

Sous-station réversible pour un nouveau système d'électrification ferroviaire à feeder MVDC

Luc BIMMEL¹, Philippe LADOUX¹, Erick Matheus DA SILVEIRA BRITO²

¹ : Université de Toulouse, Laboratoire LAPLACE, Toulouse France

² : Universidade Federal de Viçosa, Institute of Exact and Technological Sciences, Florestal, Brazil

RESUME - Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des lignes ferroviaires électrifiées en 1,5 kV ou 3 kV DC, la mise en place d'un feeder moyenne tension continu (MVDC) semble une solution pertinente. Ce conducteur sera installé sur les poteaux de la caténaire et permettra le raccordement de sources d'énergies renouvelables et de systèmes de stockage. Il est donc envisagé d'utiliser une sous-station réversible pour interconnecter le feeder MVDC et le réseau public AC. Lorsque le trafic sur la ligne ferroviaire est faible, la sous-station réversible peut fournir de la puissance active et réactive pour soutenir le réseau public triphasé. Cet article présente l'étude du fonctionnement d'une sous-station réversible MVDC basée sur une mise en série d'onduleurs de tension trois niveaux.

Mots-clés—*Electrification ferroviaire DC, sous-station réversible, convertisseur flying capacitor, contrôle puissance active et réactive, énergies renouvelables, système de stockage d'énergie.*

1. INTRODUCTION

Le train est l'un des modes de transport les plus efficaces sur le plan énergétique et le moins émetteur de gaz à effet de serre. Dans les années à venir, le transport ferroviaire jouera un rôle clé dans l'accélération de la transition vers une mobilité plus durable. Néanmoins, l'augmentation du trafic ferroviaire doit s'accompagner d'une amélioration de l'efficacité énergétique.

Dans le monde, 90 000 km de voies ferrées sont électrifiés en courant continu (1,5 kV ou 3 kV). Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont démontré l'intérêt d'une alimentation électrique en courant continu moyenne tension (MVDC) installée en parallèle de la caténaire [1]-[2]. Comme le montre la Fig. 1, l'alimentation de la caténaire est renforcée par des sous-stations intermédiaires basées sur des transformateurs électroniques (SST). De ce fait, la ligne MVDC offre des points de connexion pour les énergies renouvelables et les systèmes de stockage [3]. Ainsi, équipé de sous-stations réversibles, le système d'alimentation MVDC peut également fournir une puissance active et réactive pour soutenir le réseau électrique triphasé lorsque le trafic sur la ligne ferroviaire est faible.

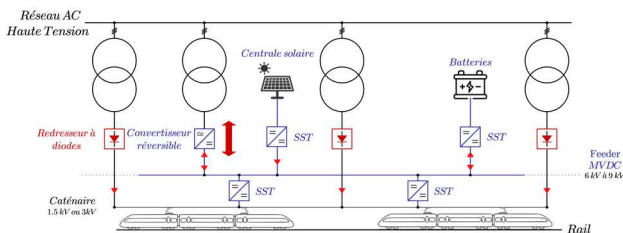


Fig. 1. Renforcement du système d'électrification ferroviaire à courant continu par un feeder MVDC. En rouge, situation initiale. En bleu, système d'alimentation supplémentaire.

Les onduleurs de tension trois niveaux (3L-VSC) sont une solution adaptée à des niveaux de puissance de l'ordre du MW. Afin de disposer d'une large plage de fonctionnement de la sous-station MVDC, il a été décidé de connecter des redresseurs à diodes en parallèle aux deux onduleurs en série, conformément à la Fig. 2. Le redresseur à diodes d'indice de pulsion douze évite un surdimensionnement des onduleurs et peut fournir un surplus de puissance au feeder lorsque les onduleurs atteignent leur limite en puissance.

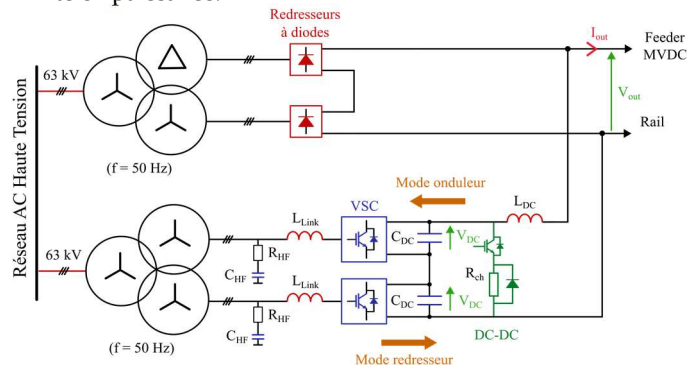


Fig. 2. Sous-station MVDC réversible basée sur deux convertisseurs de tension en parallèle avec un redresseur à diodes à indice de pulsion de 12.

La première partie de cet article est consacrée au fonctionnement de la sous-station réversible. Les différents modes sont illustrés par des résultats de simulation réalisés avec le logiciel PLECS. De plus, sur les lignes ferroviaires électrifiées en courant continu, la gestion des courts-circuits est un point critique. Bien que des disjoncteurs soient disponibles pour les systèmes d'électrification ferroviaire 1,5 kV et 3 kV, ce n'est pas encore le cas pour les systèmes d'alimentation MVDC. Par conséquent, en attendant que les fabricants développent des disjoncteurs MVDC à semi-conducteurs, la protection contre un court-circuit repose uniquement sur l'ouverture du circuit AC. Néanmoins, le temps de réponse d'un disjoncteur AC peut être critique pour la protection des semi-conducteurs des convertisseurs. C'est pourquoi, la deuxième partie de cet article concerne l'analyse d'un défaut de court-circuit et propose une solution pour éviter la destruction des diodes internes des modules IGBT de puissance.

2. DESCRIPTION DE LA SOUS-STATION REVERSIBLE

2.1. Point de fonctionnement nominal

Les topologies d'onduleurs 3 niveaux conviennent parfaitement aux applications moyenne tension. Parmi les topologies classiques décrites dans la littérature, le convertisseur Flying Capacitor (FC) [4], dont le schéma est rappelé à la Fig. 3,

présente des avantages en termes de puissance nominale et de dimensionnement des éléments passifs [5]. En considérant les caractéristiques des modules IGBT 3,3 kV, en connectant deux onduleurs FC en série, il est possible d'obtenir une tension de bus DC de 7 kV à vide.

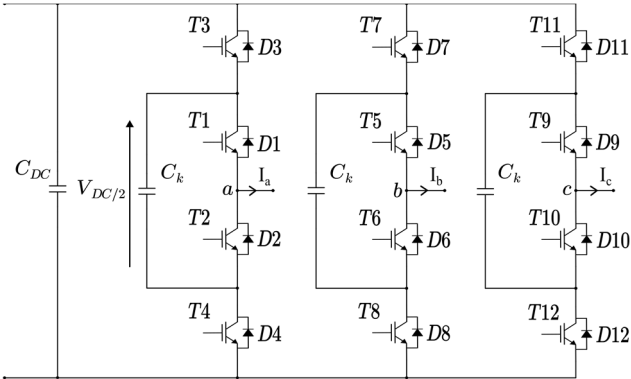


Fig. 3. Convertisseur Flying Capacitor trois niveaux.

Le point de fonctionnement nominal du FC a été choisi en mode onduleur. Ce point correspond à un rapport Q/P de 35%. Le dimensionnement du convertisseur a été réalisé en tenant compte du modèle thermique des modules de puissance et des performances de plaques à eau. Les valeurs des condensateurs C_k et C_{DC} ont été fixées en considérant une ondulation de tension maximale de 5% autour de la valeur moyenne. La valeur de l'inductance de liaison (L_{link}) a été calculée pour limiter l'ondulation de courant à haute fréquence (@ $2f_{sw}$) à 20% de la valeur crête de la composante fondamentale au courant nominal. Le filtre $R_{HF}C_{HF}$ est utilisé pour atténuer l'ondulation de tension à haute fréquence au secondaire du transformateur. Les paramètres de la sous-station sont indiqués dans le Tableau 1.

Tableau 1. Sous-station 7 000 V DC basée sur deux 3L-VSC en série (3 300 V / 1 800 A / Modules de puissance IGBT).

Tension de sortie de la sous-station, V_{out}	7 000 V
Tension à vide, redresseur à diodes	6 900 V
Fréquence de commutation f_{sw}	750 Hz
L_{link}	1,2 mH
C_{DC}	2,24 mF
C_k	7.55 mF
R_{HF}	427 mΩ
C_{HF}	170 μF
Fonctionnement nominal en mode redresseur (Q/P = 35%)	6,28 MW 2,16 MVAR
Puissance active nominale en mode redresseur (Q = 0)	8,16 MW

Une fois les éléments passifs choisis, les limites de fonctionnement dans le plan PQ ont été tracées à l'aide d'un algorithme de calcul implémenté dans le logiciel MATLAB. Elles sont présentées à la Fig. 4.

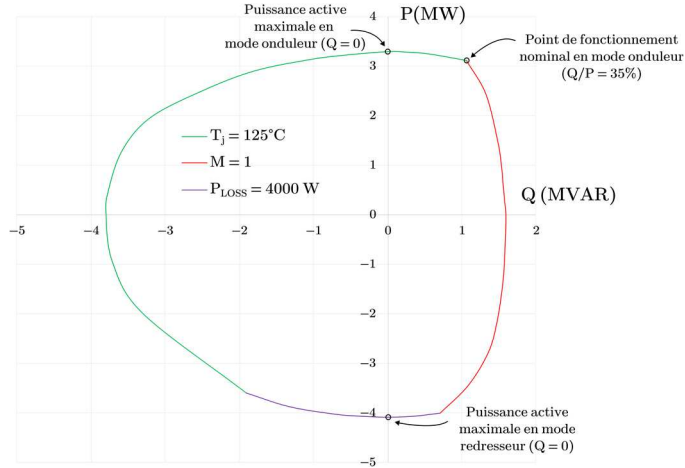


Fig. 4. Limites de fonctionnement dans le plan PQ pour un onduleur triphasé FC, avec $f_{sw} = 750$ Hz et des modules de puissance 3,3 kV / 1,8 kA.

2.2. Réversibilité en puissance

La Fig. 5 illustre la réversibilité en puissance de la sous-station MVDC quand le redresseur à diodes d'indice de pulsion douze est hors service. Dans tous ces points, le bus DC est régulé à 7kV par le système de contrôle.

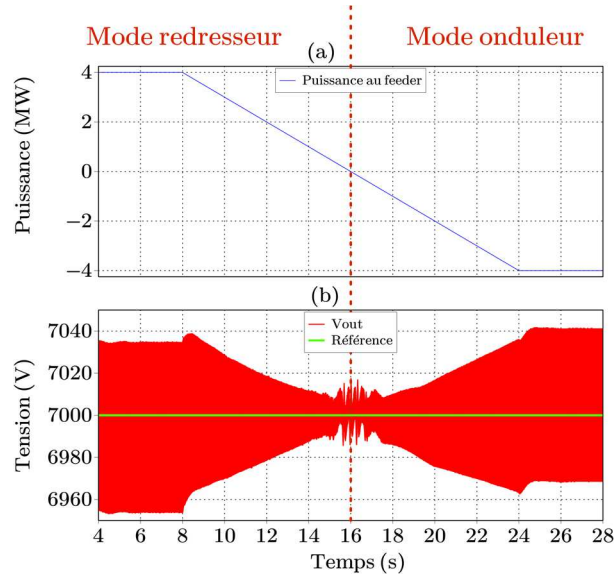


Fig. 5. Formes d'ondes de la sous-station réversible : (a) Consigne de la puissance active (b) Tension au niveau du feeder.

La Fig. 6 présente les formes d'ondes du courant et de la tension au niveau du primaire du transformateur. Sans échange de puissance réactive, le courant et la tension sont en phase en mode onduleur et ils sont en opposition de phase en mode redresseur.

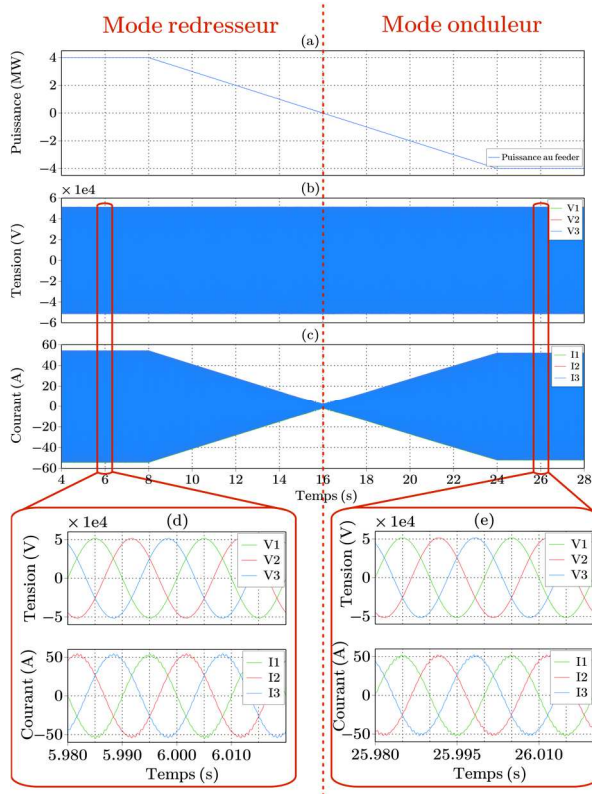


Fig. 6. Formes d'ondes du côté primaire du transformateur : (a) Consigne de la puissance active ; (b) Tensions de phase ; (c) Courants de phase ; (d) Tensions de phase et courants de phase en mode redresseur ; (e) Tensions de phase et courants de phase en mode onduleur.

En mode redresseur, lorsque les onduleurs de tension atteignent leur limite de fonctionnement, la tension au niveau du feeder (V_{out}) commence à chuter et lorsqu'elle atteint 6 900 V ; les diodes du redresseur peuvent entrer en conduction. Le redresseur à diodes fournit alors une puissance supplémentaire au feeder. De même, selon le plan PQ de la Fig. 4, la limite de fonctionnement de chaque onduleur est de 3,25 MW. Le système de supervision des sources d'énergies connectées au feeder doit tenir compte de cette limite et ne pas réinjecter plus de 6,5 MW sur le réseau public triphasé. Néanmoins, pour des raisons de sécurité, un hacheur de dissipation est connecté en parallèle du bus DC, conformément à la Fig. 2.

Finalement, la caractéristique tension-courant de sortie ($V_{out} - I_{out}$) de la sous-station réversible est présentée à la Fig. 7. Chaque mode de fonctionnement est indiqué. La chute de tension entre -10 MW et 7,8 MW est liée à la résistance interne de l'inductance du bus continu L_{DC} .

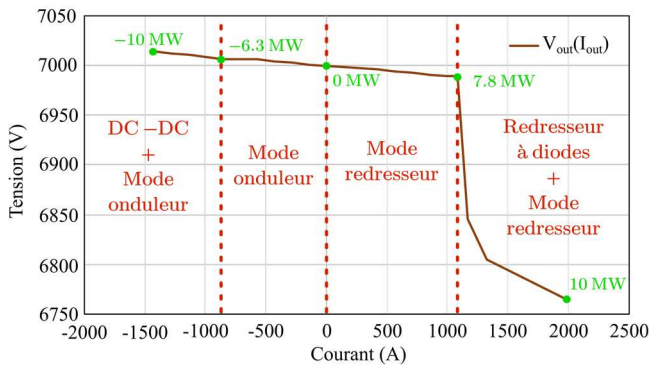


Fig. 7. Caractéristique tension-courant de sortie de la sous-station réversible pour différents points de fonctionnement.

3. STRATEGIE DE CONTROLE DE LA SOUS-STATION REVERSIBLE

Le contrôle du FC est composé de quatre parties, conformément à la Fig. 8 ; (i) une boucle interne de courant en cascade avec (ii) une boucle externe de tension du bus DC. D'autre part, (iii) le contrôle de la tension du condensateur flottant est effectué par une correction du rapport cyclique des cellules de commutation. Finalement, compte tenu de la limitation en puissance des onduleurs de tension, (iv) le contrôle du hacheur est ajouté afin d'assurer la dissipation de la puissance excédentaire.

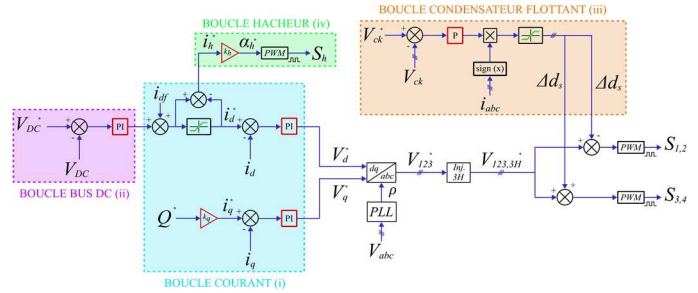


Fig. 8. Schéma de la stratégie de contrôle.

3.1. Contrôle du courant

La stratégie de contrôle du courant est mise en œuvre dans un référentiel d,q synchrone. Une injection de troisième harmonique permet d'améliorer la profondeur de modulation et d'étendre ainsi la plage de fonctionnement des onduleurs [6]. Les tensions du réseau V_{abc} dans le repère naturel sont transformées en tensions d'axe direct v_d et d'axe en quadrature v_q , au moyen de la transformation de Park (où ρ est la phase estimée du réseau). Cette stratégie permet au convertisseur de contrôler individuellement la puissance active et la puissance réactive [7]. La consigne i_q^* provient d'un calcul de la puissance Q^* à fournir par le convertisseur.

3.2. Boucle externe de la tension DC

La boucle externe est responsable du contrôle de la tension du bus DC. La méthode de commande est basée sur l'énergie stockée W_c dans le condensateur du bus DC C_{dc} , comme indiqué dans l'équation (1).

$$W_c = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 = \int (P_{out} - P_{in}) dt \quad (1)$$

où P_{out} et P_{in} représentent respectivement la puissance de sortie et la puissance d'entrée du convertisseur. Le signal de sortie du régulateur PI de la tension du bus DC fournit la référence i_d^* à la boucle interne de contrôle du courant [8]. Pour améliorer le temps de réponse de la boucle de courant, une composante anticipée (feedforward) de i_d peut être additionnée à i_d^* . Cette valeur est basée sur l'estimation de la puissance de sortie. En mode redresseur, les deux onduleurs connectés en série peuvent délivrer une puissance maximale de 8,16 MW. En utilisant l'équation (2), une saturation du courant sur l'axe direct du repère synchronisé (i_d) a donc été introduite afin de respecter la limite de fonctionnement du plan PQ.

$$I_{dmax} = \frac{P_{sat} \sqrt{2}}{3 V_{ACrms}} \quad (2)$$

où P_{sat} est la puissance active maximale en mode redresseur pour chaque onduleur, et V_{ACrms} est la valeur efficace de la tension simple au secondaire du transformateur.

3.3. Contrôle du condensateur flottant

Théoriquement, en entrelaçant les signaux de commande des interrupteurs d'une cellule, un équilibrage naturel de la tension aux bornes des condensateurs flottants peut être obtenu. Néanmoins, en raison de diverses imperfections (délai de commande, chute de tension à l'état passant, etc...), il est nécessaire de réguler la tension des condensateurs flottants [9]-[10]. En considérant un bras de l'onduleur représenté sur la Fig. 3, le courant dans le condensateur C_k est peut s'exprimer par l'équation (3).

$$i_{ck}(t) = [D_{s3}(t) - D_{s1}(t)] \cdot i_a(t) \quad (3)$$

où $D_{sx}(t)$ est le rapport cyclique instantané de l'interrupteur x et $i_a(t)$ est le courant de sortie du bras de l'onduleur. Ainsi, une petite différence entre les rapports cycliques permet de charger ou de décharger le condensateur flottant.

Par conséquent, une correction des rapports cycliques est effectuée, conformément aux relations (4) et (5).

$$D_{s1}(t) = D + \Delta d_s \quad (4)$$

$$D_{s3}(t) = D - \Delta d_s \quad (5)$$

L'incrément Δd_s est calculé en tenant compte du signe du courant de sortie i_a et proportionnellement à la différence entre la tension du condensateur flottant V_{Ck} et sa référence fixée à $V_{DC}^*/2$.

3.4. Contrôle du hacheur de dissipation

Normalement, le système de supervision du flux de puissance sur le feeder doit garantir que la limite de puissance de la sous-station réversible n'est jamais atteinte. Par mesure de sécurité, un hacheur de dissipation a été ajouté sur le bus DC [11]. A la sortie du schéma de contrôle de la tension du bus DC, une saturation du courant i_d est mise en place pour limiter la puissance excédentaire n'est pas dissipée, la tension du bus DC commence à augmenter, puisque P_{in} est supérieur à P_{out} . Ainsi, le courant de référence du hacheur i_{ch}^* est :

$$i_{ch}^* = 0, \text{ si } i_d \text{ n'est pas saturé} \quad (6)$$

$$i_{ch}^* = \frac{P_{ch}}{K_{ch}}, \text{ si } i_d \text{ est saturé} \quad (7)$$

où P_{ch} est la puissance que le hacheur doit dissiper et $K_{ch} = 3V_{grms}/\sqrt{2}$.

Ensuite, la puissance dissipée est contrôlée en changeant le rapport cyclique du hacheur α_{ch} .

$$\alpha_{ch} = \frac{P_{ch}}{R_{ch}V_{dc}^2} \quad (8)$$

où R_{ch} est la résistance de dissipation de puissance.

4. ROBUSTESSE AU COURT-CIRCUIT

4.1. Court-circuit côté DC

Un court-circuit côté DC entre le feeder et le rail peut survenir en raison de divers facteurs, tels que des conditions météorologiques extrêmes (vent fort), un défaut interne sur les équipements connectés au feeder ou une erreur humaine (oubli

d'une perche de mise à la terre (au rail) de la ligne aérienne après une intervention). Actuellement, les redresseurs à diodes utilisés dans les sous-stations ferroviaires sont composés de diodes en boîtier press-pack et sont capables de supporter des courants de courts-circuits élevés, le temps de l'ouverture du disjoncteur. Par contre, le fonctionnement de l'onduleur est critique en cas de court-circuit. En effet, le FC est composé de modules IGBT 3 300 V/1 800 A [12], et la surintensité admissible par les diodes internes n'est pas la même que pour des diodes press-pack. A ce jour, il n'existe pas de disjoncteur MVDC disponible sur le marché. Il faut donc s'assurer qu'un délai important d'ouverture du disjoncteur côté AC n'entraîne pas la destruction des diodes des modules IGBT. Par conséquent, une étude de l'impact d'un court-circuit entre le feeder MVDC et le rail a été menée, conformément à la Fig. 9.

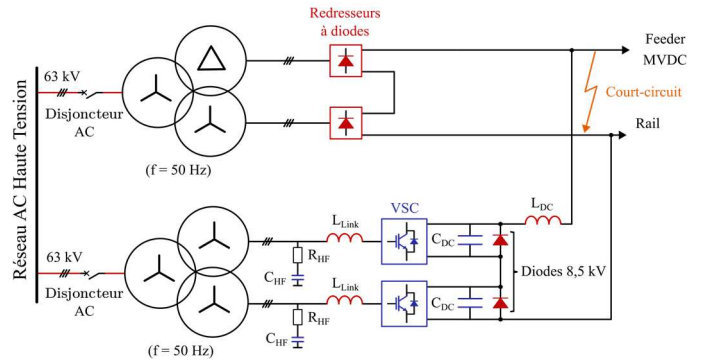


Fig. 9. Court-circuit de la sous-station au niveau du bus DC.

Les résultats de la simulation sont présentés à la Fig. 10. Après l'apparition du court-circuit, les IGBT sont désactivés dès que la tension du bus DC descend en dessous de 6 600 V. Seules les diodes des modules de puissance restent en conduction jusqu'à l'ouverture du disjoncteur AC après 120 ms. Pour évaluer la robustesse des diodes face au court-circuit, deux paramètres ont été pris en compte : la valeur instantanée maximale de la surintensité et l'intégrale de charge I^2t des diodes.

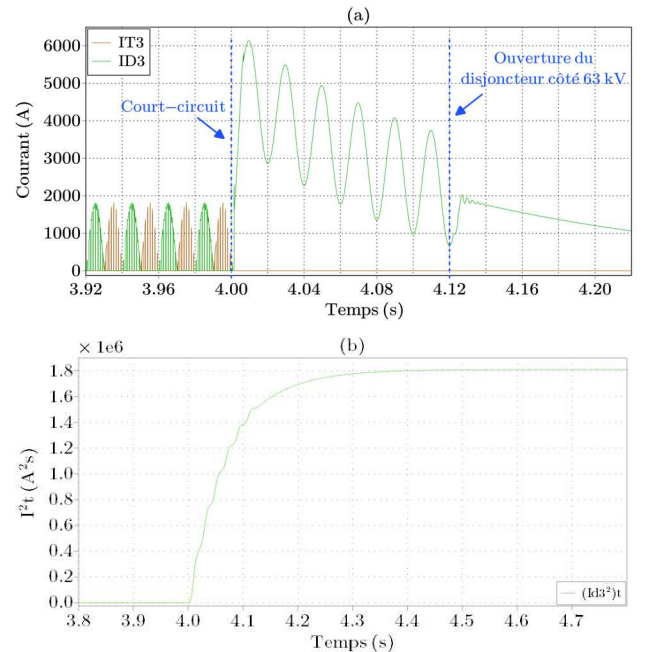


Fig. 10. Impact du court-circuit sur la diode du module de puissance, Mode redresseur, $P = 7,8 \text{ MW}$: (a) Courant dans la diode D3 ; (b) I^2t dans la diode D3.

La valeur du I^2t_{max} indiquée par le fabricant est d'environ $1.10^6 A^2s$, mais dans notre cas, le I^2t dépasse cette valeur. Par conséquent, une solution alternative doit être trouvée pour réduire cette surintensité.

4.2. Ajout de diodes press-pack 8,5 kV

Afin de réduire la surintensité dans les diodes des modules, il a été décidé d'installer des diodes press-pack de 8,5 kV en parallèle des condensateurs du bus DC. En cas de défaut, les diodes press-pack offrent de meilleures performances en conduction que les diodes des modules de puissance. Ainsi, une partie du de la surintensité circulera à travers ces diodes, qui peuvent accepter un courant bien plus élevé que les diodes des modules de puissance IGBT. Cette solution permet donc d'obtenir un I^2t inférieur à celui observé précédemment, comme le démontre la Fig. 11.

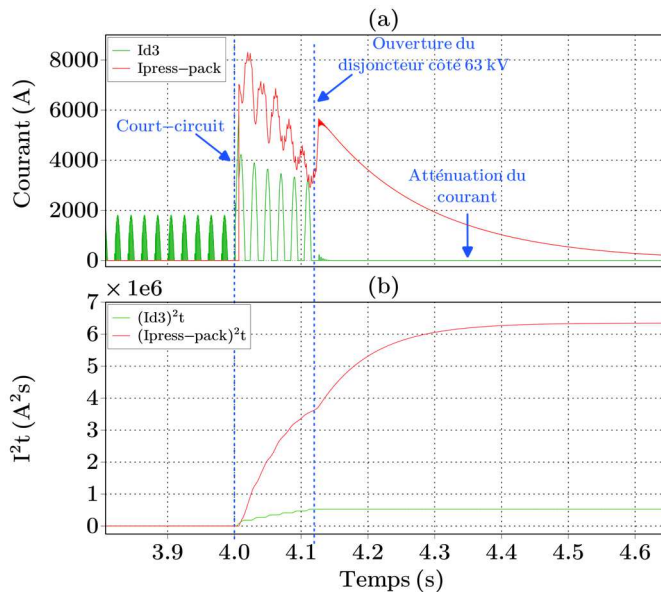


Fig. 11. Impact du court-circuit sur la diode du module de puissance et la diode 8,5 kV, Mode redresseur, $P = 7,8\text{ MW}$; (a) Courant dans la diode D3 et la diode 8,5 kV ; (b) I^2t dans la diode D3 et la diode 8,5 kV.

4.3. Distribution du courant dans les diodes du FC

Afin de comprendre le cheminement du courant de court-circuit dans les bras de l'onduleur FC, une étude détaillée a été réalisée. La répartition du courant dans les diodes n'est pas homogène, comme le montre le Tableau 2.

Tableau 2. Répartition des courants dans les diodes du FC, mode redresseur.

$I^2t\ (1.10^5\ A^2s)$		
$D_3 = 3.62$	$D_7 = 4.98$	$D_{11} = 0.86$
$D_1 = 2.92$	$D_5 = 4.64$	$D_9 = 0.39$
$D_2 = 0.31$	$D_6 = 4.48$	$D_{10} = 3.16$
$D_4 = 0.65$	$D_8 = 5.36$	$D_{12} = 3.52$

La décharge des condensateurs flottants a un impact direct sur la répartition des courants. En effet, ce courant circule à travers les diodes « externes » du FC. Cela entraîne un pic de courant, comme illustré à la Fig. 12. Par conséquent, ces diodes sont plus affectées par le court-circuit. Cependant, la valeur du I^2t reste largement inférieure à celle indiquée par le fabricant.

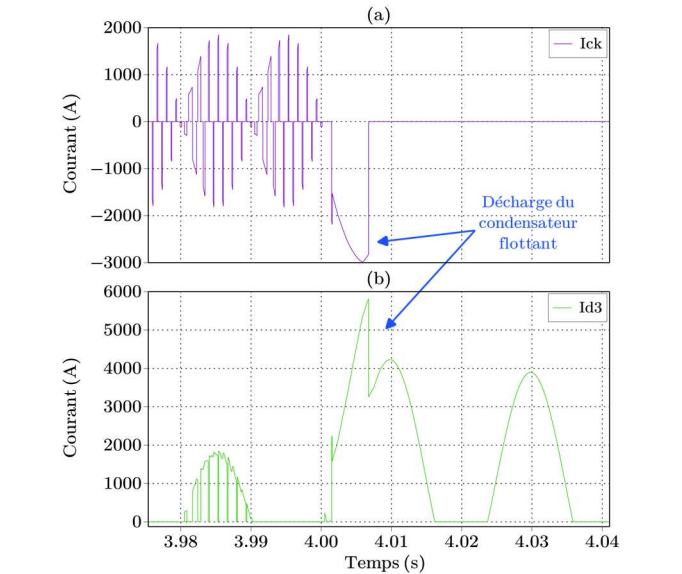


Fig. 12. Court-circuit sur une sous-station réversible avec des diodes 8,5 kV : (a) Courant dans C_k ; (b) Courant dans la diode D3.

5. CONCLUSIONS

Cet article a présenté une sous-station réversible MVDC pour un système d'électrification ferroviaire DC à trois fils. La topologie combine deux onduleurs de tension trois niveaux avec un redresseur à diodes d'indice de pulsion douze, ce qui permet d'étendre la plage de fonctionnement lorsque la puissance appelée par le trafic ferroviaire est élevée. En dehors des périodes de trafic intense, les onduleurs de tension peuvent injecter de la puissance active sur le réseau public en exploitant les sources renouvelables et les systèmes de stockage connectés au feeder MVDC déployé le long de la ligne ferroviaire. L'ensemble des différents modes de fonctionnement de la sous-station MVDC a été présenté et validé par des simulations. Le modèle de simulation ainsi que le principe de commande de la sous-station MVDC ont également été présentés.

Concernant la tenue en court-circuit côté DC, les simulations ont montré que la mise en place de diodes press-pack en parallèle avec les condensateurs du bus DC permet de réduire la surintensité traversant les diodes des modules IGBT. Ainsi, l'installation d'un disjoncteur classique côté AC est suffisante. Par conséquent, un disjoncteur hybride MVDC n'est pas indispensable.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le gouvernement français dans le cadre du programme France 2030 (projet RACCOR-D).

7. REFERENCES

- [1] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, et C. Courtois, « New Medium-Voltage DC Railway Electrification System », *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 4, n° 2, p. 591-604, juin 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2826780.
- [2] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, et S. Sanchez, « Future DC Railway Electrification System - Go for 9 kV », in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nottingham: IEEE, nov. 2018, p. 1-5. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607304.
- [3] « Fundres Project », FUNDRES project. [En ligne]. Disponible sur: <https://fundres-project.eu/>
- [4] T. A. Meynard et H. Foch, « Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters », in *PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toledo, Spain: IEEE, 1992, p. 397-403. doi: 10.1109/PESC.1992.254717.

- [5] L. Bimmel, P. Ladoux, et E. M. Da Silveira Brito, « Comparison of Three-Level Inverter Topologies for MVDC Reversible Railway Substations », in *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juin 2024, p. 3201-3207. doi: 10.30420/566262453.
- [6] J. A. Houldsworth et D. A. Grant, « The Use of Harmonic Distortion to Increase the Output Voltage of a Three-Phase PWM Inverter », *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. IA-20, n° 5, p. 1224-1228, sept. 1984, doi: 10.1109/TIA.1984.4504587.
- [7] A. Moghadasi, A. Sargolzaei, M. Moghaddami, A. I. Sarwat, et Kan. Yen, « Active and reactive power control method for three-phase PV module-integrated converter based on a single-stage inverter », in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA: IEEE, mars 2017, p. 1357-1362. doi: 10.1109/APEC.2017.7930873.
- [8] S. Zafar, M. A. Amin, B. Javaid, et H. A. Khalid, « On Design of DC-Link Voltage Controller and PQ Controller for Grid Connected VSC for Microgrid Application », in *2018 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, Islamabad, Pakistan: IEEE, sept. 2018, p. 1-6. doi: 10.1109/PGSRET.2018.8686010.
- [9] R. M. B. Moritz et A. L. Batschauer, « Capacitor voltage balancing in a 5-L full-bridge flying capacitor inverter », in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora: IEEE, nov. 2017, p. 1-6. doi: 10.1109/COBEP.2017.8257234.
- [10] M. Vivert *et al.*, « Decentralized Control for Balancing the Cell Voltages of a High Conversion Ratio Flying Capacitor Multilevel Converter », *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.*, vol. 3, n° 3, p. 635-646, juill. 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3115958.
- [11] C. Xu, X. Zhang, Z. Yu, B. Zhao, Z. Chen, et R. Zeng, « A Novel DC Chopper With MOV-Based Modular Solid-State Switch and Concentrated Dissipation Resistor for ± 400 kV/1100 MW Offshore Wind VSC-HVDC System », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, n° 5, p. 4483-4488, mai 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2950706.
- [12] « Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) and diode modules with SPT, SPT+, SPT++ and TSPT+ chips | Hitachi Energy ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/semiconductors/insulated-gate-bipolar-transistor-igbt-and-diode-modules>