

Avion & électricité de l'électrotechnique haute performance

Commande d'un système de génération électrique pour réseau de bord d'avion Introduction de charges non linéaires et mise en place d'un filtre LC

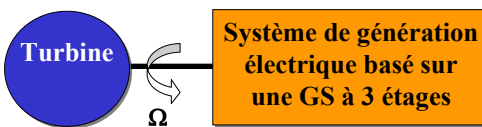
F. Khatounian, C. Khatounian, E. Monmasson, F. Berthereau, J.P. Louis



1

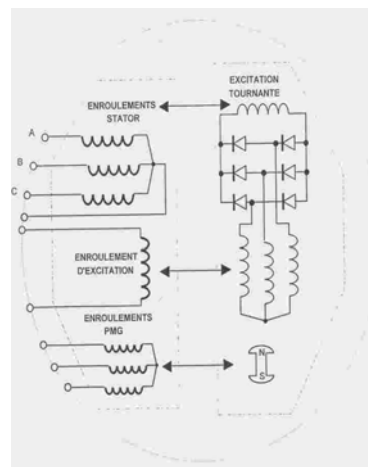
Etat de l'art

- Systèmes de génération actuels



- Prise de mouvement à vitesse variable

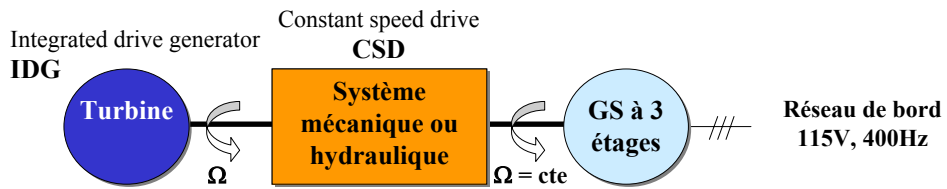
• Ne permet pas d'obtenir une tension à fréquence fixe → besoin d'un troisième élément



2

Etat de l'art

- Deux systèmes de génération électrique sur les réseaux de bord d'avion

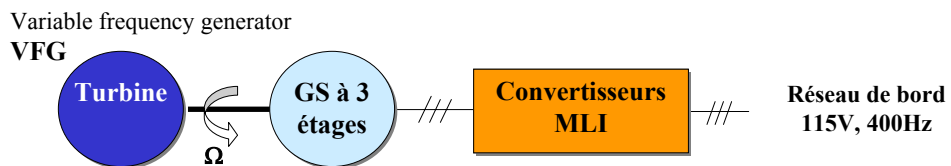


Inconvénient : coût nécessaire à la maintenance du CSD

3

Etat de l'art

- Deux systèmes de génération électrique sur les réseaux de bord d'avion



Inconvénient: dimensionnement en puissance du convertisseur

→ Autres structures de type VFG

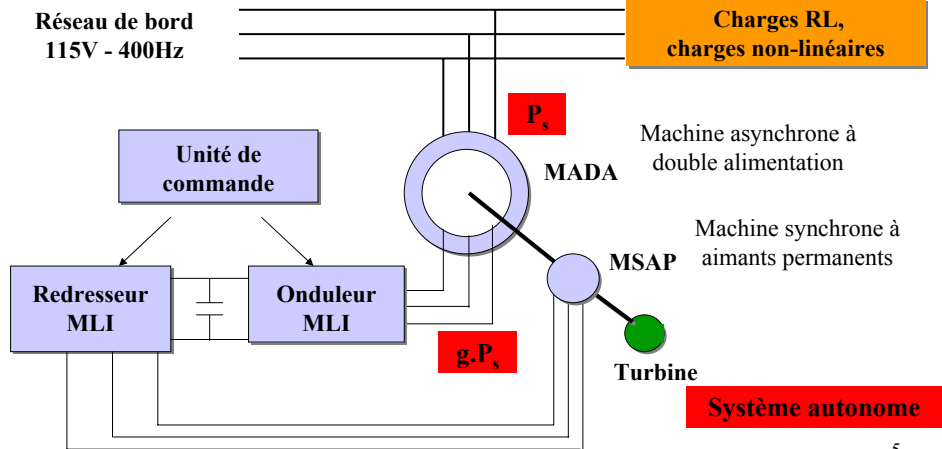
→ Nécessité de diminuer les dimensions du convertisseur

4

Système de génération à vitesse variable et fréquence fixe

Variable speed constant frequency
VSCF

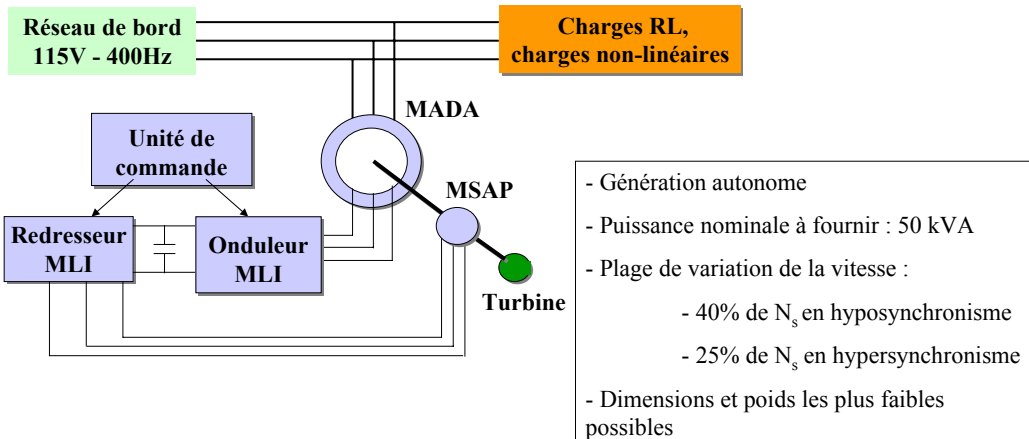
Système fréquemment utilisé dans
l'éolien et la microhydraulique



5

Système de génération à vitesse variable et fréquence fixe

• Cahier des charges :

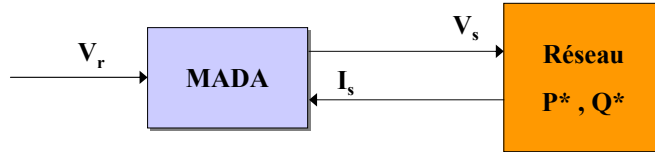


- Génération autonome
- Puissance nominale à fournir : 50 kVA
- Plage de variation de la vitesse :
 - 40% de N_s en hyposynchronisme
 - 25% de N_s en hypersynchronisme
- Dimensions et poids les plus faibles possibles

6

Modélisation de la MADA

- **Problématique** : établir une modélisation exploitable du système



Pour les besoins de la commande :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = -(1/T_r) \cdot \varphi_{rd} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} - (M_{sr}/T_r) \cdot i_{sd} + v_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = -(1/T_r) \cdot \varphi_{rq} - \omega_r \cdot \varphi_{rd} - (M_{sr}/T_r) \cdot i_{sq} + v_{rq} \end{cases}$$

Équation de sortie impropre

$$\begin{cases} v_{sd} = -\frac{M_{sr}}{L_r \tau_r} \cdot \varphi_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot \omega \varphi_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot v_{rd} + \left(r_s + \left(\frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 \cdot r_r \right) \cdot i_{sd} - \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_r \tau_r} \cdot \varphi_{rq} - \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot \omega \varphi_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot v_{rq} + \left(r_s + \left(\frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 \cdot r_r \right) \cdot i_{sq} + \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases}$$

7

Stratégie de commande de la MADA

- **Objectif** : Commander V_s en amplitude et en fréquence
- **Principe** : Commande vectorielle dans le but de découpler les puissances
- **Choix du repère** :

- référentiel lié au champ statorique

- flux statorique aligné avec l'axe \mathbf{d} : $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $\varphi_{sq} = 0$

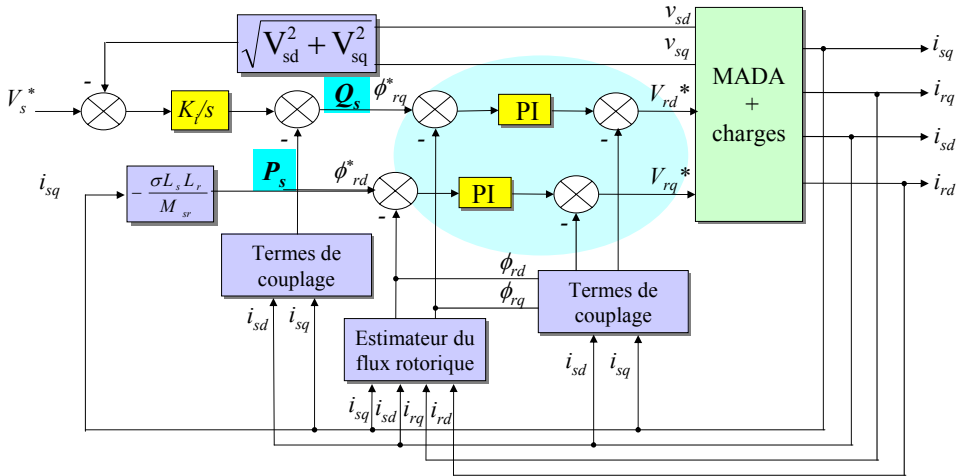
$$\begin{aligned} P_s &= \frac{(1-\sigma)}{\sigma M_{sr}} \sqrt{3} V_s \varphi_{rq} \\ Q_s &= \frac{(1-\sigma)}{\sigma M_{sr}} \left(\sqrt{3} V_s \varphi_{rd} - \frac{L_r}{M_{sr}} \frac{3V_s^2}{\omega_s} \right) \end{aligned}$$

- **Structure** :
 - Boucles internes de régulation du flux rotorique
 - Boucle externe de régulation de la tension de réseau (tension statorique)

8

Schéma bloc de la commande de la MADA

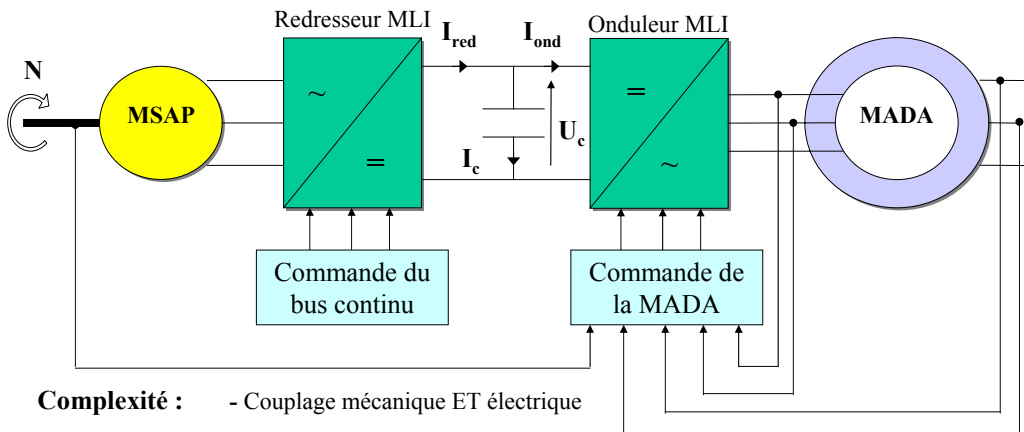
• Schéma-bloc de la commande de la MADA :



9

Schéma de la cascade côté rotor

• Cascade côté rotor :



Complexité :

- Couplage mécanique ET électrique
- Chaîne bidirectionnelle en énergie

→ Commander le redresseur afin de réguler la tension U_c du bus continu

10

Modélisation de la MSAP en vue de la commande

• Equations d'état de la MSAP :

$$\begin{cases} V_d = R_{ms} I_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - E_d \\ V_q = R_{ms} I_q + L_q \frac{d}{dt} I_q - E_q \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E_d = \omega L_q I_q \\ E_q = -\omega L_d I_d - \omega \phi_f \end{cases}$$

- Machine symétrique $\rightarrow L_d = L_q$

• Commande de la MSAP :

- **Objectif** : Réguler U_c à sa valeur nominale
- **Principe** : Commande vectorielle – référentiel lié au flux inducteur

- **Structure** :
 - Boucles internes de régulation des courants statoriques
 - Boucle externe de régulation de la tension du bus continu

11

Principe de commande de la MSAP

• En régime permanent et en négligeant R_{ms} :

$$\begin{cases} V_d = -\omega L_q I_q \\ V_q = \omega L_d I_d + \omega \phi_f \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I_q^* = \frac{P}{\omega \phi_f}} \quad (\text{avec } L_d = L_q)$$

$$P = I_d \cdot V_d + I_q \cdot V_q$$

$\rightarrow I_q^*$ directement proportionnel à la puissance demandée ou renvoyée par la MADA

• I_q fixe V_d et U_c limitant $V \rightarrow$ besoin d'une stratégie de défluxage

$$\Rightarrow \begin{cases} |V| < V_{lim}(U_c) & \Rightarrow I_d^* = 0 \\ |V| > V_{lim}(U_c) & \Rightarrow I_d^* = \frac{(\sqrt{V_{lim}^2(U_c) - V_q^2} - \omega \phi_f)}{\omega L_d} \end{cases}$$

12

Principe de commande de la MSAP

• Régulation de U_c

$$P = U_c I_{\text{red}} = \omega \varphi_f I_q$$

En supposant les pertes nulles :

$$C \frac{dU_c}{dt} = I_{\text{red}} - I_{\text{ond}}$$

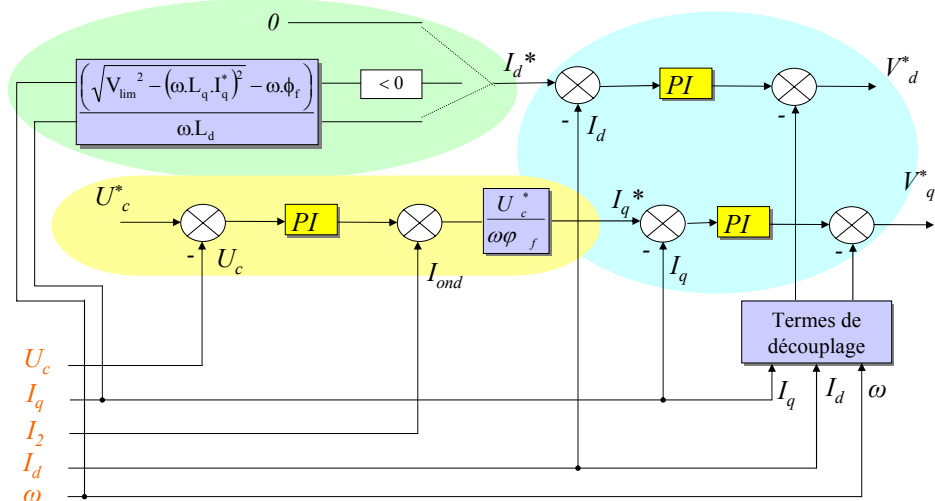
Equation de base pour la régulation du bus continu:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_q = \frac{U_c}{\omega \varphi_f} I_{\text{red}} \\ C p \cdot U_c = \frac{\omega \varphi_f}{U_c} I_q - I_{\text{ond}} \end{cases}$$

13

Schéma bloc de la commande de la MSAP

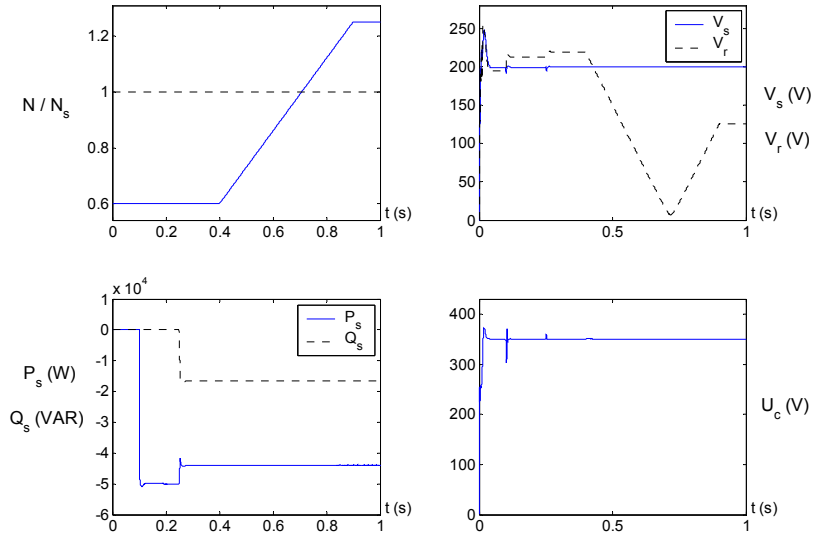
• Schéma-bloc de la commande de la MSAP



14

Résultats de simulation

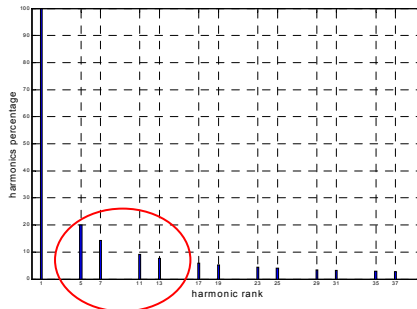
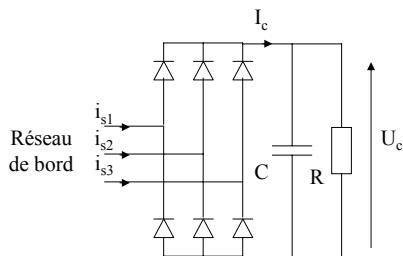
- Variation de charge suivie d'une variation de vitesse de $0.6N_s$ à $1.25N_s$



15

Ajout de charges non linéaires

- Pont redresseur à 6 diodes

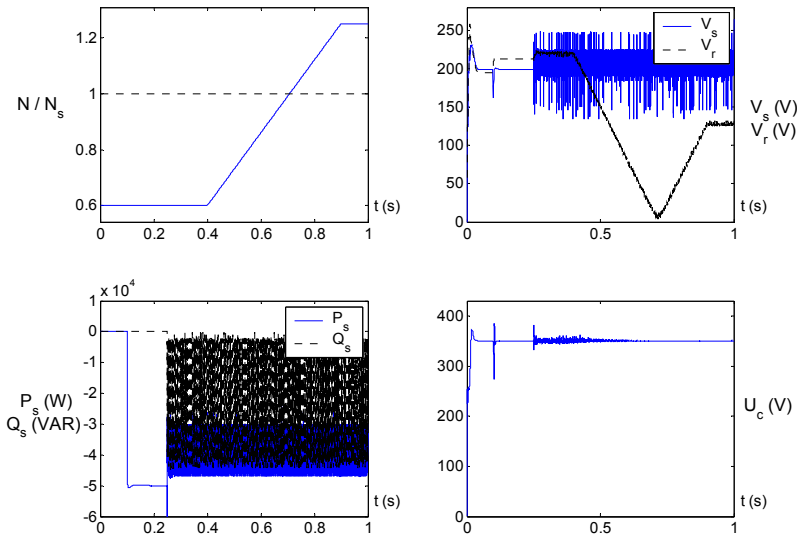


- Modélisation groupée de toutes les charges non-linéaires en un seul pont à diodes
- Réseau avec 50% de charges non-linéaires imposé par le cahier des charges

16

Influence des charges non linéaires

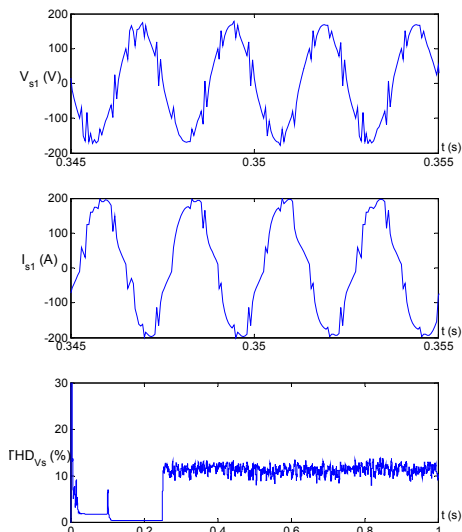
- Variation de charge suivie d'une variation de vitesse de $0.6N_s$ à $1.25N_s$ après ajout des charges non-linéaires



17

Influence des charges non linéaires

- Influence des charges non-linéaires



- Répercussion des harmoniques de courant sur la tension

→ MADA mauvaise source de tension

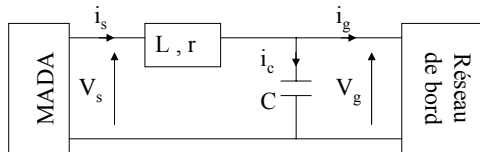
→ Nécessité de filtrer afin de réguler la tension du réseau

18

Mise en place d'un filtre LC

• Mise en place d'un filtre LC

- **Avantages** : structure simple, robustesse
- **Inconvénients** : introduction d'un élément supplémentaire qui augmente le poids et le volume du système



- **Emplacement** : entre le stator de la MADA et le réseau

19

Mise en place d'un filtre LC

• Dimensionnement du filtre

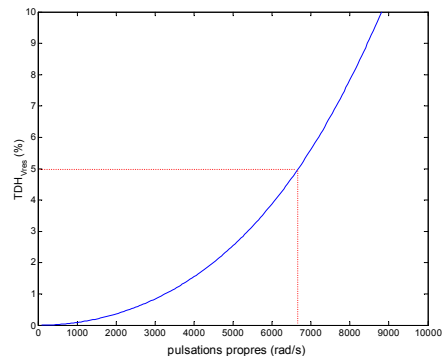
$$\begin{bmatrix} I_s(s) \\ V_{res}(s) \end{bmatrix} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2m\omega_0 s + \omega_0^2} \begin{bmatrix} 1 & Cs \\ Ls + r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{res}(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix}$$

avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $m = \frac{r}{2\sqrt{\frac{L}{C}}}$

• $TDH_{V_{res}} < 5\%$ → $\omega_0 = 6300 \text{ rad/s}, \quad \forall m$

• $P_J < 1\%$ → $r_{max} = \frac{0.01 P_{s_nom}}{3 I_{s_nom}^2}$

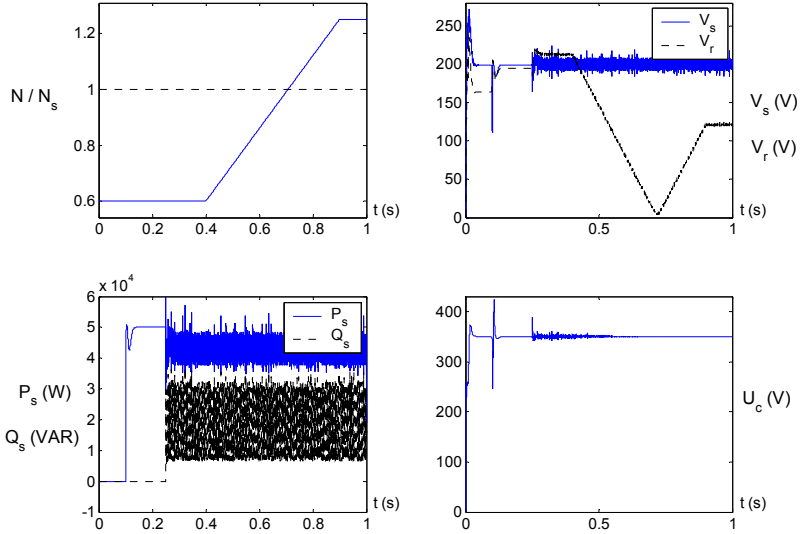
• $L = 10\% L_s$ → $C = \frac{1}{L\omega_0^2}$



20

Mise en place d'un filtre LC

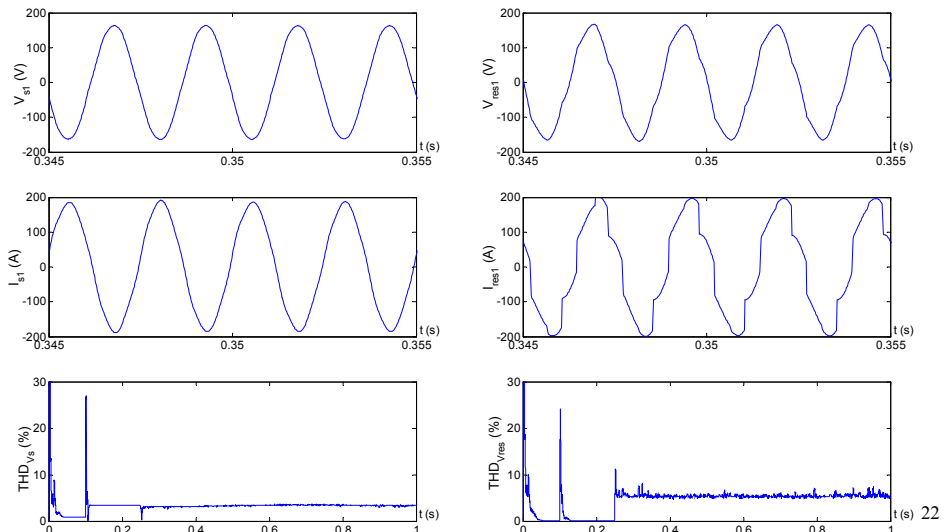
- Variation de charge suivie d'une variation de vitesse de $0.6N_s$ à $1.25N_s$ après la mise en place du filtre LC



21

Mise en place d'un filtre LC

- Formes d'onde au niveau de la MADA et du réseau



22

Conclusion

- Présentation d'un système de génération VSCF basé sur une MADA.
- Principes de commande de la MADA et de la MSAP et simulations.

→ Régulation en amplitude et en fréquence de la tension de réseau sous une large plage de variation de la vitesse.

- Introduction de CNL : pont redresseur à 6 diodes.

→ Détérioration des formes d'onde et des résultats obtenus – $TDH_{V_{res}}$ important

- Mise en place d'un filtre LC

→ Tension du réseau régulée en amplitude et en fréquence avec $TDH < 5\%$

23

Perspectives

- Meilleure modélisation de la charge :
 - répartition des charges non-linéaires (succession de ponts)
 - prise en compte des câbles (feeders)
 - introduction de déséquilibres au réseau
- Optimisation du filtrage :
 - filtre réparti ou charges à absorption sinus
 - réduction de l'encombrement du filtre (poids et volume)
- Optimisation du bus continu
- Comparaison des résultats de ce système avec les systèmes actuels

24

