

Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique

Moez HADJ KACEM^{#1}, Souhir TOUNSI^{*2}, Rfik NEJI^{#3}

[#]University of Sfax Laboratory of Electronic and Information Technology (LETI-Sfax), E.N.I.S Tunisia

* Science and Technologies of Image and Telecommunications (SETIT), ISBS – Tunisia

¹Moez_haj_kacem@voila.fr
²souhir.tounsi@isecs.rnu.tn
³rafik.neji@enis.rnu.tn

Abstract— A l'heure où l'automobile doit répondre à des enjeux environnementaux majeurs, le dimensionnement de la chaîne de traction est l'une des problématiques clef dans la conception d'un véhicule électrique afin d'améliorer sa consommation énergétique. Dans ce contexte, nous proposons de pré-dimensionner les éléments de la chaîne de traction (machine électrique et batterie) en considérant les profils de mission liés à l'usage du véhicule.

Keywords— Véhicule électrique; convertisseur; énergie; chaîne de traction.

I. INTRODUCTION

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le secteur des transports est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie en France, ainsi que des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Parmi les différents modes de transport, le transport routier représenterait à lui seul 80 % de la consommation d'énergie. Or, pour son fonctionnement, le secteur des transports est dépendant à 98 % des produits pétroliers (ADEME, 2012) [1]. La recherche et le développement dans le domaine automobile permet de faire des progrès techniques pour diminuer les consommations des véhicules et par conséquent les émissions de CO₂.

En effet, à l'heure où l'automobile doit répondre à des enjeux environnementaux majeurs, le dimensionnement des composants de la chaîne de traction est une problématique clef dans les systèmes électrique. La complexité de l'architecture embarquée est accrue par rapport aux véhicules thermiques conventionnels et il devient primordial de dimensionner correctement ces éléments afin d'assurer la fiabilité de l'architecture tout en diminuant sa consommation énergétique.

II. SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA CHAÎNE DE TRACTION

Les réalisations actuelles des véhicules électriques s'inspirent très fortement des structures propres aux véhicules thermiques. Le moteur thermique à combustion interne alimenté par un carburant stocké dans un réservoir (essence, diesel, gnv) est remplacé par un moteur électrique alimenté par une énergie électrique stockée dans des batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Une chaîne de motorisation d'un véhicule tout électrique se compose classiquement d'un moteur électrique, d'un système électronique (alimentation et commande), d'un système de liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues), figure I.1.

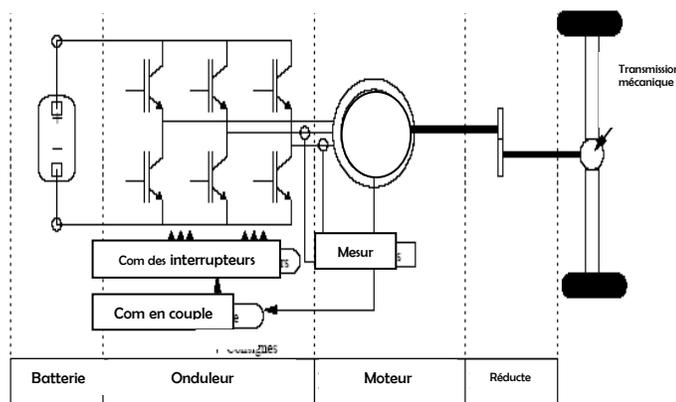


Fig. 1. Structure de la chaîne de traction

La chaîne de traction choisie est du type monomoteur, car le coût et la masse d'un seul moteur sont toujours plus faibles que ceux de plusieurs moteurs. L'utilisation d'un réducteur est dans le but de réduire le couple dimensionnant du moteur et par la suite sa masse et son coût. En plus, la commande d'un seul moteur évite le problème de dérapage lors de la commande de plusieurs moteurs à la même vitesse [2].

A. Batterie

La batterie est un réservoir d'énergie électrique qui se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient. On distingue plusieurs types de batteries, mais pour les véhicules électriques actuels on utilise fréquemment les batteries Plomb-Acide et Nickel Cadmium [3].

Une batterie de traction doit satisfaire les conditions suivantes :

- puissance massique élevée, afin de garantir de bonnes accélérations et reprises au véhicule,
- grand nombre de cycles charge/décharge sans dégradation importante des performances,
- faible coût de production,
- sécurité d'emploi, pas de risque d'explosion ou de dégagement de gaz nocifs,
- possibilité d'estimation précise de l'état de charge,
- possibilité de recharge rapide,
- bonne recyclabilité.

B. Convertisseur statique

L'actionneur peut être alimenté au moyen d'un onduleur de courant ou d'un onduleur de tension, mais pour une alimentation par batterie dans cette gamme de puissance, un onduleur de tension triphasé est une bonne solution.

L'onduleur permet l'alimentation en courant à fréquence variable de la machine, de façon à régler son couple et sa vitesse. La commande électronique génère les signaux de commande de l'onduleur à partir de la position du rotor et de la mesure des courants dans la machine.

Pour notre application, nous pouvons alimenter le moteur par un onduleur de tension bidirectionnel contrôlé en courant par modulation de largeur d'impulsion MLI (Figure 2). Le contrôle des courants s'effectue au moyen de régulateurs qui assurent le suivi d'une référence à fréquence et amplitude variables. La génération des courants peut être rectangulaire ou sinusoïdale [3-4].

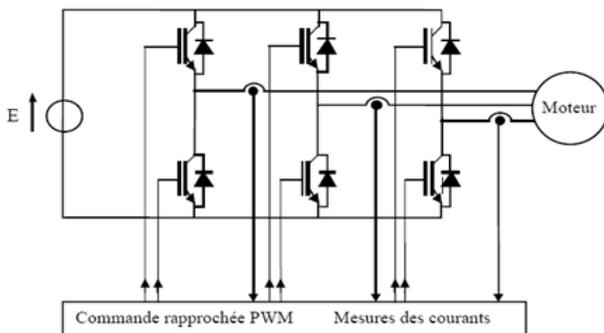


Fig. 2. Ensemble convertisseur machine triphasé

C. Réducteur mécanique

La transmission mécanique d'un VE est la liaison entre le moteur et les roues. Nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique (à rapport fixe), la boîte de vitesse et éventuellement le différentiel [3].

Le réducteur constitue un organe important de la chaîne de transmission mécanique, ou électromécanique, il permet en effet le plus souvent une économie très conséquente sur la masse du moteur dont les dimensions sont déterminées

principalement par l'effort à fournir et non par la puissance. Le réducteur fixe la limite de vitesse du véhicule en respectant la fréquence limite de commande (découpage) de l'onduleur fixée à 8000Hz [2].

D. Motorisation de la chaîne de traction

La motorisation des véhicules a connu l'introduction de l'actionneur électrique sous plusieurs configurations allant du moteur à courant continu jusqu'à l'utilisation des moteurs synchrones à aimants permanents.

Actuellement, les machines à courant continu à collecteur et particulièrement celles à excitation séparée, sont les plus utilisées dans le marché vu la simplicité d'utilisation et de commande grâce à un convertisseur électrique simple de type hacheur. Mais les moteurs à courant continu présentent des limites qui ont conduit les industriels à se diriger vers les machines triphasées, les machines asynchrones et les machines synchrones.

- Machines asynchrones : C'est une solution envisagée par de nombreux constructeurs [5]. On peut distinguer deux types de machines asynchrones, les machines à bagues et à cage d'écureuil.
- Machines synchrones : Le principe de fonctionnement du moteur synchrone est analogue à celui du moteur à courant continu. Le stator de la machine comporte les enroulements des trois phases dont la commutation par l'électronique de puissance sur la source à courant continu est assurée par un pont de puissance. On trouve, le moteur synchrone à rotor bobiné, le moteur synchrone à réluctance variable et le moteur synchrone à aimants permanents

Notre choix s'est porté sur la motorisation d'un véhicule tout électrique de puissance moyenne 15kW dont l'actionneur est un moteur synchrone à aimants permanents à flux axial à force électromotrice (f.e.m) de forme sinusoïdale. La technologie de commande est vectorielle imposant un couple optimal, le convertisseur est un onduleur de modulation de la largeur d'impulsion (MLI).

III. PRÉSENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

Le moteur synchrone à aimants permanents, figure 3, dont la puissance électrique peut dépasser 1Kw, est de plus en plus utilisé dans le domaine de vitesse variable. Son choix dans les entraînements à vitesse variable devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones et à courant continu grâce à l'évolution de la technologie des aimants permanents à base d'alliage ou à terre rares [5]. Cela leur a permis d'être utilisés comme inducteur dans les machines synchrones offrant ainsi, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres, une faible inertie et un couple massique élevé [5,6].

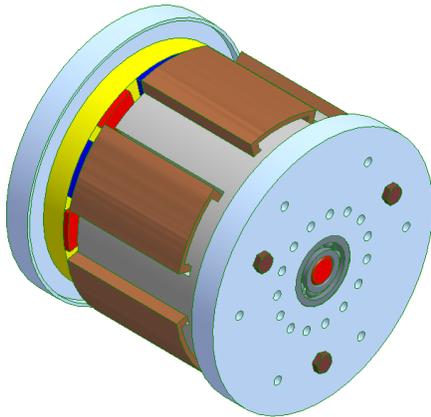


Fig. 3. Moteur synchrone à aimants permanents à flux axial

A. Equations de dimensionnement de la structure retenue

Les équations dimensionnant l'actionneur sont retrouvées par application des lois fondamentales relatives à l'électromagnétisme, par exemple la hauteur d'aimant est calculée pour une position de recouvrement maximale aimant-dent pour garantir le fonctionnement du moteur en régime linéaire et pour avoir une induction magnétique dans l'entrefer B_e .

Ces équations relient les données liées aux matériaux, les données électriques et magnétiques du moteur pour fournir des équations qui évaluent les dimensions du moteur tout en respectant les contraintes de l'application (Figure 4).

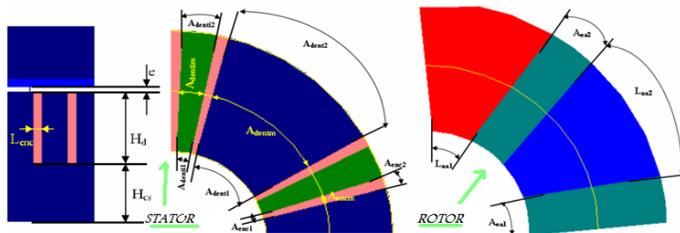


Fig. 4. Dimensions géométriques de l'actionneur à aimants permanents

On peut citer notamment les grandeurs essentielles :

*Hauteur d'aimant H_a [5]

$$H_a = \frac{\mu_r \cdot B_e \cdot e}{B_r - \frac{B_e}{K_{fu}}} \quad (1)$$

Avec :

μ_r : la perméabilité relative des aimants
 B_e : induction dans l'entrefer

e : épaisseur de l'entrefer

B_r : induction rémanente des aimants

K_{fu} : coefficient du flux de fuites inter aimants

*Hauteur des dents H_d [5]

$$H_d = \frac{3.2 \cdot N_{sph} \cdot I_d}{2 \cdot N_t \cdot \delta \cdot K_f \cdot L_{enc}} \quad (2)$$

Avec :

N_t : nombre de dents principales

I_d : courant du moteur

K_f : coefficient de remplissage des encoches

N_{sph} : nombre de spires d'une phase

L_{enc} : largeur des encoches

δ : densité du courant admissible dans le cuivre

*Epaisseurs de la culasse rotorique H_{cr} [5]

$$H_{cr} = \frac{B_e}{B_{cr}} \text{Min} \left(\frac{S_d, S_a}{D_{ext} - D_{int}} \right) \frac{1}{K_{fu}} \quad (3)$$

Avec :

D_{ext} : diamètre extérieur du moteur

D_{int} : diamètre intérieur du moteur

S_d : section des dents

S_a : section des aimants

B_{cr} : l'induction magnétique dans la culasse rotorique

*Epaisseurs de la culasse statorique H_{cs} [5]

$$H_{cs} = \frac{B_e}{B_{cs}} \text{Min} \left(\frac{S_d, S_a}{D_{ext} - D_{int}} \right) \quad (4)$$

IV. MODELISATION DE LA CHAINE DE TRACTION INTEGRANT LES DEFERANTES PERTES

Grâce à la grande disponibilité géographique de l'énergie électrique et aux nombreux développements technologiques, on trouve et on trouvera de plus en plus de machines électriques (vibreurs de téléphones, voitures électriques, propulsion navale, éoliennes, etc...). Ces actionneurs font tous intervenir des principes électriques, électromagnétiques et mécaniques qui s'accompagnent inévitablement de pertes [5,6].

A. Expression du couple électromagnétique

Pour une alimentation en courant à amplitude maximale I , et en phase avec la f.e.m l'expression du couple développé par le moteur à forme d'onde sinusoïdale est donnée par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{3EI}{2\Omega} \quad (I.1) \quad (5)$$

B. Constante électrique du moteur

La constante électrique K_e est calculée de telle sorte que le véhicule électrique puisse fonctionner à vitesse stabilisée avec une faible ondulation du couple.

$$K_e = \frac{3}{2} N_{\text{sph}} \frac{(D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2)}{4} B_e I \quad (6)$$

C. Force contre électromotrice

La force contre électromotrice E est déduite du modèle analytique, elle est donnée par la relation suivante :

$$E = 2 N_{\text{sph}} \Omega \frac{(D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2)}{8} B_e \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2}$$

$$\Rightarrow E = \frac{2}{3} \Omega K_e \quad (7)$$

D. Forces appliquées au VE

Les forces appliquées au véhicule, sont indiquées dans la figure 5 et le tableau 1.

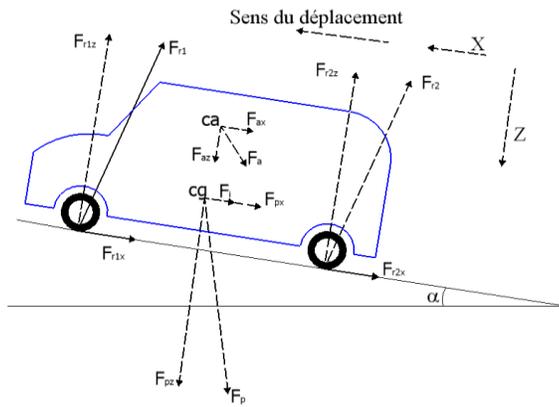


Fig. 5. Forces appliquées au véhicule

TABLE I
DIMENSIONS GÉOMÉTRIQUES DE L'ACTIONNEUR

F_{r1x}	Réaction tangentielle
F_{r1z}	Réaction normale
F_r	Force de réaction
F_p	Force de pesanteur
F_a	Force aérodynamique
F_{ax}	Traînée
F_{az}	Portance
F_i	Force d'inertie de translation
cg	Centre de gravité
ca	Centre de poussée aérodynamique

$$F_p = M_v \cdot g$$

$$\begin{cases} F_{ax} = \frac{1}{2} M_{va} S_f C_x (\alpha_r) V^2 \\ F_{ay} = \frac{1}{2} M_{va} S_f C_y (\alpha_r) V^2 \\ F_{az} = \frac{1}{2} M_{va} S_f C_z (\alpha_r) V^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$F_r = M_v \cdot g \cdot f + n \cdot C_{rr} \quad (10)$$

Les composantes de la force motrice F_m , sont calculées à partir du bilan des forces appliquées. Si l'on suppose que toutes les forces sont ramenées au centre de gravité du véhicule, l'application du principe fondamental de la dynamique permet d'écrire l'équation vectorielle suivante :

$$M \frac{dV}{dt} = \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{F}_m + \vec{F}_a + \vec{F}_p + \vec{F}_r \quad (11)$$

$$F_m = M \frac{dV}{dt} + F_a + F_p + F_r \quad (12)$$

D'après équation 12, l'effort nécessaire à l'avancement du véhicule peut s'écrire :

$$F_{\text{véhicule}} = F_a + F_p + M_v \frac{dV}{dt} + n \frac{J_r}{R^2} \frac{dV}{dt} \quad (13)$$

On déduit l'expression du couple total :

$$C_{\text{véhicule}} = C_{\text{roult}} + C_a + C_p + n \frac{J_r V}{R} \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

E. Modèle de calcul des pertes

-Pertes Joule

Dans une machine synchrone à aimants permanents, les pertes Joule liées au courant d'alimentation sont génératrices d'échauffements centralisés au niveau du stator, particulièrement dans les bobinages [7].

Les pertes par effet Joule avec des courants sinusoïdaux sont données par l'expression suivante :

$$P_j = 3 \cdot R_{ph} \cdot I_{\text{eff}}^2 = 3 \cdot R_{ph} \cdot \left(\frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (15)$$

Avec : R_{ph} : la résistance d'une phase

-Pertes fer

La détermination des pertes fer dans les machines tournantes est encore aujourd'hui l'un des aspects les moins bien maîtrisés en termes de modélisation [7]. Dans notre cas, nous considérons que les pertes fer sont composées des pertes par hystérésis et des pertes par courant de Foucault. Pour évaluer ces pertes fer, nous proposons deux modèles.

VI. CONCLUSION

Pertes fer dans les dents

$$P_{f_d} = q \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5} [M_{ds} B_d^2] \quad (16)$$

Pertes fer dans la culasse

$$P_{f_c} = q \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5} [M_{cs} B_{cs}^2] \quad (17)$$

Les figures (6) et (7) décrivent respectivement le modèle des pertes Joule et des pertes fer de notre actionneur sous l'environnement MATLAB SIMULINK.

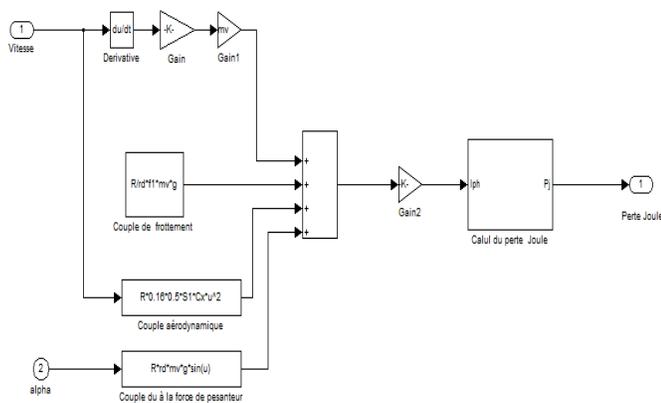


Fig. 6. Modèle des pertes Joule

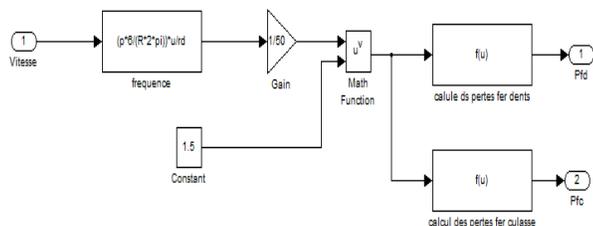


Fig. 7. Modèle des pertes Fer

Dans cet article, nous avons présenté un modèle global de la chaîne de traction d'un véhicule électrique. Cette chaîne est constituée d'un moteur synchrone à aimants permanents et d'un convertisseur statique à interrupteurs électromagnétiques. Ce travail est suivi d'une étude de la fiabilité du système d'ensemble.

REFERENCES

- [1] J.P. YONNET : «Chaîne de traction du véhicule électrique : quelques exemples de réalisation» ; Journées électrotechniques du club EEA, 24 et 25 mars 1994, Cachan, 9 p.
- [2] B. Alaim et T.Communal « Approche Globale de la Commande Dynamique de Machines Electrique » Revue 3EI, n° 17, juin 1999 ; pp73-79.
- [3] S. A. Randi, « Conception Systématique de Chaînes de Traction Synchrones pour Véhicule Electrique à Large Gamme de Vitesse ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 2003.
- [4] R. NEJI, S. TOUNSI et F. SELLAMI: «Contribution to the definition of a permanent magnet motor with reduced production cost for the electrical vehicle ropulsion»; European Transactions on Electrical Power (ETEP), 2006, 16: pp. 437-460..
- [5] M. HADJ KACEM ,« Conception des Composants Electriques de la Chaîne de Puissance d'un Véhicule Electrique»; Thèse de Doctorat 2013. ENIS Tunisie.
- [6] M. HADJ KACEM, S.TOUNSI et R. NEJI: « Electrothermal Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor» ; 13th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering December 17-19, 2012, Monastir, Tunisia.
- [7] N. JANIAUD : « Modelisation Du Systeme De Puissance Du Vehicule Electrique En Regime Transitoire En Vue De L'optimisation De L'autonomie, Des Performances Et Des Coûts Associes»; Thèse de Doctorat 2011, E.PARIS SUD.