

# Mini projet Actionneurs Electromécaniques

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

Professeur : RIU Delphine

Date : 27 Janvier 2020

Étudiants : AYHAN Sinan, ABDELLI Bilel, TRAN Gia Quoc Bao

### I. Introduction :

#### 1. Cadre général :

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 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 (commande vectorielle).

#### 2. Problématique et verrous scientifiques :

C'est un système avec lequel nous n'avons jamais travaillé auparavant, qui se compose d'un volant d'inertie (que nous devons concevoir) et d'une machine synchrone à aimants permanents (que nous devons commander). Mais nous avons déjà appris chacune de ces choses. Les principaux outils à utiliser seront les mathématiques, la physique, le contrôle automatique et le modèle PARK du moteur.

### II. Méthodologie retenue et principaux résultats :

#### 1. Présentation du système :

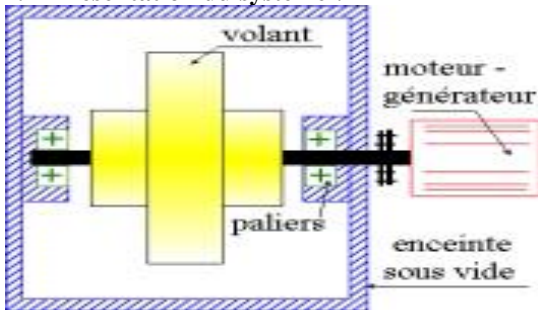


Figure 1 : Présentation du système

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

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 (rec. en générateur), via son interface d'électronique de puissance.

Dans ce projet, nous étudierons la technologie des machines synchrones à aimants permanents, ses avantages restent néanmoins nombreux avec du bruit et des vibrations faibles et une puissance massique élevée.

#### 2. Caractérisation du profil de stockage/ déstockage du volant :

Pour 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, nous avons utilisé le code MATLAB. Le résultat :

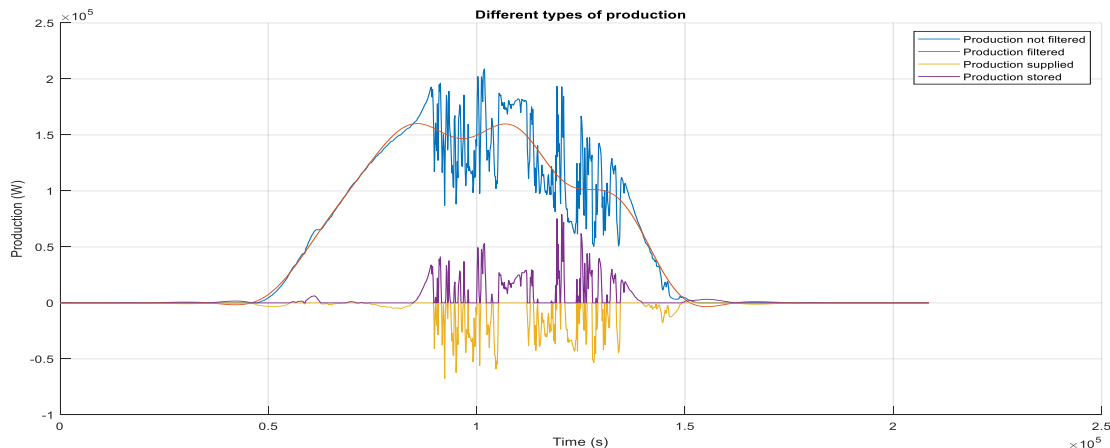


Figure 2 : Production non filtrée, filtrée, ainsi que puissance stockée et puissance devant être fournie

La figure 1 représente la production que l'on veut réaliser à l'aide du volant d'inertie. On a aussi représenté la puissance stockée et la puissance fournie. Ces puissances se calculent différemment :

$$P_{stockée} = \frac{(P_{non\ filtrée} - P_{filtrée})}{\eta}$$

Alors que :

$$P_{fournie} = (P_{non\ filtrée} - P_{filtrée}) \times \eta.$$

La puissance du volant est donc égale à la somme de ces 2 puissances :  $P = P_{stockée} + P_{fournie}$

Ensuite nous avons calculé le potentiel d'hybridation en puissance (PHP) défini par :

$$PHP = \begin{cases} 1 - \frac{P_{moy}}{P_{max}} & \text{si } P_{moy} \geq 0, P_{max} > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

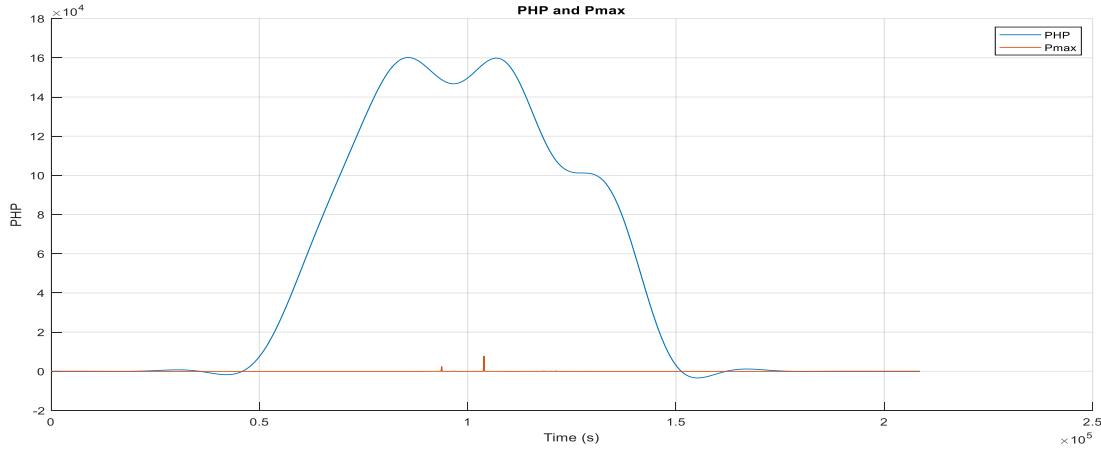


Figure 3 : Graphique représentant le PHP à tout instant

En réalité le PHP doit avoir des valeurs aux alentours de 1, nous n'avons pas réussi à le calculer correctement, même si le code a été vérifié. Nous avons ensuite calculé l'énergie devant être stockée dans le volant à chaque instant. Voici la formule que l'on utilise :

$$E_s(t) = E_s(t_0) - \int_{t_0}^t P(u) du$$

On a d'abord posé  $E_s(t_0) = 0$ , nous allons calculer ce terme plus tard (cette énergie est tracée dans la figure 3).

L'énergie utile correspondant à "la taille" minimale du réservoir nécessaire pour assurer la mission :  $E_u = \max(E_s) - \min(E_s) = 60 MJ$  (semble assez important)

### 3. Dimensionnement du volant :

L'énergie cinétique stockable en fonction de la vitesse minimale et maximale de rotation du volant :

$$E_{stockable} = \frac{1}{2} J (\Omega_{max}^2 - \Omega_{min}^2)$$

En considérant un taux de décharge maximal de 70% ( $DoD_{max} = 0.7$ ), déterminer l'énergie à stocker en fonction du profil caractérisé : On veut une capacité plus grande :

$$Capacité = \frac{E_{stockable}}{DoD_{max}}$$

Il faut donc reprendre la courbe de l'énergie déterminé plus tôt en calculant  $E_s(t_0)$  pour que la courbe de l'énergie ne descende pas en dessous de 30% de la capacité : il faut prendre :

$$E_s(t_0) = 0.3 \times Capacité - \min(E_s).$$

Voici ci-dessous la courbe qui représente ces 2 courbes d'énergie :

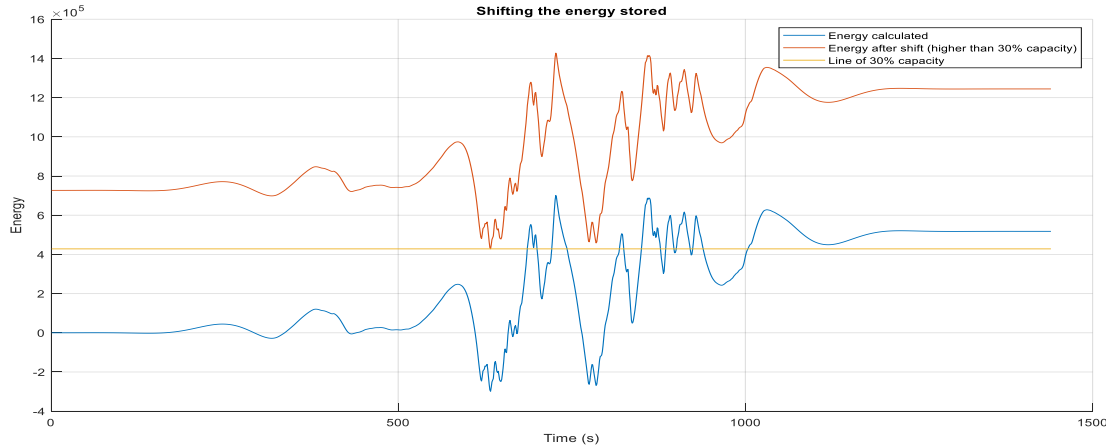


Figure 4 : Courbe représentant l'énergie stockée à tout instant et l'énergie à stocker pour rester au dessus des 30% de la capacité

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

On a la relation suivante :  $Capacité = \frac{1}{2}J\Omega_{max}^2 = \frac{1}{2}J(\Omega_{max}^2 - \Omega_{min}^2) \times \frac{1}{DoD_{max}}$ , ce qui nous amène à la relation suivante :  $\Omega_{max} = \Omega_{min} \times \sqrt{\frac{1}{1-DoD_{max}}} = 528 \text{ rad.s}^{-1}$

L'inertie du volant d'inertie : En prenant la relation  $Capacité = \frac{1}{2}J\Omega_{max}^2$ , on trouve  $J = \frac{2 \times Capacité}{\Omega_{max}^2}$

Nous avons proposé ce dimensionnement géométrique du volant : On a d'abord choisi une valeur de la longueur, sans quoi il n'aurait pas été possible de faire le dimensionnement géométrique du volant. On a pris une longueur du volant de 1m, ce qui est déjà assez élevé.

À partir de la relation  $J = kMR^2 = 615 \text{ kg.m}^2$ , avec  $M = \rho V = \rho \pi L R^2$ , on trouve  $R = \left(\frac{J}{\rho k \pi L}\right)^{1/4}$

L'épaisseur de la roue est choisie pour être de  $L = 15 \text{ cm}$ . L'application numérique nous mène à un rayon du volant de  $R = 46 \text{ cm}$ , donc notre volant est assez grand pour la mission. Le poids du volant est  $M = 194 \text{ kg}$ .

Ensuite nous avons validé le dimensionnement du moteur pour les points de fonctionnement couple/vitesse du profil de fonctionnement : Il fallait donc valider ce dimensionnement en traçant les points de fonctionnement, ainsi que les limites de valeurs : toutes ces courbes se trouvent sur la courbe suivante :

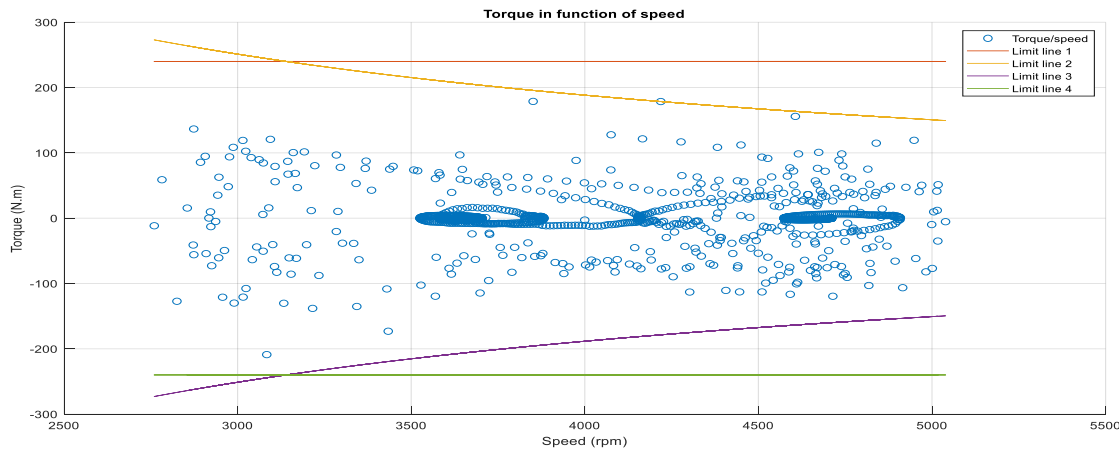


Figure 5 : Points de fonctionnement et limites du couple en fonction de la vitesse

La courbe jaune a comme équation :  $\Gamma = \frac{P_{max}}{\Omega}$ , elle représente la limite en fonction de la vitesse, les courbes constantes (courbe orange et verte) sont à 250N.m, on se réfère à la documentation. On observe que tous les points de fonctionnement se trouvent à l'intérieur des limites que l'on a tracé. Ce qui **valide** le dimensionnement du moteur.

On constate que les points de fonctionnements sont tous situés à l'intérieur des limites, certains points sont aux limites, cela est en fait bon signe car cela veut dire que notre moteur n'est pas surdimensionné.

#### 4. Modélisation et commande vectorielle du moteur :

Dans cette partie nous avons commencé par tracé l'évolution du profil de vitesse du moteur sur la journée-type retenue pour l'étude :

On a  $\Omega = \sqrt{\frac{2 \times E_S}{J}}$ , l'énergie utilisé correspond à l'énergie qui permet de rester au-dessus de 30% de la capacité.

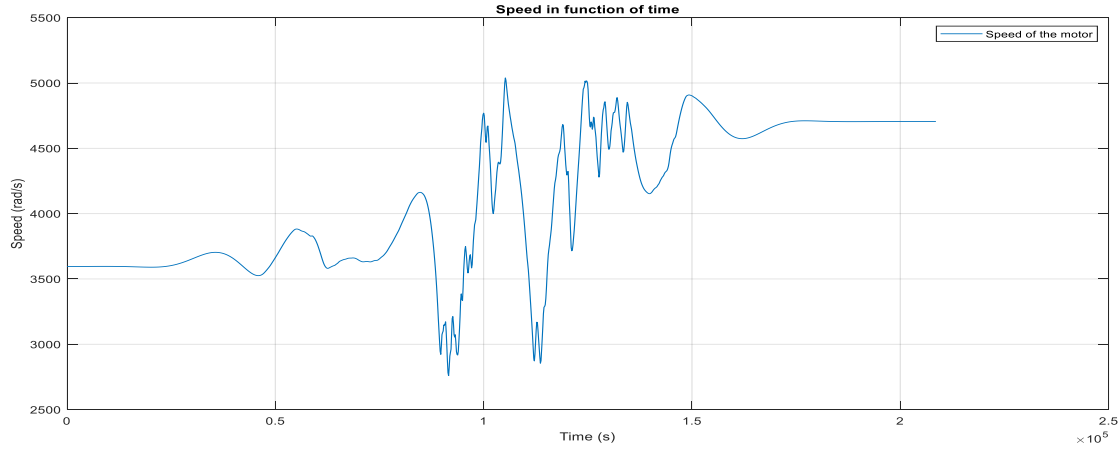


Figure 6 : Vitesse du moteur en fonction du temps

On note que  $\Omega$  est toujours positif.

Ensuite nous avons calculé et tracé l'évolution du couple moteur ramené sur l'arbre moteur tout au long du cycle choisir.

On a  $\Gamma = \frac{P}{\Omega}$  :

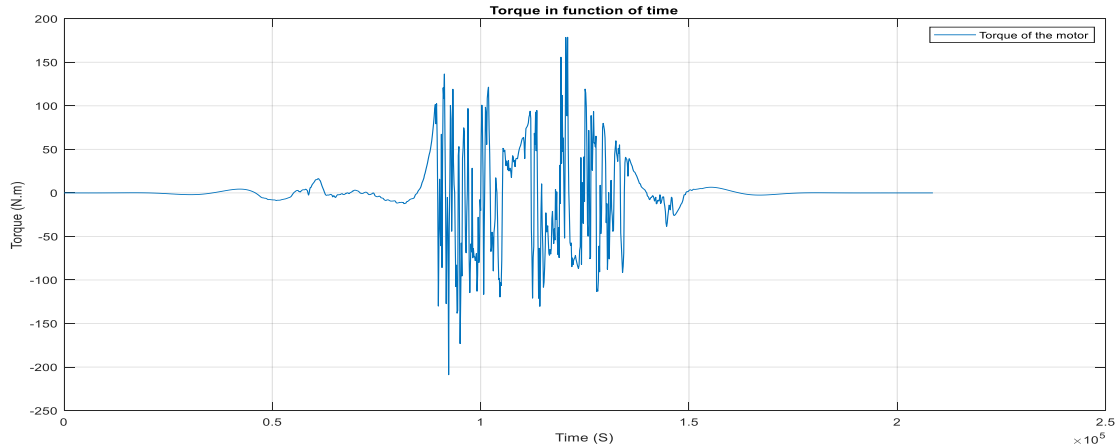


Figure 7 : Couple du moteur en fonction du temps

Lorsque l'on doit stockée de l'énergie, on fournit un couple positif pour permettre au volant de stocker de l'énergie. Lorsque le couple est négatif, nous devons fournir de l'énergie donc l'arbre doit freiner.

En fonction des paramètres du moteur donné en Annexe et en supposant que le moteur reste fluxé à sa valeur nominale tout le long du

Pour les courants statoriques, on utilise le modèle de PARK :  $\begin{cases} i_{sd}^* = \sqrt{3}I_s \cos(\delta) \\ i_{sq}^* = \sqrt{3}I_s \sin(\delta) \end{cases}$

On choisi  $\delta = \frac{\pi}{2}$  pour maximiser le couple moteur, ainsi on obtient :  $\begin{cases} i_{sd}^* = 0 \\ i_{sq}^* = \sqrt{3}I_s = \frac{\Gamma_{elm}g}{p \times \Phi_{Fsd}} \end{cases}$

Nous avons déjà calculé le couple  $\Gamma_{elm}g$ , le moteur est "HKW242\_225DAC", on utilise la documentation pour trouver :

$$p = 4, \quad \Phi_{Fsd} = \frac{k_u}{p} = \frac{1.17 \text{ Vrms}/(\text{rad/s})}{4}$$

Pour les tensions, on utilise encore une fois le modèle de PARK pour la machine synchrone à aimants permanents en régime permanent

pour trouver :  $\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s L_d i_{sd} + \omega_s \Phi_{Fsd} \end{cases}$  avec  $\omega_s = p\Omega$ . Nous avons calculé les valeurs des grandeurs :

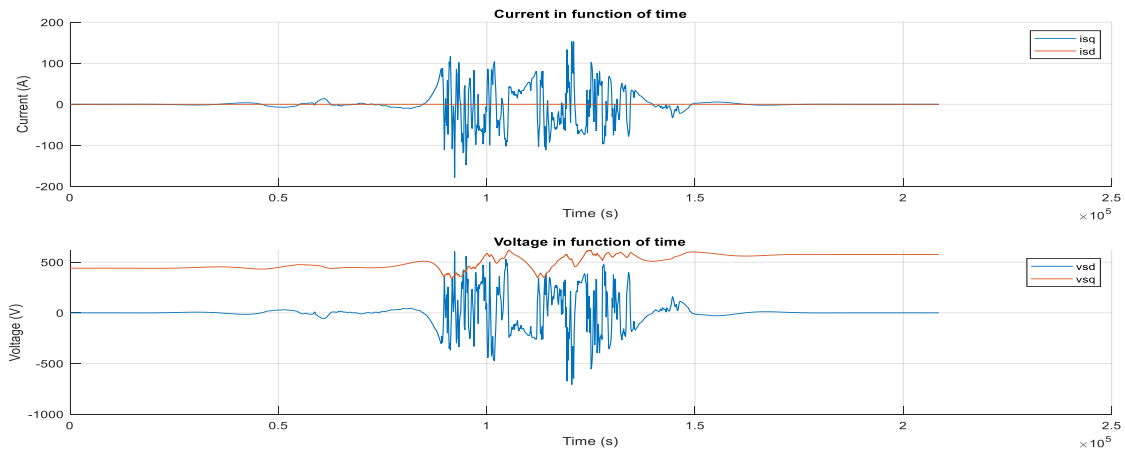


Figure 8 : Courants et Tensions statoriques du moteur en fonction du temps

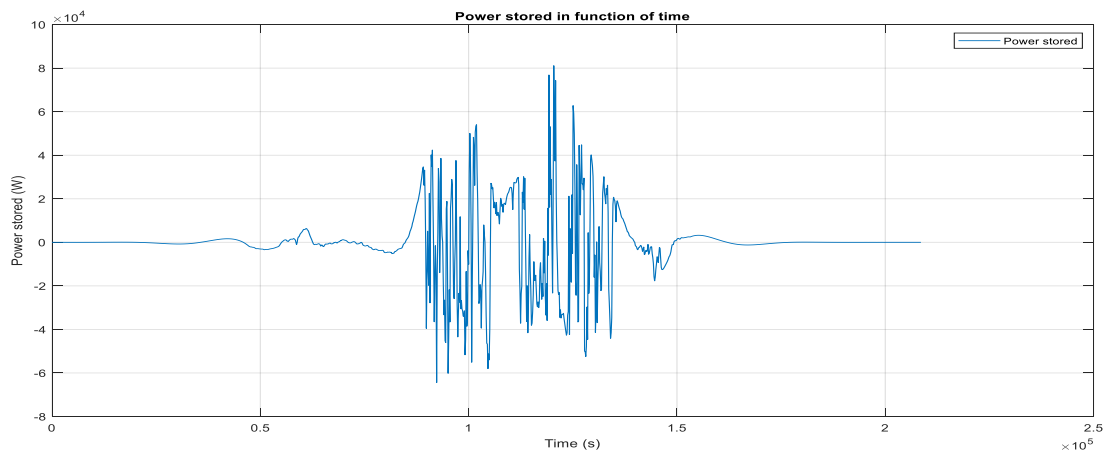


Figure 9 : La puissance stockée en fonction du temps

Nous avons aussi calculé le rendement du moteur (la puissance utile peut être la puissance stockée ou la puissance déstockée) :

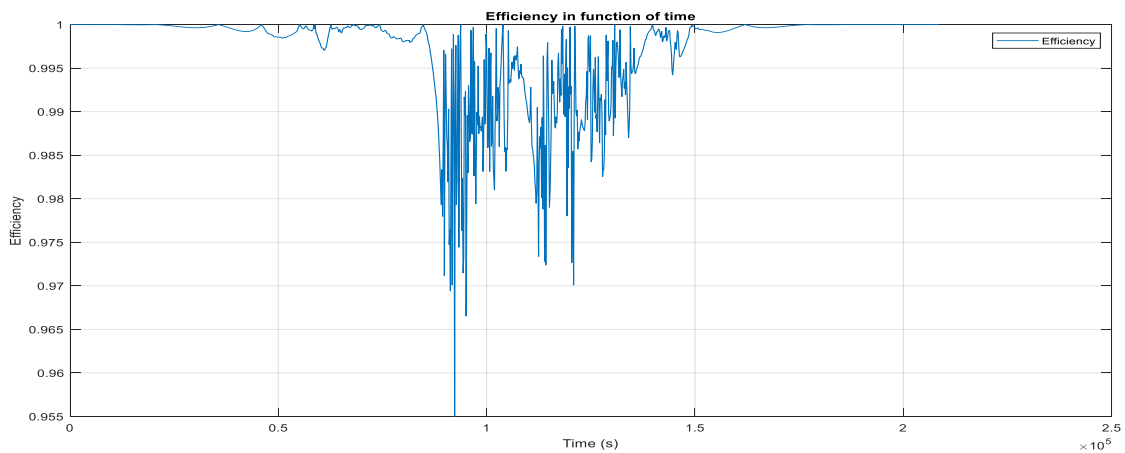


Figure 10 : Le rendement en fonction du temps

On voit que on a de bonnes valeurs pour le rendement, toujours  $\geq 95.5\%$ .

### 5. Contrôle-commande du moteur :

Tout d'abord dans cette partie nous avons choisi les architectures de contrôle-commande des boucles de régulation en couple et en vitesse du volant d'inertie. Voici les fonctions des transferts entre les courants statoriques (on utilise le modèle de PARK) :

$$v_{cd,q} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd,q}}{dt} \rightarrow G_{d,q}(s) = \frac{I_{sd,q}(s)}{V_{cd,q}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{L_{d,q}}{R_s} s}$$

Le temps de réponse du système en boucle ouverte est :

$$\tau_{res,BO,d,q} = 3 \times \frac{L_{d,q}}{R_s}$$

La fonction de transfert est stable, on utilise donc un correcteur de type PI avec cette structure :

$$K(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

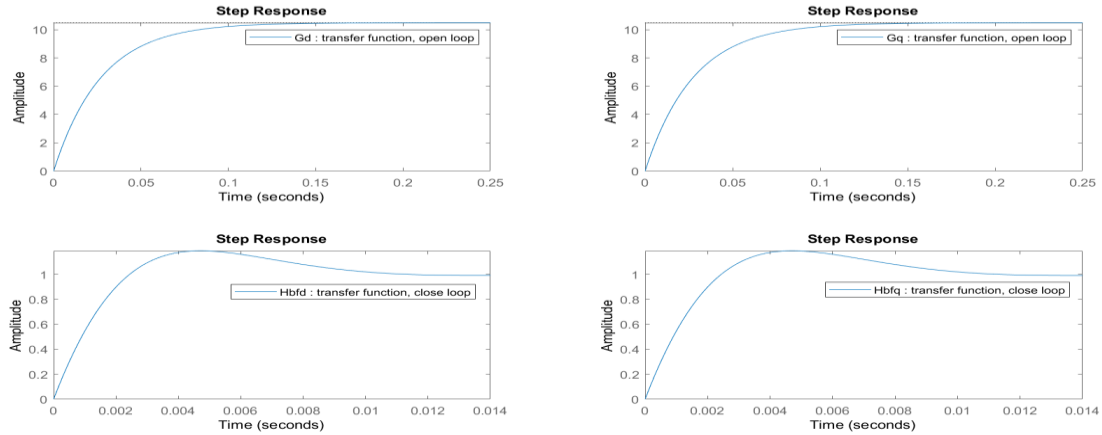


Figure 11 : Réponses en boucle ouverte et boucle fermée des fonctions de transfert des courants

Nous synthétisons les correcteurs pour obtenir les performances visées. Fonction de transfert du système en boucle ouverte et fermée :

$$H_{BO}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{L_{d,q}}{R_s} s} \rightarrow H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{1 + T_i s}{1 + \left( T_i + \frac{T_i R_s}{K_p} \right) s + \frac{T_i L_{d,q}}{K_p} s^2}$$

Pour implémenter les pôles désirés, on a pris un coefficient  $\zeta_{des} = 0.7$  :

$$1 + 2 \frac{\zeta_{des}}{\omega_{n,des}} s + \frac{s^2}{\omega_{n,des}^2} \rightarrow \begin{cases} T_i + \frac{T_i R_s}{K_p} = 2 \frac{\zeta_{des}}{\omega_{n,des}} \\ \frac{T_i L_{d,q}}{K_p} = \frac{1}{\omega_{n,des}^2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} K_p = 2 L_{d,q} \zeta_{des} \omega_{n,des} - R_s \\ T_i = \frac{K_p}{L_{d,q} \omega_{n,des}^2} \end{cases}$$

Le temps de réponse (système en boucle fermée d'ordre 2) sera :

$$\tau_{res} = \frac{4.75}{\zeta_{des} \omega_{n,des}}$$

Nous avons choisi :

$$\tau_{res,\omega} = 10 \text{ s}, \tau_{d,q} = \frac{1}{10} \times 3 \times \frac{L_{d,q}}{R_s}$$

Parce que nous avons trouvé qu'avec cette valeur, ce temps de réponse (TdR) est 4 fois plus grand que le TdR minimale du système en boucle ouverte et 10 fois plus petit que le TdR maximale.

Le système associé à la vitesse (fonction de transfert entre la vitesse et le couple) a la même relation, en faisant l'analogie  $L_{d,q} \leftrightarrow J$  et  $R_s \leftrightarrow f_1$ . Nous avons tenté de chercher la relation entre ces deux variables sous forme linéaire :

$$\Gamma_{elm} = f_0 + f_1 \Omega \rightarrow \begin{bmatrix} \Gamma_{elm(1)} \\ \dots \\ \Gamma_{elm(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Omega_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & \Omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} \rightarrow \Gamma_{elm} = \Omega_{bis} F$$

Pour obtenir de bons coefficients, on a utilisé la méthode d'Optimisation "least squares" :

$$F = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = (\Omega_{bis}^T \Omega_{bis})^{-1} \times \Omega_{bis}^T \times \Gamma_{elm} = \Omega_{bis} \setminus \Gamma_{elm} = \begin{bmatrix} -7.3309 \\ 0.0132 \end{bmatrix}$$

On considère  $f_0$  comme une perturbation. La valeur  $f_1$  étant très petite, elle est négligeable. On obtient cette équation physique :

$$\Gamma_{elm} = J_t \frac{d\Omega}{dt} \rightarrow \frac{\Omega(s)}{\Gamma_{elm}(s)} = \frac{1}{J_t s}$$

## 6. Thèmes complémentaires :

Nous avons construit un modèle Simulink pour simuler le système. Pour l'entrée on utilise un bloc "From Workspace" : on crée une variable appelée "reference\_speed" dans le Workspace, cette variable est composée de 2 colonnes, la première est pour le temps et la deuxième est pour la valeur de référence. On implante les correcteurs PI et ajoute des "Scope" pour regarder l'évolution de ces variables : les courants  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ , le couple du moteur, et la vitesse de rotation du moteur. On s'intéresse particulièrement au profil de vitesse.

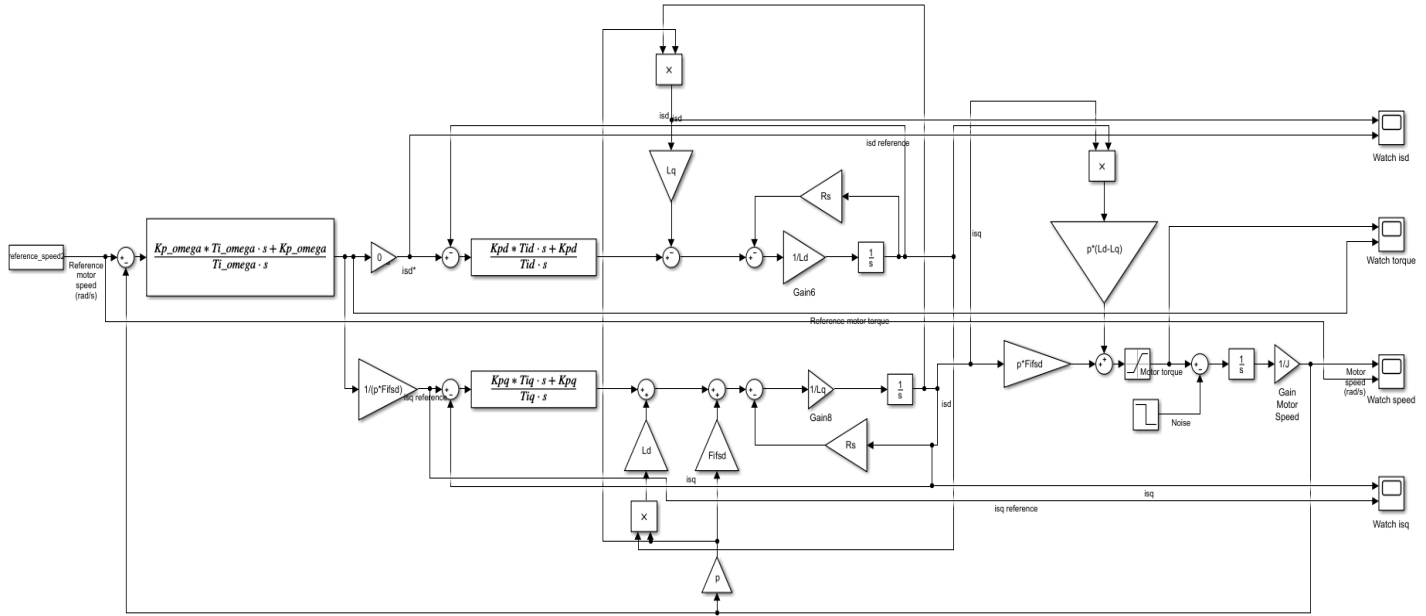


Figure 12 : Le schéma Simulink utilisé pour simuler le système

Au lancement de la simulation, nous passons d'une valeur faible à une valeur très importante, ce qui sollicite le moteur et nécessite un très grand couple de démarrage (qui est bien supérieur aux limites). Pour pallier à ce problème, il faudrait augmenter la valeur de référence plus lentement (on démarre le moteur pour quelques minutes et la commande commence quand la vitesse est d'environ 380 rad/s), on acceptera un temps de réponse plus court (nous avons un temps de réponse de 10s pour la vitesse, on peut accepter un temps de réponse un peu plus élevé). Pour vérifier que le couple reste dans les limites, ces résultats ont été obtenus avec une simulation effectuée sur 250000s. Nous savons que le temps de simulation est très long, environ 2 heures et nous risquons de manquer de mémoire informatique, alors nous intégrons **2 problèmes dans 1 simulation** : après le temps de stockage d'énergie, nous prétendons que nous avons un accident et que nous devons arrêter le moteur soudainement. Voici les résultats de la simulation :

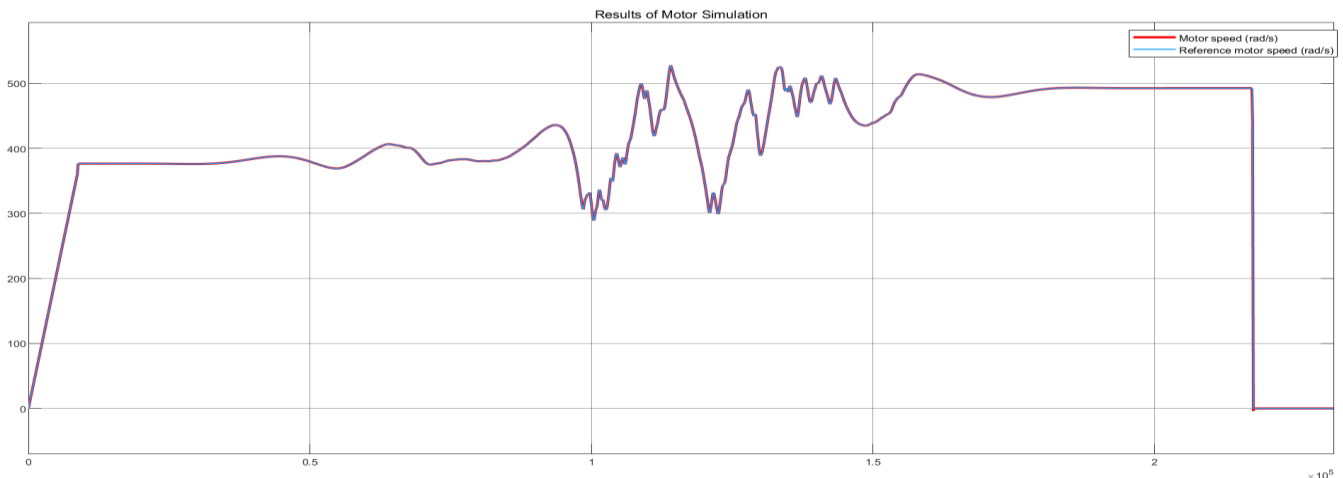


Figure 13 : Vitesse référence et vitesse sortie

On voit que la perturbation est rejetée grâce à l'intégrateur dans les correcteurs PI. La vitesse du moteur suit bien la valeur souhaitée. On peut réguler la vitesse du moteur comme on veut.

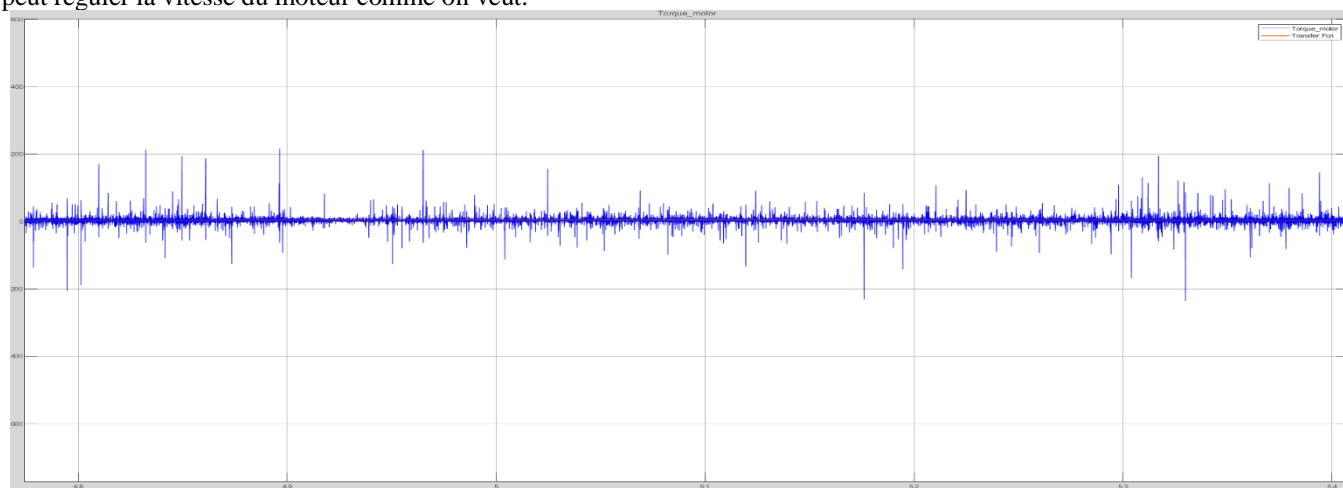


Figure 14 : Le couple du moteur

Pour le couple, on voit qu'il reste dans les limites de 200 Nm. Si on fait la simulation pour une période courte, par exemple 1440 secondes au lieu de  $1440 \cdot T_e = 250000$  s, on va observer que le couple est trop grand, d'ordre  $10^5$  et cela se révèle impossible pour notre moteur.

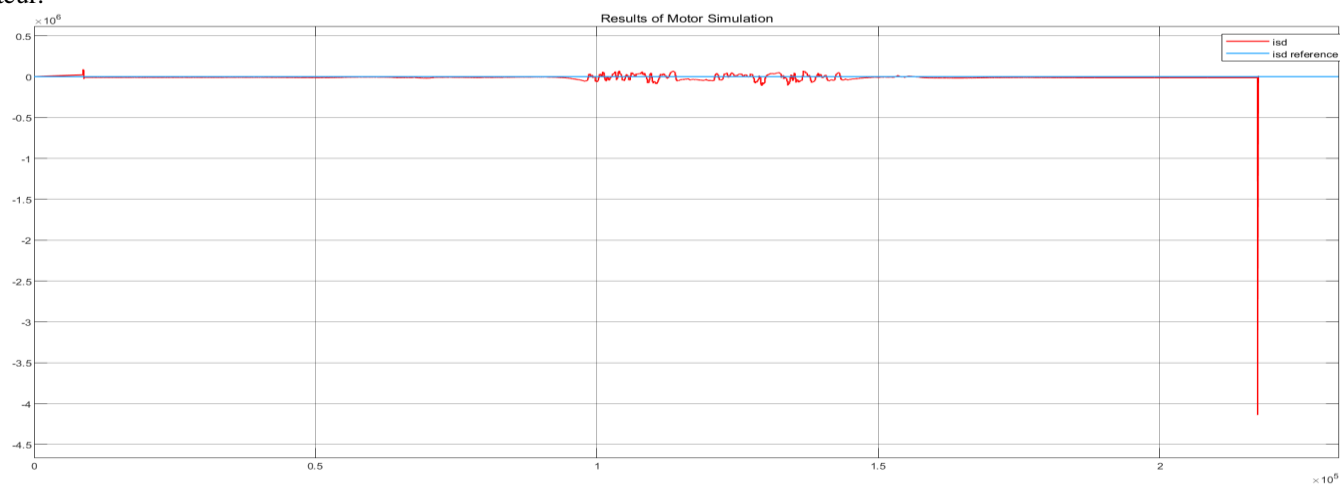


Figure 15 : Courant  $i_{sd}$  et courant  $i_{sd}$  référence

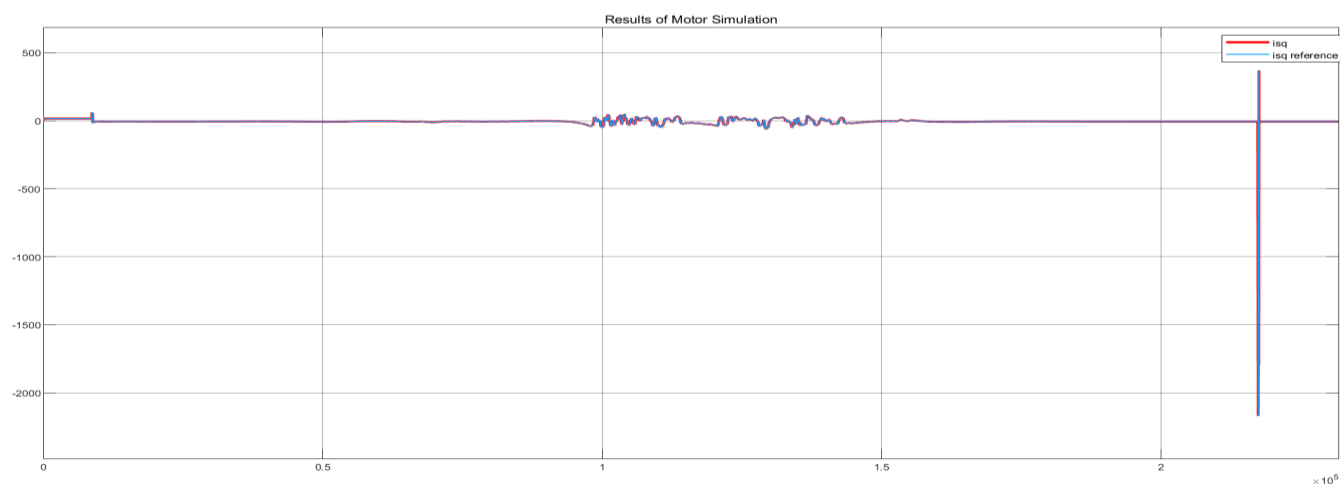


Figure 16 : Courant  $i_{sq}$  et courant  $i_{sq}$  référence



Pour étudier le cas où on doit arrêter le moteur soudainement, on considère 1 rad/s comme une vitesse assez faible pour garantir la sécurité. On voit que le temps pour arrêter le moteur est environ 8 s (ou  $8 + T_e$  si on compte à partir du moment où l'on veut arrêter le moteur). En réalité avec la période d'échantillonnage d'environ 144s, le moteur "s'arrête" après environ 152 secondes ou 2.5 minutes. C'est un peu long, parce qu'il tourne à une vitesse très élevée. Mais rappelons que nous observons des valeurs très élevées pour le couple et les courants si nous le faisons, le temps réel pour arrêter le moteur doit être plus long que cela. Un arrêt soudain peut sauver la vie d'une personne malheureuse mais en échange, nous pouvons détruire le moteur. Ce n'est pas un prix élevé après tout...

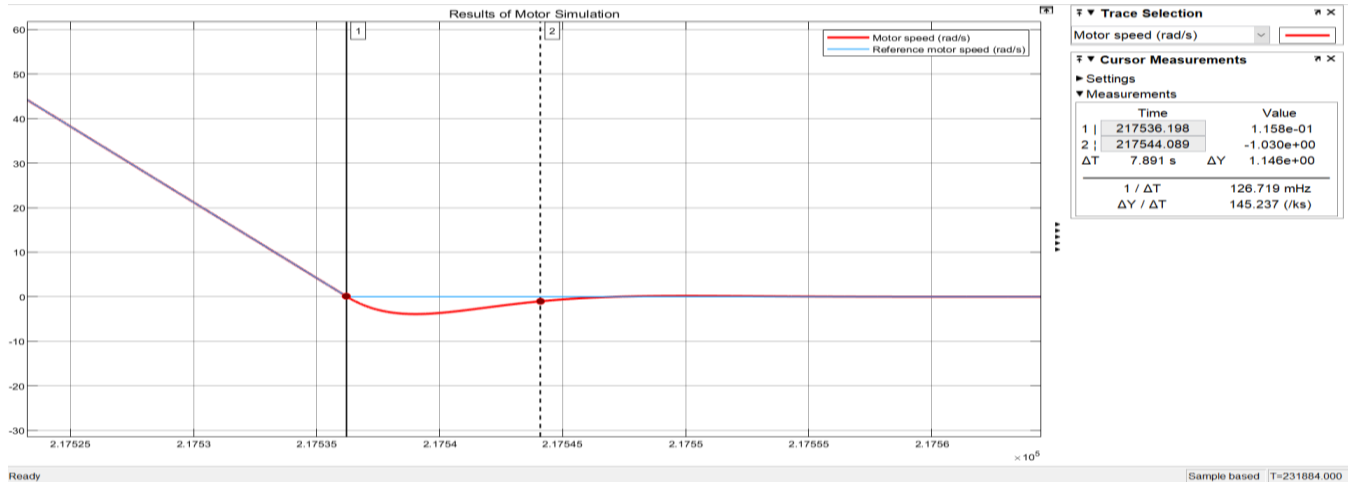


Figure 17 : Le temps pour arrêter le moteur

Finalement nous avons vérifié la densité massique de puissance du système (en W/kg) qui est définie par la puissance stockée/poids du volant :

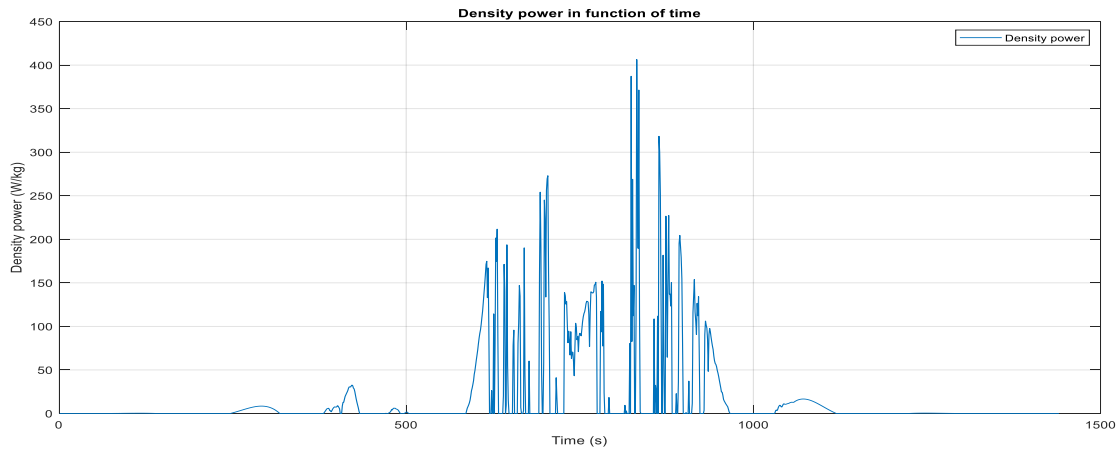


Figure 18 : La densité massive de puissance du système en fonction du temps

On voit que la densité massique de puissance est de l'ordre de 400 W/kg c'est-à-dire quelques centaines W/kg. En utilisant le diagramme de RAGONE, on voit que cette valeur **correspond** très bien à ce que nous avons trouvé sur Internet sur la densité massive du volant d'inertie.

Pour comparer cela avec d'autres systèmes, nous dirions que même si cela peut stocker moins de puissance sur le même poids, par rapport au supercondensateur ou à la batterie électrochimique (voir diagramme ci-dessous), notre système est facile à étudier, à construire, à concevoir et à contrôler, donc devrait avoir un coût beaucoup moins cher.

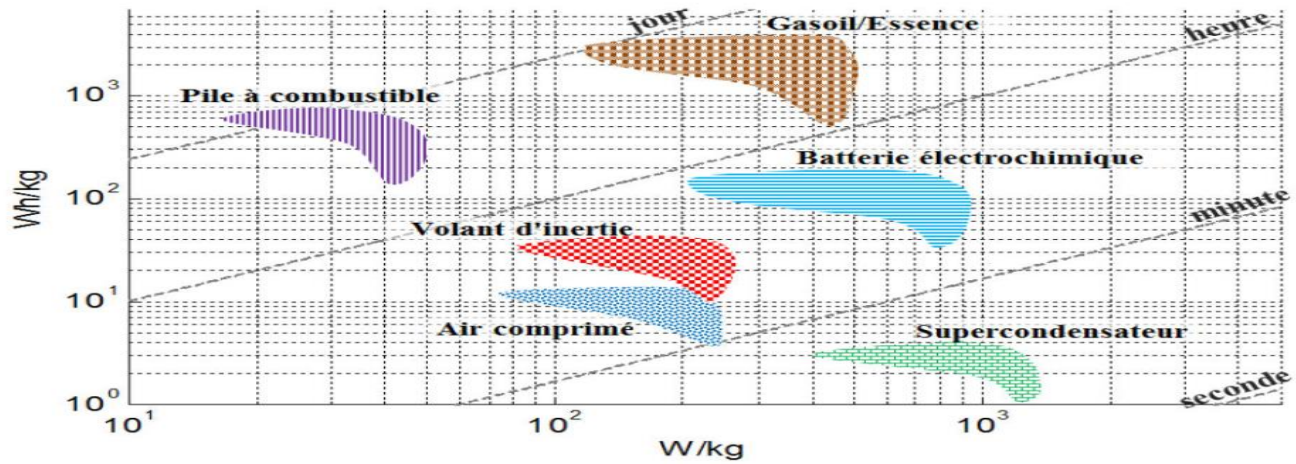


Figure 19 : Le diagramme de RAGONE pour les différents systèmes. Source : [2]

### III. Analyses des résultats et conclusion :

Jusqu'à présent, nous avons eu de très bons résultats avec la commande de la vitesse du moteur. L'une des choses les plus importantes à garder à l'esprit est que les valeurs du couple moteur et des courants doivent rester dans les limites. Pour vérifier cela, nous devons effectuer la simulation complète avec la très longue période de temps que nous avons utilisée tout au long des études.

Le volant d'inertie que nous avons dimensionné à une taille acceptable qui garantit la puissance à stocker et à donner si nous commandons avec succès sa vitesse. Nous avons également étudié un cas où nous devons arrêter le système brusquement et l'avons comparé à d'autres systèmes. Pour les calculs et la simulation, nous avons utilisé le modèle de PARK.

### IV. Contribution et compétences développées :

#### 1. Contribution :

Rôle de chacun des membres de l'équipe : Calcul sur papier et/ou code sur MATLAB pour chacune des questions ainsi que vérification de la part de chaque membre de l'équipe. On a avancé pas à pas, en prenant soin d'écouter chaque idée de chacun des membres et en prenant soin de vérifier à chaque fois qu'une tâche était réalisée.

#### 2. Compétences développées :

Ce projet nous a permis de comprendre mieux comment commander un moteur synchrone à aimants permanents et la transformée de PARK. Nous avons eu la chance de mettre en pratique nos compétences en mathématiques, commande et simulation.

De plus, notre groupe a parlé anglais pendant le projet, afin que nous puissions pratiquer la compétence pour travailler dans un environnement international (demandée par notre école).

### V. Liste de références bibliographiques :

- [1] Riu Delphine, Grenoble INP, *Modélisation vectorielle d'une machine synchrone*
- [2] Stéphane Raël, Université de Lorraine, *Batteries Electrochimiques : Principes, Technologies et Perspectives*, 2017. [Site web : <https://docplayer.fr/56019939-Batteries-electrochimiques-principes-technologies-et-perspectives-stephane-rael-universite-de-lorraine.html>]