

Conception préliminaire d'un smart-grid ferroviaire par optimisation simultanée des composants du système et de leur contrôle

Contact : Stéphane Brisset, stephane.brisset@centralelille.fr

Contexte :

Les énergies renouvelables et plus particulièrement l'électricité photovoltaïque sont, de par leur nature, intermittentes et incertaines. L'ensoleillement est caractérisé par des variations journalières et saisonnières ainsi qu'une couverture nuageuse difficilement prévisible au-delà de quelques jours. Un stockage d'énergie peut réduire ces inconvénients mais le dimensionnement d'un système complexe comportant des énergies renouvelables, des systèmes de stockage, des consommations et une connexion au réseau d'électricité nécessite d'optimiser simultanément les dimensions des composants et leur contrôle sur un large horizon temporel, typiquement une année. Dans une phase de dimensionnement préliminaire sans a priori sur la commande, ceci conduit à de très nombreuses variables de décision et un problème d'optimisation de grande taille dont la résolution se heurte à la « malédiction de la dimensionnalité ».

Deux approches peuvent être utilisées pour la conception par optimisation d'un tel système. La première consiste à linéariser les modèles des composants du système et à trouver, en une seule étape, les dimensions des composants et leur contrôle par une programmation linéaire mixte comprenant des variables continues et booléennes (MILP). Cependant, le tarif d'utilisation des réseaux d'électricité (TURPE), la chute de tension, et les lois constitutives des composants sont des fonctions non-linéaires aussi une MILP conduit fatalement à une solution approchée.

La seconde approche procède par décomposition du problème complet en sous-problèmes de tailles réduites et donc plus simples à résoudre en présence de non-linéarité. Parmi les méthodes de décomposition, on trouve les techniques d'optimisation collaborative, notamment à deux niveaux, et la décomposition de Benders. La difficulté de ces méthodes se situe dans la coordination des sous-optimisations et leur convergence vers l'optimum du problème complet.

Objectif :

L'objectif est de développer un outil pour le dimensionnement du système complet avec la gestion énergétique. Il sera atteint au moyen d'un stage master suivi d'une thèse en partenariat avec la SNCF et RAILENIUM en collaboration avec l'équipe Réseaux du L2EP.

Cet outil de dimensionnement devra être flexible pour permettre un changement rapide de l'architecture de connexion. Elle doit aussi être couplé à la gestion énergétique du système, ce qui permettra d'obtenir un dimensionnement optimisé.

Plusieurs approches seront menées. La première consistera en la réalisation d'un modèle linéaire d'optimisation qui permettra d'optimiser simultanément les dimensions des composants du systèmes et la gestion d'énergie. Cette première approche conduira à une solution approchée dont les performances seront confrontées à celles obtenues avec un outil de simulation ferroviaire.

La seconde approche s'appuiera sur des modèles d'optimisation plus fins intégrant les non-linéarités qui apparaissent naturellement dans les objectifs d'optimisation, les contraintes fonctionnelles et les lois de comportement des organes du système. Un modèle « système » permettra d'optimiser la gestion d'énergie et des modèles des composants seront utilisés pour leur conception par optimisation. Un schéma d'optimisation imbriqué (l'optimisation de la gestion d'énergie est refaite à chaque modification d'un composant) sera utilisé car c'est le plus robuste.

La troisième approche est bien plus délicate à mettre en œuvre mais permettra de réduire le temps nécessaire à la conception globale. Il s'agira de reprendre les modèles du système et des composants précédents et de tenter un schéma d'optimisation itératif comme par exemple la décomposition de Benders.

Etat de l'art :

L'optimisation trouve des applications dans la conception des micro-réseaux embarqués comme les trains, les voitures, les bateaux et les avions qui représentent des systèmes complexes multiphysiques constitués de composants interagissant sur des profils de mission longs. Elle s'intéresse également aux réseaux captifs qui intègrent des énergies renouvelables et des stockages d'énergie.

Certaines techniques procèdent à une décomposition physique du système en sous-systèmes et composants qui sont optimisés séparément. Parmi ces techniques, on trouve le « target cascading » [1] qui a été utilisé au L2EP pour l'optimisation d'une chaîne de traction ferroviaire [2]. Un niveau système coordonne les sous-optimisations en leur soumettant des objectifs qui sont ajustés itérativement.

D'autres techniques peuvent être utilisées au niveau des composants multiphysiques pour séparer les disciplines lors de la modélisation. Ceci permet de gérer les couplages entre les physiques dans la boucle d'optimisation et conduit à un gain de temps. Les modèles sont aussi plus simples à construire. Ces techniques d'optimisation multidisciplinaire [3]-[4] ont été utilisées au L2EP pour l'optimisation d'un transformateur [5].

Enfin, il existe des méthodes qui visent à optimiser séparément les dimensions des composants et leur commande par des approches itératives [6]. Elles se distinguent par la façon dont les résultats de la commande optimale sont intégrés lors de l'optimisation des dimensions et vice-versa. Par exemple, la décomposition de Benders construit des approximations linéaires des objectifs d'optimisation en fonctions des contraintes [7]. Ces techniques ont été utilisées au L2EP pour la conception du moteur de traction d'un véhicule électrique hybride par optimisation sur cycle routier [8] et la conception préliminaire par optimisation sur une année d'une sous-station ferroviaire hybride intégrant des énergies renouvelables et un stockage [9].

[1] J. T. Allison, D. Walsh, M. Kokkolaras, P. Y. Papalambros, and M. Cartmell, "Analytical target cascading in aircraft design", proceeding of 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006

- [2] KREUAWAN Sangkla, MOUSSOUNI Fouzia, GILLON Frédéric, BRISSET Stéphane, BROCHET Pascal, « Optimal design of a traction system using Target Cascading », International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 30, N°. 3, pages. 163-178, 12/2009
- [3] N. M. Alexandrov and R. M. Lewis. « Comparative properties of collaborative optimization and other approaches to multidisciplinary optimization ». In proceedings of the First ASMO UK/ISSMO, Conference on Engineering Design Optimization, July 1999.
- [4] P.M. Zadeh, V.V. Toropov, and A.S. Wood. « Metamodel-based collaborative optimization framework », Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 38, no. 2, pp. 103-115, 2009.
- [5] PIERQUIN Antoine, BRISSET Stéphane, HENNERON Thomas, « Multidisciplinary optimization formulation for the optimization of multirate systems », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, N°. 3, 03/2016
- [6] H K Fathy, J A Reyer, P Y Papalambros, and A G Ulsoy. On the Coupling between the Plant and Controller Optimization Problems. Proceedings of the American Control Conference, pages 25–27, 2001
- [7] A.M. Costa, “A survey on Benders decomposition applied to fixed-charge network design problems”, Computers & Operations Research, vol. 32, no. 6, pp. 1429-1450, 2005
- [8] KALOUN Adham, BRISSET Stéphane, OGIER Maxime, AHMED Mariam, VINCENT Robin, « Comparison of Cycle Reduction and Model Reduction Strategies for the Design Optimization of Hybrid Powertrains on Driving Cycles », Energies, Vol. 14, N°. 4, pages. 948, 02/2021
- [9] BRISSET Stéphane, OGIER Maxime, « Collaborative and Multilevel Optimizations of a Hybrid Railway Power Substation », International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 10/2017