

Optimisation des manœuvres de contrôle sur les lignes de transport électrique

M. Charara, M. De Montigny, N. Abou Daher, H. Dagdougui, A. Lesage-Landry

G-2025-19

February 2025

La collection *Les Cahiers du GERAD* est constituée des travaux de recherche menés par nos membres. La plupart de ces documents de travail a été soumis à des revues avec comité de révision. Lorsqu'un document est accepté et publié, le pdf original est retiré si c'est nécessaire et un lien vers l'article publié est ajouté.

The series *Les Cahiers du GERAD* consists of working papers carried out by our members. Most of these pre-prints have been submitted to peer-reviewed journals. When accepted and published, if necessary, the original pdf is removed and a link to the published article is added.

Citation suggérée : M. Charara, M. De Montigny, N. Abou Daher, H. Dagdougui, A. Lesage-Landry (Février 2025). Optimisation des manœuvres de contrôle sur les lignes de transport électrique, Rapport technique, Les Cahiers du GERAD G- 2025-19, GERAD, HEC Montréal, Canada.

Suggested citation: M. Charara, M. De Montigny, N. Abou Daher, H. Dagdougui, A. Lesage-Landry (February 2025). Optimisation des manœuvres de contrôle sur les lignes de transport électrique, Technical report, Les Cahiers du GERAD G-2025-19, GERAD, HEC Montréal, Canada.

Avant de citer ce rapport technique, veuillez visiter notre site Web (<https://www.gerad.ca/fr/papers/G-2025-19>) afin de mettre à jour vos données de référence, s'il a été publié dans une revue scientifique.

Before citing this technical report, please visit our website (<https://www.gerad.ca/en/papers/G-2025-19>) to update your reference data, if it has been published in a scientific journal.

La publication de ces rapports de recherche est rendue possible grâce au soutien de HEC Montréal, Polytechnique Montréal, Université McGill, Université du Québec à Montréal, ainsi que du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies.

The publication of these research reports is made possible thanks to the support of HEC Montréal, Polytechnique Montréal, McGill University, Université du Québec à Montréal, as well as the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies.

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
– Bibliothèque et Archives Canada, 2025

Legal deposit – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
– Library and Archives Canada, 2025

Optimisation des manœuvres de contrôle sur les lignes de transport électrique

Mohamad Charara ^{a, c, d}

Martin De Montigny ^e

Nivine Abou Daher ^e

Hanane Dagdougui ^{b, c, d}

Antoine Lesage-Landry ^{a, c, d}

^a *Département de génie électrique, Polytechnique Montréal, Montréal, (Qc), Canada, H3T 1J4*

^b *Département de mathématiques et de génie industriel, Polytechnique Montréal, Montréal, (Qc), Canada, H3T 1J4*

^c *GERAD, Montréal (Qc), Canada, H3T 1J4*

^d *MILA, Montréal (Qc), Canada, H2S 3H1*

^e *Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varenne (Qc), Canada, J3X 1S1*

charara.mohamad@polymtl.ca

February 2025
Les Cahiers du GERAD
G–2025–19

Copyright © 2025 Charara, De Montigny, Abou Daher, Dagdougui, Lesage-Landry

Les textes publiés dans la série des rapports de recherche *Les Cahiers du GERAD* n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. Les auteurs conservent leur droit d'auteur et leurs droits moraux sur leurs publications et les utilisateurs s'engagent à reconnaître et respecter les exigences légales associées à ces droits. Ainsi, les utilisateurs:

- Peuvent télécharger et imprimer une copie de toute publication du portail public aux fins d'étude ou de recherche privée;
- Ne peuvent pas distribuer le matériel ou l'utiliser pour une activité à but lucratif ou pour un gain commercial;
- Peuvent distribuer gratuitement l'URL identifiant la publication.

Si vous pensez que ce document enfreint le droit d'auteur, contactez-nous en fournissant des détails. Nous supprimerons immédiatement l'accès au travail et enquêterons sur votre demande.

The authors are exclusively responsible for the content of their research papers published in the series *Les Cahiers du GERAD*. Copyright and moral rights for the publications are retained by the authors and the users must commit themselves to recognize and abide the legal requirements associated with these rights. Thus, users:

- May download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research;
- May not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain;
- May freely distribute the URL identifying the publication.

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Abstract : Avec la demande croissante en énergie et l'intégration des sources d'énergie renouvelable, les réseaux électriques font face à d'importants défis opérationnels. Ces défis incluent les surcharges, les pertes de puissance et les instabilités du système, notamment lorsque les réseaux fonctionnent à proximité de leurs limites de capacité. Les dispositifs du réseau de transport jouent un rôle essentiel pour assurer l'exploitation sécurisée du réseau tout en facilitant l'intégration efficace des sources renouvelables afin de répondre à la demande croissante en électricité. Ce travail propose un modèle d'optimisation formulé sous forme de programme mixte en nombres entiers et à contraintes coniques du second ordre (MISOCP) pour la planification des actions de contrôle des dispositifs clés dans les systèmes de transport électrique, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité opérationnelle du réseau et d'assurer une résolution efficace à l'aide de solveurs d'optimisation standards. Le modèle intègre (i) les changeurs de prise en charge (OLTC) pour gérer les niveaux de tension par des ajustements discrets des prises ; (ii) les compensateurs statiques synchrones (STATCOM) et les réactances shunt pour assurer la compensation de puissance réactive et la régulation de la tension ; et (iii) les condensateurs série à thyristors (TCSC) afin de contrôler l'impédance série et de réguler les flux de puissance. L'objectif du modèle est de minimiser les pertes de puissance active dans les lignes de transport en utilisant un nombre limité d'actions de contrôle, comme recommandé par l'opérateur, sur un horizon temporel donné, tout en garantissant le respect des contraintes opérationnelles et physiques à tout moment.

Pour modéliser efficacement les contraintes imposées par les caractéristiques opérationnelles des dispositifs, des techniques de linéarisation et de relaxation sont appliquées. Plus précisément, une relaxation conique du second ordre (SOCR) est employée pour modéliser les flux de puissance au sein du problème d'optimisation tout en garantissant une résolution computationnelle. Les contraintes associées aux OLTC sont discrétisées à l'aide d'une expansion binaire avant d'être linéarisées. Les STATCOM sont modélisés à l'aide de contraintes linéaires basées sur leurs valeurs maximales et minimales de puissance réactive afin de représenter leur comportement d'injection et d'absorption. Une technique d'expansion binaire est également utilisée pour modéliser les réactances shunt, permettant l'agrégation de plusieurs valeurs discrètes de puissance réactive. De plus, une technique de reformulation-linéarisation (RLT) est appliquée afin de modéliser la contribution des TCSC de manière convexe. Afin d'assurer une représentation précise du problème, un modèle d'optimisation multi-période est employé. Cette approche prend en compte la nature séquentielle des actions de contrôle, où les décisions prises à un instant donné influencent celles adoptées aux étapes suivantes.

Le modèle est testé sur les réseaux IEEE 9-bus et RTS 96 et comparé avec des modèles existants issus de la littérature. Les profils de tension et les pertes de puissance active sont évalués afin d'en mesurer la performance. Ces tests valident l'efficacité du modèle pour maintenir les tensions dans des limites acceptables tout en minimisant les pertes de puissance, soulignant ainsi son potentiel pour une application à des réseaux électriques de plus grande échelle.

Optimisation des manœuvres de contrôle sur les lignes de transport électrique

Mohamad Charara*, Martin De Montigny, Nivine Abou Daher, Hanane Dagdougui, Antoine Lesage-Landry.



POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

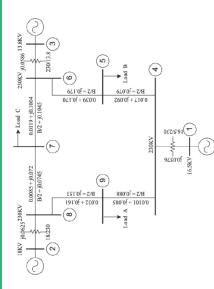


1. Mise en Contexte

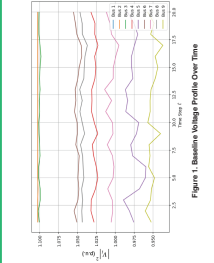
Avec la demande croissante en énergie et l'intégration des sources d'énergie renouvelable, les réseaux électriques font face à d'importants défis opérationnels. Ces défis incluent les surcharges d'équipement et les pertes de puissance, notamment lorsque les réseaux sont opérés près de leurs limites de capacité.



3. Réseaux IEEE-9bus



4. Profil de voltage sans équipement



2. Méthode et Formulation

Ce travail propose un modèle formulé sous forme de programme mixte en nombres entiers et sous contraintes coniques du second ordre MISOCP pour la planification des manœuvres de contrôle des dispositifs clés dans les systèmes de transport électrique.

Objective:
$$\min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in \mathcal{L}} P_{i,j}^{t, Loss}$$

Minimisation de la perte de puissance:

$$P_{i,j}^{t, Loss} = P_{ij}^t + P_{ji}^t, \forall i, j \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$
+ Écoulement de puissance avec SOCR

Changeurs de prise en charge OLTC: [1]

$$\sum_{n \in \mathcal{N}_{OLTC}} \alpha_{tap,n} = 1$$

$$V_{tap}^2 \leq V_{tap}^{max2} \leq (V_{tap}^{max})^2$$

$$real(W_{ij}^t) = \sum_{n \in \mathcal{N}_{OLTC}} m_n^t$$

$$imag(W_{ij}^t) = 0$$

$$\Delta P_{tap} = (P_{tap})^2$$

$$0 \leq m_n \leq M \alpha_{tap,n}$$

$$m_n \geq V_{tap}^{min} \Delta P_{tap,n} + M(1 - \alpha_{tap,n})$$

$$m_n \leq V_{tap}^{max} \Delta P_{tap,n} - M(1 - \alpha_{tap,n})$$

Méthode Big M et expansion binaire pour linéariser

$$U_{tap}^t = V_{tap}^t (\alpha_{tap}^t)^2$$

Compensateurs statiques synchrones STATCOM: [2][3]

$$|W_{stat}^t| \leq \alpha_{stat}^{max} S_{stat}^t + M(1 - \alpha_{stat}^t)$$

$$|W_{stat}^t| \geq \alpha_{stat}^{min} S_{stat}^t + M(1 - \alpha_{stat}^t)$$

Injection ou absorption de puissance réactive et tension si active

Réactances Shunt :

$$\sum_{k \in \mathcal{N}_{shunt}} \alpha_{shunt,k} \leq N$$

$$q_{shunt}^t = \sum_{k \in \mathcal{N}_{shunt}} (\alpha_{shunt,k}^t q_{shunt,k}^t + (1 - \alpha_{shunt,k}^t) M)$$

$$v_{shunt}^t \geq \sum_{k \in \mathcal{N}_{shunt}} (\alpha_{shunt,k}^t v_{shunt,k}^t + (1 - \alpha_{shunt,k}^t) M)$$

Injection de puissance réactive + possibilité d'agrégation

Condensateurs sériels à thyristors TCSC: [4][5] (assumption: $x_{ij} > 0$)

$$-0.8k_j < X_{TCSC} < 0.2k_j$$

$$\frac{\alpha_{TCSC}^t}{\alpha_{TCSC}^{max}} \leq M P_{TCSC}$$

$$\Delta P_{TCSC} = \frac{1}{x_{ij} + X_{TCSC}} + M(1 - \alpha_{TCSC}^t)$$

$$-M P_{TCSC} \leq \Delta P_{TCSC} \leq M P_{TCSC}$$

$$P_{ij}^t + P_{ji}^t = (W_{ij}^t - W_{ji}^t)(V_i^t + \Delta V_{TCSC}^t)$$

$$\Delta V_{TCSC}^t = \beta \Delta P_{TCSC}^t$$

+ Relaxation avec la technique Formulation-Linearization

Contrôle:

Maximum m action de contrôle chaque à t

$$\sum_{i \in \mathcal{N}_{TCSC}} |\alpha_{TCSC,i}^t| + \alpha_{tap}^t \leq m$$

$$t \in \{2, \dots, T\}$$

Changement maximal permis par action du OLTC

$$|W_{tap}^t - W_{ij}^t| \leq \alpha_{tap}^{limit, tap}$$

$$V_{tap} = (d, i, OLTC) \in \mathcal{D}, \forall i \in \{2, 3, \dots, T\}$$

Lien entre la représentation binaire et entière de la position du OLTC à t

$$u_{tap} = \sum_{n \in \mathcal{N}_{OLTC}} n \alpha_{tap,n}^t$$

$$S_{tap,n}^t \in \{0, 1\}, \alpha_{tap,n}^t \in \{0, 1\}, u_{tap}^t \in \{1, 2, \dots, N_{tap}^t\}, \alpha_{tap,n}^t \in \{0, 1\}$$

8. References

[1] José Iria, Miguel Heinho, Gonçalo Cardoso, Optimal sizing and placement of energy storage systems and on-load tap changer transformers in distribution networks. Applied Energy, vol. 250, pp. 1147-1157, 2019.

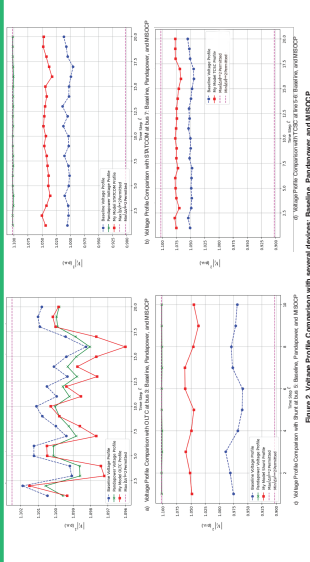
[2] N. H. Khan et al., A Novel Modified Lightning Attachment Procedure Optimization Technique for Optimal Allocation of the FACTS Devices in Power Systems. IEEE Access, vol. 9, pp. 47976-47997, 2021.

[3] N. H. Khan et al., Optimal Allocation of Multiple STATCOMs in a Power System using BBO. IJPSO & ISO. Journal of Electrical, Systems and Information Technology, vol. 5, Issue 3, pp. 777-793, 2018.

[4] K. Kothuru, R. Neela, Optimal allocation of multiple FACTS devices for its effect in enhancing the system security. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 6, pp. 4684-4693, 2019.

[5] C. Bringham, M. F. Anjos, S. Le Digabel, Tight-and-Cheap Conic Relaxation for the Optimal Reactive Power Dispatch Problem. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 6, pp. 4684-4693, 2019.

5. Résultats



6. Validation du modèle

- Testé sur le réseau IEEE 9-bus et comparé aux modèles de la littérature.
- Évaluation des profils de tension et des pertes de puissance active.
- Résultats confirmant l'efficacité du modèle pour maintenir les tensions dans les limites acceptables et minimiser les pertes.

7. Futurs travaux

- Application au réseau RTS96 pour une évaluation sur un système plus complexe.
- Inclusion des ressources énergétiques distribuées (DER), source d'incertitude.
- Exploration d'approches stochastiques pour mieux gérer la variabilité et renforcer la robustesse du modèle.