

# MINIPROJET Actionneurs Electromécaniques

## « Conception d'une chaîne de conversion pour un volant d'inertie »

### 1 SOMMAIRE

1	Sommaire.....	1
2	Contexte et objectifs.....	1
3	Description DU SYSTEME – DEFINITION DE LA MISSION.....	2
3.1	Présentation du système.....	2
3.2	Caractérisation du profil de stockage/déstockage du volant.....	3
3.3	Dimensionnement du volant.....	4
3.4	Modélisation et commande vectorielle du moteur.....	4
3.5	Contrôle-commande du moteur.....	4
3.6	Thèmes complémentaires.....	4

### 2 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le contexte actuel de réduction de la consommation énergétique globale à l'échelle planétaire, le contrôle-commande des très nombreux moteurs présents dans l'industrie ou le transport apporte une solution efficace pour optimiser leur consommation.

Dans le cadre de ce projet, nous nous proposons de **concevoir et valider une chaîne de conversion électromécanique** complète pour alimenter un volant d'inertie couplé à une centrale photovoltaïque.

La conception passera essentiellement par une :

- caractérisation de la charge et de l'application visée ;
- définition du profil du moteur électrique choisi et choix du moteur (technologie, gamme constructeur);
- choix des principaux éléments interfaçant le moteur au réseau et à sa charge ainsi que de l'architecture de contrôle-commande pour ce système étudié en cours de 2<sup>ème</sup> année (commande vectorielle).

La phase de validation consistera à simuler le système à l'aide du logiciel Matlab-Simulink et, dans une certaine mesure, à l'aide d'un banc expérimental.

Vous serez répartis en groupes de 2 à 3 étudiants chacun.

**Les enseignants s'inscriront également dans cette démarche de projet : ils auront ainsi plus un rôle de tuteur pédagogique pour vous amener à vous poser les bonnes questions, sans parfois y répondre directement. Vous êtes les acteurs de votre projet et nous évaluerons également votre capacité à adopter un rôle actif dans l'apprentissage de vos enseignements.**

Au terme du projet, vous serez évalués à la fois sur vos compétences acquises mais aussi sur vos capacités à travailler en groupe pendant un certain nombre de semaines. Il vous sera ainsi demandé de vous autoévaluer mais aussi d'évaluer vos collègues par rapport à un certain nombre de critères, soit techniques soit managériaux.

Les objectifs pédagogiques du projet consistent ainsi à :

- mieux appréhender le fonctionnement et la modélisation de machines électriques classiques ;
- maîtriser la commande de machines électriques tournantes classiques ;
- mieux appréhender une chaîne de conversion électromécanique complète (connaissance des éléments constituant cette chaîne de conversion, éléments de modélisation et de contrôle de ces composants, ...);

- savoir formuler un cahier des charges pour le dimensionnement d'une chaîne de conversion ;
- savoir travailler en groupe, dans le cadre d'un apprentissage par problème ;
- savoir évaluer son travail et ses compétences acquises à l'issue du projet.

Compte-tenu des contraintes horaires du projet, nous proposons dans une première phase de donner clairement les premiers objectifs du projet à travers une méthodologie. Dans une deuxième phase, vous serez libres de choisir et développer **un ou plusieurs thèmes complémentaires**, dont une liste non exhaustive sera donnée plus loin.

Au sein de chaque groupe, la répartition des forces humaines est laissée libre à l'appréciation du groupe. Cette répartition devra cependant être harmonieuse et éventuellement évolutive dans le temps en fonction des besoins évalués à chaque séance. La notation globale tiendra compte du nombre d'heures réelles passées par chacun et des aspects liés à la gestion de projet.

Tous les choix et calculs devront être argumentés, les détails pouvant être reportés en annexe du rapport final.

Attendus du projet (livrables) :

1. un rapport de projet synthétique (10 pages maximum) reprenant votre méthodologie et votre organisation interne, les principaux résultats de votre étude, sans oublier un positionnement général et une conclusion. Une liste de références bibliographiques pourra être ajoutée en fonction de vos lectures.

2. une fiche d'évaluation personnelle et de groupe (cette fiche vous sera transmise à la fin du projet).

L'évaluation de projet portera sur deux items : une évaluation collective (notation du compte-rendu du groupe), une évaluation individuelle (1h, en fin de projet).

**Remarque importante aux étudiants :**

**Après un début de projet très guidé, les lignes pédagogiques directrices sont de plus en plus vagues. Le miniprojet est en effet avant tout un projet. Il vous laisse toute liberté d'aborder et d'approfondir certains points plutôt que d'autres. Dans tous les cas, vos choix seront argumentés et les résultats seront illustrés et confrontés aux éléments de théorie dont vous disposez par ailleurs dans les divers cours de la filière.**

### 3 DESCRIPTION DU SYSTEME – DEFINITION DE LA MISSION

#### 3.1 Présentation du système

On s'intéresse dans ce projet à l'hybridation d'une centrale photovoltaïque de 250 kWc avec un système de stockage inertiel à dimensionner.

Pour dimensionner le stockage, on partira du profil de production photovoltaïque le plus contraignant en terme de variabilité au cours d'une journée (cf. figure 1).

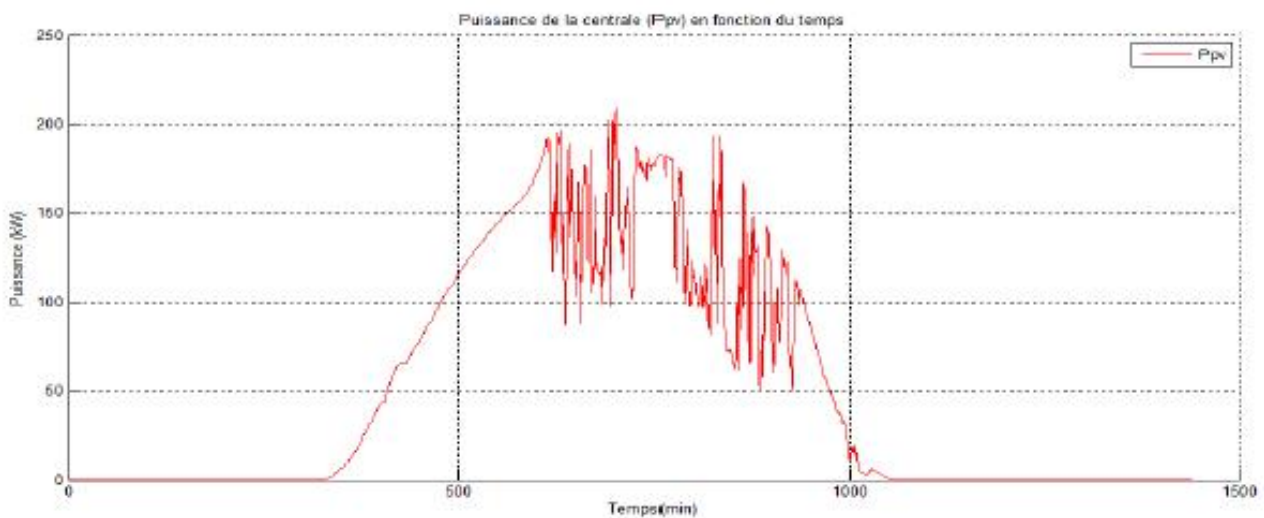


Figure 1 : Profil de production PV pour le dimensionnement du système de stockage

La variabilité « haute fréquence » de ce profil de production sera lissée grâce à un volant d'inertie. Le principe de ce système de stockage consiste à stocker (réciproquement déstocker) de l'énergie sous forme inertielle en contrôlant la vitesse de rotation d'une machine électrique fonctionnant en moteur (réc. en générateur), via son interface d'électronique de puissance.

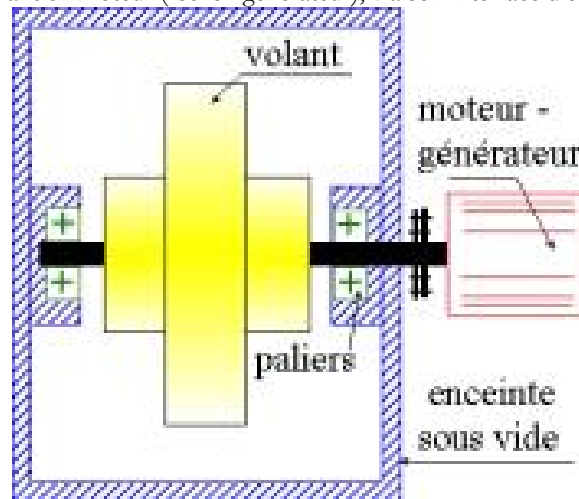


Figure 2 : Schéma de principe d'un volant d'inertie

De nombreuses technologies de machine ont été étudiées pour optimiser le bilan énergétique et la tenue mécanique du volant d'inertie (cf. références bibliographiques). Dans ce projet, nous étudierons la technologie des machines synchrones à aimants permanents, bien qu'elle ne soit optimale par rapport à son coût, et aux pertes Fer et à l'énergie magnétisante nécessaire à assurer son fonctionnement.

Ses avantages restent néanmoins nombreux avec du bruit et des vibrations faibles et une puissance massique élevée.

Pour le choix du volant, nous partirons sur une structure en acier avec un cylindre plein, les contraintes mécaniques étant plus fortes à proximité de l'axe de rotation que vers la périphérie extérieure.

L'inertie d'un tel volant est alors donnée par la relation :

$$J = kMR^2$$

où M désigne la masse tournante, R, le rayon maximal du volant et k, un coefficient dépendant de la forme du volant. Pour un cylindre plein, k est égal à 0,5.

La vitesse limite d'un volant d'inertie dépendant de la limite de résistance élastique du matériau le constituant. Ainsi, cette vitesse limite est donnée par la relation :

$$\Omega_{lim} = \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\rho.R^2}}$$

Où  $\sigma_{max}$  représente la limite de résistance élastique du matériau ( $\sigma_{max} = 1800 \text{ MPa}$ ) et  $\rho$ , la masse volumique du matériau ( $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ).

### 3.2 Caractérisation du profil de stockage/déstockage du volant

- 1) Filtrer le profil de production PV de manière à isoler la seule variabilité haute fréquence qui correspondra au profil de puissance demandé au système de stockage. Pour cela, vous pourrez utiliser le programme suivant (codé sous Matlab©) ou un filtrage fréquentiel programmé sous Matlab/Simulink©.

```
load('Centrale250kW_16_sept.mat');
Ppv = Grandeur_lapalud_16sept(:,4);

Fe = 0.0069; % fréquence d'échantillonnage
M = round((3.3/12)-1);
B=fir1(M,2*Fe,'low',hamming(M+1));
PV_filtre=filtfilt(B,1,Ppv);
```

- 2) Calculer le potentiel d'hybridation en puissance (PHP) défini par la relation suivant :  $PHP = \begin{cases} 1 - \frac{P_{moy}}{P_{max}} & \text{si } P_{moy} \geq 0, P_{max} > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$ . Quelle signification physique donnez-vous à cet indicateur ? Est-ce que le calcul de la puissance moyenne sur la journée est la référence la plus adéquate ?
- 3) Calculer la puissance devant être fournie à chaque instant par le volant d'inertie en prenant en compte le rendement du convertisseur d'électronique de puissance égal à 95% (attention au signe de la puissance stockée !).
- 4) Calculer l'énergie devant être stockée dans le volant à chaque instant. En déduire l'énergie utile correspondant à « la taille » minimale du réservoir nécessaire pour assurer la mission.

### 3.3 Dimensionnement du volant

Déterminer l'énergie cinétique stockable en fonction de la vitesse minimale et maximale de rotation du volant.

En considérant un taux de décharge maximal de 70%, déterminer l'énergie à stocker en fonction du profil caractérisé à la question 3.3.

La vitesse nominale du moteur retenu (cf. Annexe technique) est de 2760 tour/minute. En déduire la vitesse maximale de rotation du moteur correspondant à l'énergie à stocker calculée précédemment.

En déduire l'inertie du volant d'inertie.

Proposer alors un dimensionnement géométrique du volant.

Valider le dimensionnement du moteur pour les points de fonctionnement couple/vitesse du profil de fonctionnement.

### 3.4 Modélisation et commande vectorielle du moteur

**Tracer** l'évolution du profil de vitesse du moteur sur la journée-type retenue pour l'étude.

**Calculer** et **tracer** l'évolution du couple moteur ramené sur l'arbre moteur tout au long du cycle choisi. **Justifier** le signe du couple à chaque phase de fonctionnement.

**Valider** le choix du moteur proposé en Annexe en régime quasi-permanent.

En fonction des paramètres du moteur donnés en Annexe et en supposant que le moteur reste fluxé à sa valeur nominale tout le long du cycle retenu pour le dimensionnement, **déterminer** pour chaque instant :

- la valeur de la vitesse du moteur
- la valeur du courant statorique  $I_s$
- la valeur de la pulsation  $\omega_R$  et de la pulsation statorique  $\omega_S$
- la valeur de la tension simple statorique  $V_s$

**Conclure** quant à la réalisation du cycle complet avec ce moteur et cette alimentation. **Adapter** la commande le cas échéant.

### 3.5 Contrôle-commande du moteur

**Définir** des spécifications raisonnables pour le contrôle en couple et en vitesse de l'asservissement.

**Choisir** les architectures de contrôle-commande des boucles de régulation en couple et en vitesse du volant d'inertie.

**Synthétiser** les correcteurs pour parvenir à obtenir les performances visées.

### 3.6 Thèmes complémentaires

#### Validation du dimensionnement

Un fichier de simulation établi sous Matlab/Simulink est à votre disposition pour effectuer vos tests de validation finale :

- Pour le dimensionnement du moteur

- Pour le choix des boucles de régulation
- Pour analyser la robustesse du dimensionnement vis-à-vis des incertitudes de fonctionnement.

### **Sécurité du dispositif**

Analyser les situations d'urgence auxquelles serait soumis le système de stockage inertiel en calculant notamment les temps de freinage pour arrêter le volant.

### **Comparaison du volant d'inertie avec d'autres dispositifs de stockage**

Analyser la pertinence de cette solution de stockage par rapport aux autres technologies. On pourra s'inspirer notamment du diagramme de RAGONE permettant de comparer les différentes technologies de stockage.