

Optimisation global d'un système de génération électrique hybride dans le but de réduire sa consommation de carburant

Ivan KRAVTZOFF^{**}, Philippe DESSANTE^{*}, Jean-Claude VANNIER^{*}, Philippe Manfè[‡], Emile Mouni[‡]

^{*}Département énergie, Supélec, 3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

[‡]Leroy Somer, Boulevard Marcelin Leroy, 16000 Angoulême, France

RESUME – Cet article propose une méthode pour dimensionner de manière optimale un système de génération électrique hybride avec pour objectif de réduire la consommation de carburant. Dans un tel système, le bénéfice apporté par l'hybridation est fortement dépendant du dimensionnement du système en lui-même mais aussi de la stratégie de gestion énergétique qui sera utilisé. Le choix de la stratégie influençant fortement le dimensionnement et inversement. Ce phénomène n'est pas toujours pris en compte ce qui conduit à un dimensionnement du système non optimal. Cet article propose une nouvelle méthode pour dimensionner un système hybride en prenant en compte cette interaction. L'idée principale est de calculer dans un premier temps la stratégie de gestion des flux d'énergie optimale pour une structure donnée. On peut alors, pour un profil de charge définit, effectuer une optimisation de la structure du système pour le dimensionner au plus juste.

MOTS-CLES – Groupe électrogène, hybride, optimisation, consommation de carburant, stockage.

1. Introduction

Les préoccupations environnementales sont de plus en plus importantes et nous ont conduits à faire des efforts pour réduire les émissions de polluants. Un groupe électrogène classique est composé d'un alternateur qui est entraîné par un moteur à combustion interne pour produire de l'électricité. Dans un tel système, le groupe est obligé de fournir à chaque instant ce dont la charge à besoin et ce, même si cette charge est très faible. Cette production à faible charge conduit à une surconsommation de carburant ainsi qu'à un encrassement prématuré du moteur thermique. Un élément de stockage d'énergie peut alors nous permettre de choisir les points de fonctionnement du groupe électrogène en gérant les flux d'énergie du système. On peut alors s'attendre à réduire la consommation du groupe et/ou réduire son cout de maintenance. Cet article présente une méthode pour dimensionner un groupe électrogène hybride et plus généralement, un système hybride en se basant sur deux optimisations imbriquées. La première basée sur une méthode provenant de la théorie des graphs nous permet d'obtenir la stratégie optimale de gestion des flux énergétique et une deuxième utilisant un algorithme génétique nous permet d'optimiser le système hybride suivant deux critères : le cout d'investissement du système et sa consommation de carburant.

2. Modélisation du système

Pour étudier notre système, nous avons développé un modèle qui intègre un moteur à combustion interne, un alternateur, des convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur, DC/DC, onduleur) et un élément de stockage d'énergie. Une représentation synoptique du système utilisant la représentation macroscopique énergétique est donnée à la Figure 1. Une brève description des éléments du système est donnée ci-après.

2.1 Moteur Diesel

Le moteur à combustion interne est modélisé par une cartographie de consommation spécifique de moteur diesel de type industriel. Ce diagramme nous permet d'évaluer la consommation spécifique du moteur en fonction de sa vitesse de rotation et de sa puissance à fournir.

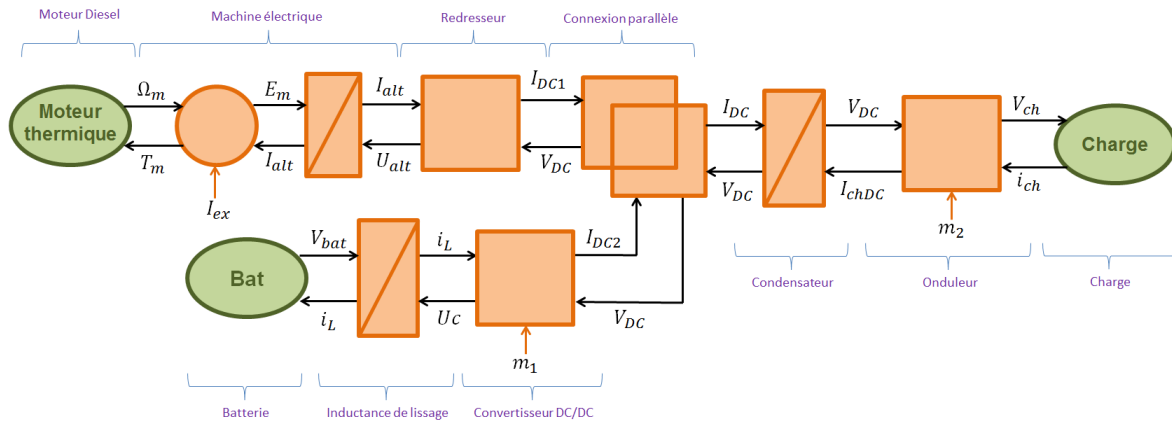


Figure 1 : Diagramme synoptique de système hybride

2.2 Alternateur

L'alternateur choisi est de type synchrone bobiné à pôle saillant. Pour le modéliser, nous évaluons l'état électrique de la machine à partir d'un modèle vectoriel basé sur une combinaison entre les méthodes de Potier et de Blondel. Après avoir calculé l'état électrique de la machine, nous évaluons les pertes par des relations de similitudes avec une machine test de référence.

2.3 Stockage d'énergie

Nous avons choisi dans cet article de considérer comme élément de stockage, une batterie au plomb. Nous ne cherchons pas à évaluer l'état transitoire de la batterie mais seulement pouvoir élaborer une stratégie de gestion énergétique à partir de celui-ci. Nous utilisons pour cela le modèle CIEMAT. C'est un modèle basé sur la mise en série d'une résistance avec une force électromotrice. Des équations analytiques décrivent la tension de la batterie en selon son mode de fonctionnement (charge, décharge, surcharge). Ces équations sont des fonctions de la capacité de la batterie et de son état de charge. Une présentation du modèle CIEMAT peut être vue dans [1].

2.4 Electronique de puissance

Puisque l'alternateur est de type synchrone bobiné, nous pouvons nous permettre de choisir un convertisseur non commandé pour relier la machine électrique au bus continu. En effet, avec une telle machine, la régulation peut se faire à l'aide de l'excitation de l'alternateur. Nous prendrons donc un pont de diode qui fonctionnera en redresseur de courant. Un onduleur MLI fera le lien entre le bus continu et la charge et un convertisseur DC/DC entrelacé réversible en courant relira la batterie au bus continu. Pour évaluer le fonctionnement de ces convertisseurs, nous utilisons des modèles moyens.

3. Algorithme d'optimisation

L'algorithme décrit dans cet article repose sur deux optimisations imbriquées. Une optimisation globale qui s'appuie sur un algorithme génétique va optimiser le dimensionnement du système et une optimisation locale basée sur les équations de Hamilton-Bellman-Jacobi nous permet de trouver la stratégie de gestion de flux énergétique optimale. La structure de l'algorithme entier est décrite à la Figure 2.

3.1 Commande optimale

Nous cherchons à minimiser la consommation de carburant en prenant en compte toute la chaîne de conversion du système. Le groupe hybride doit fournir à chaque instant la puissance demandée par la charge, mais cette puissance peut provenir du groupe électrogène et/ou de l'élément de stockage. Si nous considérons que nous connaissons le profil de charge *a priori*, rechercher la stratégie optimale de gestion de flux d'énergie peut se ramener à un problème de recherche de trajectoire dans le plan formé par l'énergie échangé par la batterie et le temps du profile de charge. Pour résoudre ce problème, nous utilisons une méthode basé sur la théorie des graphs utilisant les équations de Hamilton-Bellman-Jacobi en discrétisant les deux axes du domaine de recherche. Ce principe est expliqué dans [2].

3.2 Optimisation du dimensionnement

Dans cette partie, nous cherchons à dimensionner les éléments du système afin de minimiser la consommation de carburant et le cout d'investissement du système global. Pour cela, nous utilisons un algorithme génétique qui va nous permettre de tracer un front de Pareto entre ces deux objectifs. Des modèles de couts sont élaborés pour chaque sous-système et la consommation de carburant est évaluée à l'aide de l'algorithme de commande optimale décrite précédemment. Le résultat sera fortement dépendant de l'application pour laquelle le groupe est utilisé. L'algorithme génétique utilisé est décrit dans [3] et [4].

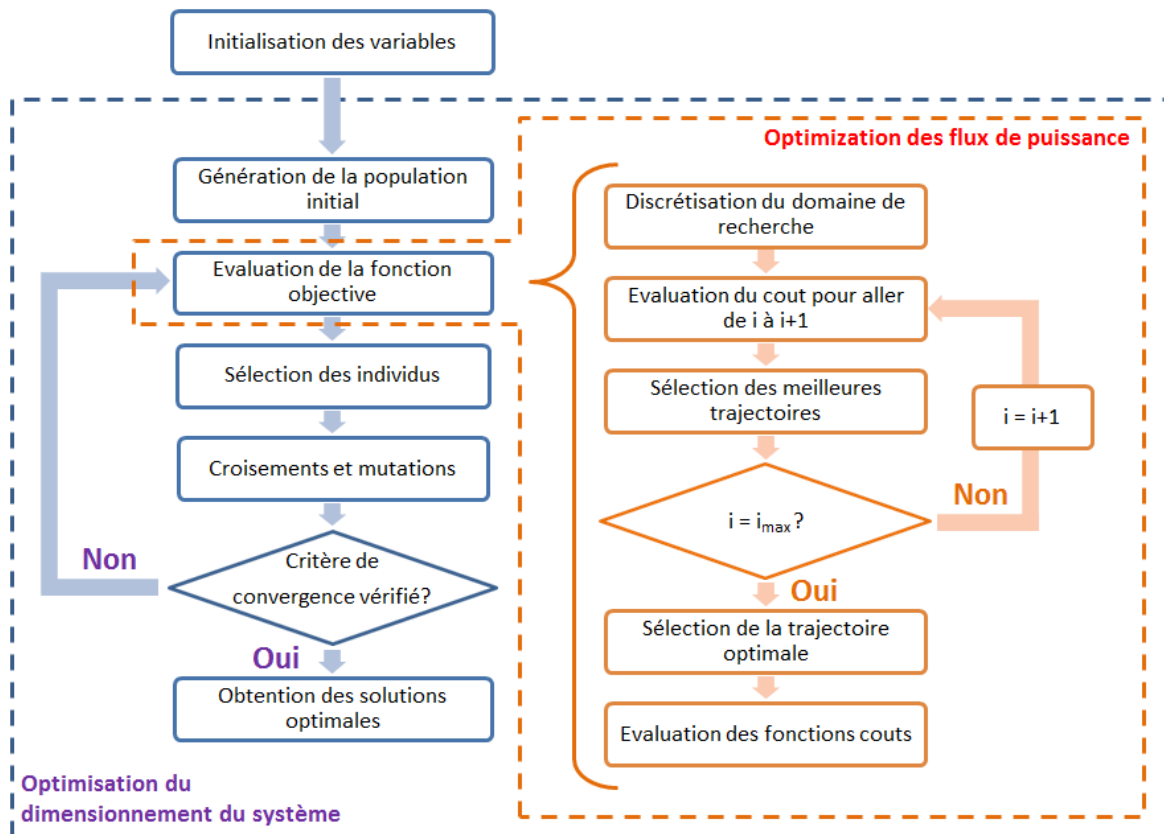


Figure 2 - Structure de l'algorithme d'optimisation

4. Profile de charge

Dans un cas idéal, nous devrions optimiser le dimensionnement du groupe pour chaque application. En réalité, à l'exception de quelques cas particuliers, un groupe électrogène peut être utilisé dans diverses applications avec des profils de charge tout aussi divers. Nous choisissons de prendre dans cette étude des profils de charge aléatoire. Le gain de l'hybridation semble être lié aux rapports entre la puissance moyenne du profil et sa puissance maximum. Nous générons alors trois profils aléatoires avec une puissance maximum de 20kW et une puissance moyenne de 6kW, 10kW et 14kW pour la suite de l'étude. Les profils possèdent donc des rapports entre leur puissance moyenne et leur puissance maximum de respectivement 30%, 50% et 70%.

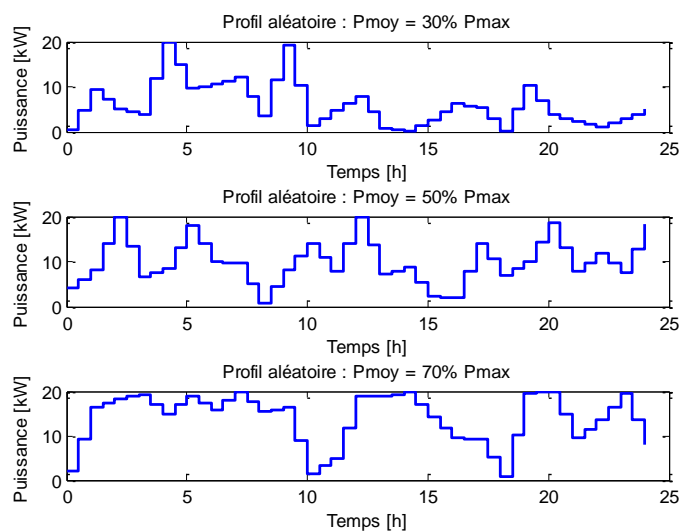


Figure 3 - Profils de charge aléatoires

5. Résultats d'optimisations

Nous choisissons d'optimiser notre système avec 8 paramètres dimensionnant:

- La tension de bus continu
- La puissance maximum du moteur diesel
- La vitesse de rotation maximum du moteur diesel
- Le nombre de cellule élémentaire de batterie au plomb en série
- La capacité de chacune d'entre elles
- Le nombre de bras du convertisseur DC/DC
- La tension nominale de l'alternateur
- La puissance nominale de l'alternateur

Les résultats d'optimisation, pour les trois profils décrits précédemment, sont présentés à la Figure 4. Ces résultats sont comparés au système traditionnel composé uniquement d'un moteur diesel et d'un alternateur dimensionnés pour subvenir un pic du profil de charge et fonctionnant en permanence à 1500tr/min. Le gain sur la consommation de carburant est présenté à la Figure 5.

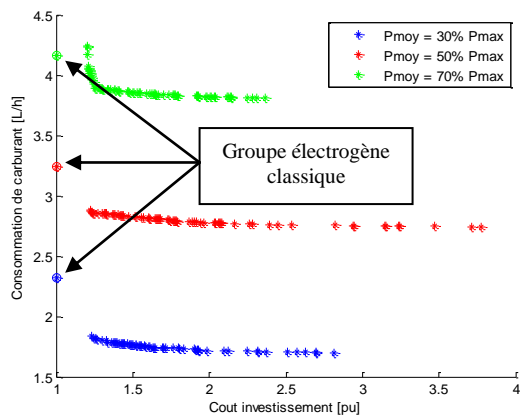


Figure 4 – Fronts de Pareto: Cout d'investissement vs. Consommation de carburant

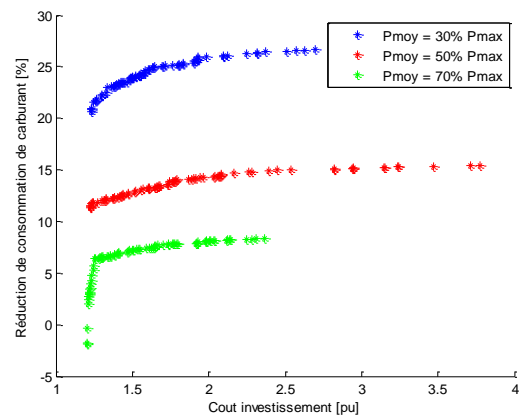


Figure 5 – Réduction de carburant vs. Cout d'investissement

Comme nous pouvions nous en douter, plus le cout d'investissement est élevé, plus la capacité de stockage de la batterie est élevée et plus cela nous permet de manager les flux énergétiques du système et ainsi réduire la consommation de carburant. Cependant, ce gain est fortement lié à l'application. On pourra par exemple atteindre plus de 25% de réduction de carburant sur à profil dont le rapport entre la puissance moyenne et la puissance maximum est de 30% alors que l'on atteint à peine 10% avec le profil avec un rapport de 70%. Pour corroborer ce résultat, d'autres optimisations seront faites avec d'autres profiles de charges mais en conservant les ratios identiques.

6. Conclusion

La méthode proposée dans cet article nous permet d'évaluer les gains d'un système hybride sur une application donnée et nous permet de dimensionner ce système en se basant sur un premier algorithme qui va évaluer la consommation minimale pour une structure donnée, l'optimisation du dimensionnement se faisant avec un algorithme de plus haut niveau. Cette méthode nous a également permis de mettre en valeur la dépendance du profil de charge sur le gain apporté par l'hybridation par rapport à un système classique. Une adaptation de l'algorithme prenant en compte de cout de maintenance du groupe électrogène ainsi que l'usure des batteries peut également être faite.

7. Références

- [1] Gergaud O., « Energy modeling of a lead-acid battery within hybrid wind/photovoltaic systems », SATIE – ENS Cachan.
- [2] Scordia J., Desbois-Renaudin M., Trigui R., Jeanneret B., Badin F., 2005. « Global optimization of energy management laws in hybrid vehicles using graph theory » - *International Journal of Vehicle Design*. Vol. 39, N°4 - pp. 349-367.
- [3] Kenneth Price, Rainer M. Storn, Jouni A. Lampinen, « Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization ».
- [4] Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap, T. Meyarivan, « A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization : NSGA-II ».