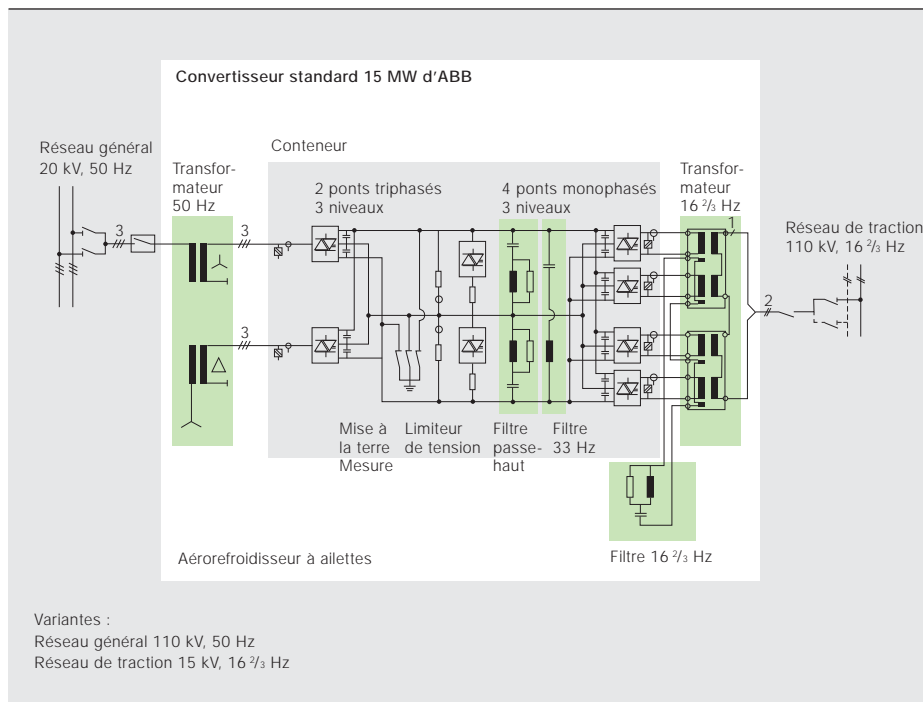




À convertisseurs statiques, performances dynamiques

Pour une énergie
de traction à la
fréquence requise

GERHARD LINHOFER, PHILIPPE MAIBACH, NIKLAUS UMBRICHT – Il existe de grandes disparités entre les réseaux de traction ferroviaire et les réseaux électriques. Tout d'abord, les chemins de fer électrifiés en courant alternatif sont principalement alimentés en monophasé alors que le réseau général produit, transporte et distribue l'électricité en triphasé. Ensuite, les fréquences utilisées sont bien souvent différentes ; et même quand elles sont identiques, elles ne sont pas forcément synchronisées. Aujourd'hui, de gros convertisseurs de fréquence à électronique de puissance assurent le transfert de l'électricité entre réseau national et réseau ferroviaire. Nombreux sont les convertisseurs de fréquence ABB de 15 MW qui alimentent, par exemple, le nouveau tunnel de base du Lötschberg. De nos jours, de plus fortes puissances peuvent être mises en œuvre, comme la station de conversion de 413 MW construite pour l'énergéticien allemand E.ON : un record sur le marché des convertisseurs statiques !



L a traction électrique a de gros besoins en énergie. Pour y répondre, de nombreux exploitants ferroviaires possèdent leur propre réseau de transport haute tension (HT), voire leurs centrales de production. Mais *indépendance* ne veut pas dire *autarcie* : l'énergie doit pouvoir transiter d'un réseau électrifié à l'autre. Trois grands systèmes d'alimentation des voies ferroviaires coexistent aujourd'hui :

- Dans les pays ou régions dont l'électrification des chemins de fer est relativement récente, les caténaires sont souvent alimentées par le réseau général à la fréquence industrielle de 50/60 Hz, principalement sous 25 kV ;
- Là où l'électrification remonte au début du XX^e siècle, la grande traction ferroviaire a opté pour le courant continu (CC) à 1,5 ou 3 kV ;
- Certains pays ou régions du monde ont fait le choix du courant alternatif monophasé à fréquence spéciale ; c'est le cas de la Norvège, de la Suède, de l'Allemagne, de l'Autriche, de la Suisse (16 2/3 Hz) et du corridor nord-est des États-Unis (25 Hz).

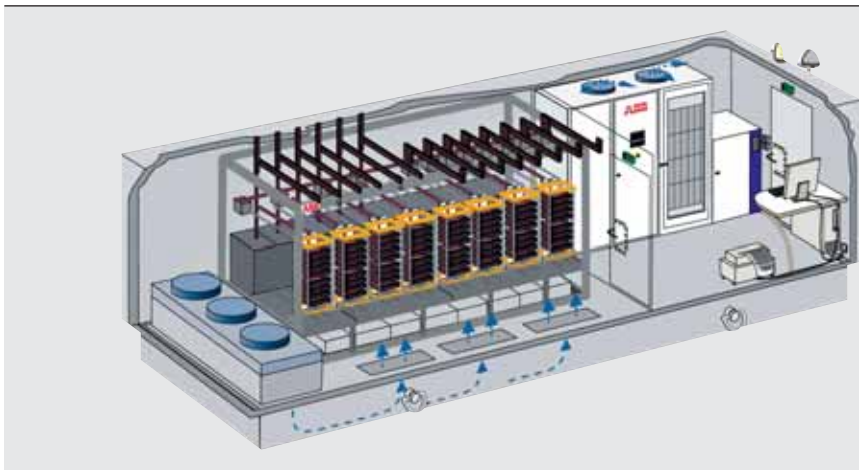
Dans le passé, on faisait appel à des groupes tournants pour produire le monophasé nécessaire au réseau de traction

à partir du triphasé puisé au réseau général. Ce couplage était assuré fondamentalement par deux machines électriques au nombre de paires de pôles différent, accouplées sur un arbre mécanique commun. Plus récemment, les progrès accomplis dans le domaine des semi-conducteurs ont ouvert la voie aux convertisseurs de fréquence à électronique de puissance : ces appareils « statiques » ont totalisé ces 15 dernières années quelque 1 000 MW, près des deux tiers étant de fourniture ABB. Des convertisseurs cumulant 700 MW supplémentaires sont en construction ou en commande.

Au niveau du convertisseur (rotatif ou statique), la jonction du triphasé et du monophasé est plus problématique que le couplage de deux réseaux triphasés. Cela tient surtout au fait que la puissance dans un réseau monophasé oscille au double de la fréquence, alors qu'elle est fondamentalement constante en triphasé. Sur les convertisseurs tournants, 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, ce qui ajoute à la complexité de la réalisation, tant de la machine que de ses fondations.

Dans le cas des convertisseurs statiques, l'oscillation est filtrée par une bat-

La conception compacte permet de développer des modules convertisseurs standardisés et de réaliser des appareils de différentes puissances.



Composition :

- Système de refroidissement
- Modules convertisseurs et limiteurs de tension avec électronique de commande à proximité du convertisseur
- Jeux de barres du bus CC et condensateurs derrière les modules convertisseurs
- Jeux de barres des transformateurs
- Distribution d'énergie aux auxiliaires, à l'instrumentation et au système de contrôle-commande (régulation, mesure et protection)
- Alimentation sans interruption de l'instrumentation et du contrôle-commande
- Exploitation locale par interface homme-machine et imprimante au fil de l'eau

terie de condensateurs et une inductance accordée au double de la fréquence d'exploitation du réseau ferroviaire.

Autre défi : le convertisseur statique doit non seulement servir de source de tension et de puissance réactive, mais aussi être capable de gérer, sans interruption, le passage d'un fonctionnement interconnecté à un fonctionnement îloté, en cas de perturbation sur le réseau. De plus, il doit pouvoir être l'unique source d'alimentation d'un secteur isolé de la

et intègre un dispositif de commande de gâchette de faible inductance. Sa compacité permet de développer des modules convertisseurs standardisés et de réaliser des appareils de différentes puissances. Aujourd'hui, plus d'une vingtaine de convertisseurs de 15 à 20 MW sont en exploitation, à la plus grande satisfaction des clients.

15 à 20 MW pour le Lötschberg

Parmi les réalisations d'ABB figure la station de conversion électrique de Wimmis (canton de Berne) destinée au nouveau tunnel de base du Lötschberg¹ que les trains empruntent à 200 km/h. En 2005, ABB livrent 4 convertisseurs d'une puissance unitaire de 20 MW à la société d'électricité bernoise BKW FMB Energie, alors responsable

de l'alimentation électrique du chemin de fer. Le principe en est simple : la tension triphasée du réseau régional à 50 Hz commence par être redressée, puis cette énergie est momentanément stockée dans un bus continu (CC) avant d'être transformée par un onduleur en tension alternative monophasée à $16\frac{2}{3}$ Hz.

Le schéma de principe d'une station de conversion complète comme celle du Lötschberg est illustré en → 1 ; ses constituants sont décrits ci-après.

Convertisseur 50 Hz

Ce convertisseur est constitué de 2 modules standard triphasés à 3 niveaux. Deux phases se combinent en un bloc pour former un module double phase. Le convertisseur est en vraie configuration 12 pulses : seuls les harmoniques caractéristiques de ce schéma sont donc générés ($n = 12k \pm 1$, avec $k = 1, 2, 3, 4 \dots$).

Convertisseur $16\frac{2}{3}$ Hz

Ce convertisseur se compose de 4 modules standard biphasés à 3 niveaux. Deux phases se combinent en un bloc pour former un module double phase. L'appareil est configuré en 8 étapes. Ses niveaux de tension de sortie sont additionnés par couplage série des enroulements du transformateur réseau des quatre ponts en H à trois niveaux et impulsions décalées.

Limiteur de tension

Si la tension du bus CC franchit un seuil haut, elle est déchargée par une résistance jusqu'à revenir à un seuil bas. La commande du limiteur est indépendante du système de contrôle-commande du convertisseur côté réseau ferroviaire (alternatif biphasé) et côté réseau national (triphase) ; la tension du bus CC reste ainsi toujours dans la plage définie.

Bus continu

Tous les modules double phase du convertisseur sont interconnectés côté CC par un jeu de barres commun qui comporte les connexions des modules convertisseurs individuels pour les condensateurs du bus CC à couplage

Le convertisseur statique doit servir de source de tension et de puissance réactive mais aussi gérer le passage d'un fonctionnement interconnecté à l'îlotage, en cas de perturbation sur le réseau.

ligne de chemin de fer et se resynchroniser ensuite sur le reste du réseau de traction après disparition de la perturbation.

Une longue lignée

La technologie des convertisseurs de fréquence statiques jouit d'une longue tradition chez ABB. En 1994, la Suisse inaugure les premiers convertisseurs de traction ferroviaire à base de puissants semi-conducteurs, les thyristors blocables par la gâchette «GTO» ; ceux-ci cèdent le pas au thyristor intégré commuté par la gâchette «IGCT», qui offre de bien meilleures performances en commutation avec des pertes inférieures

Note

¹ Lire « La Suisse sur les rails », p. 31.



Livrés dans un conteneur protégé des intempéries, le convertisseur et sa commande sont intégralement testés et câblés.

direct et ses filtres, ainsi que les mesures de tension.

Le bus CC reliant 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 les fluctuations de puissance du réseau ferroviaire ;
- un filtre passe-haut pour absorber les harmoniques de fréquence caractéristiques de la traction ferroviaire (rangs 3 et 5, en particulier).

Conteneur du convertisseur

Le convertisseur et sa commande sont livrés dans un conteneur protégé des intempéries et intégralement câblés et testés. Le système de refroidissement occupe un autre conteneur. Les deux conteneurs sont montés sur un même support → 2.

Transformateur 50 Hz

Le transformateur du convertisseur 50 Hz alimente les 2 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 2 circuits magnétiques à 3 colonnes, renfermés dans une même cuve.

Transformateur 16^{2/3} Hz

Le transformateur du convertisseur 16^{2/3} Hz additionne les 4 tensions partielles pour obtenir une tension monophasée quasi-sinusoïdale à la fréquence assignée de 16^{2/3} Hz. Il se compose de 4 unités monophasées. Les tensions partielles rectangulaires sont produites à

La plus grande station de conversion au monde, d'une puissance de 413 MW, est en construction à Datteln (Rhin-du-Nord-Westphalie, Allemagne).

partir d'une source de tension continue (bus CC) au moyen de 4 ponts d'IGCT monophasés utilisant la modulation par largeur d'impulsion ; elles sont 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 permet de réduire encore la très faible distorsion harmonique due au convertisseur ; ce filtrage peut aussi être nécessaire côté 50 Hz.

Gestion technique centralisée

L'ensemble de l'installation du Löttschberg est piloté à distance par un ordinateur de commande ALR² d'ABB, qui collecte et traite les données des 4 convertisseurs statiques de 20 MW et des 2 convertisseurs rotatifs, par le biais d'interfaces normalisées. L'ordinateur calcule en permanence l'utilisation optimale des convertisseurs statiques et rotatifs disponibles, en fonction des besoins de puissance du réseau de traction ou de réglages manuels ; il peut donc connecter ou déconnecter du réseau la réserve de puissance nécessaire, en l'espace de quelques secondes.

Toutes les fonctions de contrôle-commande, de régulation et de protection disposent du système numérique PSR³

Notes

- 2 De l'allemand *Anlageleitreechner* (ordinateur de commande)
- 3 Dénomination des anciennes installations, remplacée par la plate-forme AC 800PEC pour les installations actuelles.

3 La station de conversion statique de fréquence du Lötschberg (Wimmis)



L'ordinateur ALR calcule en permanence l'utilisation optimale des convertisseurs statiques et rotatifs disponibles, en fonction des besoins de puissance du réseau de traction ou de réglages manuels.

Les deux convertisseurs de 30 MW de la station autrichienne de Timelkam



d'ABB, conçu pour être utilisé avec les boucles d'asservissement précises et très rapides des systèmes convertisseur/onduleur. Les postes opérateurs du système de pilotage MicroSCADA d'ABB, installés dans le centre de conduite, garantissent l'affichage fiable des mesures et calculs, ainsi que la commande des circuits et séquences de surveillance de tous les éléments de l'installation. L'exploitation en mode secours automatique instantané de toute la supervision (ARL + postes opérateurs) garantit la très grande disponibilité du système.

L'installation est photographiée en → 3 : à gauche, on aperçoit le transformateur triphasé 50 Hz coiffé du circuit de filtrage (sur portique) ; à droite, le transformateur monophasé $16\frac{2}{3}$ Hz et, au milieu, le conteneur du convertisseur.

De 20 à 30 MW et plus...

La modularité de ces équipements permet d'augmenter très facilement la puissance par paliers de 15 MW ; il suffit de connecter en parallèle les modules convertisseurs supplémentaires. Cette génération d'appareils établit de nouvelles références en termes de performance, d'encombrement et de rapidité de montage et de mise en service. Les retours positifs des clients prouvent que ces équipements standardisés répondent bien à leurs besoins.

Les clients ne tardèrent pas à rebondir sur le succès de ces convertisseurs 15–20 MW pour demander encore plus de puissance unitaire ; ABB développa alors un autre convertisseur de fréquence standard de 30 MW, doté en option d'une capacité de surcharge selon l'application

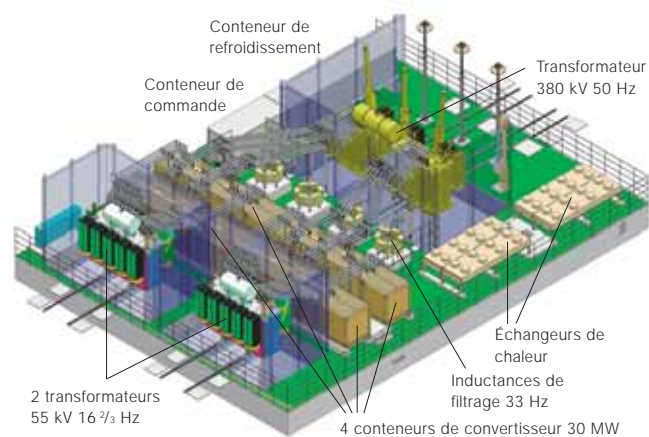
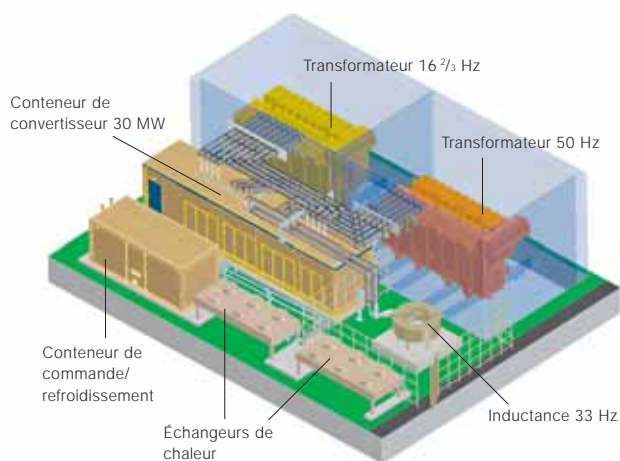
et l'environnement. Deux unités ou plus de 30 MW peuvent être couplées en parallèle pour obtenir plus de puissance par station.

Station de conversion de Timelkam : 30 MW

Fin 2007, les chemins de fer autrichiens ÖBB commandent une nouvelle station de conversion ferroviaire, à installer près de la ville de Timelkam, au nord de l'Autriche. La station comporte deux convertisseurs indépendants de 30 MW pour transformer l'alimentation du réseau national à 50 Hz/110 kV en $16\frac{2}{3}$ Hz/110 kV. Le réseau de traction dispose ainsi de 60 MW, sans perte de transport grâce à la proximité de la centrale d'énergie. Le premier convertisseur 30 MW entre en service en juillet 2009 → 4.

Station de conversion de Datteln : 413 MW

La plus grande station de conversion ferroviaire au monde est en construction à Datteln (Rhin-du-Nord-Westphalie, Allemagne). Commandée en 2007 par E.ON, elle fournira 413 MW et remplacera les générateurs $16\frac{2}{3}$ Hz des centrales Datteln 1–3, arrivés en fin de vie économique et technique. La station puisera le 50 Hz de la nouvelle centrale toute proche de Datteln 4 pour le convertir en $16\frac{2}{3}$ Hz et alimenter le réseau 110 kV de la *Deutsche Bahn* (DB). Datteln étant ainsi l'un des plus gros « points d'injection » du réseau ferroviaire allemand, sa station de conversion doit afficher une très haute disponibilité. ABB est responsable de toute l'ingénierie du projet, de la conception de la chaîne de conversion à la définition technique de tous ses composants, en passant par le développement du logiciel de contrôle-commande et



protection. Ce projet clés en mains inclut l'installation et la mise en œuvre.

La fourniture ABB comprend 4 stations de conversion indépendantes, d'une puissance assignée de 103 MW obtenue à partir de 4 convertisseurs standard de 30 MW. La capacité de surcharge intégrée permet au client de continuer à recevoir la puissance nominale de 413 MW même si l'un des convertisseurs est hors service. Chaque station se compose des éléments suivants → 5 :

- 1 transformateur convertisseur, côté 50 Hz ;
- 4 conteneurs de convertisseur avec filtres de circuits intermédiaires ;
- 1 conteneur de commande ;
- 1 conteneur abritant le système de refroidissement ;
- 4 échangeurs de chaleur eau/air ;
- 2 transformateurs convertisseurs couplés en série, côté 16²/₃ Hz.

Outre les enjeux techniques de cet ambitieux projet, la logistique et la qualité de la planification sont primordiales pour pouvoir livrer l'équipement à temps. La durée du contrat, dont l'échéance est prévue en 2011, et la rigidité du planning en font un chantier d'exception, qui peut aussi faire date dans l'exécution d'autres projets : ces 4 stations de 103 MW établissent un nouvel étalon de puissance pour la conversion de fréquence statique.

Perspectives

La part de marché relativement importante d'ABB pour ce type de système prouve que les efforts de développement du Groupe sont en phase avec les exigences des clients. Qui plus est, son

approche modulaire confère la souplesse nécessaire aux besoins différenciés de puissance. Les prochaines années verront une demande accrue de convertisseurs de 15 MW pour remplacer les nombreux groupes tournants arrivés en fin de vie. ABB ne ménage pas ses efforts pour conforter sa position de leader sur ce marché particulièrement exigeant.

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

Bibliographie

- [1] Gaupp, O., Linhofer, G., Lochner, G., Zanini, P., « Convertisseurs GTO de haute puissance pour le trafic ferroviaire à travers les Alpes », *Revue ABB 5/1995*, p. 4-10.
- [2] Lönard, D., Northe, J., Wensky, D., « Statische Bahnstromrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen », *Elektrische Bahnen 6/1995*, p. 179-190.
- [3] Mathis, P., « Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen », *Elektrische Bahnen 6/1995*, 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 5/1996*, 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.