

Rapport de Projet – UE : Modélisation des
Systèmes Électrotechniques :
Simulation d'un kart électrique

H.Zinedine Abayahia

2025

Dr.DESREVEAUX Anatole

Conservatoire National des Arts et Métiers

Résumé

Ce rapport présente la modélisation et la simulation d'un kart électrique développé dans le cadre de l'UE « Modélisation des Systèmes Électrotechniques ». La chaîne de traction électromécanique, composée d'une batterie, d'un convertisseur DC/DC, d'une machine à courant continu à aimants permanents et d'une transmission poulie-courroie, est décrite et paramétrée. Des régulateurs P et PI sont conçus pour assurer la commande mécanique et électrique du système. Les performances du véhicule sont évaluées par simulation sous MATLAB/Simulink selon le cycle normalisé ECE, permettant d'analyser la dynamique, les rendements et les contraintes de courant. Les résultats sont comparés aux objectifs du cahier des charges.

Table des matières

1	Représentation Énergétique Macroscopique	1
1.1	Définition	1
1.2	Commande par inversion de système (REM)	1
2	Cahier des charges et contexte	2
2.1	Spécifications générales	2
2.2	Conditions maximales admissibles	3
3	Modélisation du système	3
3.1	Modèle électrique	3
3.1.1	Batterie	3
3.1.2	Convertisseur DC-DC	4
3.1.3	MCC à aimants permanents	6
3.2	Modèles des composants mécaniques de la chaîne de traction	8
3.3	Réducteur	8
3.4	Roue et châssis	9
3.5	Environnement	9
4	Conception du contrôle et inversion des systèmes	10
4.1	Régulation mécanique	10
4.2	Régulation électrique	11
4.3	Inversion des blocs mécaniques (roue et transmission)	11
4.4	Inversion du convertisseur DC-DC	11
5	Simulation sous MATLAB/Simulink	11
5.1	Cycle ECE	12
5.2	Résultats de simulation	12
5.2.1	Analyse des performances	12
6	Conclusion	13

Table des figures

1	Schéma d'inversion de commande. [1]	2
2	Implémentation du modèle de batterie sur Simulink.	4
3	Modèle du convertisseur [2].	5
4	Implémentation du modèle de convertisseur dans Simulink.	6
5	Modèle de la MCC [2].	7
6	Implémentation du modèle de la MCC dans Simulink.	8
7	Implémentation du modèle de réducteur dans Simulink.	8
8	Modélisation de la roue et du châssis dans Simulink.	9
9	Implémentation de l'environnement dans Simulink.	10
10	Schéma global de simulation sous Simulink.	12
11	Résultats de la simulation : comparaison entre la consigne et la réponse.	13

Nomenclature

FOC Field-Oriented Control

MCC Machine à Courant Continu

MSAP Machine Synchrone à Aimant Permanent

REM Représentation Énergétique Macroscopique

Introduction

Avec l'électrification croissante du secteur automobile, la modélisation précise du groupe motopropulseur et de ses algorithmes de commande devient indispensable pour le développement, la simulation et la validation de véhicules électriques. En effet, ces modèles permettent de tester virtuellement les performances dynamiques, les contraintes électriques et thermiques, ainsi que les stratégies de commande, sans passer par des prototypes ou des bancs d'essai coûteux [3].

En pratique, les constructeurs automobiles utilisent majoritairement des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) pour la traction électrique, en raison de leur densité de puissance et de leur rendement élevé. Ces machines sont pilotées via des commandes vectorielles. Ces commandes, dites également FOC (Field-Oriented Control), permettent de découpler le contrôle du flux magnétique et du couple, à la manière d'une machine à courant continu. Toutefois, cette méthode nécessite une modélisation fine de la machine, la transformation de Park, des estimateurs d'état (observateurs de position et de courant), ainsi qu'un asservissement multi-boucle en temps réel, ce qui implique une charge de calcul importante [4].

Ce projet illustre les étapes clés du dimensionnement d'un système électromécanique, de la régulation de courant (boucle interne) à la régulation de vitesse (boucle externe), ainsi que les compromis à considérer entre complexité de modélisation, performance de commande et coût de mise en œuvre.

Dans un but pédagogique, la chaîne de traction est simplifiée en remplaçant la MSAP par une machine à courant continu à aimants permanents (MCC), en modélisant le convertisseur DC/DC au sens des valeurs moyennes et en utilisant un modèle de batterie simplifié. Cette approche permet de conserver les comportements critiques du système en facilitant la modélisation. Ce rapport présente la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink d'un kart électrique, incluant la batterie, le convertisseur, la MCC et sa commande. Les performances sont évaluées selon le cycle de conduite urbain ECE.

1 Représentation Énergétique Macroscopique

1.1 Définition

La REM (Représentation Énergétique Macroscopique) est un formalisme de modélisation multiphysique dédié à la commande des systèmes énergétiques. Elle permet de représenter graphiquement les chaînes d'énergie en respectant **la causalité** entre les entrées et les sorties des blocs, ce qui facilite grandement le processus de modélisation et d'analyse [1].

Un des avantages majeurs de la REM réside dans sa capacité à rendre les flux de puissance explicites. En effet, la puissance transmise par un bloc peut être obtenue en multipliant les deux grandeurs situées à sa gauche (généralement une variable d'effort et une variable de flux) pour la puissance de sortie, et celles à sa droite pour la puissance d'entrée. Cela permet une lecture intuitive et immédiate des échanges énergétiques dans le système. [1]

1.2 Commande par inversion de système (REM)

La commande par inversion d'un système modélisé en REM repose sur l'exploitation de la causalité énergétique : il s'agit de déterminer, à partir de la sortie souhaitée, l'entrée à appliquer pour l'obtenir. Autrement dit, on inverse le modèle direct du système afin de générer la commande appropriée. Ce principe revient à identifier la "bonne cause" pour produire l'"effet désiré".(voir figure 1).

Dans cette approche, chaque élément de la REM peut être inversé selon des règles précises, en respectant la structure causale initiale du modèle. La grandeur de sortie souhaitée (appelée consigne ou référence $y_{\text{réf}}(t)$) est injectée en entrée d'un bloc de commande. Celui-ci calcule alors la commande $u_{\text{réf}}(t)$ à appliquer au système réel pour que sa sortie suive au mieux la consigne imposée [1].

Cette méthode est particulièrement utile dans les systèmes énergétiques complexes, car elle permet une synthèse directe de la commande à partir de la structure REM, tout en maintenant la cohérence physique et énergétique du système.

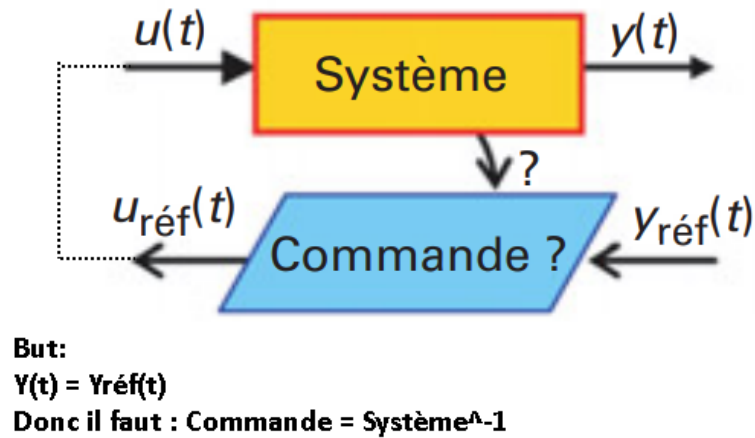


FIGURE 1 – Schéma d'inversion de commande. [1]

2 Cahier des charges et contexte

2.1 Spécifications générales

Le kart étudié est le TRITON (Kart Master) équipé d'une machine à courant continu à aimants permanents, remplaçant la machine synchrone brushless de 4,8 kW d'origine pour simplifier la pré-étude. Le système comprend :

- une batterie lead-acid OPTIMA YellowTop R 3,7 ;
- un convertisseur DC/DC SEVCON Millipak 4Q ;
- une machine CC ME0909 ;
- une transmission par poulie-courroie et roue ;
- un châssis + passager modélisé par une masse équivalente ;
- les résistances à l'avancement (roulement, aérodynamique, pente).

Le client souhaite vérifier la dynamique du véhicule, adapter l'algorithme de commande et estimer les contraintes électriques.

les inerties des arbres mécaniques en rotation sont supposées négligeables

devant la masse du kart.

2.2 Conditions maximales admissibles

Après la simulation du système, il est essentiel de vérifier que les conditions maximales d'utilisation ne sont pas dépassées, afin de préserver l'intégrité des composants. Les valeurs limites à respecter sont les suivantes :

- **Batterie** : courant maximal par cellule : 810 A
- **Convertisseur DC/DC** : courant maximal : 300 A
- **Machine à courant continu (MCC)** : courant maximal pendant 60 secondes : 300 A

3 Modélisation du système

3.1 Modèle électrique

3.1.1 Batterie

Un modèle simplifié de type source de tension avec une résistance série a été utilisé pour la batterie.

Paramètres du modèle :

- V_{oc_n} : Tension nominale de la cellule n.
- R_{cell_n} : Résistance série de la cellule n.
- V_{bat} : Tension aux bornes de la batterie.
- I_{bat} : Courant débité de la batterie.
- $V_{oc_{tot}}$: Tension de la batterie en circuit ouvert.

Caractéristiques pertinentes à la modélisation :

- Nombre de cellules en série : $N_{cell/mod} = 6$ cellules/module, $N_{modules} = 4$ modules
- Tension nominale cellule : $V_{oc} = 2,0$ V
- Résistance interne par cellule : $R_{cell} = 0,53$ m Ω

La tension aux bornes de la batterie peut être déterminée à l'aide des relations suivantes :

$$V_{oc_{tot}} = V_{oc} \cdot N_{modules} \cdot N_{cell/mod} \text{ et } R_{cell_{tot}} = R_{cell} \cdot N_{modules} \cdot N_{cell/mod} \quad (1)$$

$$V_{bat} = (V_{oc} - I_{bat} \cdot R_{cell}) \cdot N_{modules} \cdot N_{cell/mod} \quad (2)$$

À partir de la relation (2), ce modèle a été implémenté dans Simulink (voir figure 2).

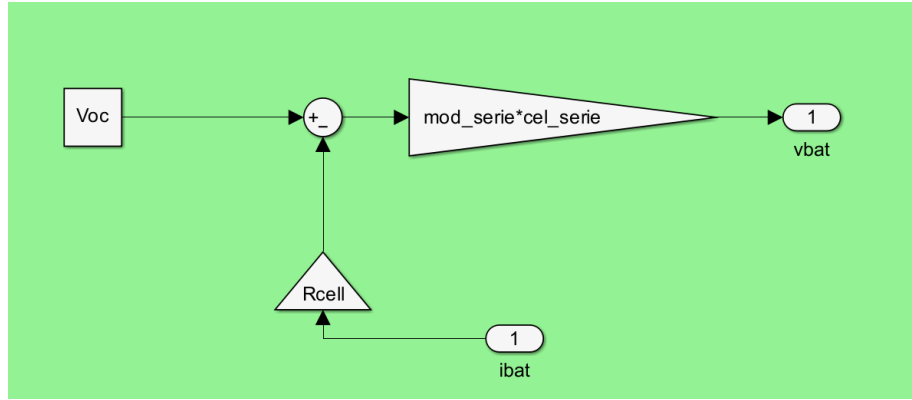


FIGURE 2 – Implémentation du modèle de batterie sur Simulink.

3.1.2 Convertisseur DC-DC

Le rendement du convertisseur, noté $\eta_{conv} = 95\%$, doit être pris en compte. Ce rendement varie en fonction du sens du transfert de puissance, afin de toujours respecter le principe de conservation de l'énergie (voir (3)).

À partir des équations représentées dans la figure 3, les relations (3) peuvent être établies. Elles serviront à modéliser le comportement du convertisseur dans une approche en moyenne :

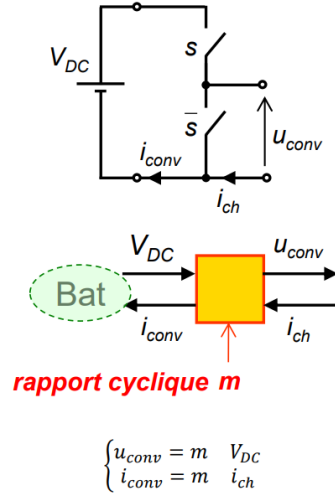


FIGURE 3 – Modèle du convertisseur [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{bat} = V_{bat} \cdot I_{conv} \\ P_{mcc} = U_{conv} \cdot I_{ch} \\ \text{Si } P_{bat} > 0 : \\ \quad I_{conv} = \frac{1}{\eta_{conv}} \cdot m(t) \cdot I_{ch} \\ \quad P_{mcc} = P_{bat} \cdot \eta_{conv} \\ \text{Si } P_{bat} < 0 : \\ \quad I_{conv} = \eta_{conv} \cdot m(t) \cdot I_{ch} \\ \quad P_{mcc} = P_{bat} \cdot \frac{1}{\eta_{conv}} \end{array} \right. \quad (3)$$

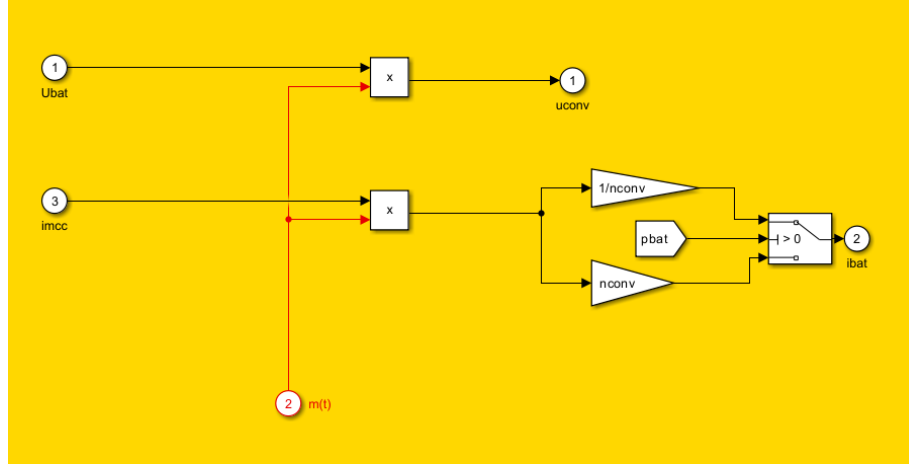


FIGURE 4 – Implémentation du modèle de convertisseur dans Simulink.

3.1.3 MCC à aimants permanents

La MCC peut être modélisée comme une charge de type RL, avec une force électromotrice (FEM) proportionnelle à la vitesse d'excitation (voir figure 5).

Avant de procéder à la modélisation, il est nécessaire d'identifier les paramètres caractéristiques de la machine. Les données suivantes sont fournies :

- Vitesse à vide sous 36 V (V_{vide}) : 3200 tr/min (N_{vide}) ;
- Tension nominale (V_n) : 48 V ;
- Vitesse nominale (N_n) : 4000 tr/min ;
- Courant nominal (I_n) : 100 A ;
- Puissance électrique nominale (P_n) : 4,8 kW.

Les constantes de la machine peuvent être déterminées à partir des expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e = \frac{V_{\text{vide}}}{N_{\text{vide}} \cdot \frac{2\pi}{60}} \\ R_{\text{mcc}} = \frac{V_n - k_e \cdot N_n \cdot \frac{2\pi}{60}}{I_n} \end{array} \right. \quad (4)$$

Une inductance a été ajoutée pour limiter les ondulations de courant. L'ondula-

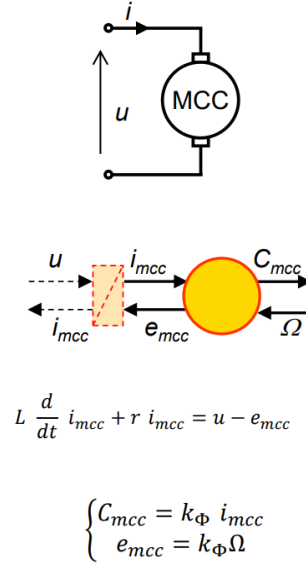


FIGURE 5 – Modèle de la MCC [2].

tion maximale acceptable est fixée à :

$$\Delta i_{\max} = 0,1 \cdot I_n$$

L'inductance est alors calculée par [5] :

$$L_{mcc} = \frac{V_{\text{bat}}}{2f_{\text{dec}} \cdot \Delta i} \quad (5)$$

Paramètres utilisés :

- Δi_{\max} : ondulation maximale du courant ;
- L_{mcc} : inductance ajoutée ;
- f_{dec} : fréquence de découpage.

Dans le cas d'une excitation séparée, on suppose $k_e = k_i$.

À partir des équations (4) et (5), on obtient les valeurs suivantes :

$$R_{mcc} = 0,032 \, \Omega, \quad k_e = k_i = 0,107 \, \text{V} \cdot \text{s/rad}, \quad L_{mcc} = 150 \, \mu\text{H}$$

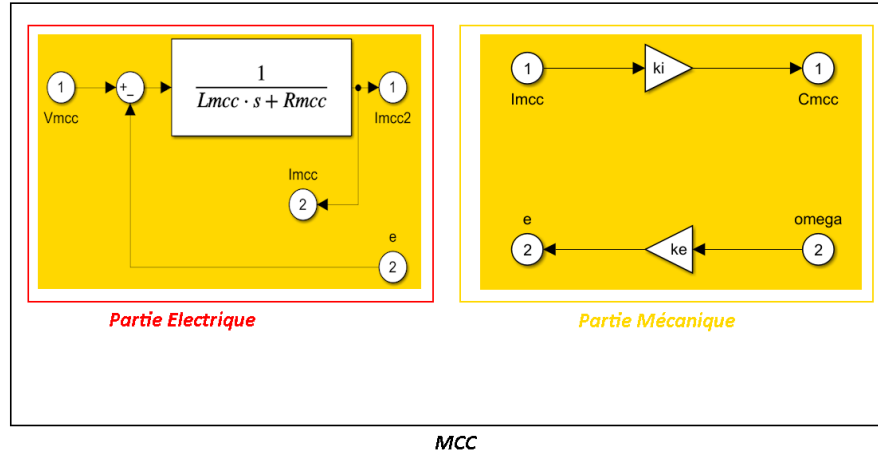


FIGURE 6 – Implémentation du modèle de la MCC dans Simulink.

3.2 Modèles des composants mécaniques de la chaîne de traction

3.3 Réducteur

La transmission est modélisée par un rapport de réduction $k_{\text{red}} = \frac{75}{22}$ et un rendement $\eta_{\text{trans}} = 0,92$. Le rendement est implémenté selon la même logique que celle utilisée pour le convertisseur DC-DC (voir section 3.1.2 et figure 7).

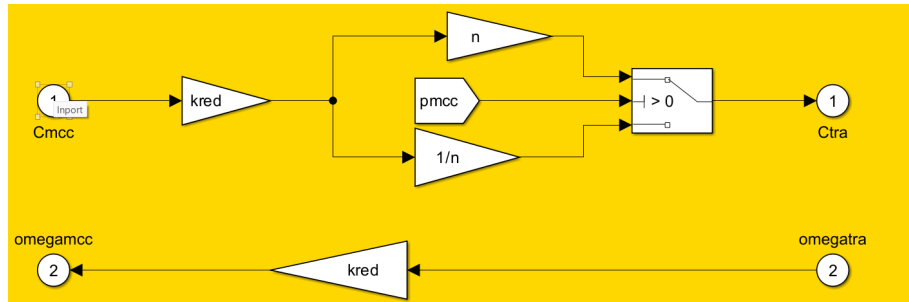


FIGURE 7 – Implémentation du modèle de réducteur dans Simulink.

3.4 Roue et châssis

L'inertie des pièces en rotation est négligée par rapport à la masse totale du véhicule. Le mouvement est alors régi par le principe fondamental de la dynamique :

$$F_{\text{roue}} - F_{\text{res}} = Mv \cdot \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Ce sous-système est implémenté comme indiqué à la figure 8.

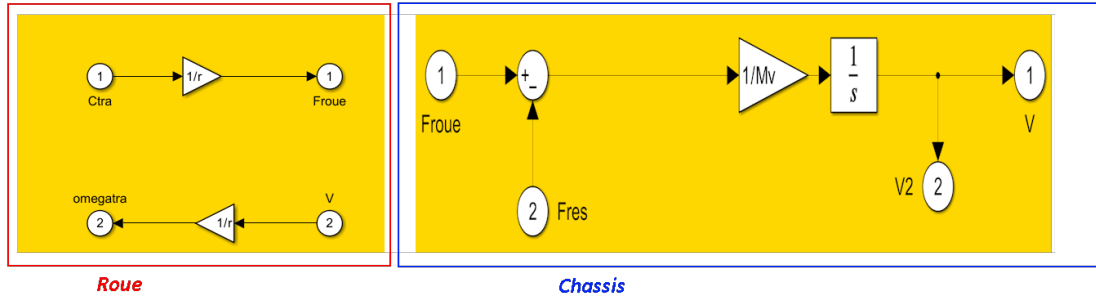


FIGURE 8 – Modélisation de la roue et du châssis dans Simulink.

3.5 Environnement

Trois forces de résistance sont considérées dans l'environnement :

$$F_{\text{roul}} = fMg \quad (7)$$

$$F_{\text{air}} = \frac{1}{2}\rho C_x S v^2 \quad (8)$$

$$F_{\text{pente}} = Mg\alpha \quad (9)$$

Paramètres utilisés :

- $f = 0,02$: coefficient de roulement ;
- $\rho = 1,223 \text{ kg/m}^3$: densité de l'air ;
- $C_x = 0,2$: coefficient de traînée ;

- $S = 0,95 \text{ m}^2$: surface frontale ;
- α : angle de pente (0% ou 10%).

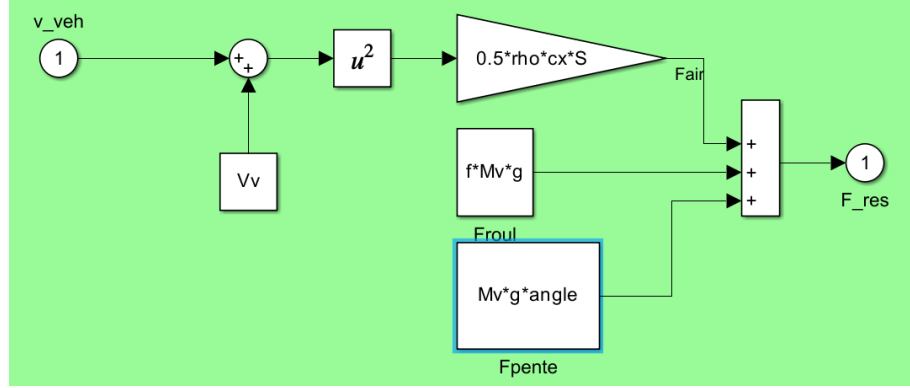


FIGURE 9 – Implémentation de l'environnement dans Simulink.

4 Conception du contrôle et inversion des systèmes

4.1 Régulation mécanique

Dans un premier temps, un régulateur PI est ajouté afin d'annuler l'écart statique et d'inverser l'élément d'accumulation [1]. On remarque que la fonction de transfert du système comporte un intégrateur, ce qui correspond à un système de type I. Ainsi, il est possible que la partie intégrale du correcteur ne soit pas nécessaire.

$$PI_m(s) = K_{pm} + K_{im} \cdot \frac{1}{s} \quad (10)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte :

$$T_{bo}(s) = \frac{K_{pm} \cdot s + K_{im}}{s^2 \cdot Mv} \quad (11)$$

Fonction de transfert en boucle fermée :

$$T_{bf}(s) = \frac{T_{bo}(s)}{1 + T_{bo}(s)} = \frac{K_{pm} \cdot s + K_{im}}{s^2 \cdot Mv + K_{pm} \cdot s + K_{im}} \quad (12)$$

Dans le cas où $K_{im} = 0$ (régulateur P uniquement), on obtient un système du premier ordre.

Pour dimensionner ce correcteur P, on choisit un temps de réponse cible $T_{5m} = 0,1s$, et on applique :

$$\tau_m = \frac{T_{5m}}{3}, \quad K_{pm} = \frac{M}{\tau_m}$$

4.2 Régulation électrique

De manière analogue, un régulateur PI est utilisé pour le courant. La méthode de placement de pôles (annulation zéro-pôle) est utilisée pour le dimensionnement :

$$\tau_e = \frac{L}{R}, \quad T_{5e} = 0,01 s, \quad K_{pe} = \frac{\tau_e}{(1/R) \cdot (T_{5e}/3)}, \quad K_{ie} = \frac{K_{pe}}{\tau_e}$$

4.3 Inversion des blocs mécaniques (roue et transmission)

L'inversion de ces blocs est simple, puisqu'il s'agit uniquement de gains. La relation effort/flux est inversée sans difficulté dans la REM [1].

4.4 Inversion du convertisseur DC-DC

Une particularité importante du modèle inversé est la présence d'un élément mémoire, ajouté pour éviter une division par zéro ainsi qu'une boucle algébrique au démarrage du simulateur.

5 Simulation sous MATLAB/Simulink

L'ensemble du système a été implémenté sous Simulink. Le solveur utilisé est 'ode4' (Runge-Kutta), avec un pas fixe de 10^{-4} s, adapté aux dynamiques électriques et mécaniques du modèle.

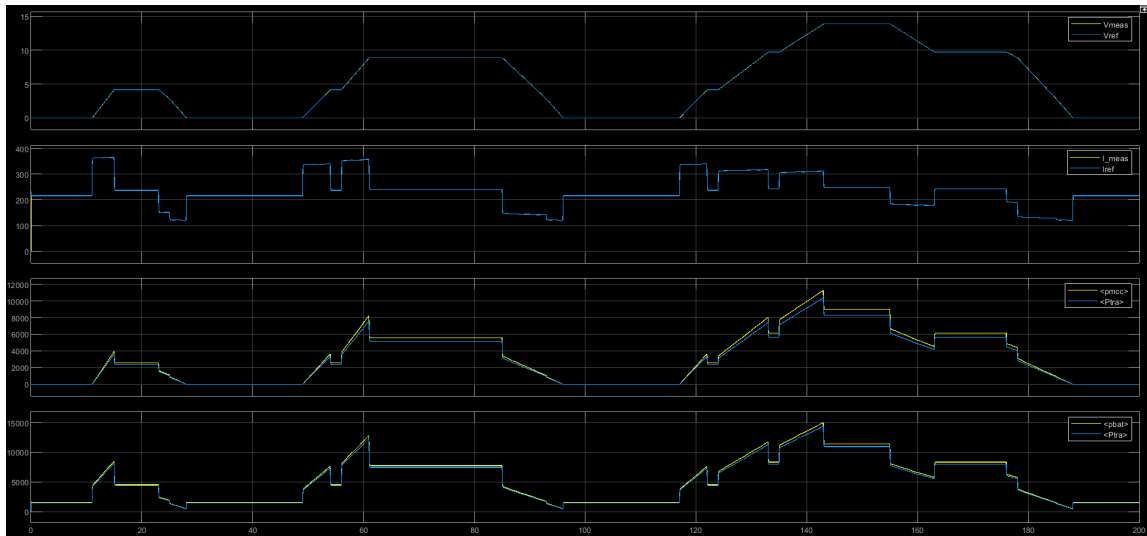


FIGURE 11 – Résultats de la simulation : comparaison entre la consigne et la réponse.

- Le rendement varie selon le sens du transfert d'énergie, conformément au modèle mis en place (voir les courbes de puissance sur la figure 11).

6 Conclusion

Le modèle développé permet de simuler de manière réaliste le comportement d'un kart électrique avec une architecture simplifiée. Il a permis de valider l'approche par inversion de la REM, ainsi que la conception des régulateurs de courant et de vitesse.

Perspectives et travaux futurs :

- Adopter un modèle plus représentatif de la réalité : par exemple, une machine synchrone à aimants permanents pilotée en commande vectorielle (FOC), ou bien un modèle générateur de couple utilisé dans l'industrie automobile [3].
- Ajouter un système de gestion de batterie (BMS) pour simuler l'état de charge, la température et la protection des cellules.
- Intégrer les systèmes de freinage mécanique et de frein à main.
- Évaluer quantitativement la précision de l'asservissement à l'aide d'un critère objectif, comme l'erreur quadratique moyenne entre la consigne et la vitesse

réelle.

Références

- [1] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, and P. Barrade, “La rem, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques,” *International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (EECCMC)*, 2018.
- [2] A. Desreveaux, “Modélisation des systèmes Énergétiques,” CNAM, Tech. Rep., 2024, support de cours.
- [3] MathWorks, “Vehicle modeling using simulink,” <https://fr.mathworks.com/videos/matlab-and-simulink-racing-lounge-vehicle-modeling-part-1-simulink-1502466996305.html>, 2017, consulté en mai 2025.
- [4] H. Garnier, L. Krichen, and A. Bouscayrol, *Commande vectorielle des machines électriques*. Hermès Science, 2006.
- [5] N. Z. 1 and R. Gouws, “Switching current ripple calculation for the passive filter design of the grid connected inverter,” *International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (EECCMC)*, 2021.