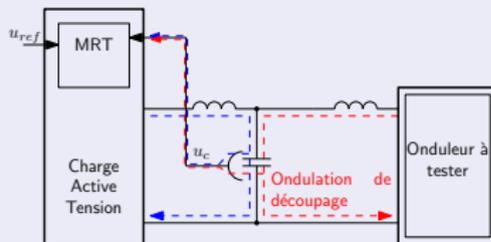
1ère possibilité

- Signal de référence échantillonné
- Synchronisation sur un harmonique proche de l'auto-oscillation
- **Solution : Filtrage**



2ème possibilité : Le MRT

- Fonctionnement normal à vide
- En charge : ondulation de découpage de l'onduleur sous test
- **Solution : ...**



Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- **Synchronisation Indirecte**
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

CAS DU MRC

Identification

- Entrée Sinusoïdale : Pas d'harmoniques de rang $n > 1$ dans le signal de référence
- Réponse fréquentielle : Notion Gain/Déphasage

Tracé de la réponse fréquentielle

Diagramme de Bode

- $||$ db
- \angle°

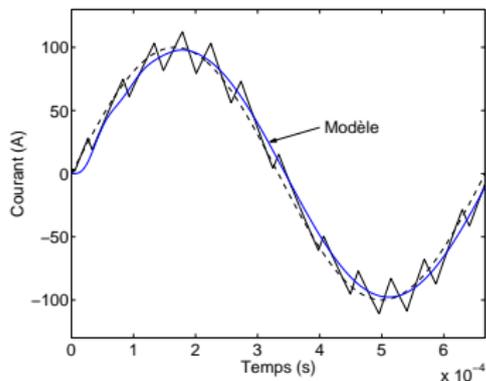
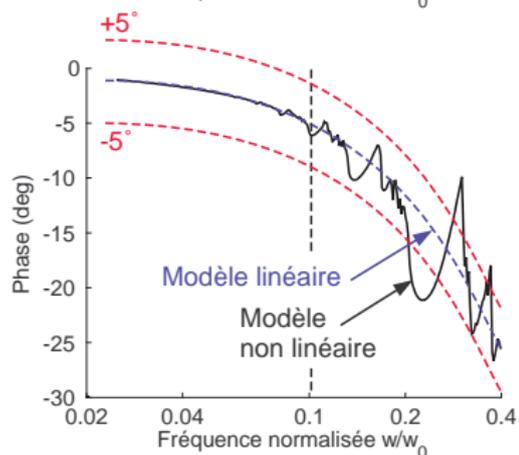
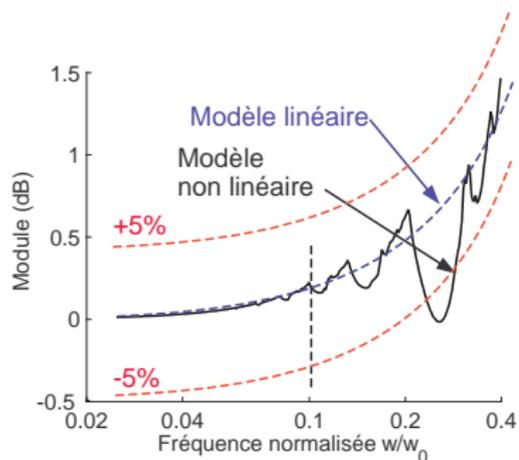


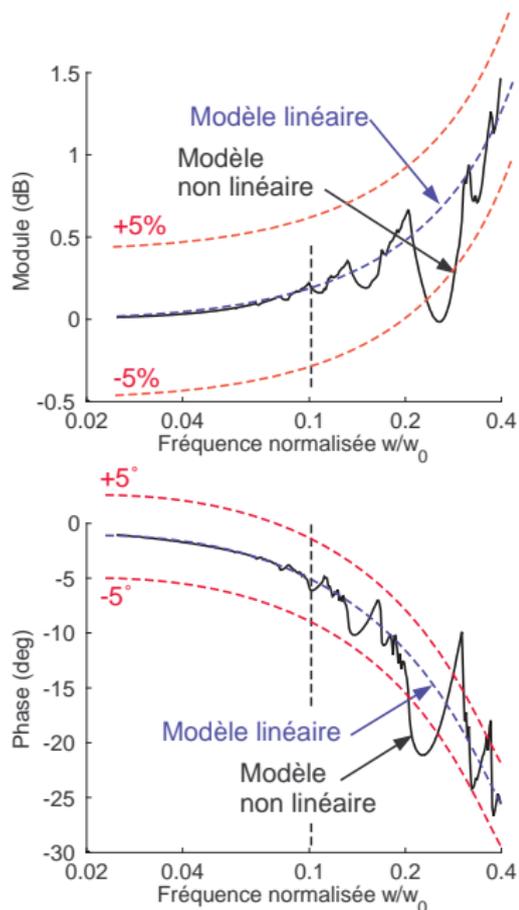
Diagramme de Bode



Déformations

- Sur le gain : Variation de 0.5db
- Sur le déphasage : Variation de 10°

Diagramme de Bode



Déformations

- Sur le gain : Variation de 0.5db
- Sur le déphasage : Variation de 10°



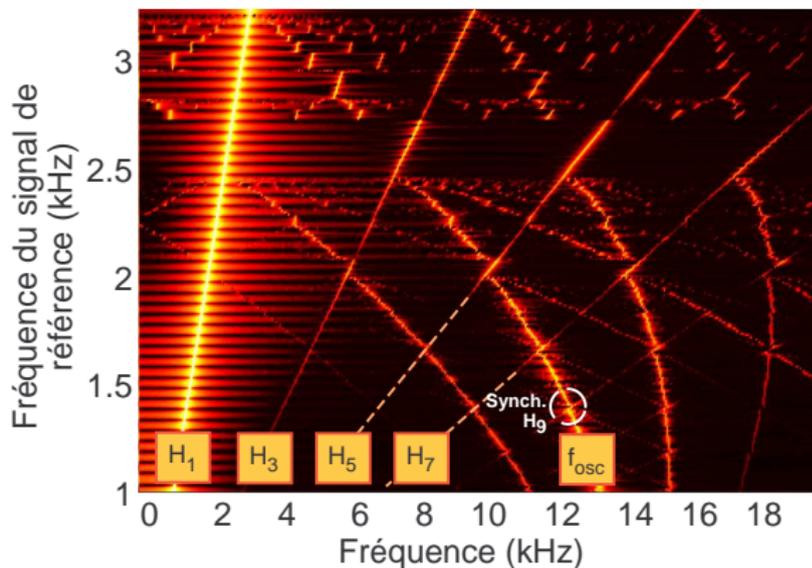
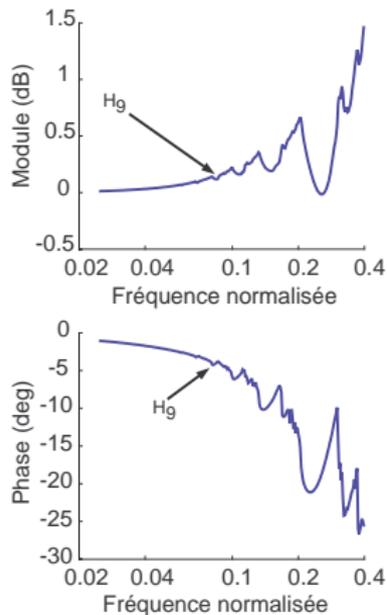
Cause(s)

Le diagramme de Bode ne suffit pas pour déterminer la cause du phénomène.

Évolution de la FFT

Résultats expérimentaux

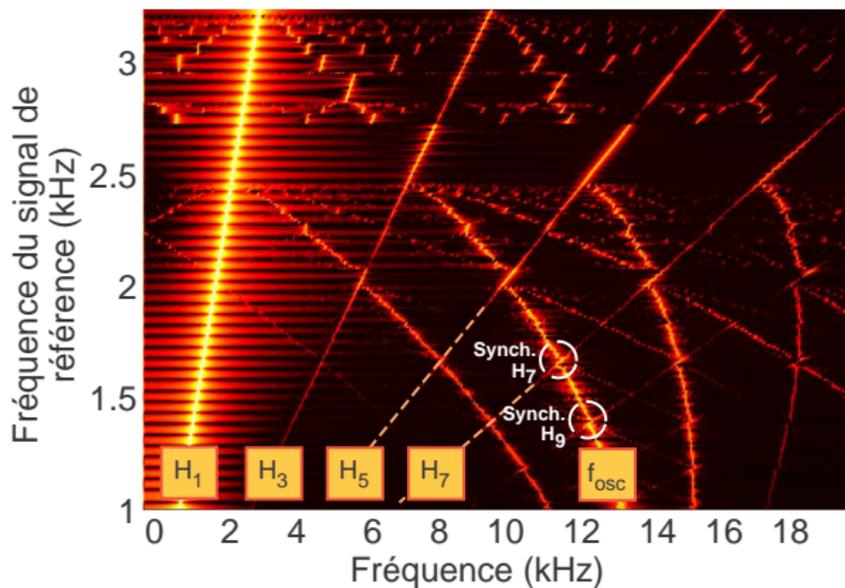
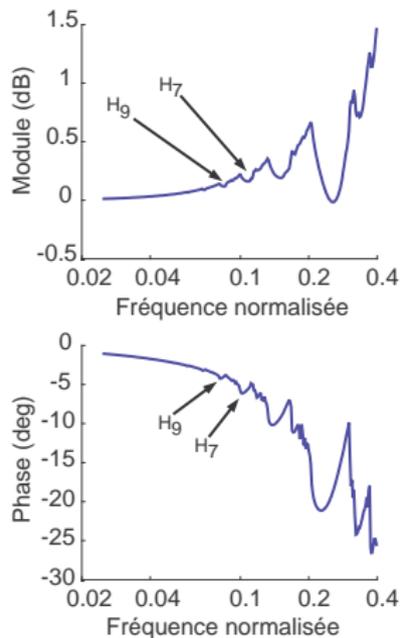
Cas d'une amplitude importante du signal de référence ($u_{max} \simeq 90\%$ de E)



Évolution de la FFT

Résultats expérimentaux

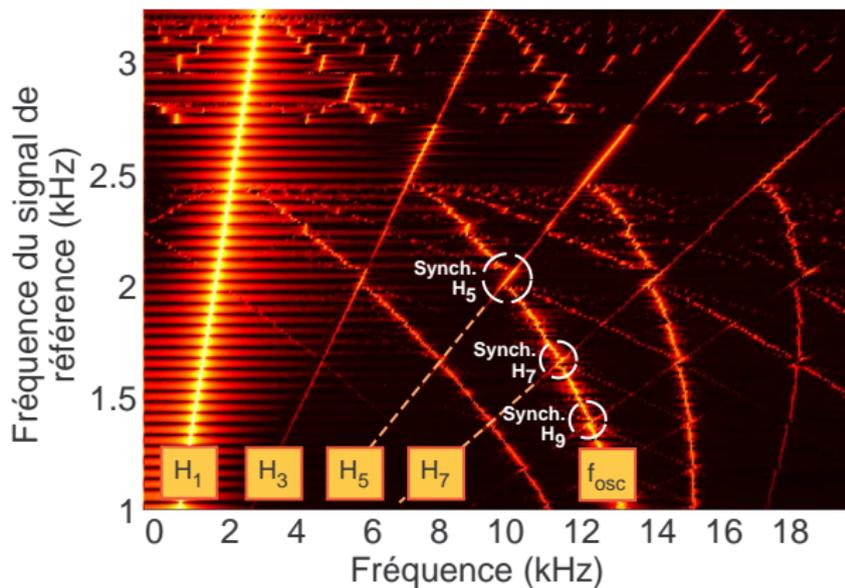
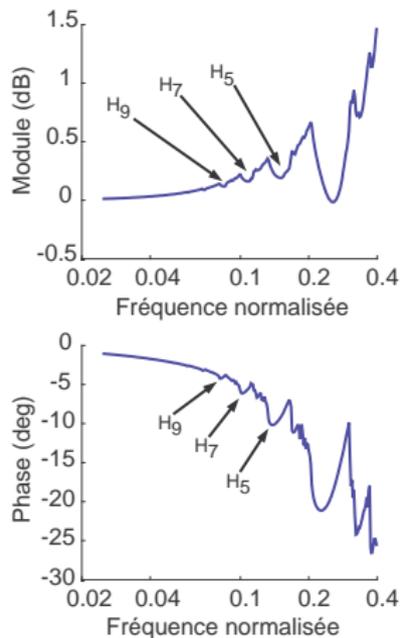
Cas d'une amplitude importante du signal de référence ($u_{max} \simeq 90\%$ de E)



Évolution de la FFT

Résultats expérimentaux

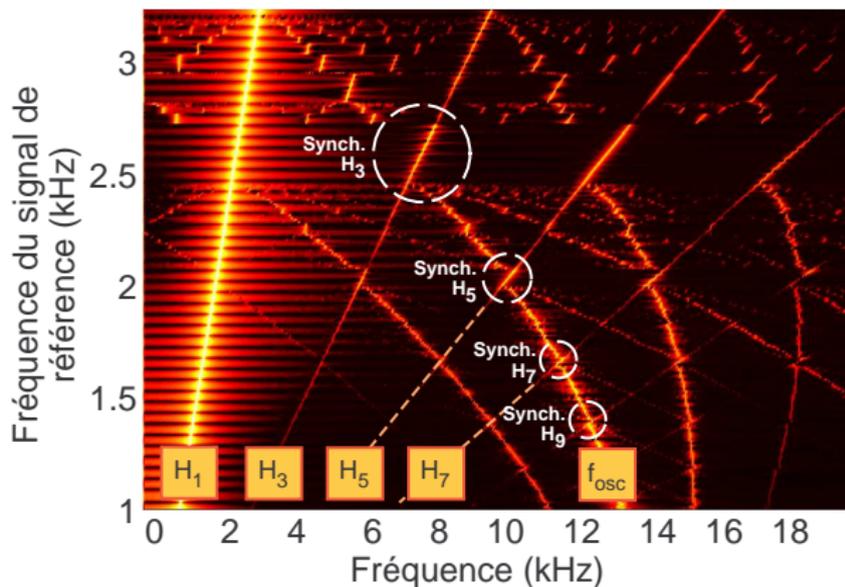
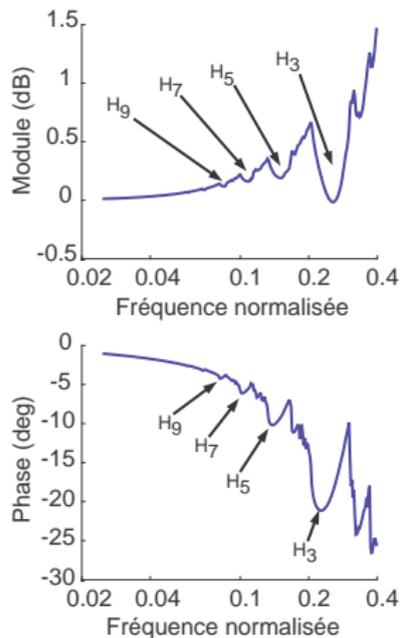
Cas d'une amplitude importante du signal de référence ($u_{max} \simeq 90\%$ de E)



Évolution de la FFT

Résultats expérimentaux

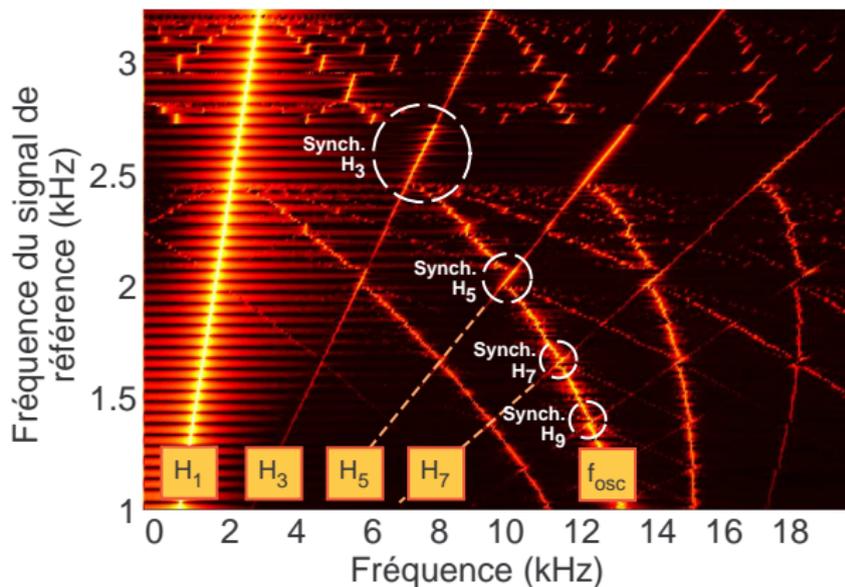
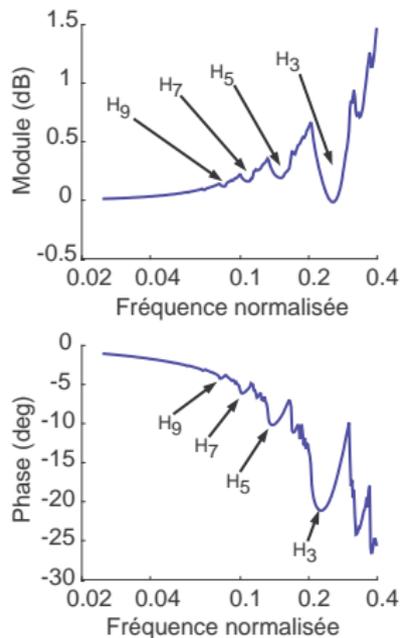
Cas d'une amplitude importante du signal de référence ($u_{max} \simeq 90\%$ de E)



Évolution de la FFT

Résultats expérimentaux

Cas d'une amplitude importante du signal de référence ($u_{max} \simeq 90\%$ de E)



LIMITATION DU DOMAINE DE VALIDITÉ DU MODÈLE LINÉAIRE

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- **Conclusions sur les aspects non linéaires**

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

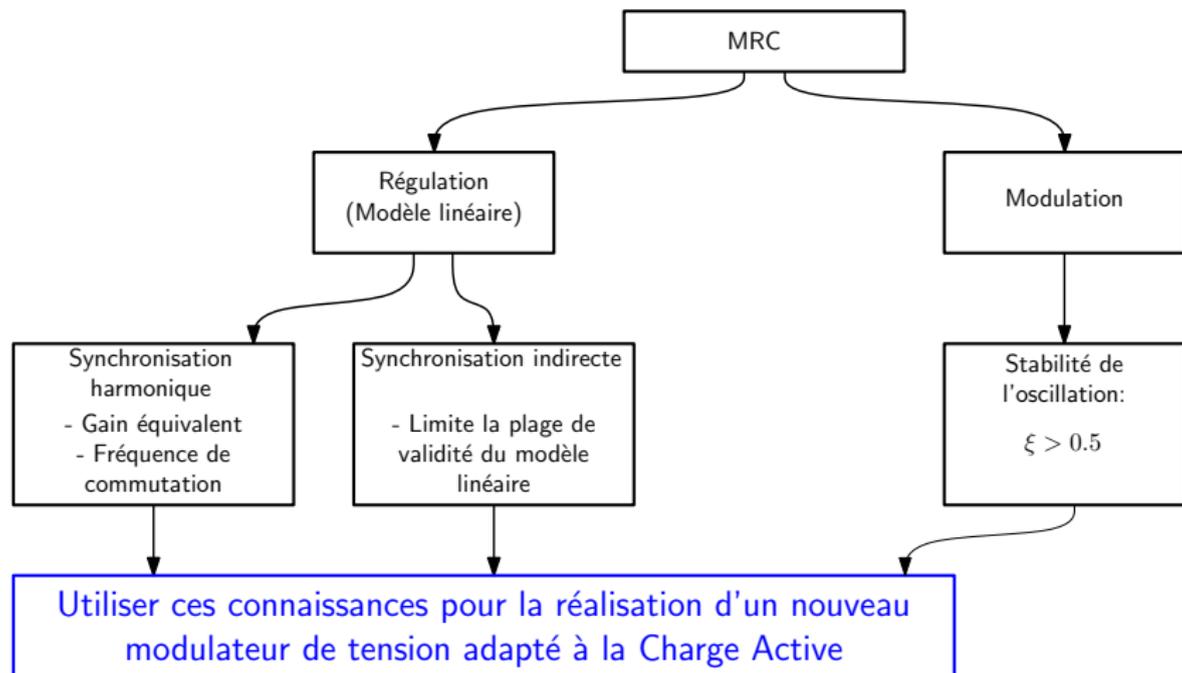
4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Conclusions sur les aspects non linéaires



Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{V2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Extension du principe de fonctionnement du *MRC*

Problématique

Systèmes à relais

- **Modulation** : Faire en sorte que le déphasage du système commandé passe par -180° à la fréquence de commutation désirée
- **Régulation** : Ajouter des correcteurs n'agissant qu'en basse fréquence
- Couplage naturel entre fréquence de commutation/Comportement basse fréquence

Charge Active

- Basse fréquence (Régulation) : 0-2 kHz
- Fréquence de commutation (Modulation) : 10-20 kHz
- Interactions fortes entre **Modulation** et **Régulation**

Extension du principe de fonctionnement du *MRC*

Problématique

Systèmes à relais

- **Modulation** : Faire en sorte que le déphasage du système commandé passe par -180° à la fréquence de commutation désirée
- **Régulation** : Ajouter des correcteurs n'agissant qu'en basse fréquence
- Couplage naturel entre fréquence de commutation/Comportement basse fréquence

Charge Active

- Basse fréquence (Régulation) : 0-2 kHz
- Fréquence de commutation (Modulation) : 10-20 kHz
- Interactions fortes entre **Modulation** et **Régulation**

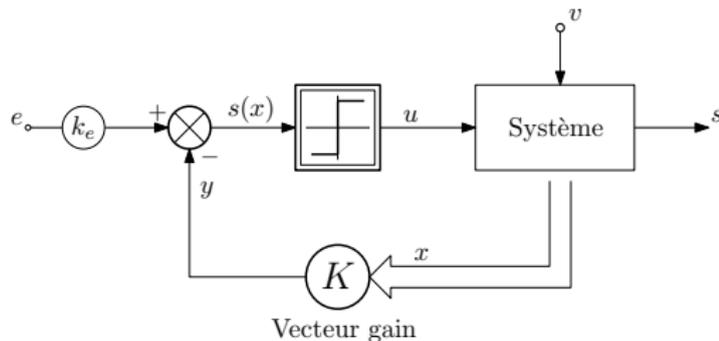
Objectifs

- Découpler comportement Basse fréquence / Mise en oscillation
- Privilégier une approche plus générale de synthèse

Synthèse en mode de glissement

Particularités :

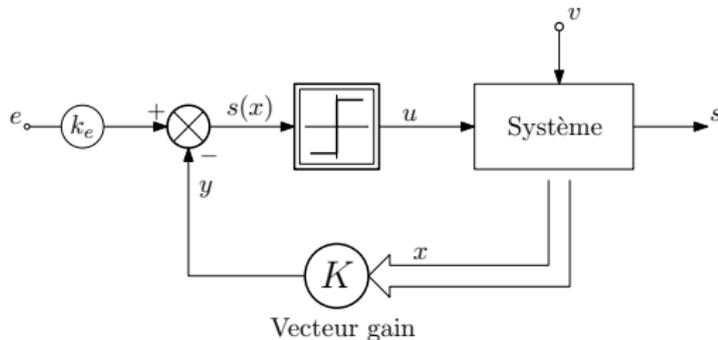
- $s(x) = 0, \dot{s}(x) = 0$
- Fréquence de commutation infinie
- Très grande robustesse
- Synthèse de la fonction de régulation



Synthèse en mode de glissement

Particularités :

- $s(x) = 0, \dot{s}(x) = 0$
- Fréquence de commutation infinie
- Très grande robustesse
- Synthèse de la fonction de régulation



Approche par placement de pôles (Hansruedi Bühler, 1986)

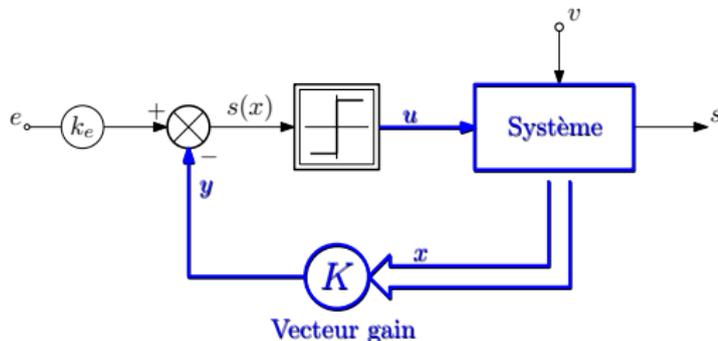
- Système commandé linéaire
- K : Combinaison linéaire du vecteur d'état x
- **Système en boucle fermée linéaire, parfaitement connu**

CHOISIR LE MODÈLE EN BOUCLE FERMÉE → OBTENTION DU VECTEUR DE GAINS K

Synthèse en mode de glissement

Particularités :

- $s(x) = 0, \dot{s}(x) = 0$
- Fréquence de commutation infinie
- Très grande robustesse
- Synthèse de la fonction de régulation



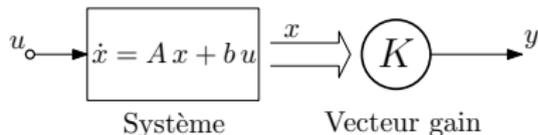
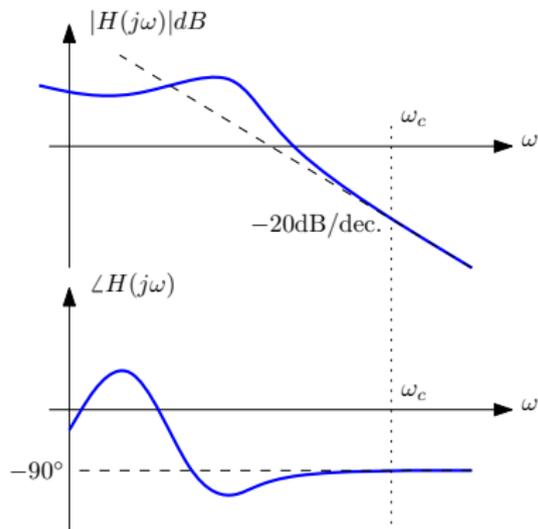
Approche par placement de pôles (Hansruedi Bühler, 1986)

- Système commandé linéaire
- K : Combinaison linéaire du vecteur d'état x
- **Système en boucle fermée linéaire, parfaitement connu**

CHOISIR LE MODÈLE EN BOUCLE FERMÉE → OBTENTION DU VECTEUR DE GAINS K

Extension du principe de fonctionnement du MRC

Comportement en haute fréquence



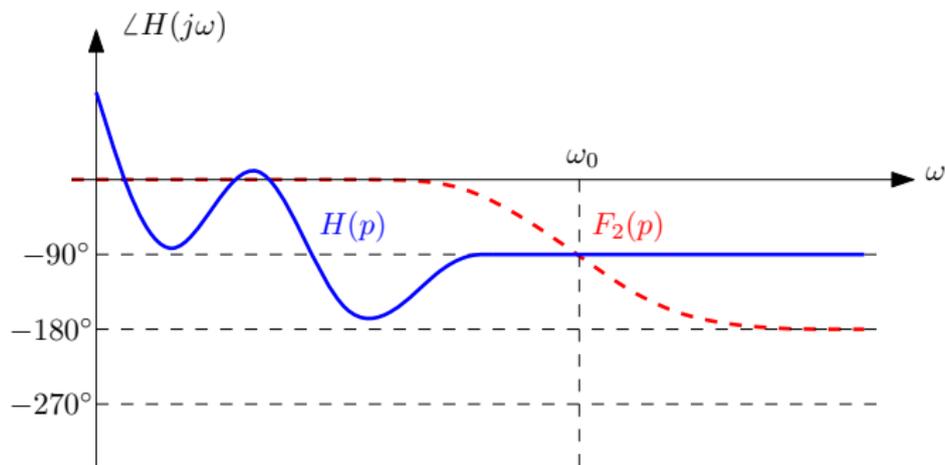
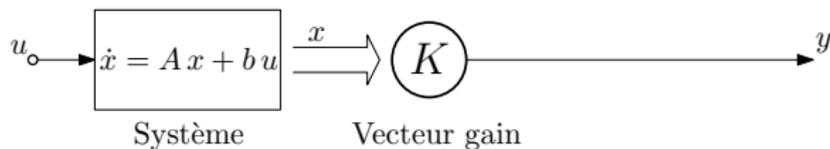
En haute fréquence

$$\frac{k_s}{p} \rightarrow \text{MRC}$$

LE SYSTÈME AVEC SA COMMANDE SE COMPORTE COMME UN INTÉGRATEUR EN HAUTE FRÉQUENCE...
... LE MRC

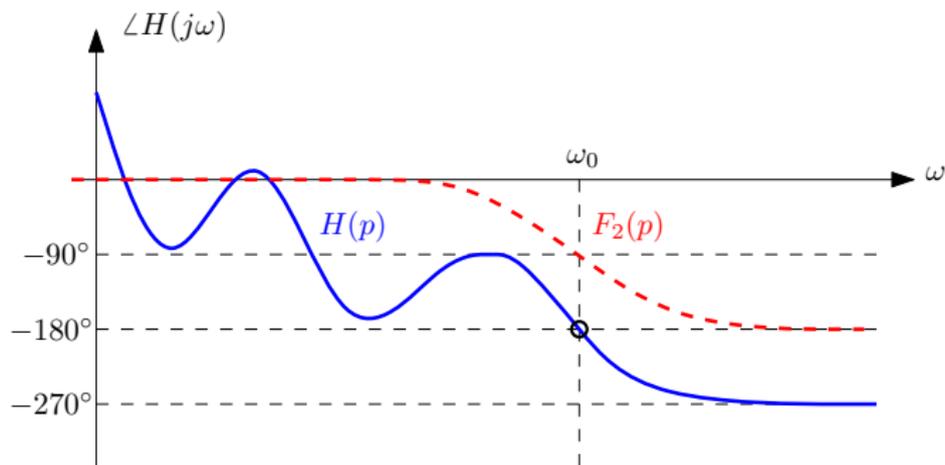
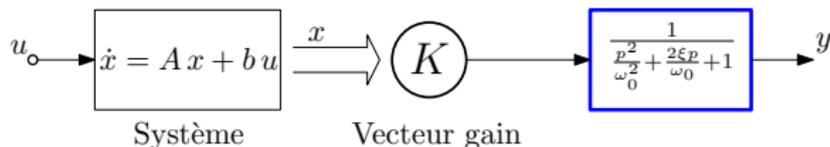
Extension du principe de fonctionnement du MRC

Ajout du filtre $F_2(p)$



Extension du principe de fonctionnement du MRC

Ajout du filtre $F_2(p)$



EXTENSION DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MRC, AIDÉ PAR UNE SYNTHÈSE EN MODE DE GLISSEMENT

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- **Application de la méthode au MRT**
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

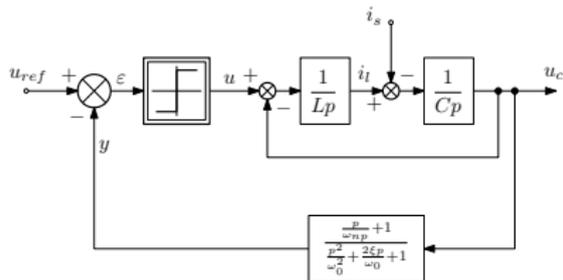
- Conclusion
- Perspectives

Du MRT au MRT_{v2}

Synthèse en mode de glissement

Variables d'état choisies

- Tension de sortie u_c
- Courant du condensateur i_c

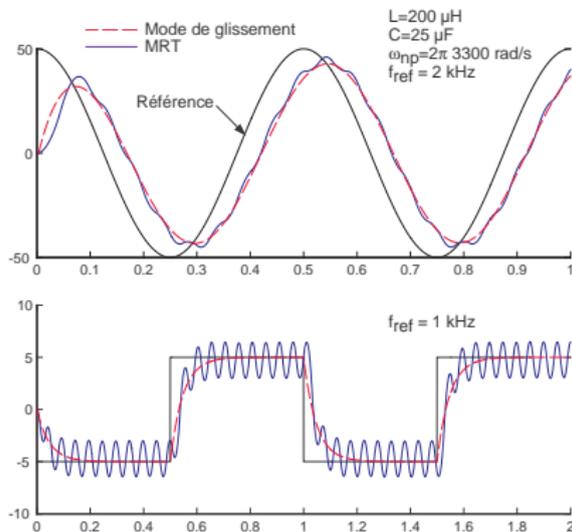
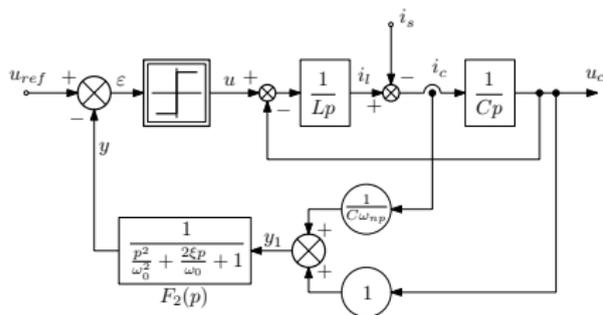


Du MRT au MRT_{v2}

Synthèse en mode de glissement

Variables d'état choisies

- Tension de sortie u_c
- Courant du condensateur i_c



Premier bilan

- Comportement du MRT proche du modèle en mode de glissement
- Fréquence de commutation contrôlée par l'ajout d'un filtre du second ordre

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

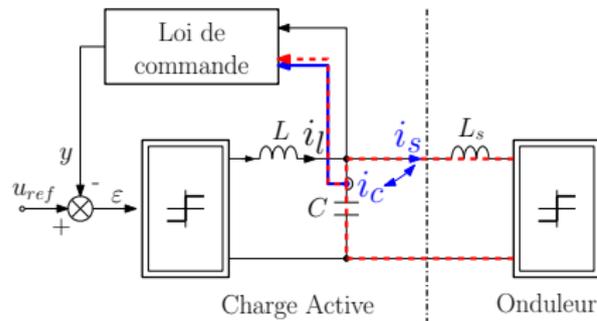
- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Problème de la synchronisation sur le courant de charge

Choix des nouvelles variables d'état

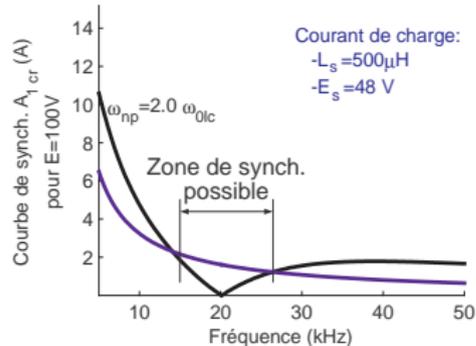
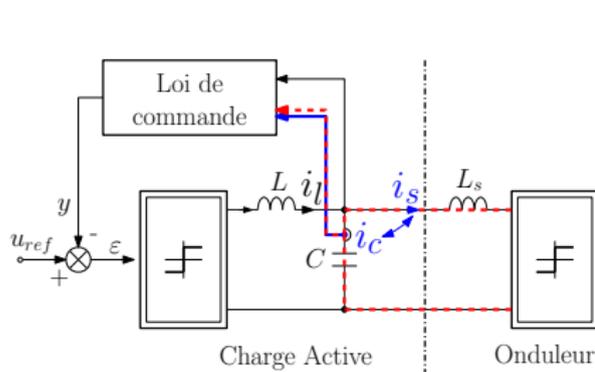


Problème

- Ondulation sur le courant de charge = Synchronisation
- MRT_{v2} sensible à cette ondulation

Problème de la synchronisation sur le courant de charge

Choix des nouvelles variables d'état



Problème

- Ondulation sur le courant de charge = Synchronisation
- MRT_{v2} sensible à cette ondulation

SYNCHRONISATION POSSIBLE ENTRE 15 ET 25 kHz

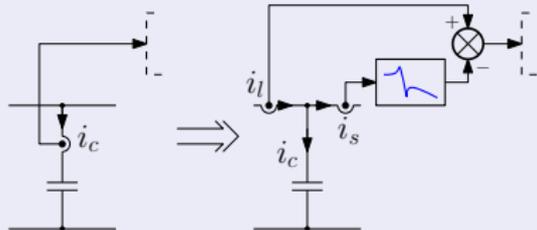
Risque de destruction du pont



Du MRT au MRT_{v2}

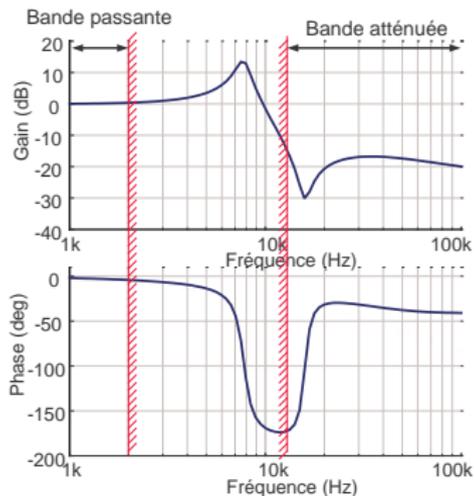
Filtre de Cauer

$$i_c = i_l - i_s$$



Onduations de découpage

- Courant de pont i_l : Auto-oscillation du MRT
- Courant de charge i_s : Découpage de l'onduleur sous test



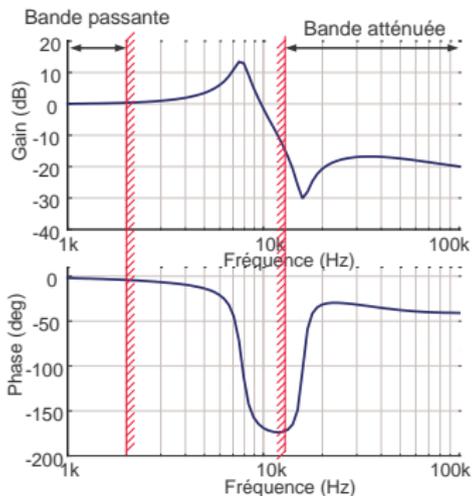
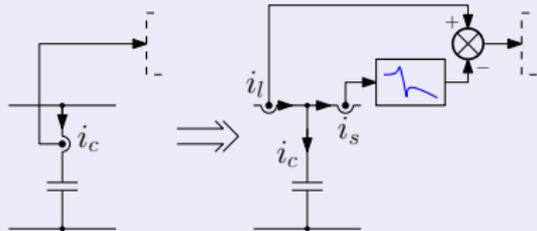
Caractéristiques

- Très faible déphasage et gain quasiment unitaire dans la bande passante
- Atténuation rapide des hautes fréquences (> 10 kHz)

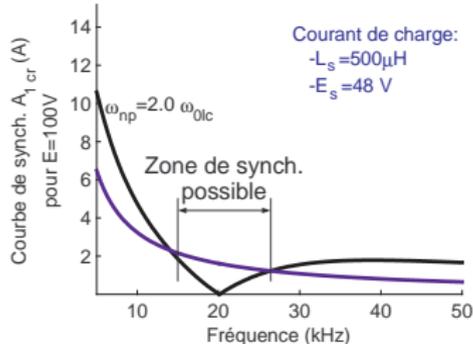
Du MRT au MRT_{v2}

Filtre de Cauer

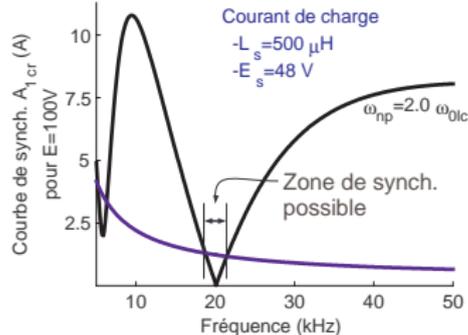
$$i_c = i_l - i_s$$



Sans filtre de Cauer



Avec filtre de Cauer



Du MRT au MRT_{v2}

Structure proposée

Limites du MRT_{v2}

- Fréquence de commutation limitée : Ce n'est plus du mode de glissement
- Revenir à la notion de gain équivalent

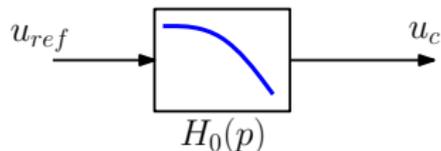
Du MRT au MRT_{v2}

Structure proposée

Limites du MRT_{v2}

- Fréquence de commutation limitée : Ce n'est plus du mode de glissement
- Revenir à la notion de gain équivalent

Ce que l'on souhaitait... Au départ



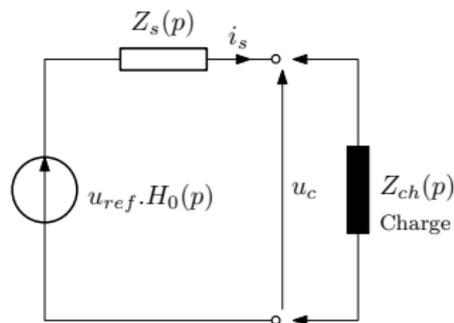
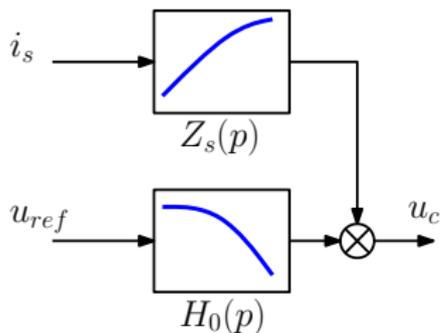
Du MRT au MRT_{v2}

Structure proposée

Limites du MRT_{v2}

- Fréquence de commutation limitée : Ce n'est plus du mode de glissement
- Revenir à la notion de gain équivalent

Ce que l'on peut faire... A l'arrivée



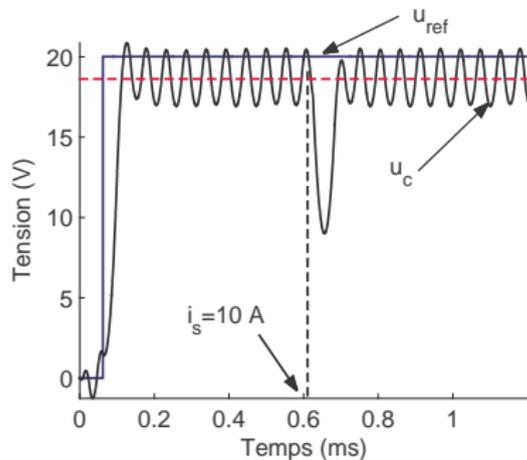
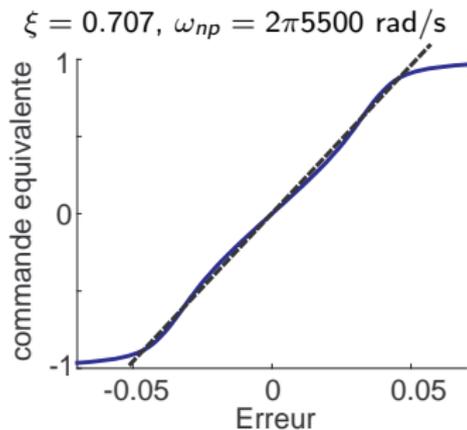
$H_0(p)$ & $Z_s(p)$ doivent être linéaires

Du MRT au MRT_{v2}

Choix des paramètres du système

Contraintes pour le choix des paramètres

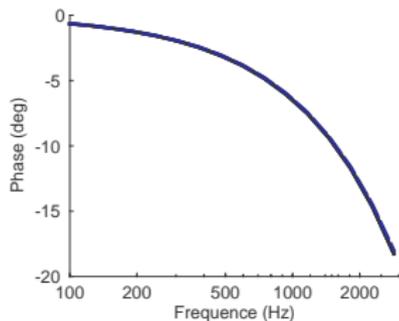
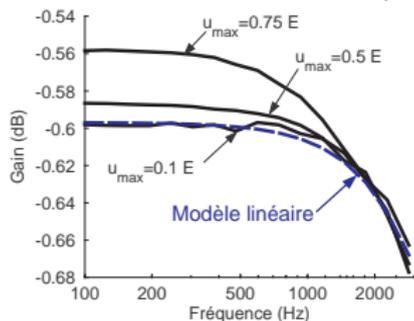
- Etage de puissance proche d'un gain \rightarrow Système linéaire
- Régime transitoire rapide \rightarrow Grande bande passante
- Bon rejet de perturbation \rightarrow Robustesse



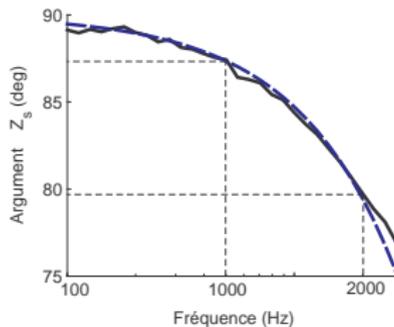
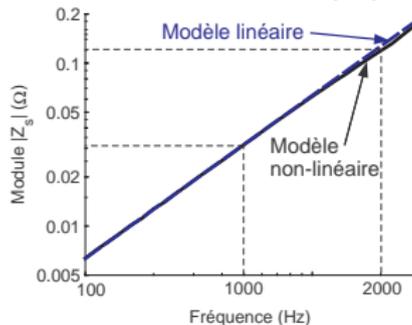
Du MRT au MRT_{v2}

Choix des paramètres du système (2)

Fonction de transfert à vide (H_0)



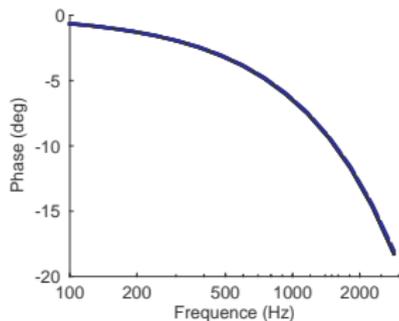
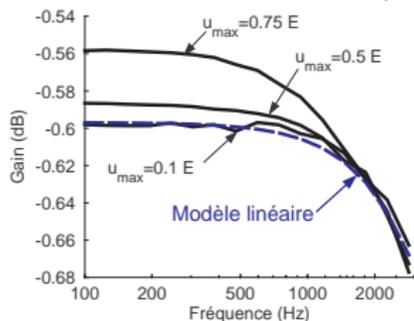
Impédance de sortie (Z_s)



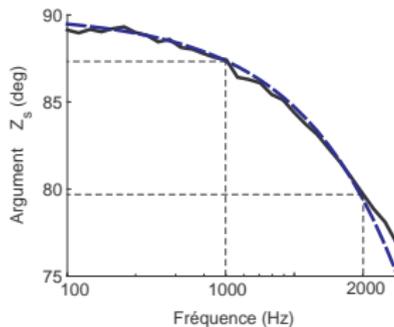
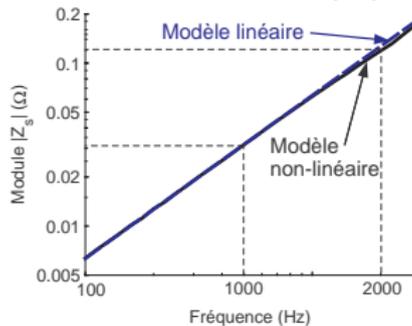
Du MRT au MRT_{v2}

Choix des paramètres du système (2)

Fonction de transfert à vide (H_0)



Impédance de sortie (Z_s)



RESTE À VALIDER EXPÉRIMENTALEMENT CETTE NOUVELLE STRUCTURE DE COMMANDE

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Présentation du système de test

Prototype de la Charge Active



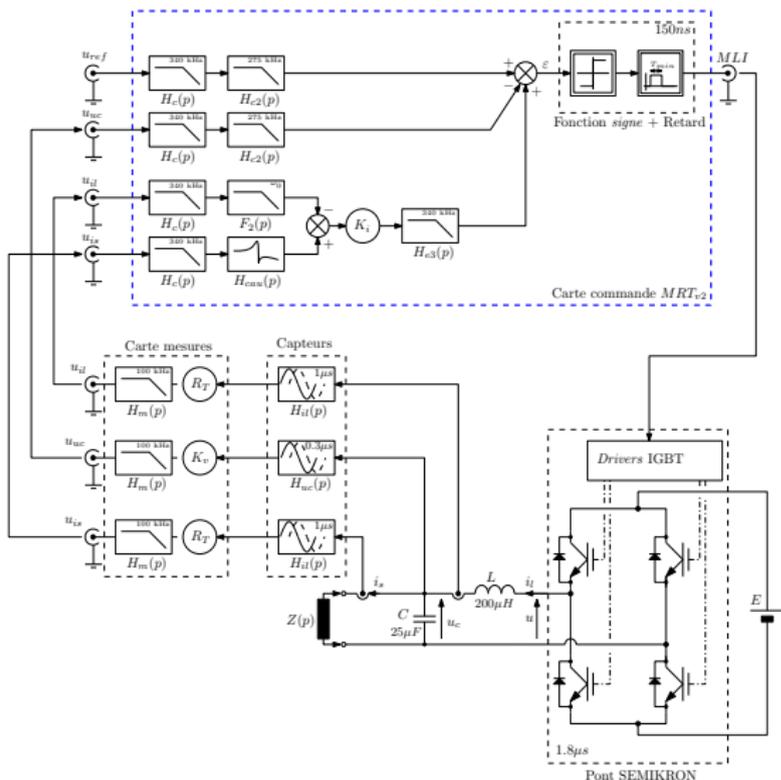
Caractéristiques

- 3 ponts monophasés indépendants
 - Courant de pont : 250 A
 - Tension de pont : 200 V
 - Fréquence de commutation : $< 20\text{kHz}$
 - Fréquence de coupure du filtre $L - C$: 2.25 kHz
-
- Système complexe, loin du modèle théorique
 - Nombreux filtres de mesures

NÉCESSITÉ DE PRENDRE EN COMPTE TOUS LES FILTRES ET TOUTES LES IMPERFECTIONS DES COMPOSANTS DE LA CHARGE ACTIVE

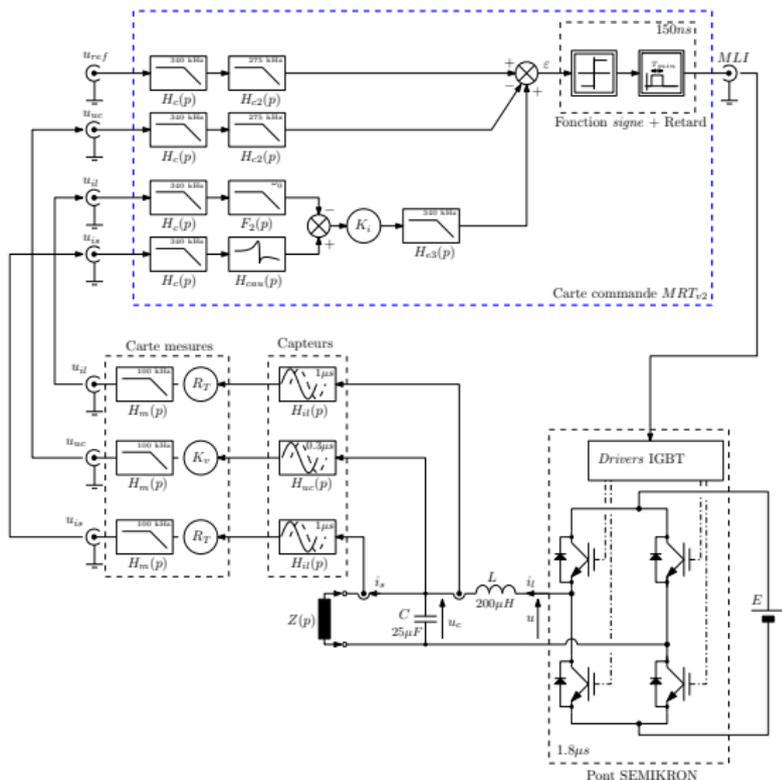
Modèle de la Charge Active réelle

Modèle simplifié...

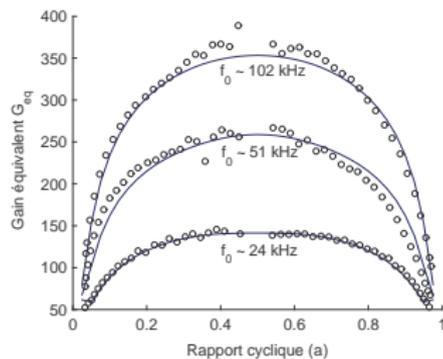
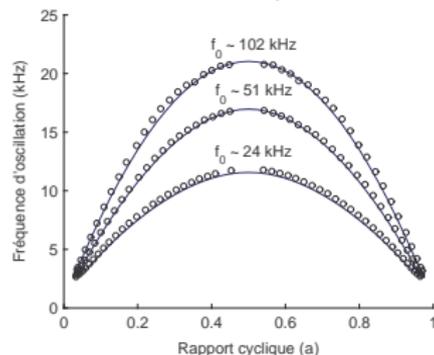


Modèle de la Charge Active réelle

Modèle simplifié...



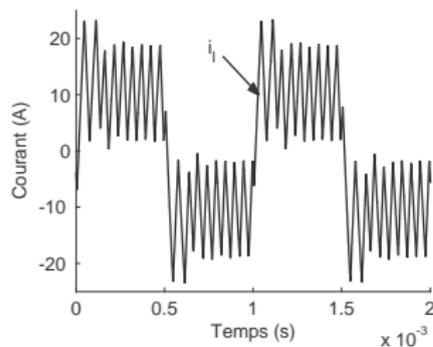
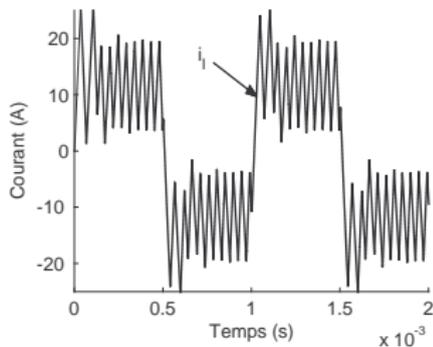
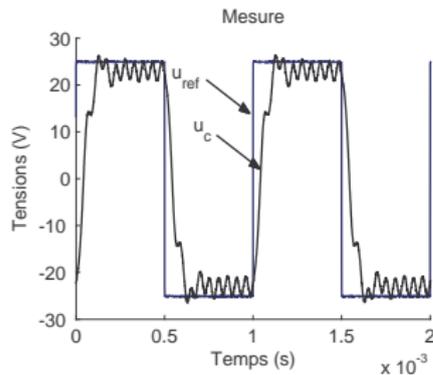
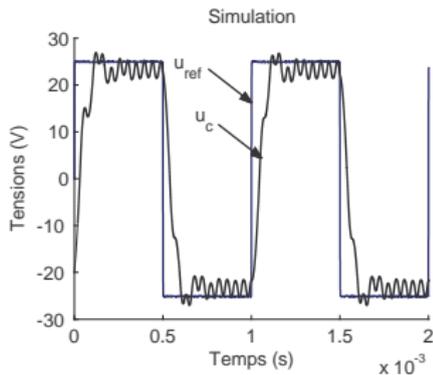
Comparaison Modèle/Mesures



Comparaison Simulations/Mesures

Réponse indicielle

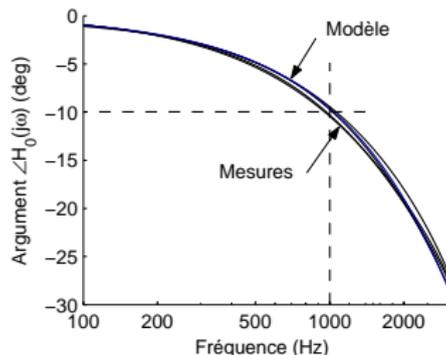
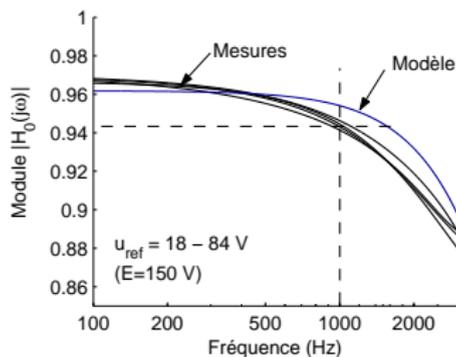
Résistance de charge : 2.2Ω



Comparaison Modèle analytique/Mesures

Réponse fréquentielle

Charge Active à vide



- Précision meilleure que 2% sur le module de 0 – 2 kHz
- Précision meilleure que 2° sur le déphasage
- Faible influence de l'amplitude des signaux
- Comportement macroscopique "linéaire"

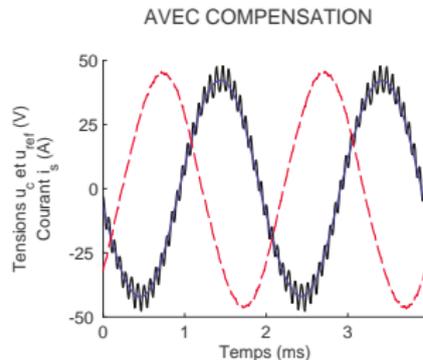
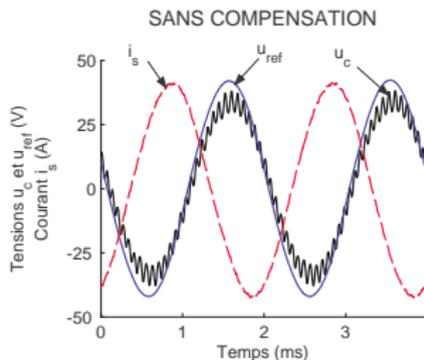
Compensation de la référence

- Modulateur assimilable à un système linéaire
- Charge : Onduleur de courant
- Compensation de la référence hors ligne

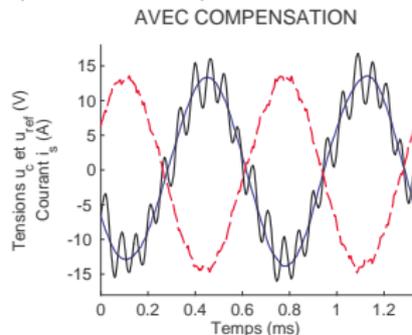
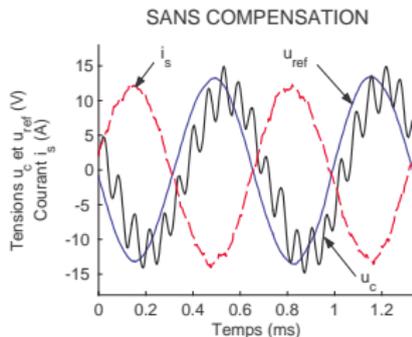
$$U_C = U_{ref}$$

Compensation de la référence

Entrée sinusoïdale de 500 Hz, $|Z| = 1.0 \Omega$, $\angle Z = -120^\circ$



Entrée sinusoïdale de 1500 Hz, $|Z| = 1.0 \Omega$, $\angle u/i = -180^\circ$



Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Conclusions

Aspects non linéaires

- Identification de plusieurs phénomènes propres à la non linéarité de la structure
 - ▶ Synchronisation harmonique
 - ▶ Synchronisation indirecte
- **Limitation de la plage de validité du modèle linéaire équivalent**

Synthèse des modulateurs

- Synthèse en mode de glissement : Bonne régulation, **fréquence de commutation infinie**
- Utilisation du procédé de limitation de la fréquence du MRC : Filtre du second ordre
- **Application au MRT**
 - ▶ Choix judicieux des variables d'état + filtrage = Résoudre le problème de synchronisation sur le courant de charge
 - ▶ Choix judicieux des paramètres de réglage = Rendre l'étage de puissance quasiment linéaire

Validation expérimentale du modèle

- **Très bonne similitude en charge et à vide entre modèle linéaire et mesures**
- **Capacité de compenser les imperfections du MRT_{v2}**

Plan

1 Introduction

- Contexte/Problématique
- Présentation du MRC & du MRT

2 Phénomènes non linéaires

- Synchronisation harmonique
- Synchronisation Indirecte
- Conclusions sur les aspects non linéaires

3 Nouvelle structure adaptée à la Charge Active : Le MRT_{v2}

- Extension du principe de fonctionnement du MRC
- Application de la méthode au MRT
- Synchronisation sur le courant de charge/ Choix des paramètres

4 Validation expérimentale

- Présentation du système et modélisation des éléments

5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

Aspects non linéaires

- Synchronisation indirecte : De nombreuses questions
- Stabilité des oscillations : Critère local \rightarrow Critère global (IRCCyN, Nantes)
- D'autres phénomènes non identifiés ?

Charge Active

- Validation en triphasé du MRT_{v2} ; Application à la Charge Active dans un contexte industriel
- Implanter les algorithmes de compensation pour un calcul **en ligne**
- Développer les modèles des machines à émuler

