

Le convertisseur statique de phase. Une solution pour renforcer l'alimentation électrique des lignes ferroviaires 25 kV/50Hz

Paul SACCO^(1,2), Philippe LADOUX⁽¹⁾, Sébastien SANCHEZ^(1,3), Benoit SONIER⁽²⁾, Mahmoud HASSAN⁽²⁾

⁽¹⁾LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse - ⁽²⁾SNCF Réseau, Saint-Denis - ⁽³⁾Icam, Toulouse

RESUME – Malgré ses avantages par rapport aux systèmes concurrents, le système d'alimentation ferroviaire 25 kV - 50 Hz présente quelques inconvénients. En particulier, il produit un déséquilibre de tension au point de raccordement sur le réseau triphasé amont, et les sous-stations adjacentes ne peuvent pas fonctionner en parallèle, ce qui interdit le partage de l'énergie. Dans les cas critiques, la mise en œuvre d'une sous-station électronique de puissance, ci-après dénommée convertisseur statique de phase (SPC), peut constituer une solution. Cet article concerne l'intégration d'un SPC sur un secteur de ligne ferroviaire alimenté en 25 kV. Des simulations sont effectuées sur un cas générique.

Mots-clés – Électrification ferroviaire en courant alternatif, Convertisseur statique de phase, déséquilibre de tension, surcharge de sous-station.

1. INTRODUCTION

En France, à partir des années 50, le système d'alimentation ferroviaire alternatif à la tension de 25 kV, fonctionnant à la fréquence industrielle de 50 Hz, a été développé. Il se base sur l'utilisation de transformateurs abaisseurs monophasés qui alimentent le réseau de distribution ferroviaire (les caténaires) à partir du réseau de transport d'électricité (Rte). Ce système a de nombreux avantages par rapport aux systèmes concurrents, les systèmes à courant continu et à courant alternatif à fréquence spéciale. Sa tension de fonctionnement plus élevée, permet des courants plus faibles et donc un meilleur rendement, des lignes de contact aériennes plus légères et donc moins chères, et un espacement entre les sous-stations plus grand. Les sous-stations sont aussi plus simples car elles ne comportent pas de convertisseurs alternatif-continu ou de changeur de fréquence. Ces caractéristiques ont favorisé le développement du système 25 kV/50 Hz qui représente maintenant 48% des lignes ferroviaires électrifiées dans le monde.

Néanmoins, ce système d'électrification présente également deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, il n'utilise que deux phases du réseau public triphasé. Cela signifie que les courants absorbés par les sous-stations provoquent un déséquilibre en tension sur le réseau triphasé. Deuxièmement, les sous-stations alimentant deux secteurs adjacents ne sont généralement pas connectées sur les mêmes phases du réseau triphasé amont et ne peuvent donc pas, ou alors très difficilement, être mises en parallèle. En cas de pic de consommation sur une ligne, la puissance ne peut être répartie sur plusieurs sous-stations et chaque sous-station doit fournir 100% de la puissance consommée par les trains sur son secteur. Cela peut mener à une surcharge du transformateur de traction et à des chutes de tension plus importantes sur la ligne de contact.

Les solutions conventionnelles pour résoudre le problème de déséquilibre sont la création d'une connexion à un réseau avec une puissance de court-circuit plus élevée ou l'utilisation d'un montage de transformateur Scott ou en V. Pour le problème de surcharge des transformateurs de traction, la solution est simplement de remplacer le transformateur par un plus puissant. Ces solutions sont généralement soit extrêmement coûteuses

soit peu efficaces et inadaptées à la situation.

En ce qui concerne les chutes de tension sur la ligne de contact, une solution consiste à utiliser un compensateur statique de réactif (SVC) [1, 2] qui peut fournir de la puissance réactive à proximité de l'extrémité du secteur électrique. Plus généralement, les SVC font partie d'un ensemble de solutions électroniques de puissance qui pourraient être utilisées pour l'application 25 kV. Ces solutions se développent depuis quelques années [3, 4]. Le SVC est aussi utilisé sur la ligne à grande vitesse britannique HS1 pour compenser le déséquilibre du réseau triphasé amont. De même, le STATCOM est utilisé à la sous-station d'Évron en France [5] avec le même objectif. Plus récemment, un compensateur de déséquilibre basé sur une impédance de Steinmetz contrôlée par des gradateurs MLI a été proposé [6]. Le *Railway Power Conditioner (RPC)* est une autre solution électronique de puissance permettant de compléter les montages de transformateur Scott ou V et d'améliorer leur capacité de rééquilibrage du réseau triphasé amont [7, 8].

Cependant, tous les systèmes mentionnés ci-dessus ne sont pas en mesure de résoudre tous les problèmes simultanément. Dans certains cas critiques, la mise en œuvre d'une sous-station électronique de puissance est alors une solution pertinente. Ce type de sous-stations est déjà utilisé depuis environ trois décennies dans le système d'alimentation 15 kV/16,7 Hz Germano-Helvétique [9] et est donc déjà bien documentée. Cette sous-station électronique remplit dans ce cas une fonction de conversion statique de fréquence (*SFC*). Mais au-delà de ce changement de fréquence, le *SFC* absorbe des courants équilibrés sur le réseau amont et ne génère donc pas de déséquilibre. Pour une application 25 kV la tension produite en sortie du convertisseur sur le réseau ferroviaire peut être synchronisée sur la tension de la SST adjacente ce qui autorise la mise en parallèle des secteurs. Par conséquent, la chute de tension sur la ligne de contact est plus faible et la puissance consommée par les trains est répartie plus uniformément entre les sous-stations. C'est pourquoi de nombreux travaux de recherche se concentrent sur l'application des sous-stations électroniques de puissance au système 25 kV/50 Hz [3, 9, 10]. Dans ce cas, le convertisseur ne réalise pas de conversion de fréquence mais un changement du nombre de phase. C'est pourquoi, nous préférons parler de convertisseur statique de phase (*SPC*). Certains *SPC* 25 kV/50 Hz ont déjà été installés, par exemple à Wulkuraka en Australie [11] ou à Potteric Carr au Royaume-Uni [12].

Cet article cherche à évaluer l'intérêt du *SPC* pour le système d'alimentation 25 kV/50 Hz français. Dans un premier temps le principe du *SPC* et différentes possibilités de pilotage seront présentés. Le cas d'étude et la méthodologie seront présentés. Enfin les résultats seront analysés.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SPC ET DE LA MISE EN PARALLÈLE DES SOUS-STATIONS

La **figure 1** montre le principe de fonctionnement du *SPC*. La sous-station électronique est composée d'un transformateur

triphasé abaisseur, qui assure notamment une fonction d'isolation galvanique en plus d'adapter le niveau de tension, et de deux onduleurs de tension dos-à-dos qui réalisent une conversion triphasé-continu-monophasé.

La puissance active absorbée par le convertisseur d'entrée est pilotée de telle sorte à réguler la tension du bus continu à sa valeur nominale. La puissance réactive absorbée peut être contrôlée indépendamment. La sous-station peut donc se comporter soit comme une charge avec un facteur de puissance unitaire ou fournir du réactif au réseau de transport d'électricité amont pour compenser les chutes de tension. Le bus continu permet de découpler complètement le réseau triphasé et le réseau de distribution ferroviaire.

L'onduleur monophasé côté réseau ferroviaire permet une grande variété de modes de fonctionnement. La sous-station peut fonctionner par exemple en mode îloté sans mise en parallèle des secteurs ferroviaire entre eux. Dans ce cas la sous-station alimente un seul secteur électrique ferroviaire et régule simplement l'amplitude de la tension de sortie côté caténaire.

2.1. Fonctionnement en parallèle

2.1.1. Synchronisation des tensions de sortie

Il est aussi possible de mettre en parallèle la sous-station électronique avec une autre sous-station adjacente, électronique ou conventionnelle. Les tensions de sortie des sous-stations sont alors synchronisées (c'est-à-dire régulées pour avoir la même phase). La puissance consommée par les trains entre deux sous-stations est donc répartie de manière naturelle au prorata de la position des trains sur la ligne. Par exemple si un train se situe entre deux sous-stations espacées d'une distance l , les courants I_A et I_E fournies par les sous-stations de gauche et de droite sont :

$$I_A = \left(1 - \frac{x}{l}\right) I \quad (1)$$

$$I_E = \frac{x}{l} I \quad (2)$$

où x est la position du train par rapport à la sous-station de gauche et I le courant absorbé par le train. Les relations 1 et 2 modélisent une situation idéalisée où les SST sont considérées comme des sources de tensions idéales (impédance interne négligée) et où la ligne est modélisée par une simple impédance RL.

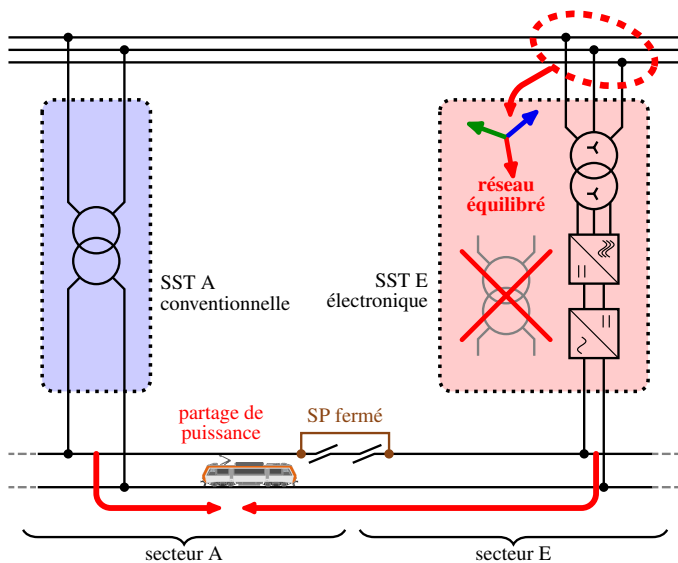


FIG. 1. Principe de la sous-station électronique / SPC

2.1.2. Phase angle control

Une autre méthode de pilotage nommée *phase angle control* peut être adoptée [13, 14]. Il s'agit de modifier la répartition des puissances fournies par les deux sous-stations adjacentes mises en parallèle en jouant sur l'amplitude et la phase de la tension de sortie du SPC :

$$I_A = \frac{V_A - V_E}{lZ_{km}} + \left(1 - \frac{x}{l}\right) I \quad (3)$$

$$I_E = \frac{V_E - V_A}{lZ_{km}} + \frac{x}{l} I \quad (4)$$

où V_A est la tension de sortie de la SST A et $V_E = \alpha V_A$ est la tension de sortie de la SST E, avec un déphasage $\alpha = e^{-j\delta}$ et Z_{km} l'impédance linéique au kilomètre de la ligne. En plus de la composante dépendant de la position du train sur la ligne, une composante dépendant de la tension de sortie du SPC V_E apparaît dans la répartition des courants fournies par les deux SST. En jouant sur le déphasage des tensions produites par les deux SST, il est donc possible de créer un flux de puissance sur le réseau de distribution. Ce flux forcé est un degré de liberté intéressant car il peut permettre de plus ou moins soutenir une sous-station adjacente en fonction des conditions d'alimentation électrique. Dans le cas d'une dégradation de la puissance de court-circuit du réseau de transport pour une sous-station conventionnelle A par exemple, la sous-station électronique E en parallèle peut être pilotée de manière à soulager la SST A.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Présentation du cas d'étude

Afin d'étudier l'intérêt du SPC pour le système d'alimentation ferroviaire 25 kV/50 Hz français, un cas d'étude générique a été modélisé et simulé avec le logiciel PLECS. Comme le montre la figure 1, deux sous-stations respectivement notées A et E alimentent chacune un secteur électrique ferroviaire. Trois cas de simulation ont été comparés :

- situation actuelle (courbes bleues) : pas de mise en parallèle et pas de SPC, les SST A et E sont conventionnelles
- situation "SPC" (courbes oranges) : la sous-station E est équipée d'un SPC et fonctionne en parallèle de la SST A qui reste conventionnelle
- situation "dérogatoire" (notée SI - courbes jaunes) : deux sous-stations conventionnelles sont mises en parallèles

La situation dérogatoire est très rare. En France SNCF Réseau doit demander à RTE l'autorisation de mettre en parallèle deux sous-stations conventionnelles. Cette mesure est mise en place pour décharger une SST trop chargée, mais est complexe à gérer à cause de la circulation indésirable de courant sur la caténaire. Ainsi ce cas est simplement simulé pour servir de point de comparaison avec les deux autres.

3.2. Modélisation

Le réseau de transport d'électricité a été modélisé par une source de tension triphasé idéale, connectée en série avec des impédances RL permettant de modéliser la puissance de court-circuit du réseau et le déséquilibre en tension. De même la SST conventionnelle a été modélisée par un transformateur idéal avec une impédance RL série au secondaire. Les pertes fer et l'inductance magnétisante ont été négligées.

La sous-station électronique est donc basée sur deux convertisseurs de tension mis dos-à-dos. Ces convertisseurs sont modélisés par un modèle moyen pour permettre une étude basse fréquence du système (flux de puissances).

Le réseau de distribution ferroviaire est constitué des caténaires et des rails qui assurent le retour courant traction. La modélisation de cet ensemble est complexe du fait de nombreux phénomènes physiques à prendre en compte. Pour simplifier,

l'ensemble caténaire et rail est ramené à une impédance linéique équivalente en supposant que les grandeurs soient sinusoïdales à 50 Hz [15, 16].

TABLEAU 1. Simulation parameters

Paramètres	Valeurs	
Sous-station	E	A
Tension du réseau triphasé U_n [kV]	63	63
Puissance de court-circuit du réseau triphasé S_{cc} [MVA]	214	749
Résistance du transformateur [Ω]	0.47	0.53
Réactance du transformateur [Ω]	5.36	6.03
Fréquence réseau triphasé et ferroviaire f [Hz]	50	
Tension caténaire V_{cat} [kV]	27.5	
Résistance linéique de la ligne [$\Omega \text{ km}^{-1}$]	0.08	
Réactance linéique de la ligne [$\Omega \text{ km}^{-1}$]	0.28	

Le **tableau 1** présente les paramètres de simulation. Ceux-ci proviennent d'un cas d'étude réel actuellement étudié par SNCF Réseau. Enfin les charges ont été modélisées par des sources de courant idéales pilotées pour absorber une puissance active et réactive spécifiques.

3.3. Contrôle du SPC

Le convertisseur triphasé-continu est piloté dans le repère dq. Des correcteurs PI régulent les composantes actives et réactives du courant absorbé par le convertisseur sur le réseau amont. Dans les simulations, la composante sur l'axe q de la référence de courant (composante réactive) est réglée à 0. Ainsi le facteur de puissance du convertisseur au point de connexion du réseau amont est unitaire. La composante active du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu à sa valeur nominale de 50 kV.

Pour le convertisseur continu-monophasé, la structure de commande est basée sur des correcteurs PI en cascade pour contrôler le courant et la tension de sortie. Le convertisseur agit donc comme une source de tension. Le choix de la référence de tension dépend du type de pilotage voulu et doit donc être choisi avec précaution. Si le pilotage avec synchronisation des tensions est choisi, la référence de tension du SPC ne peut être prise sur la tension de sortie de la SST adjacente. La chute de tension dans le transformateur se propagerait en effet dans la commande du SPC et produirait des résultats insatisfaisants. La référence de tension doit donc être maintenue à son amplitude nominale (27,5 kV) tandis que la phase est obtenue grâce à une PLL sur la tension de sortie de la SST adjacente.

Dans le cadre de la *phase angle control* (**figure 2**) un angle δ de déphasage est ajouté à la phase obtenue par la PLL. Cet angle δ est fourni par un correcteur PI qui régule la puissance active injectée par le SPC sur le réseau ferroviaire. Il existe en effet un couplage entre la puissance active injectée et le déphasage d'une part et entre la puissance réactive et l'amplitude d'autre part. Dans cette étude le couplage réactif/amplitude n'est pas exploité et la puissance réactive circule donc librement.

Dans tous les cas ces méthodes de pilotage nécessitent la transmission d'information entre les deux sous-stations, distantes de plusieurs dizaines de kilomètres.

3.4. Approche de simulation

L'étude des systèmes ferroviaires, en génie électrique, est complexe du fait du caractère déformable du circuit électrique. Les impédances modélisant la ligne dépendent en effet de la position du train et sont donc variables dans le temps. L'approche

retenue dans cette étude consiste à simuler un point de fonctionnement du système jusqu'à obtenir un régime permanent. La distribution des puissances consommées est alors modifiée, puis un second point est simulé, etc.

La **figure 3** montre le principe de la variation de la distribution des charges. Dans cette étude, quatre charges sont considérées se situant aux extrémités des secteurs A et E. À chaque simulation, le facteur k_A est modifié pour faire varier les puissances consommées par les trains sur le secteur correspondant. Plus ce facteur tend vers 0, plus les charges sont consommées "à gauche" du secteur et inversement plus il tend vers 1 plus elles sont consommées "à droite". Par symétrie, la même logique est appliquée au secteur E.

Les indicateurs qui seront mesurés sont :

- le taux de déséquilibre en tension (*VUF*) aux points de raccordement des deux SST,
- la puissance apparente (*S*) transitant dans les deux SST,
- le rendement du réseau de distribution ferroviaire
- la moyenne des tensions aux pantographes des trains ($U_{train,moy}$)

Le déséquilibre en tension est calculé en simulation avec la méthode des composantes symétriques. En France ce taux, calculé avec des puissances moyennées sur dix minutes, ne doit pas excéder 1%, avec une tolérance de 30 points hors limite par an. La puissance apparente est un indicateur de la surcharge des SST. Le rendement du réseau de distribution ferroviaire correspond à la puissance fournie en sortie des SST moins celle consommée par les trains (les pertes dans les SST ne sont pas mesurées ici). Enfin, la moyenne des tensions aux pantographes des trains permet d'estimer les chutes de tensions en ligne. La norme EN50163 définit que la tension aux bornes des trains doit toujours être supérieure à 19 kV pour le système 25 kV. Cette étude étant basée sur un cas d'étude générique et non sur un cas spécifique (pour des raisons de confidentialité), les charges ne correspondent pas à un trafic ferroviaire réel. Les grandeurs mesurées ne seront donc comparées que de manière relative et ne permettront que de dégager des tendances.

4. RÉSULTATS

La **figure 4** montre les résultats de simulation pour une variation de la distribution des charges sur le secteur A (la variable en abscisse est k_A). Celle-ci présente le taux de déséquilibre (*VUF*) et la puissance apparente (*S*) pour les SST A et E. La moyenne des tensions au pantographe des trains permet d'observer la chute de tension moyenne sur la ligne et le rendement du réseau de distribution est aussi montré. De même la **figure 5** montre les résultats pour une variation des charges sur le secteur E. Dans ces deux figures (**4** et **5**), le mode de pilotage du SPC est la "synchronisation des tensions".

Les résultats montrent d'abord que l'utilisation du SPC permet bien d'annuler totalement le déséquilibre sur le réseau triphasé au niveau de son point de branchement (courbes orange *VUF SST E*). On voit aussi qu'elle permet de diminuer la chute de tension sur la caténaire (voir *U train moy*) et d'améliorer le rendement du système ferroviaire (caténaïres) notamment lorsque la puissance consommée se situe à droite du secteur A ou à gauche du secteur E c'est-à-dire sur le secteur intermédiaire entre les deux SST.

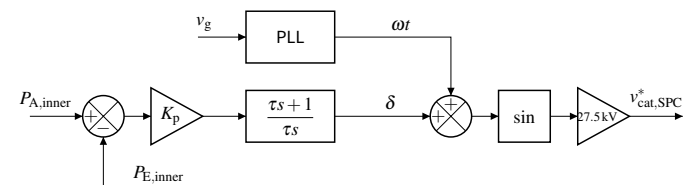


FIG. 2. Génération de la référence en tension du SPC avec le pilotage par *phase angle control*

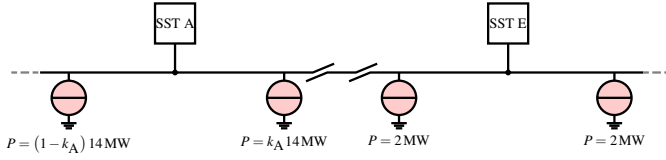


FIG. 3. Variation de la distribution de puissance sur le secteur A

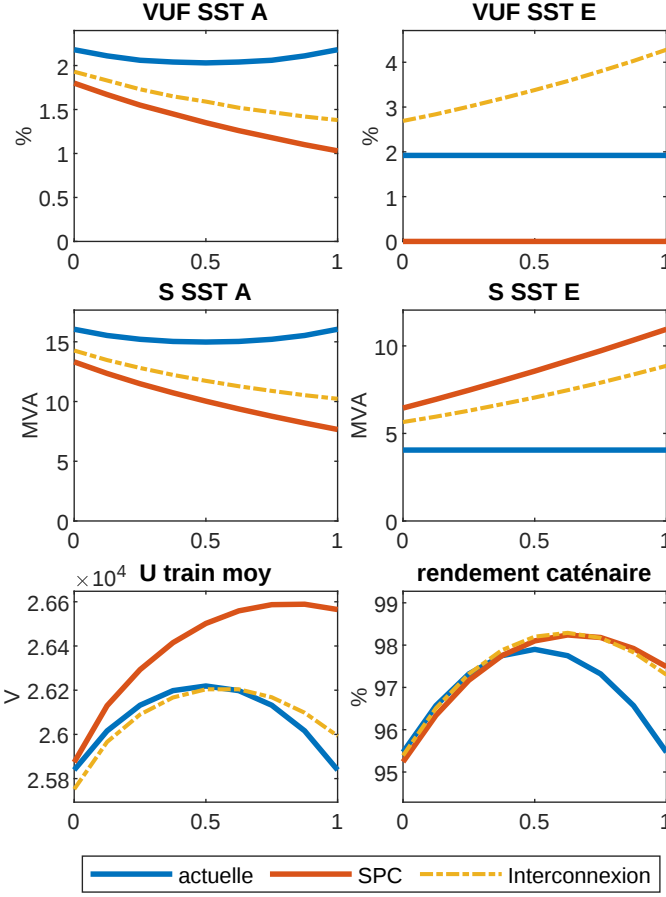


FIG. 4. Résultats de simulation (VUF, S , $U_{train,moy}$ et rendement caténaire) en faisant varier la distribution des puissances sur le secteur A

L'utilisation du SPC est plus performante en termes de rendement et de chute de tension que l'interconnexion de deux SST conventionnelles (courbes jaunes). Contrairement à ce dernier cas le SPC fournit en effet une tension à amplitude nominale ce qui annule l'effet de l'impédance interne de la SST E.

Lorsque le secteur A est plus chargé que le secteur E (cas de la figure 4), l'utilisation du SPC à la SST E et le fonctionnement en parallèle des secteurs amènent à la réduction de la puissance apparente et donc du déséquilibre au niveau de la SST A. La puissance consommée par les charges est en effet répartie entre les deux SST et la sous-station E vient en soutien de la SST A. Cela ne pose pas de problème car le déséquilibre de la SST E reste nul.

En revanche, dans le cas où le secteur E est plus chargé que le secteur A (figure 5), le phénomène inverse se produit et la puissance majoritairement consommée sur le secteur E se répartie sur le secteur A, entraînant une aggravation de la surcharge et du déséquilibre de la SST A.

Ces résultats montrent que l'utilisation du SPC est dans tous les cas bénéfique mais que le fonctionnement en parallèle des SST est dépendant de la répartition des charges sur la ligne et donc *in fine* du plan de transport sur la ligne.

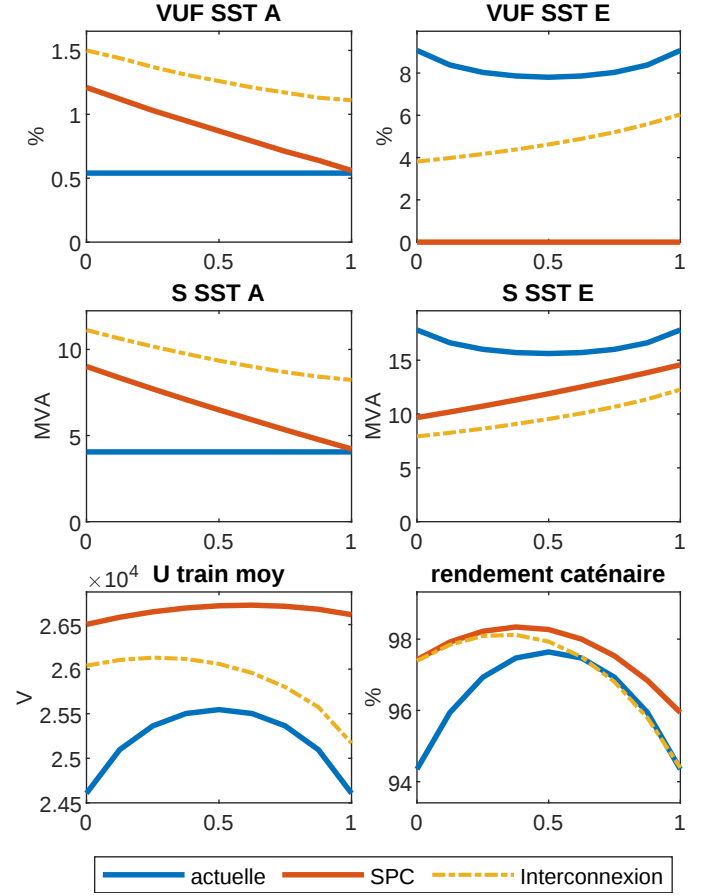


FIG. 5. Résultats de simulation (VUF, S , $U_{train,moy}$ et rendement caténaire) en faisant varier la distribution des puissances sur le secteur E

La figure 7 montre les résultats de simulation dans les mêmes conditions que la figure 4 mais en comparant cette fois les modes de pilotages du SPC. Les courbes bleues représentent le pilotage par synchronisation des tensions, tandis que les courbes jaunes et oranges représentent le *phase angle control*. Deux possibilités sont présentées ici. Pour les courbes oranges, le SPC est piloté pour égaliser les puissances actives totales injectées par les SST A et E sur les deux secteurs. Pour les courbes jaunes, le principe est similaire à la nuance près que ce sont les puissances actives injectées sur le secteur intermédiaire, entre les deux SST, qui sont égalisées (voir figure 6). Dans ce dernier cas, les puissances actives injectées sur les secteurs extrêmes, en dehors du secteur intermédiaire, circulent librement.

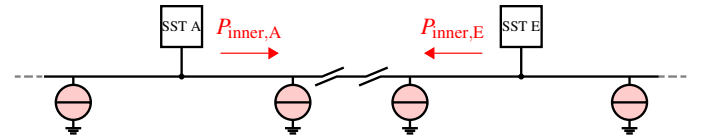


FIG. 6. Définition des puissances injectées sur le secteur intermédiaire P_{inner}

Ces résultats valident le fonctionnement du *phase angle control*. La répartition des puissances fournies par les deux SST est bien modifiée en fonction du type de pilotage. Le fait de forcer la sous-station électronique équipée du SPC à fournir la même puissance active que la SST conventionnelle A permet de soulager cette dernière et de réduire son déséquilibre en tension au point de raccordement au prix d'un rendement caténaire plus faible. Au contraire, le fait d'égaliser uniquement les puissances injectées sur le secteur intermédiaire (courbes jaunes) défavorise la SST A car la SST E équipée du SPC ne participe plus à

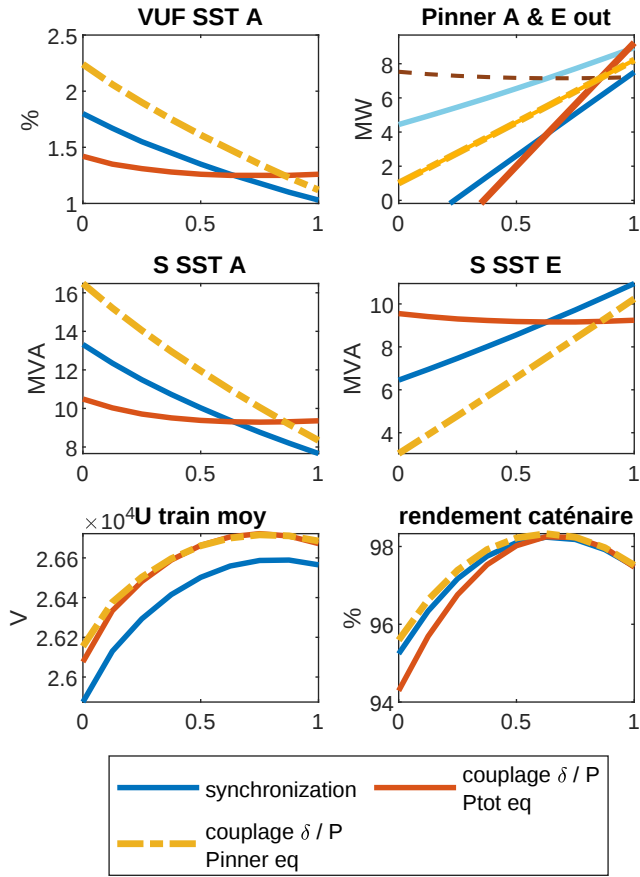


FIG. 7. Résultats de simulation (VUF, S , $U_{train,moy}$ et rendement caténaire) en faisant varier la distribution des puissances sur le secteur A en comparant les deux modes de pilotages

alimenter les trains situés tout à gauche de la ligne. La moyenne des tensions aux pantographes est aussi légèrement améliorée par rapport au pilotage par synchronisation des tensions.

5. CONCLUSION

Cet article a présenté le convertisseur statique de phase pour l'application ferroviaire 25 kV. Le principe du SPC dans le cadre de cette application a été présenté, et notamment les possibilités de pilotage offertes par ce système. Un cas d'étude générique a été étudié et les résultats associés ont été présentés.

Les simulations ont permis de valider le fonctionnement de la sous-station ferroviaire et ont montré son intérêt pour l'alimentation ferroviaire. En produisant une tension à amplitude nominale sur le réseau de distribution ferroviaire, le SPC annule l'effet de l'impédance interne de la sous-station par rapport à une SST conventionnelle et permet ainsi de rehausser les tensions aux pantographes des trains ainsi que le rendement du système caténaire. La mise en parallèle des deux secteurs permet aussi de réduire l'impédance de l'alimentation des trains renforçant encore plus ces deux avantages.

Du point de vue du réseau de transport d'électricité, le gain au point de raccordement de la SST électronique est indéniable puisque le déséquilibre en tension est entièrement supprimé. En revanche, au point de raccordement de la SST conventionnelle adjacente, la mise en parallèle des secteurs peut être avantageuse ou au contraire désavantageuse selon la répartition des charges sur la ligne. Le déséquilibre en tension sur le réseau amont et la surcharge de la SST peut ainsi être amélioré ou empiré selon la situation.

Enfin l'utilisation d'un pilotage par déphasage de la tension

produite par le SPC offre un degré de liberté supplémentaire pour contrôler la puissance active injectée sur le réseau ferroviaire. La méthode proposée dans cet article vise à égaliser les puissances actives fournies par les deux sous-stations.

À la suite de ce travail liminaire, un travail de dimensionnement et de comparaison des performances pour choisir une topologie de conversion est à réaliser. Certains industriels ont déjà installé des SPC pour l'application 25 kV [11].

Dans un objectif d'optimisation des performances des systèmes d'alimentation ferroviaires, le pilotage du SPC doit être approfondi. Bien connu pour des applications sur les réseaux de transport d'électricité haute tension, les smartgrids [17], ou même les réseaux d'alimentation ferroviaires Allemands ou Suisses à 15 kV - 16,7 Hz, le *phase angle control* et autre *droop control* ont fait l'objet de peu de travaux pour l'application ferroviaire 25 kV [14]. Un travail plus approfondi sur ce sujet est donc nécessaire.

6. RÉFÉRENCES

- [1] K. Kawahara, S.-I. Hase, Y. Mochinaga, Y. Hisamizu, and T. Inoue, "Compensation of voltage drop using static VAr compensator at sectioning post in AC electric railway system," in *Proceedings of Power Conversion Conference - PCC '97*, vol. 2. Nagaoka, Japan : IEEE, 1997, pp. 955–960.
- [2] L. Zanotto, R. Piovan, V. Toigo, E. Gaio, P. Bordignon, T. Consani, and M. Fracchia, "Filter Design for Harmonic Reduction in High-Voltage Booster for Railway Applications," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 258–263, Jan. 2005.
- [3] I. Krastev, P. Tricoli, S. Hillmansen, and M. Chen, "Future of Electric Railways : Advanced Electrification Systems with Static Converters for ac Railways," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 6–14, Sep. 2016.
- [4] M. Brenna, H. J. Kaleybar, F. Foiadelli, and D. Zaninelli, "Modern Power Quality Improvement Devices Applied to Electric Railway Systems," in *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, May 2022, pp. 1–6.
- [5] R. Grünbaum, "FACTS for power quality improvement in grids feeding high speed rail traction," in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. Antalya, Turkey : IEEE, May 2007, pp. 618–623.
- [6] D. Flumian, P. Ladoux, and J. Fabre, "Comparison of Two Cascaded Converter Topologies for Voltage Balancing in AC Railway Substations," in *2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. Venice, Italy : IEEE, Mar. 2023, pp. 1–7.
- [7] T. Uzuka, S. Ikeda, and K. Ueda, "A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. Aachen, Germany : IEEE, 2004, pp. 1869–1873.
- [8] P. Sacco, P. Ladoux, S. Sanchez, and M. Hassan, "A Comprehensive Study of a Railway Power Conditioner for 25 kV Substations with Scott and V/V Transformer," in *2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. Venice, Italy : IEEE, Mar. 2023, pp. 1–6.
- [9] A. Steimel, "Power-electronic grid supply of AC railway systems," in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. Brasov, Romania : IEEE, May 2012, pp. 16–25.
- [10] C. Zhao, C. Banceanu, T. Schaad, P. Maibach, and S. Aubert, "Static frequency converters : A flexible and cost efficient method to supply single phase railway grids in Australia," in *AusRAIL PLUS 2015*, Melbourne, 2015-11-24/2015-11-26.
- [11] ABB, "Static frequency converter supports 50 Hz rail network," 2016. [Online]. Available : <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BHS987050%20E01&DocumentPartId=>
- [12] T. Thurnherr, "Potteric Carr - The First Rail SFC Feeding the UK Rail Network," Nov. 2022. [Online]. Available : <https://www.youtube.com/watch?v=9EfBQhXq0tw>
- [13] C. Sao and P. Lehn, "Autonomous load sharing of voltage source converters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1009–1016, Apr. 2005.

- [14] D. Sharifi, "The use of static frequency converter feeder stations and a new control strategy enabling mesh feeding for 50 Hz AC railways," Ph.D. dissertation, University of Birmingham, Birmingham, 2020. [Online]. Available : <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/11017>
- [15] J. A. Suarez Diaz, "Étude et modélisation des interactions électriques entre les engins et les installations fixes de traction électrique 25kV/50Hz," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, Dec. 2014. [Online]. Available : <https://theses.hal.science/tel-04240496>
- [16] D. Frugier and P. Ladoux, "Voltage disturbances on 25kV-50 Hz railway lines – Modelling method and analysis," in *SPEEDAM 2010*, Jun. 2010, pp. 1080–1085.
- [17] A. Bulteau, "Conception et pilotage de réseaux de convertisseurs génériques dans un contexte Smartgrids," Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, Grenoble, Jun. 2023.