



**Machines polyphasées :
de la Modélisation Multimachine à la Commande**

M. Benkhoris



J. P. Hautier

A. Bouscayrol



E. Monmasson

J.P.Louis



B. Davat

F. Meibody-Tabar

P. Delarue, **E. Semail**

B. de Fornel

H. Razik



M. Pietrzak-David



S. Piefederici

Machine polyphasée: de la modélisation Multmachines à la commande.

- Plan -

2

1. Machines Polyphasées et avionique

- Polyphasé ? , Pourquoi ? , Aujourd'hui ? , Problèmes ?

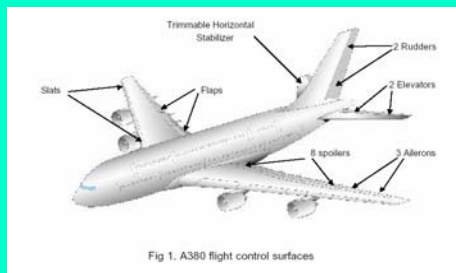
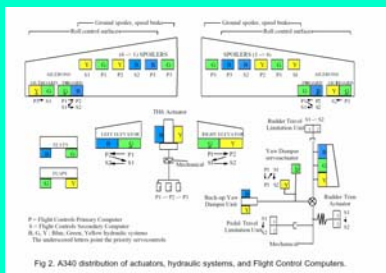
2. Equivalence avec un ensemble Multimachine

- Justification théorique

3. Exemple: machine synchrone pentaphasée à aimants

- Synthèse d'une MLI originale de l'onduleur de tension
- Commande vectorielle de la machine pentaphasée
- Un fonctionnement sur 4 phases (mode dégradé)

1. « Machines polyphasées et avionique »



From « More electric control surface actuation : a standard for the next generation of transport aircraft »
D.Van den Bossche, AIRBUS, EPE2003

- 1. Machines Polyphasées et avionique -

Polyphasée ?

- au minimum 2 phases... (indépendantes) pour créer un champ tournant (diphassée, triphasée couplée étoile/triangle)
- au minimum 3 phases... (indépendantes) pour fiabilité (triphassée étoile neutre sorti, pentaphasée, hexaphasée,...)

Concrètement

- Triphasée neutre alimenté: oui mais composants supplémentaires
- Hexaphasée double étoile alimentée par 2 ponts à thyristors triphasés (4 phases indépendantes, stratégie simple de commande en mode dégradé)
- Quelques cas d'alimentation par onduleur de tension (5, 6, 9, 13, 15)

Pourquoi ?

Constat:

Électrification des systèmes embarqués
(Utilisation d'actionneurs commandables électriquement)
(**électromagnétiques**, hydrauliques/électriques, piézo-électriques...)
(Mis à profit d'algorithmes de commande élaborés)
(optimisant fiabilité et ressources énergétiques)

Contraintes essentielles :

- Couples massique et volumique... **aimants permanents**
- fiabilité ... **polyphasé**

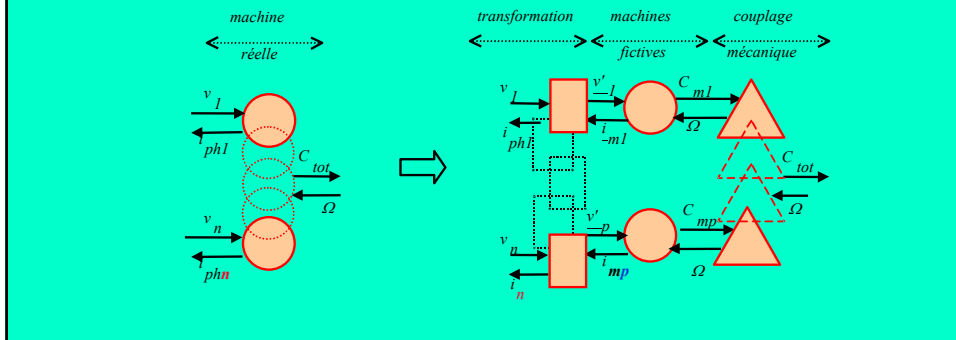
Aujourd'hui ?

- Puissance croissante des DSP, des FPGA: possibilité/coût acceptable
- Vitesse variable/nombre de phases... paramètre de dimensionnement
- Prototypes virtuels ... de "drives" (modélisation "fine" accessible)

Problèmes ?

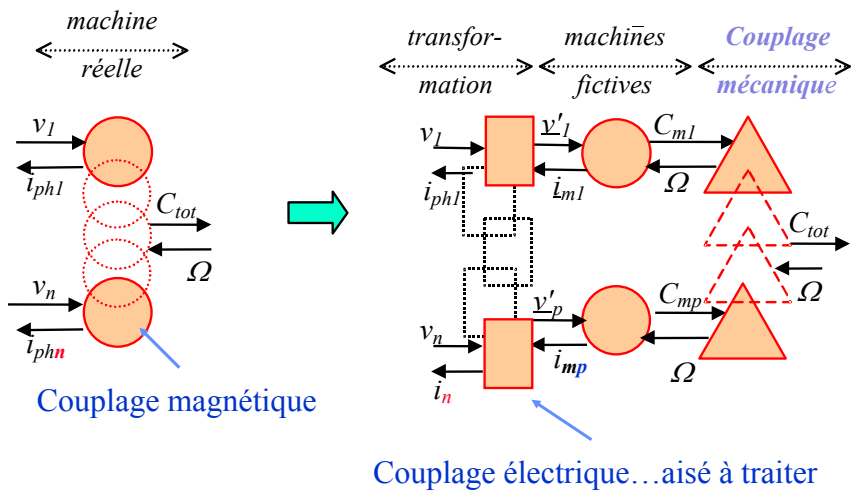
- Outils conceptuels et synthétiques de commande non disponibles:
(Machine diphasée équivalente, phaseurs complexes)
(Représentation graphique des onduleurs de tension et machine)
Privilège des machines à **deux phases indépendantes** alimentées par onduleurs)
- Concevoir machine adaptée à l'onduleur

2. « Ensemble Multimachine équivalent »



- 2. Ensemble Multimachine équivalent -

(GDR SDSE-ME2MS...thèse X. Kestelyn/L2EP)



Hypothèses : machine à pôles lisses et non saturée

SYMETRIE : matrice inductance propre statorique

- Diagonalisable : valeurs propres réelles λ_L ... les « inductances cycliques »
- **Orthogonalité** des espace propres E_L associé à chaque valeur propre λ_L
flux d'énergie indépendants

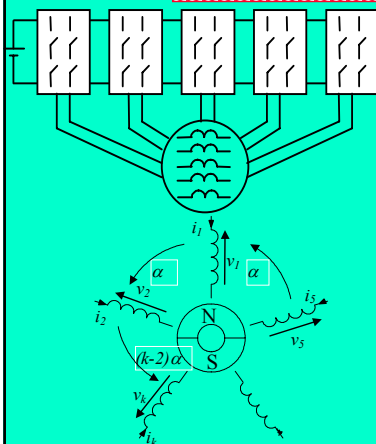


Ensemble de machines fictives dotées de propriétés caractéristiques

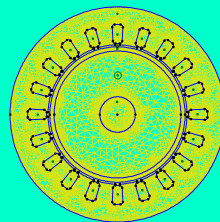
- $\dim E_L$ = nombre de phases de la machine fictive associée à λ_L
- λ_L : inductance de la machine fictive

3. « Machine synchrone pentaphasée »

Entraînement pentaphasé



Représentation multidimensionnelle de l'onduleur

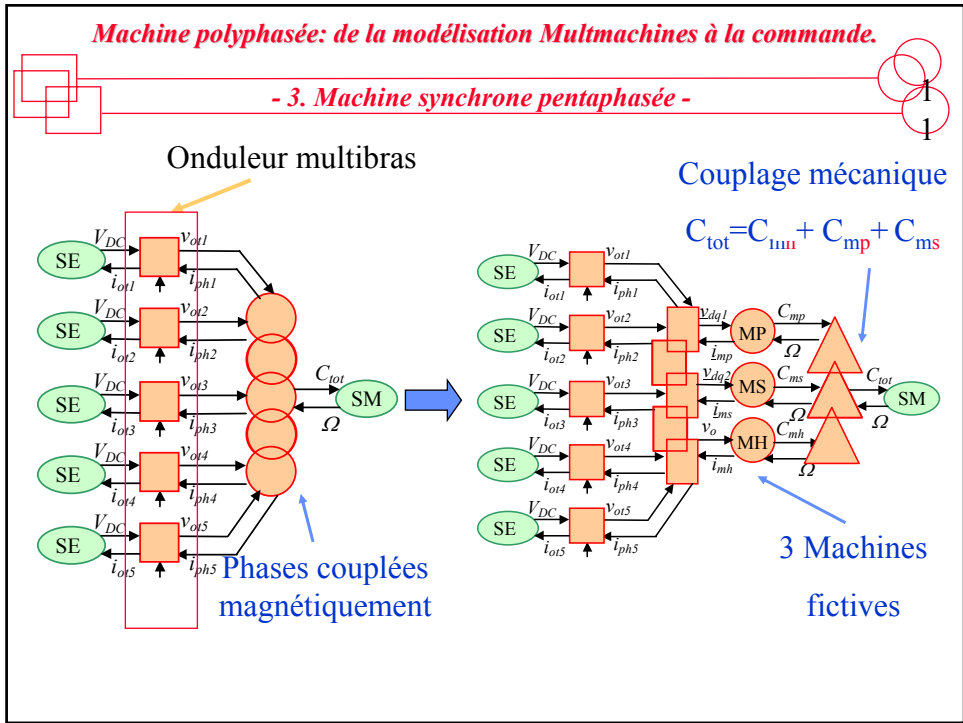


Prototype virtuel



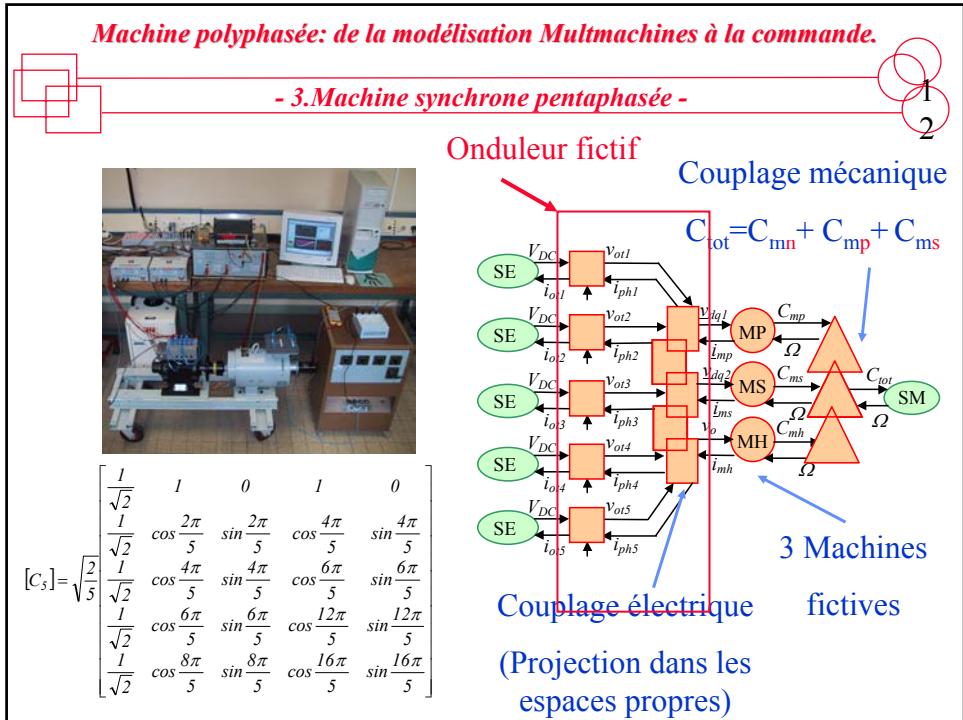
Machine polyphasée: de la modélisation Multimachines à la commande.

- 3. Machine synchrone pentaphasée -



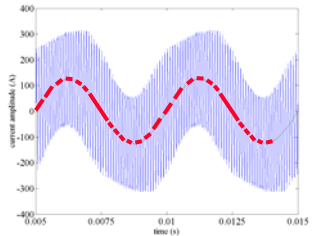
Machine polyphasée: de la modélisation Multimachines à la commande.

- 3. Machine synchrone pentaphasée -

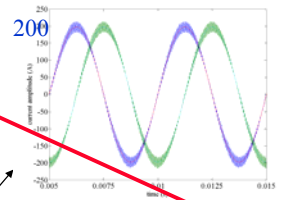


- 3.1 Outil d'analyse
- 3.2 Outil de synthèse: MLI originale de l'onduleur de tension adaptée
- 3.3 Outil de synthèse: commande vectorielle des deux machines fictives
- 3.4 Un fonctionnement sur 4 phases

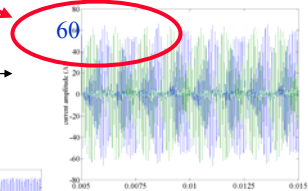
Analyse des ondulations parasites du courant



Courant de phase
MLI intersective
« triangle/sinus »

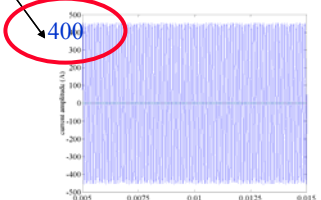


M. Principale



M. Secondaire

Projections

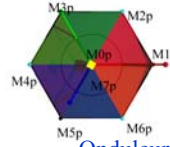
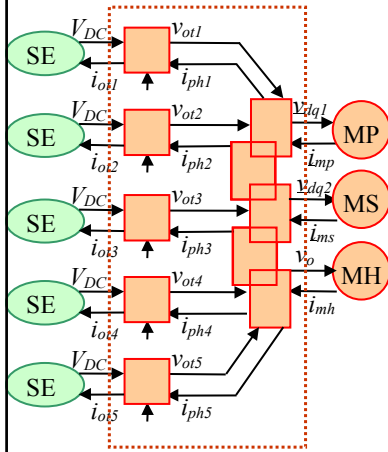


M. Homopolaire

Machine polyphasée: de la modélisation Multmachines à la commande.

- 3.2 Outil de Synthèse: MLI originale -

1
5



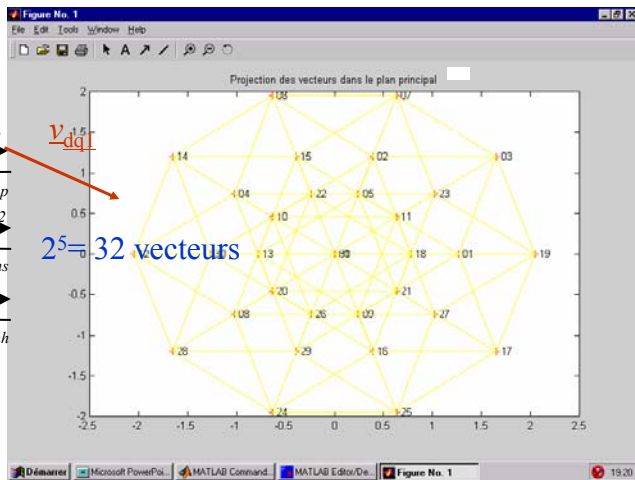
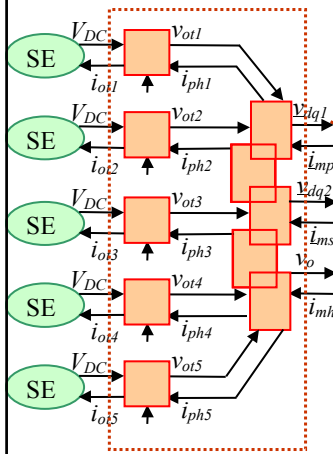
Onduleur triphasé alimentant machine diphasée

Onduleur ...alimentant 2 machines diphasées et une machine monophasée

Machine polyphasée: de la modélisation Multmachines à la commande.

- 3.2 Outil de Synthèse: MLI originale -

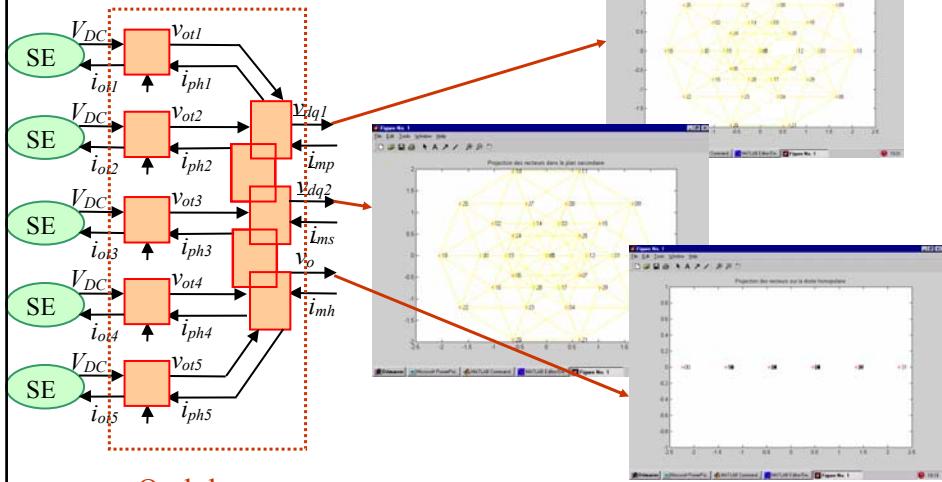
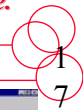
1
6



Onduleur

Machine polyphasée: de la modélisation Multmachines à la commande.

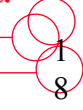
- 3.2 Outil de Synthèse: MLI originale -



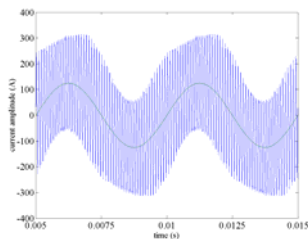
Onduleur ...alimentant 2 machines diphasées et une machine monophasée
3 onduleurs indépendants alimentant 3 machines

Machine polyphasée: de la modélisation Multmachines à la commande.

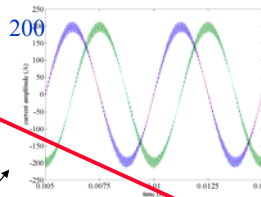
- 3.2 Outil de Synthèse: MLI originale -



Analyse des ondulations parasites du courant

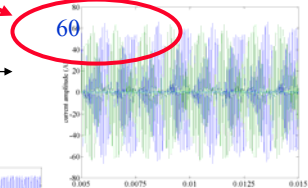


Courant de phase
MLI intersective

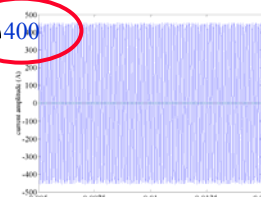


M. Principale

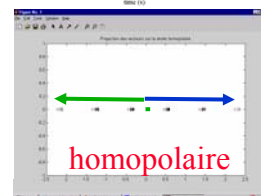
Projections



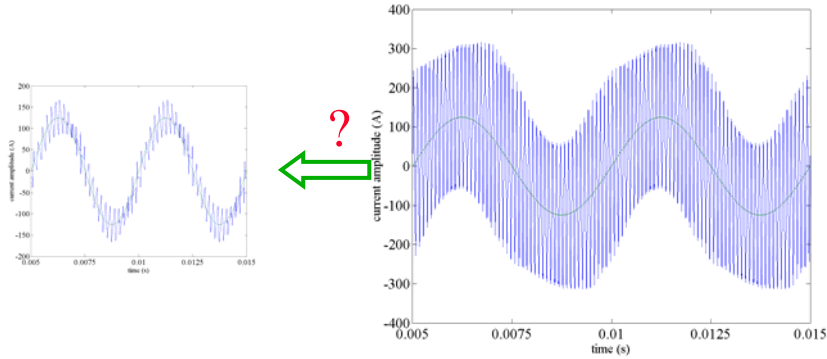
400



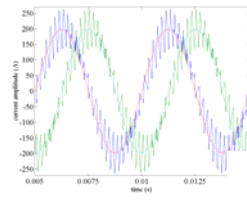
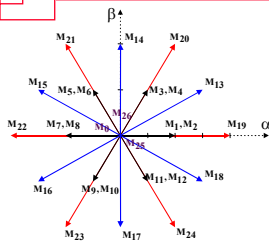
M. Homopolaire



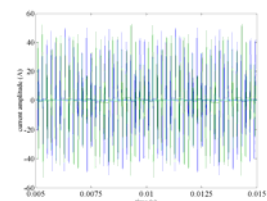
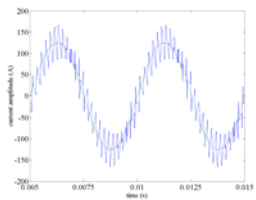
homopolaire



Synthèse d'une commande

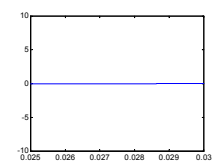


M. Principale

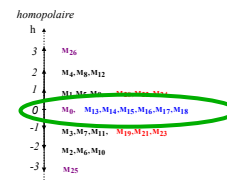


M. Secondaire

Projections



M. Homopolaire



Synthèse d'une commande

Machine polyphasée: de la modélisation Multimachines à la commande.

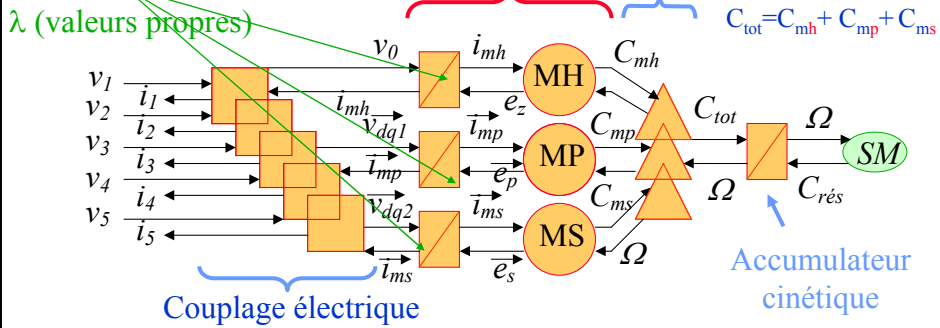
- 3.3 Commande vectorielle machine pentaphasée -

2

Modèle causal REM (Représentation Energétique Macroscopique)

pour la commande

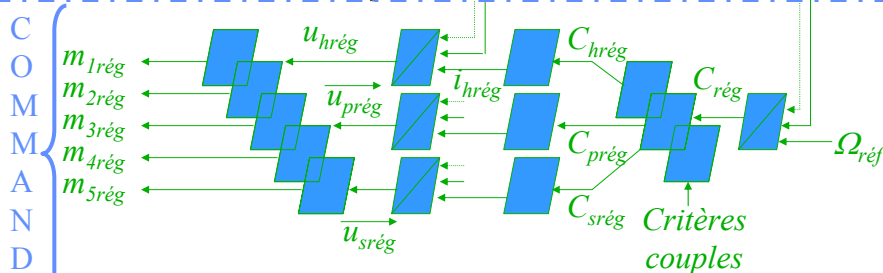
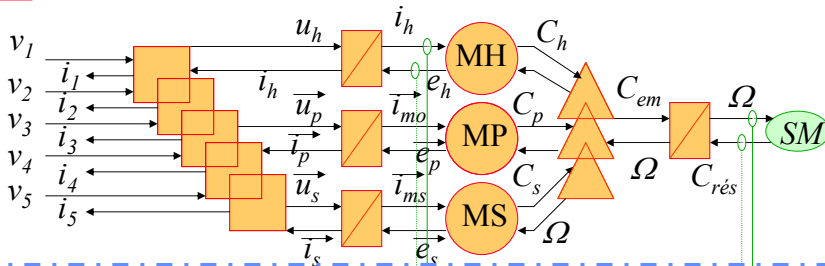
3 accumulateurs inductifs Machines fictives Couplage mécanique



Machine polyphasée: de la modélisation Multimachines à la commande.

- 3.3 Commande vectorielle machine pentaphasée -

2



Dédudition systématique d'une Structure Maximale de Commande SMC

C
O
M
M
A
N
D
E

Choix des critères couples ?

En fonctionnement normal

$$C_{em} \Omega = \vec{e} \cdot \vec{i} = \vec{e}_{mp} \cdot \vec{i}_{mp} + \vec{e}_{ms} \cdot \vec{i}_{ms} + e_{mh} i_{mh}$$

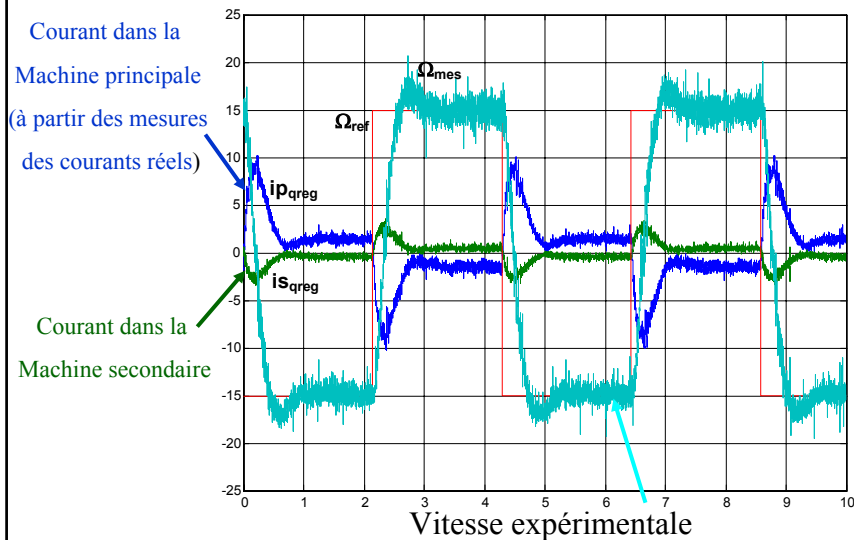
- Machine homopolaire monophasée non alimentée
- 2 machines diphasées alimentées afin d'optimiser le rendement... vecteur fem et vecteur courant colinéaires

$$\vec{i}_{mp-ref} = k \vec{e}_{mp} \quad \vec{i}_{ms-ref} = k \vec{e}_{ms} \quad i_{hréf} = 0$$

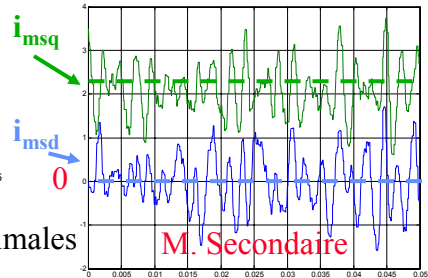
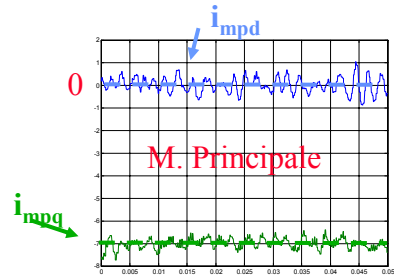
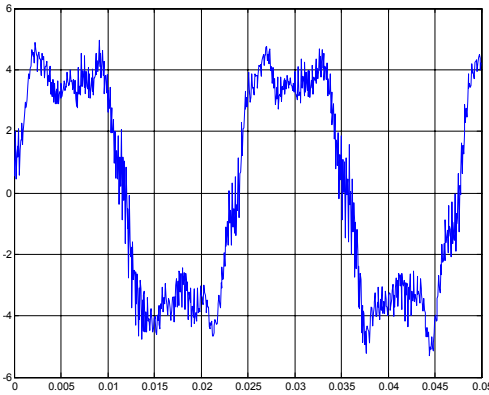
In fine,... simplement

deux commandes vectorielles de machines diphasées

Asservissement de vitesse: 2 machines actives

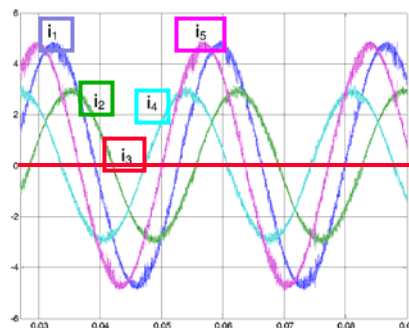
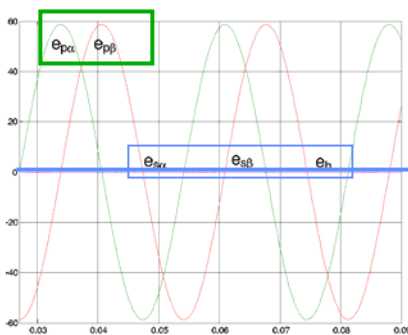


Courant de phase et courants d,q



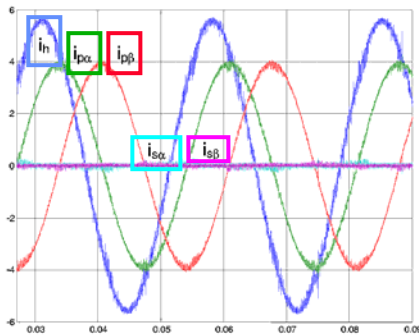
Avec $i_{qms} = 30\% i_{qmp}$... pertes Joule minimales

Hypothèse d'une machine « sinus » sans harmonique de fem

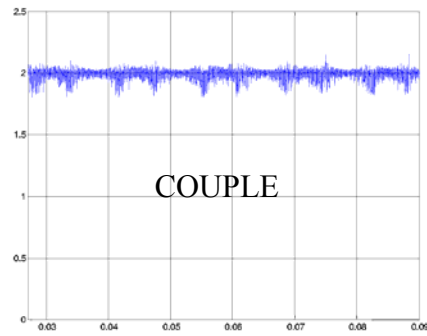


Stratégie: ne piloter que les machines principale et secondaire

Hypothèse d'une machine « sinus » sans harmonique de fem



Courants dans les machines fictives

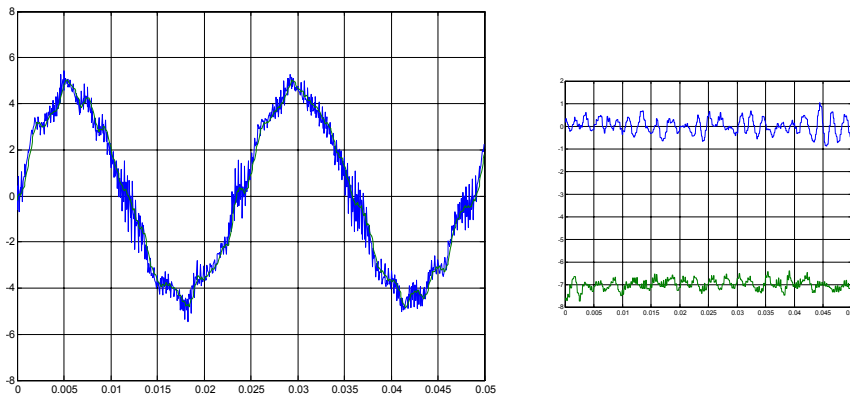


et

couple total

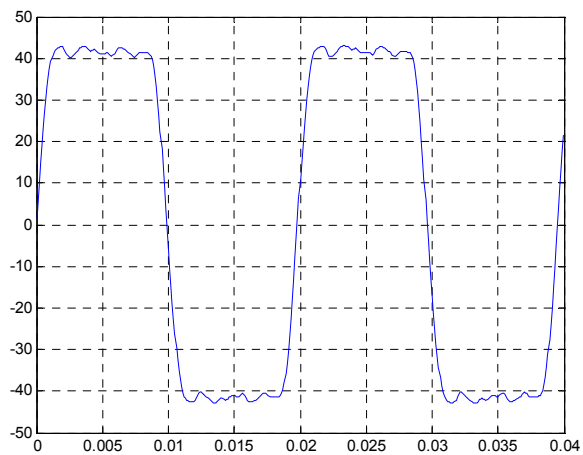
Conclusion

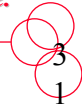
- ▶ **Entraînement polyphasée intrinsèquement ...plus fiable**
- ▶ **Formalisme... représentation conceptuellement pratique d'utilisation**
- ▶ **Formalisme...outil d'analyse et de conception...de la commande ... du générateur**
- ▶ **Formalisme...comparaison aux autres SMM**



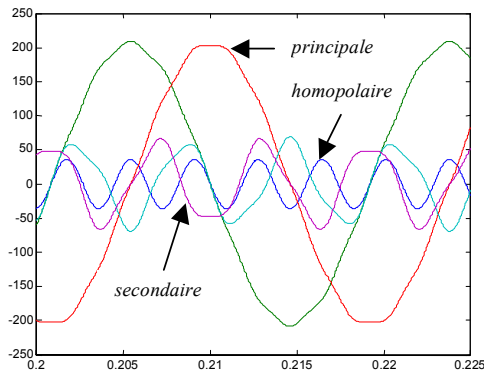
Seulement la machine principale

Fem réelle





Fem des machines fictives



Les fem sont composées par des familles harmoniques de la fem réelle.

Chaque machine peut fournir un couple constant (principale-diphassée) ou non (homopolaire).

$$C_h = e_h \cdot i_h$$

$$C_p = \vec{e}_p \cdot \vec{i}_p$$

$$C_s = \vec{e}_s \cdot \vec{i}_s$$