



Un train d'avance

Les convertisseurs de fréquence pour applications ferroviaires

Gerhard Linhofer, Philippe Maibach, Niklaus Umbricht

La traction électrique est grosse consommatrice d'énergie, à tel point que de nombreuses compagnies de chemin de fer exploitent leurs propres réseaux haute tension (HT) et parfois leurs propres centrales de production. Or rares sont celles à être totalement autonomes, les obligeant à échanger de l'électricité avec les réseaux nationaux. Une situation loin d'être simple car, pour des raisons historiques, de nombreux réseaux ferroviaires fonctionnent à des fréquences différentes de celles des réseaux publics qui, de plus, ne sont pas toujours synchronisés.

A l'origine, des machines tournantes étaient utilisées pour passer d'une fréquence à l'autre en faisant appel, si nécessaire, à des équipements auxiliaires pour compenser le glissement de fréquence dans des limites données. Aujourd'hui, les choses ont complètement changé : les trains modernes embarquent des convertisseurs de fréquence à électronique de puissance qui offrent de nombreux avantages, notamment des temps de réponse plus courts et une meilleure régulation de la puissance réactive.

Convertisseurs

Les convertisseurs de fréquence à électronique de puissance servant à l'interconnexion de réseaux non synchronisés ou de réseaux fonctionnant à des fréquences différentes existent depuis de nombreuses années. Il s'agit principalement de convertisseurs à base de thyristors commutés par le réseau. Ce n'est que depuis une date assez récente que des convertisseurs à semi-conducteurs blocables sont utilisés dans ce domaine sous la forme de convertisseurs à source de tension sur bus continu commun (bus CC). L'alimentation des réseaux de traction monophasés pose un défi particulier. C'est l'avènement de ces convertisseurs à source de tension qui a permis aux systèmes à électronique de puissance de s'implanter dans ce domaine et de remplacer les commutatrices auparavant très répandues.

Repères historiques et état de l'art

De nos jours, on distingue principalement trois types de réseaux électriques ferroviaires.

Dans les pays ou régions où les lignes de chemin de fer ont été électrifiées relativement récemment (après l'arrivée des semi-conducteurs de puissance autorisant la régulation de vitesse des moteurs de traction), les caténaires sont souvent alimentées par le réseau public à 50 Hz (ou 60 Hz), principalement sous 25 kV.

Avant que ces semi-conducteurs ne soient disponibles, d'autres systèmes d'alimentation électrique étaient utilisés. Dans certains pays où les lignes de chemin de fer avaient été électrifiées bien plus tôt, on choisit le courant continu (CC), avec des tensions types de 1,5 et 3 kV, qui avait l'avantage de simplifier la régulation de vitesse des moteurs CC. Dans d'autres pays, on privilégia le courant alternatif (CA) et les moteurs à collecteur, également faciles à réguler en vitesse. Toutefois, la fréquence de 50 ou 60 Hz étant trop élevée pour le collecteur, on adopta une fréquence d'alimentation plus basse.

On retrouve ainsi des liaisons ferroviaires fonctionnant en CA monophasé à basse fréquence :

- sur la côte est des Etats-Unis (25 Hz) ;
- en Norvège et en Suède (16 2/3 Hz) ;
- en Allemagne, en Autriche et en Suisse (16 2/3 Hz).

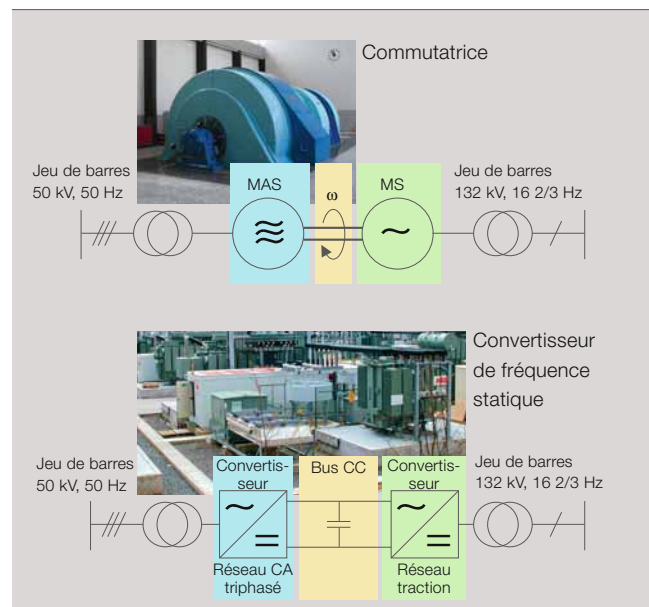
Des convertisseurs de fréquence délivrant une puissance totale proche de 1000 MW ont été mis en service ces quinze dernières années, dont près des deux tiers fournis par ABB.

Par le passé, les commutatrices constituées de deux machines électriques au nombre de paires de pôles différent et montées sur un arbre mécanique commun assuraient l'échange d'énergie entre les réseaux de traction électrique et les réseaux nationaux triphasés. On distingue deux conceptions différentes : aux Etats-Unis et en Scandinavie, des machines synchrones utilisées des deux côtés font que les réseaux sont quasiment synchronisés avec un rapport de fréquence fixe non modifiable ; en Europe centrale, les compagnies de chemin de fer exploitaient leurs propres moyens de pro-

duction d'électricité en utilisant, dès le début, des machines monophasées et leur propre réseau de transport HT indépendamment du réseau national triphasé. Ainsi, les réseaux nationaux et ferroviaires ne sont pas rigoureusement synchronisés, mais le rapport de fréquence varie dans des limites définies. Dans ce contexte, les commutatrices étaient des machines spéciales appelées « machines Scherbius ». Les machines synchrones n'étaient utilisées que côté monophasé alors qu'une machine asynchrone à rotor bobiné et bagues était utilisée côté triphasé. De (petites) machines supplémentaires assuraient la régulation de la fréquence de glissement dans le rotor, autorisant une variation de la vitesse (dans une plage donnée).

Plus récemment, des convertisseurs de fréquence à électronique de puissance sous la forme de convertisseurs de tension ont été développés pour cette application, marquant la fin des commutatrices. En réalité, des convertisseurs de fréquence délivrant une puissance totale proche de 1000 MW ont été mis en service ces quinze dernières années, dont près des deux tiers fournis par ABB. Actuellement des convertisseurs totalisant 600 MW sont en cours de fabrication ou en commande, environ 500 MW de cette puissance revenant à ABB.

1 Commutatrice composée d'une machine asynchrone (MAS) et d'une machine synchrone (MS) (haut), et convertisseur de fréquence statique pour installation extérieure (bas)



Comparaison avec les commutatrices

Les convertisseurs traditionnels commutés par le réseau n'ont jamais été des concurrents sérieux pour l'alimentation de ces réseaux monophasés dans lesquels, contrairement aux réseaux triphasés, les stratégies de commutation ne peuvent être équilibrées, donnant des distorsions de tension inacceptables. Pour autant, certains convertisseurs directs (cyclo-convertisseurs) furent construits, engendrant une forte pollution harmonique des deux réseaux et perturbant leur fonctionnement. Autre inconvénient de ces convertisseurs : la puissance injectée sur le réseau monophasé fluctue au double de

2 Thyristor IGCT avec l'élément semi-conducteur en boîtier pressé (gauche) et le circuit de commande de gâchette (droite). Ce dernier est connecté au semi-conducteur par un circuit imprimé multicouche d'inductance extrêmement faible.



la fréquence de ce réseau, entraînant également des perturbations sur le réseau triphasé.

Il fallut attendre l'arrivée du puissant thyristor blocable par la gâchette GTO (*Gate Turn-Off thyristors*) pour pouvoir élaborer des convertisseurs à source de tension autocommutés.

Il fallut attendre l'arrivée du puissant thyristor blocable par la gâchette GTO (*Gate Turn-Off thyristors*) pour pouvoir élaborer des convertisseurs à source de tension autocommutés.

L'interconnexion d'un réseau triphasé et d'un réseau monophasé est plus contraignante à la fois pour les commutatrices et pour les convertisseurs à électronique de puissance que l'interconnexion de deux réseaux triphasés, essentiellement parce que la puissance dans le réseau monophasé oscille à deux fois la fréquence. Dans le cas des commutatrices, ces fluctuations de couple et de puissance sont absorbées et amorties par les masses en rotation. Les vibrations résultantes doivent toutefois être absorbées par leurs fixations mécaniques et leurs fondations, compliquant d'autant la

conception de la machine et de ses fondations.

Lorsque des convertisseurs de tension sont utilisés pour cette application, l'oscillation est filtrée au moyen d'une batterie de condensateurs et d'une inductance, accordée au double de la fréquence d'exploitation du réseau monophasé.

Autre défi : un tel système doit non seulement jouer le rôle de source de tension et de puissance réactive, mais également être capable de gérer, sans interruption, la transition entre le fonctionnement interconnecté et le fonctionnement en îlotage en cas de perturbation sur le réseau. De surcroît, il doit également être capable de fonctionner comme l'unique source d'alimentation d'un secteur isolé de la ligne de chemin de fer et de se resynchroniser sur le reste du réseau ferroviaire après disparition de la perturbation ■.

Exemples de convertisseur de fréquence

La technologie des convertisseurs statiques jouit d'une longue tradition chez ABB. Si les premiers convertisseurs de puissance pour la traction ferroviaire furent mis en exploitation en Suède, cette technologie était inadaptée aux pays d'Europe centrale où la structure du réseau de traction électrique était très différente avec de forts impératifs de qualité de tension.

Les deux premiers convertisseurs de fréquence modernes, d'une puissance unitaire de 25 MVA, furent mis en service en 1994, à Giubiasco (Suisse). La réussite du projet incita à poursuivre le développement de la technologie des GTO et, en 1996, un convertisseur de 100 MVA entra en service à Bremen (Allemagne). Celui-ci était équipé de GTO à commande « dure », c'est-à-dire avec une gâchette concentrique et un circuit de commande qui lui transmettait le signal de commande via un fil d'inductance extrêmement faible, débouchant sur une commutation plus performante des semi-conducteurs. Cette technologie fut mise en œuvre en 1999 dans une station de conversion ferroviaire de Karlsfeld (Allemagne) de 2×50 MW/67 MVA.

L'étape suivante fut le développement d'un nouveau composant semi-conducteur, le thyristor intégré commuté par la gâchette IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*)¹⁾. Partant d'un GTO, il offre de bien meilleures performances en commutation et des pertes inférieures, et intègre un circuit de commande de gâchette de faible inductance. Sa compacité permet de développer des modules convertisseurs standard et de fabriquer des convertisseurs de différentes puissances.

Note

¹⁾ Pour en savoir plus sur les IGCT, lire *IGCT : petit mais costaud* p. 15.

Convertisseurs

Aujourd'hui, 21 convertisseurs entre 15 et 20 MW sont en exploitation, à la grande satisfaction des clients. Leur conception modulaire permet de proposer très facilement différents niveaux de puissance, opportunément par multiple de 15 MW, par la mise en parallèle, d'une part, des modules convertisseurs et, d'autre part, des convertisseurs.

Cette génération de convertisseurs instaure de nouvelles références en matières de performance, de dimensions et de délais de montage/mise en service. Les échos positifs des clients confirment que le convertisseur de traction standardisé d'ABB répond parfaitement à leurs besoins.

Module de base

L'IGCT **2**, véritable « cœur » du module convertisseur, conjugue les avantages du thyristor GTO et du transistor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) en termes de robustesse, de pertes en commutation et en conduction, et de rapidité de commutation. Les qualités de ce composant semi-conducteur restent inégalées pour le domaine du ferroviaire (forte puissance, moyenne tension). L'IGCT, IGBT de haute tension utilisé dans cette application, par exemple, affiche des per-

tes en conduction comparables pour la même surface de silicium, mais des pertes en conduction beaucoup plus élevées. Qui plus est, l'IGCT permet de concevoir un convertisseur avec un minimum de circuits supplémentaires. Ainsi, si un module de phase se contente d'un simple circuit de protection (*snubber*), chaque GTO nécessite de nombreux circuits. Les avantages en termes de coût, de compacité et de pertes sont légion.

L'IGCT conjugue les avantages du thyristor GTO et du transistor IGBT en termes de robustesse, de pertes en commutation et en conduction, et de rapidité de commutation.

Les pertes en conduction et en commutation d'un semi-conducteur peuvent être minimisées en abaissant la fréquence de commutation. Pour autant, celle-ci ne doit pas être trop basse pour ne pas générer d'harmoniques. Il s'agit donc de trouver le juste équilibre entre pertes et harmoniques. Une manière élégante de résoudre partiellement ce problème est une topologie multini-

veau qui permet d'exploiter le convertisseur à une fréquence de commutation relativement faible tout en minimisant les harmoniques.

Des modules de phase à 3 niveaux sont utilisés pour produire une tension alternative à partir d'une tension continue. Ces modules s'apparentent à des commutateurs à 3 positions : la sortie peut être basculée sur le potentiel positif (+), neutre (0) ou négatif (-) du bus CC **3**.

Deux modules de phase de ce type sont combinés pour former un module double phase à 3 niveaux dont tous les IGCT sont refroidis par les deux côtés. Le fluide de refroidissement (eau glycolée) circule dans des tuyaux jusqu'aux radiateurs. La structure mécanique du double bloc autorise une conception très compacte qui contribue aux faibles valeurs d'inductance parasite au sein d'un bloc et à l'utilisation optimale des semi-conducteurs. Toutefois, tous les semi-conducteurs d'un bloc restent accessibles et sont donc facilement remplaçables. Chaque semi-conducteur peut être remplacé avec un outil simple sans couper le circuit de refroidissement. **4** est un exemple de configuration à deux blocs.

Exemple :

station de conversion 15-20 MW

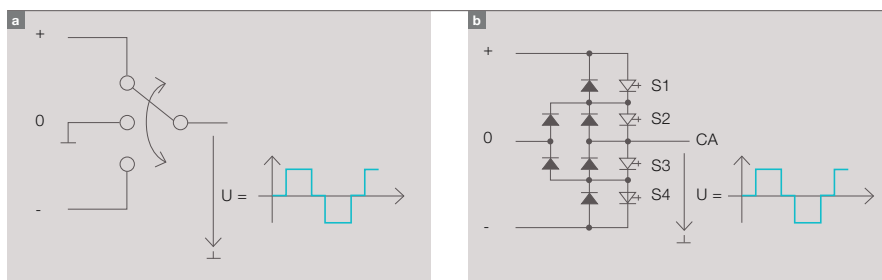
5 illustre le schéma de principe d'une station de conversion complète.

Convertisseur 50 Hz (SR50) **5a**

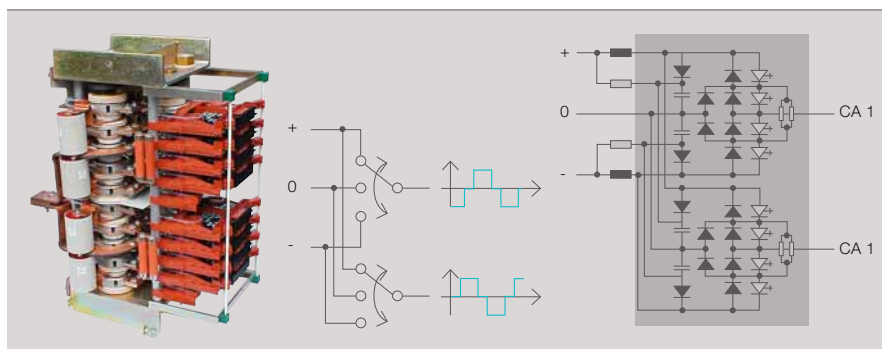
■ **Conception :** le convertisseur 50 Hz est constitué de deux modules standard triphasés à trois niveaux. Deux phases sont combinées dans un bloc pour former un module double phase. Chaque module double phase d'un appareil à trois niveaux comprend 8 IGCT avec leurs 8 diodes de roue libre et 4 diodes de roue libre sur le conducteur neutre. Le circuit de commande de gâchette et le GCT forment l'IGCT intégré. Le circuit d'écrêtage assure le rôle de limiteur di/dt et de limiteur de tension. Il est composé de bobines d'inductance de protection, de condensateurs et de diodes de limitation avec résistances.

■ **Configuration et commande :** le convertisseur 50 Hz est en vraie configuration 12 pulses, donc seuls

3 Principe de fonctionnement du convertisseur à 3 niveaux et mise en œuvre avec des composants semi-conducteurs



4 Structure mécanique et schéma de raccordement d'un double bloc





les harmoniques caractéristiques de cette configuration sont générés ($n = 12k \pm 1$, avec $k = 1, 2, 3, 4 \dots$). Selon la fréquence de commutation choisie des semi-conducteurs et la stratégie de modulation, certains harmoniques résiduels peuvent être annulés. Au besoin, les harmoniques sont encore atténués au moyen d'un filtre réseau.

Une topologie multiniveau permet d'exploiter le convertisseur à une fréquence de commutation relativement faible tout en minimisant les harmoniques.

Convertisseur 16 2/3 Hz 5b

- **Conception:** le convertisseur 16 2/3 Hz se compose de 4 modules standard diphasés à 3 niveaux. Deux phases sont combinées dans un bloc pour former un module double phase pouvant servir à créer un pont en H monophasé. Un module double phase est constitué des mêmes éléments que ceux décrits pour le convertisseur 50 Hz.
- **Configuration et commande:** le convertisseur 16 2/3 Hz est configuré en 8 étapes. Ses niveaux de tension de sortie sont additionnés par le raccordement en série des enroulements du transformateur réseau des 4 ponts en H 3 niveaux à impulsions décalées. Chaque pont en H fonctionne en mode 3 pulses selon une technique classique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Limiteur de tension

Si la tension du bus CC franchit une limite haute, il est déchargé via une résistance jusqu'à revenir à une limite basse 5d. La commande du limiteur de tension est indépendante du système de commande du convertisseur côté réseau ferroviaire (CA diphasée) et côté réseau national (CA triphasé). Ainsi, la tension du bus CC reste toujours dans la plage définie.

Bus CC

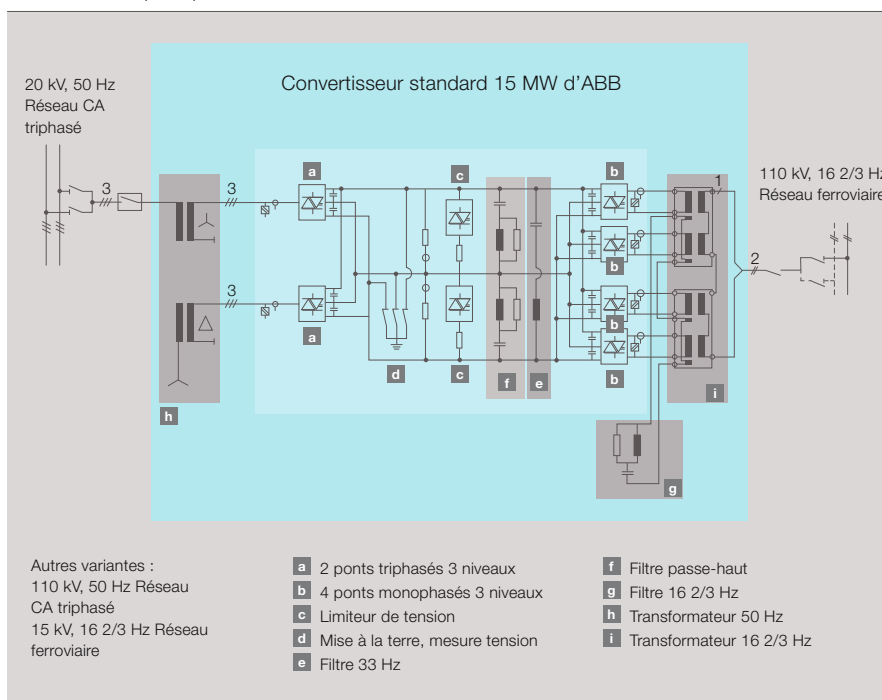
Tous les modules double phase du convertisseur sont interconnectés côté CC par une barre collectrice commune qui comporte les connexions des modules convertisseurs individuels

(condensateurs à couplage direct, batteries de filtres et mesures de tension).

Le bus CC qui relie les convertisseurs 50 Hz et 16 2/3 Hz comprend principalement :

- Une batterie de condensateurs à couplage direct pour le stockage d'énergie ;
- Un filtre 33,4 Hz pour absorber la fluctuation de puissance du réseau ferroviaire 5e ;
- Un filtre passe-haut pour absorber les harmoniques de fréquence plus élevée du réseau ferroviaire, en particulier ceux de rangs 3 et 5 5f.

5 Schéma de principe d'une station de conversion



Convertisseurs

Les deux filtres, en plus des condensateurs à couplage direct, servent également au stockage d'énergie, ceci pour des raisons de régulation. La capacité de stockage d'énergie est suffisante pour faire face à un délestage intempéstif de $P = 100\%$ suffisamment rapide pour maintenir la tension du bus CC dans les limites spécifiées.

Filtre 33,4 Hz

Le filtre d'encoche 33,4 Hz sert à absorber les pulsations de puissance provenant du réseau ferroviaire **5e**. Malgré un facteur de qualité élevé d'environ 200 (faible amortissement), le filtre est caractérisé par une largeur

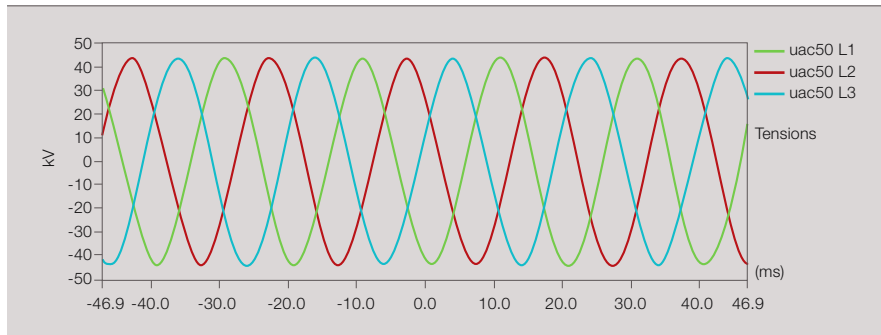
de bande relativement importante autour de sa fréquence nominale du fait de sa capacité élevée, permettant d'absorber les écarts de fréquence donnés du réseau ferroviaire. De plus, ses pertes sont relativement faibles car les pertes des condensateurs sont généralement inférieures à celles des inductances.

Filtre passe-haut

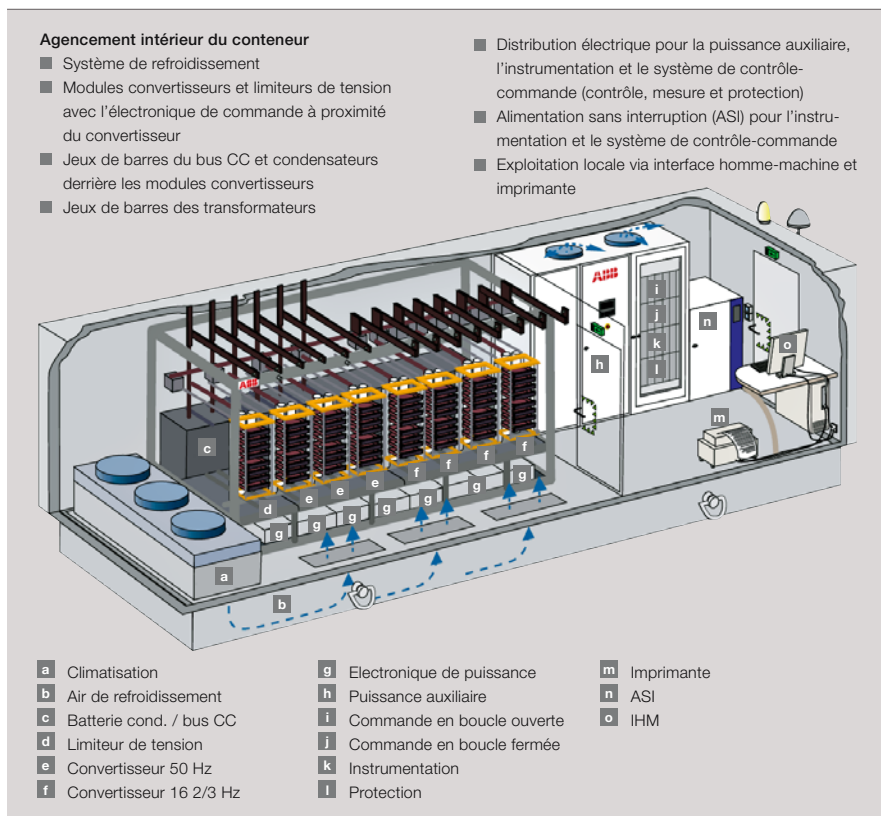
Ce filtre absorbe les harmoniques de fréquence plus basse provenant principalement du réseau ferroviaire **5f**. Il est configuré comme un circuit d'absorption amorti de deuxième ordre accordé sous l'harmonique de

rang 5 de la fréquence fondamentale du réseau ferroviaire. En effet, les harmoniques de rang 3 et 5 de la tension du réseau ferroviaire correspondent à ceux des rangs 2, 4 et 6 dans le bus CC. Les harmoniques de fréquence supérieure provenant du réseau triphasé et du réseau ferroviaire, de même que ceux provoqués par les pulsations, sont en partie absorbés par ce filtre et principalement par les condensateurs à couplage direct du convertisseur. Ainsi, les harmoniques prévus dans ces réseaux sont également pris en compte lors du dimensionnement de ces composants.

7 Tensions triphasées au point de raccordement au réseau 50 Hz



6 Conteneur du convertisseur



Conteneur du convertisseur

Le convertisseur et son système de commande sont intégralement câblés et testés dans un conteneur protégé des intempéries. Le système de refroidissement est livré dans un conteneur à part. Les deux conteneurs sont montés sur un même support **6**.

Encadré Avantages des convertisseurs de fréquence statiques (à électronique de puissance) par rapport aux commutatrices

Coûts

En incluant tous les éléments de coût, y compris ceux des auxiliaires, de construction et d'assemblage, les coûts d'investissement et d'exploitation des convertisseurs statiques sont beaucoup plus faibles.

Rendement

Les convertisseurs statiques possèdent un rendement approximatif de 97 % (transformateurs de raccordement aux deux réseaux électriques compris) sur une large plage de fonctionnement. Le rendement des commutatrices varie en-dessous de 90 à 95 %, en fonction de la taille et du point de fonctionnement.

Disponibilité

Des délais de maintenance et de réparation plus longs pénalisent fortement la disponibilité des commutatrices.

Comportement en exploitation

L'absence de masses en rotation dans les convertisseurs statiques raccourcit considérablement les temps de réponse. Les problèmes potentiels de stabilité en cas de perturbations sur le réseau du fait des oscillations du rotor n'existent pas.

Transformateurs des convertisseurs

■ **Transformateur 50 Hz**: le transformateur 50 Hz du convertisseur 50 Hz alimente les deux ponts triphasés à IGCT. Un transformateur triphasé est constitué soit d'un circuit magnétique à 3 colonnes selon une conception à 2 plans avec culasse intermédiaire, soit de deux circuits magnétiques à 3 colonnes renfermés dans une cuve. Chaque colonne porte un enroulement HT et un enroulement côté électronique. Les deux fractions d'enroulement HT sont connectées en série. L'enroulement HT est couplé Y alors que les deux enroulements côté électronique sont décalés de 30° électriques (couplage Y/D) pour permettre le fonctionnement en mode 12 pulses des convertisseurs. Le raccordement résultant est YN y0 d11.

■ **Transformateur 16 2/3 Hz**: le transformateur 16 2/3 Hz du convertisseur 16 2/3 Hz totalise les 4 tensions partielles en une tension monophasée quasi sinusoïdale de 16 2/3 Hz de fréquence nominale. Il est composé de 4 unités monophasées. Les tensions partielles rectangulaires sont produites à partir d'une source de tension continue (bus CC) au moyen de 4 ponts d'IGCT monophasés utilisant la modulation MLI et envoyées aux

4 enroulements côté électronique du transformateur. L'addition et l'adaptation à la tension du réseau de traction se font dans l'enroulement HT. Un filtre est connecté aux enroulements tertiaires en série ou au réseau de traction.

Filtre réseau

Côté 16 2/3 Hz, un filtre est utilisé pour réduire encore la très faible distorsion harmonique provoquée par le convertisseur. Côté 50 Hz, ce filtrage peut, dans certains cas, s'avérer aussi utile.

Les tensions de sortie des convertisseurs à IGCT forment des impulsions rectangulaires de largeur contrôlable. Comparé au spectre de fréquence type des machines, celui de la tension de sortie formé par les niveaux individuels est à très faible teneur en harmoniques dans la plage des basses fréquences. Le réseau perçoit le convertisseur comme une source de tensions harmoniques. L'inductance du transformateur a un effet amortisseur particulièrement marqué pour les harmoniques de courant supérieurs, avec un impact positif sur la qualité de la tension du réseau. Pour encore améliorer l'impact de l'inductance du transformateur, un filtre est fourni qui réduit davantage les tensions harmo-

niques. Les valeurs de distorsion harmonique qui en résultent restent sous les valeurs requises. 7 montre la bonne qualité de la tension au point de raccordement au réseau d'un convertisseur (oscillogramme enregistré pendant la mise en service).

8 montre une sous-station avec 4 convertisseurs de 15 à 20 MW.

Perspectives d'avenir

La part de marché relativement importante d'ABB pour ce type de système prouve que le développement ciblé de la technologie des convertisseurs est en adéquation avec les besoins des clients. De surcroît, l'approche modulaire apporte la souplesse indispensable aux exigences différenciées de puissance. Des convertisseurs de 30 MW et plus sont actuellement en fabrication et des efforts considérables sont déployés par ABB pour continuer de s'imposer sur ce créneau avec une technologie extrêmement pointue.

Gerhard Linhofer

Philippe Maibach

Niklaus Umbricht

ABB Automation Products

Turgi (Suisse)

gerhard.o.linhofer@ch.abb.com

philippe.maibach@ch.abb.com

niklaus.umbricht@ch.abb.com

8 Sous-station de conversion 15–20 MW pour l'échange d'électricité entre le réseau national à 50 Hz et le réseau de traction électrique monophasé à 16 2/3 Hz. A gauche, le transformateur 50 Hz avec les filtres CA triphasés montés sur le dessus; au centre, le conteneur du convertisseur; à droite, le transformateur basse fréquence monophasé



Bibliographie

- [1] Gaupp, O., Linhofer, G., Lochner, G., Zanini, P., *Convertisseurs de fréquence GTO de haute puissance pour le trafic ferroviaire à travers les Alpes*, Revue ABB 5/95, p. 4–10
- [2] Lönard, D., Northe, J., Wensky, D., *Statische Bahnstromrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen*, Elektrische Bahnen 6/95, p. 179–190
- [3] Mathis, P., *Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen*, Elektrische Bahnen 6/95, p. 194–200
- [4] Steimer, P., Grüning, H., Werninger, J., Dähler, P., Linhofer, G., Boeck, R., *Couplage série de thyristors GTO pour convertisseurs de haute puissance*, Revue ABB 5/96, p. 14–20
- [5] Steimer, P., Grüning, H. P., Werninger, J., Carroll, E., Klaka, S., Linder, S., *IGCT – Une nouvelle génération de thyristors pour onduleurs de forte puissance*, Revue ABB 5/1998, p. 34–42
- [6] Meyer, M., Thoma, M., *Netzkompatibilitätsstudie und -messungen für die Umrichteranlage Wimmis*, Elektrische Bahnen 12/2006, p. 567–574
- [7] Jampen, U., Thoma, M., *Statische Frequenzumrichteranlage Wimmis*, Elektrische Bahnen 12/2006, p. 576–583