

Onduleurs de tension multiniveaux

Avec son nouveau convertisseur de fréquence MT, ABB fait monter la tension

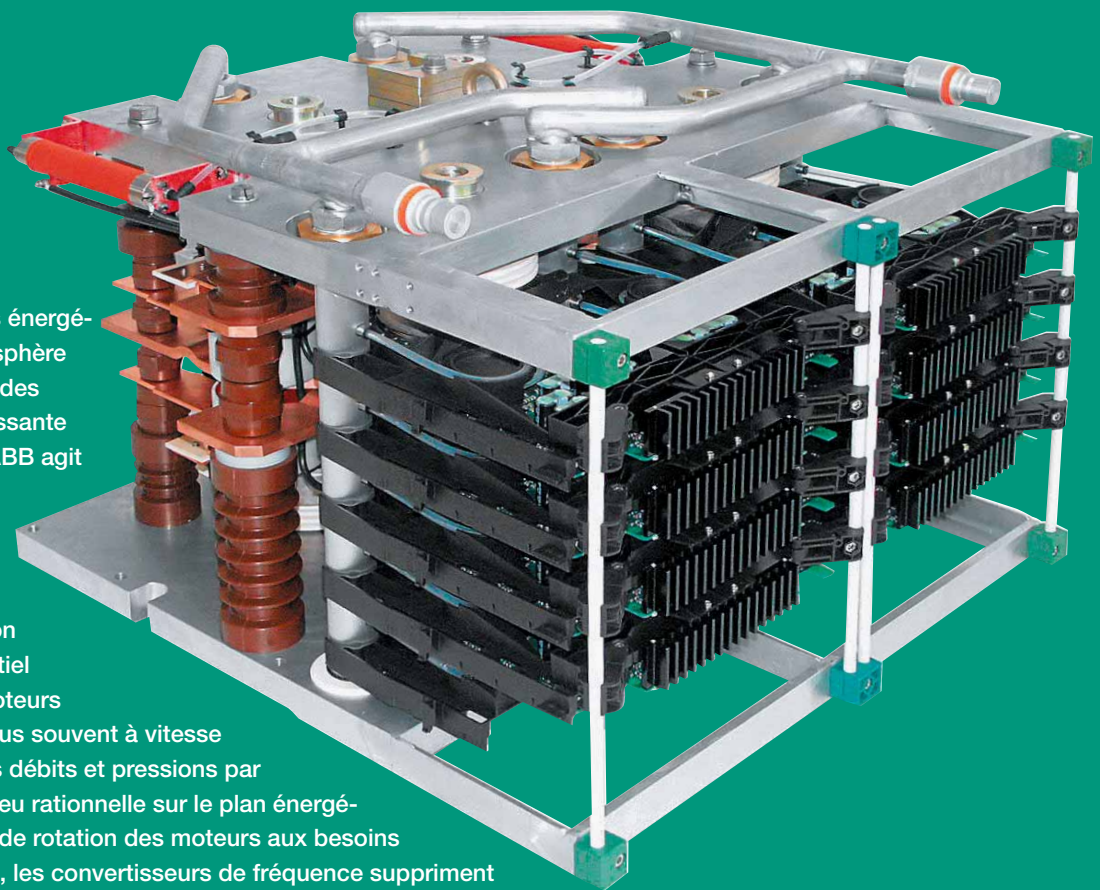
Pieder Jörg, Gerald Scheuer, Per Wikström

L'épuisement des ressources énergétiques et le rejet dans l'atmosphère des gaz à effet de serre sont des sujets de préoccupation croissante pour l'avenir de l'humanité. ABB agit en misant sur l'efficacité énergétique.

Les applications de ventilation, pompage et compression recèlent un formidable potentiel d'économies. En effet, les moteurs d'entraînement tournent le plus souvent à vitesse fixe avec une modulation des débits et pressions par action mécanique, solution peu rationnelle sur le plan énergétique. En adaptant la vitesse de rotation des moteurs aux besoins réels de pression ou de débit, les convertisseurs de fréquence suppriment les consommations inutiles.

La panacée? Pas tout à fait, car les concepteurs de convertisseurs de fréquence moyenne tension (MT) doivent résoudre deux problèmes fondamentaux: fournir au moteur le niveau de tension requis et délivrer une onde de tension aussi proche que possible de la sinusoïdale pure. En recombinaut plusieurs solutions existantes, ABB apporte une réponse innovante à ces problèmes: le convertisseur de fréquence à cinq niveaux de tension.

Cette solution améliore considérablement la forme d'onde tout en augmentant la tension de sortie du convertisseur. Et pour couronner le tout, elle s'appuie, pour l'essentiel, sur des concepts éprouvés, constituant une innovation à moindre risque et fiabilisée.



Pour réguler les débits, on utilise traditionnellement des techniques très énergivores «d'étranglement». Par analogie, supposons qu'au volant de votre voiture vous gardiez en permanence votre pied à fond sur l'accélérateur (le moteur tournant à plein régime) et adaptez votre vitesse avec les freins (étranglement) sans jamais toucher à la boîte de vitesses. Dans le cas des moteurs électriques, les convertisseurs de fréquence jouent le rôle de changement de vitesse et favorisent des économies tous azimuts.

Les moteurs absorbent environ 30 % de l'énergie électrique produite dans le monde. Près des trois quarts entraînent des pompes, des ventilateurs et des compresseurs dans des applications où le pilotage à vitesse variable peut faire chuter leur consommation électrique. ABB estime que si l'on équipait le parc mondial de moteurs MT de convertisseurs de fréquence, les économies se chiffreraient à 227 TWh, soit la production annuelle de 144 centrales thermiques à flamme ou encore la consommation énergétique totale d'un pays comme l'Espagne¹⁾.

Aujourd'hui, la vitesse de rotation de moins de 10 % des moteurs vendus chaque année est régulée par la solution la plus efficace sur le plan économique et la plus simple en termes de maintenance : le convertisseur de fréquence. Malgré cela, pourquoi la majorité des utilisateurs continue-t-elle d'opter pour d'autres techniques de régulation? Les raisons les plus fréquemment évoquées sont :

- a) la fiabilité ;
- b) les harmoniques ;
- c) le coût et/ou le délai de retour sur investissement.

Le convertisseur de fréquence à cinq niveaux de tension d'ABB répond précisément à ces contraintes.

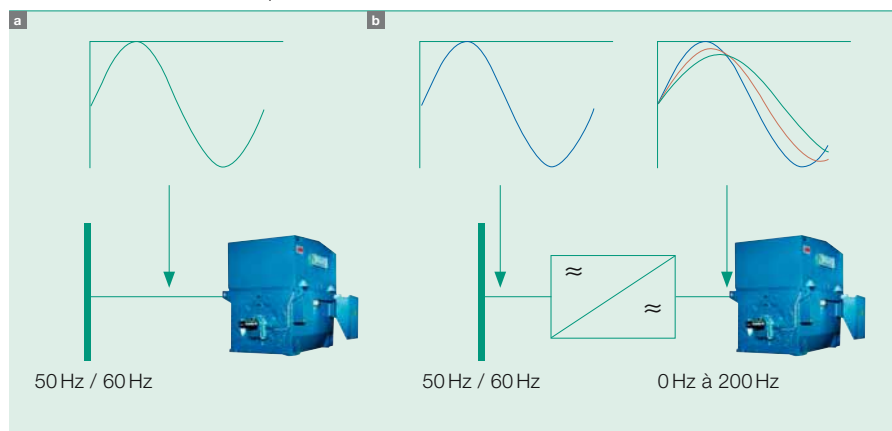
La forme idéale

Traditionnellement, l'électricité produite par un alternateur synchrone

Note

¹⁾ Cf. également Wikstroem, P., Tolvanen, J., Savolainen, A., Barbosa, P., *La variation de vitesse au rendez-vous de l'efficacité énergétique*, Revue ABB 2/2007, p. 73-80 (au premier chef, p. 74-76).

1 Moteur raccordé directement au réseau électrique a et moteur alimenté par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence b



possède une tension sinusoïdale. Un moteur électrique raccordé directement au réseau, tournant à vitesse fixe, est optimisé pour cette forme d'onde. Si ce même moteur est commandé en vitesse variable, le convertisseur de fréquence doit produire une forme d'onde aussi proche que nécessaire de la tension sinusoïdale pure. A défaut, le moteur s'échauffe, ne peut être exploité à sa puissance nominale et doit être déclassé. Autre inconvénient : l'ondulation de couple superposée peut induire des oscillations torsionnelles dans la chaîne cinématique et la machine entraînée.

Les moteurs absorbent environ 30 % de l'énergie électrique produite dans le monde. Près des trois quarts entraînent des pompes, des ventilateurs et des compresseurs dans des applications où le pilotage à vitesse variable peut faire chuter leur consommation électrique.

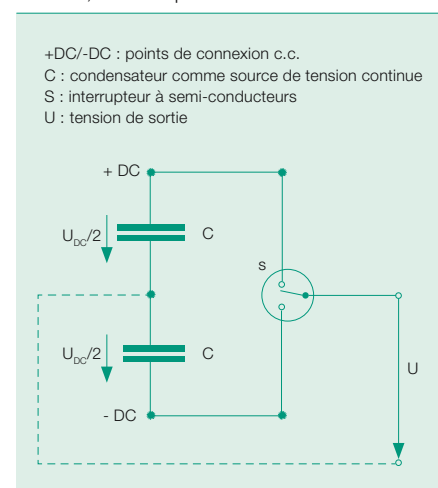
Par ailleurs, les plages de tension des moteurs sont normalisées. Pour les moteurs MT jusqu'à environ 7 000 kW, les tensions les plus fréquentes au sein des sites industriels sont 6 kV/50 Hz et 4 kV/60 Hz. Cela signifie que, pour utiliser les mêmes moteurs dans des applications en démarrage direct sur le réseau 1a et en comman-

de en vitesse variable 1b, le convertisseur de fréquence doit pouvoir fournir les mêmes niveaux de tension de sortie. Or ces valeurs de tension ne sont pas aisées à obtenir avec les convertisseurs traditionnels à deux et trois niveaux car la tension de sortie maximale est déterminée par les plages de tension des semi-conducteurs de puissance.

Voyage au cœur du convertisseur de fréquence

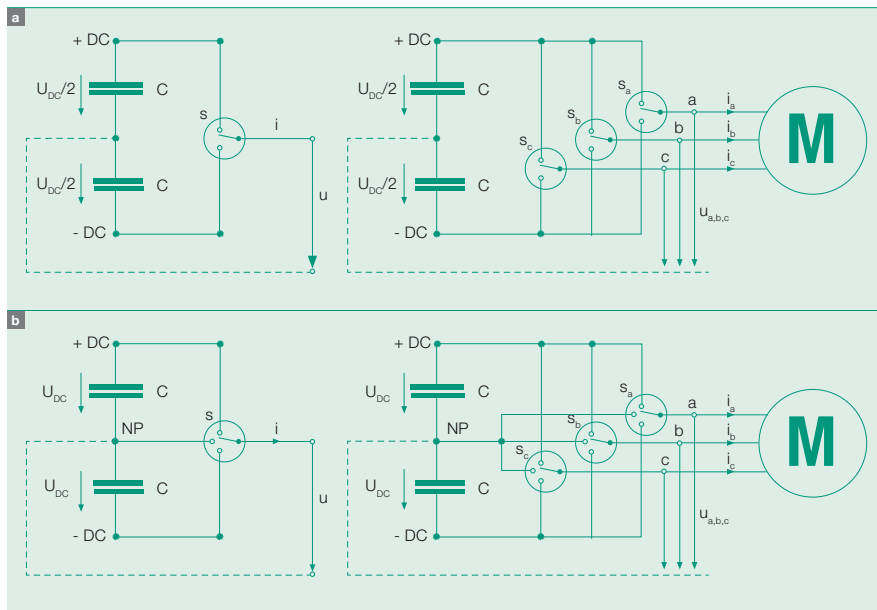
Dans un convertisseur, l'énergie subit une double conversion. D'abord, la tension d'entrée sinusoïdale de fréquence fixe et d'amplitude constante est redressée en tension continue ou en courant continu dans un pont redresseur. Ensuite, cette source continue est reconvertie en tension alternative ou courant alternatif de fréquence

2 Représentation des phases d'un onduleur à deux niveaux de tension avec un interrupteur idéal, alimenté par une source continue

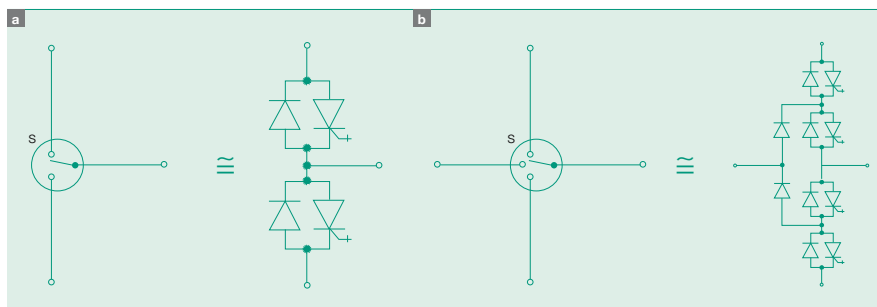


Produits

3 Schémas de principe d'un onduleur à 2 niveaux avec condensateur double **a** et à 3 niveaux **b**



4 Même si les interrupteurs des convertisseurs sont souvent représentés par de simples contacts (gauche), ils intègrent en réalité un grand nombre de composants semi-conducteurs (droite). **a** bras à deux niveaux et **b** équivalent à trois niveaux.



Encadré 1 Semi-conducteurs de puissance : 50 ans de progrès

En un demi-siècle, ABB est devenu leader du marché de l'électronique de puissance. Les convertisseurs de fréquence pour la commande en vitesse variable des moteurs constituent un créneau important de ce marché. Les interrupteurs électroniques sont au cœur de chaque convertisseur de fréquence. Voyons comment leur évolution a ouvert la voie à la commutation à cinq niveaux.

Ceux parmi vous qui suivent le développement de ces composants depuis longtemps se souviendront que les premiers circuits de commande électriques haute puissance étaient basés sur des thyristors commutés par le réseau. Si ces derniers peuvent être conçus pour des courants et des tensions de blocage élevés (les plus récents atteignant des valeurs de 8–10 kV), ils ont l'inconvénient d'être commandables à l'amorçage et

non à l'extinction : ils restent à l'état passant jusqu'à ce qu'un événement externe vienne interrompre la circulation du courant. Cette spécificité restreint les stratégies de commutation possibles et, de ce fait, l'adéquation de ces circuits aux problèmes de qualité de l'énergie (cf. commutation à deux niveaux en **1a**).

Les convertisseurs intégrant ces interrupteurs engendrent des harmoniques de forte amplitude et de fréquence relativement faible, créant des problèmes à la fois dans le réseau électrique et dans le moteur. De surcroît, le facteur de puissance côté réseau varie sur la plage de fonctionnement du convertisseur de fréquence. La pollution harmonique du réseau peut être atténuée par des filtres. Au niveau du moteur, deux contraintes doivent être prises en compte : d'une part, l'échauffement supplémentaire du moteur impose un surdimen-

et d'amplitude variables dans un pont onduleur. Les ponts redresseur et onduleur sont des circuits à électronique de puissance. Cet article s'intéresse principalement à la technologie du pont onduleur.

La plupart des convertisseurs ABB sont des onduleurs à source de tension dont le principe le plus simple est illustré en **2**. Une phase de sortie de l'onduleur est raccordée successivement à l'un des deux pôles d'un gros condensateur c.c. Le pont redresseur (non illustré) doit veiller à ce que ce condensateur soit toujours alimenté en tension continue fixe. Si une tension alternative est requise, l'interrupteur du pont onduleur doit changer de position (modification de la tension de sortie) au moins une fois par demi-période. Ainsi, par exemple, pour une sortie de 50 Hz, l'interrupteur doit basculer d'une position à l'autre au moins 50 fois par seconde.

Dans la pratique, l'interrupteur bascule en général beaucoup plus rapidement. La stratégie de la commande numérique de la commutation détermine non seulement la fréquence, mais également la valeur moyenne de la tension qui circule dans la charge. Ces niveaux sont modifiés en réglant les valeurs d'entrée de l'unité selon les besoins. technique appelée « mo-

sionnement et, d'autre part, l'arbre et les accouplements doivent être conçus pour résister aux oscillations torsionnelles.

Par le passé, ces contraintes étaient acceptées faute d'alternative. De fait, on procède encore ainsi pour les applications de très forte puissance (20 MW et plus) pour des raisons de fiabilité. Or l'avènement de nouveaux composants à semi-conducteurs autorise des topologies innovantes délivrant des formes d'onde plus proches de la tension sinusoïdale pure. Ces composants, tous à base d'interrupteurs optimisés comme les transistors bipolaires à grille isolée IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) et les thyristors commutés à gâchette intégrée IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristors*), ont l'avantage d'être commandables à l'extinction.

dulation de largeur d'impulsion» (MLI).

En réalité, l'interrupteur n'est pas un contact mobile comme le suggèrent les schémas, mais est constitué de composants semi-conducteurs de puissance **4a**. Le développement et les performances de ces interrupteurs ont, depuis les premiers convertisseurs, été liés aux progrès réalisés en électronique de puissance **Encadré 1**.

Le convertisseur ACS 5000 d'ABB utilise la technologie à cinq niveaux de tension.

Le niveau monte

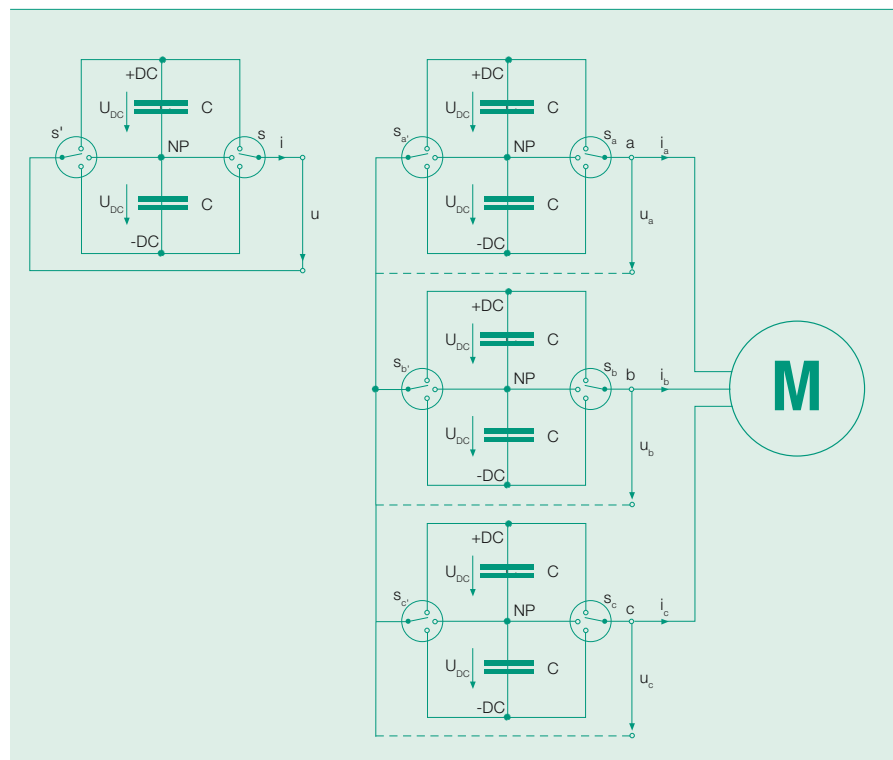
Même si la forme d'onde d'un onduleur de tension à deux niveaux **7a** peut varier en amplitude et en fréquence par modulation MLI, la forme de la tension de sortie est loin d'être sinusoïdale avec, pour conséquence, une distorsion importante du courant harmonique et, du même coup, des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement du moteur. Pour améliorer la forme d'onde, une solution consiste à augmenter le nombre de niveaux de tension.

Encore par analogie, cela équivaut à améliorer la résolution d'un écran d'ordinateur pour rendre l'image plus nette.

Autre raison qui pousse à accroître le

nombre de niveaux : la tension de sortie maximale réalisable avec les onduleurs à deux niveaux et les semi-conducteurs de puissance modernes ne dépasse pas 2,3 kV, ce qui est in-

5 Schéma du nouvel onduleur à cinq niveaux (gauche) et nouvel entraînement triphasé complet à neuf niveaux de tension entre phases



6 Le convertisseur ACS 5000 d'ABB utilise la technologie à cinq niveaux de tension qui fournit au moteur neuf niveaux de tension entre phases.



Produits

suffisant pour la gamme standard de moteurs MT.

La configuration à deux condensateurs et un interrupteur électronique à trois positions – appelée onduleur à trois niveaux pour le nombre de combinaisons de tension de sortie par phase – est connue depuis un certain temps.

3b est un schéma de principe d'un interrupteur à trois positions. Ce circuit doit commuter l'un des trois points de connexion des condensateurs sur la sortie dans les deux sens du courant²⁾. Pour des valeurs assignées de tension et de courant, ABB a standardisé cet interrupteur 4b sous la forme d'un module de puissance PEBB (*Power Electronic Building Block*). Cette standardisation lui permet de réutiliser les mêmes modules PEBB dans différentes applications, d'acquies rapidement un précieux retour d'expérience et de proposer aux clients des conceptions parfaitement au point.

Depuis près d'une décennie, ces modules de puissance sont utilisés pour différents produits et systèmes, y compris les convertisseurs des variateurs de vitesse (ex., ACS 1000 et ACS 6000), les systèmes de stockage d'énergie et les systèmes de qualité du courant électrique.

Onduleurs à cinq niveaux

Depuis un certain temps, la communauté scientifique cherche à élaborer une solution combinant un nombre accru de condensateurs et des circuits électroniques toujours plus complexes. Jusqu'ici, les solutions proposées

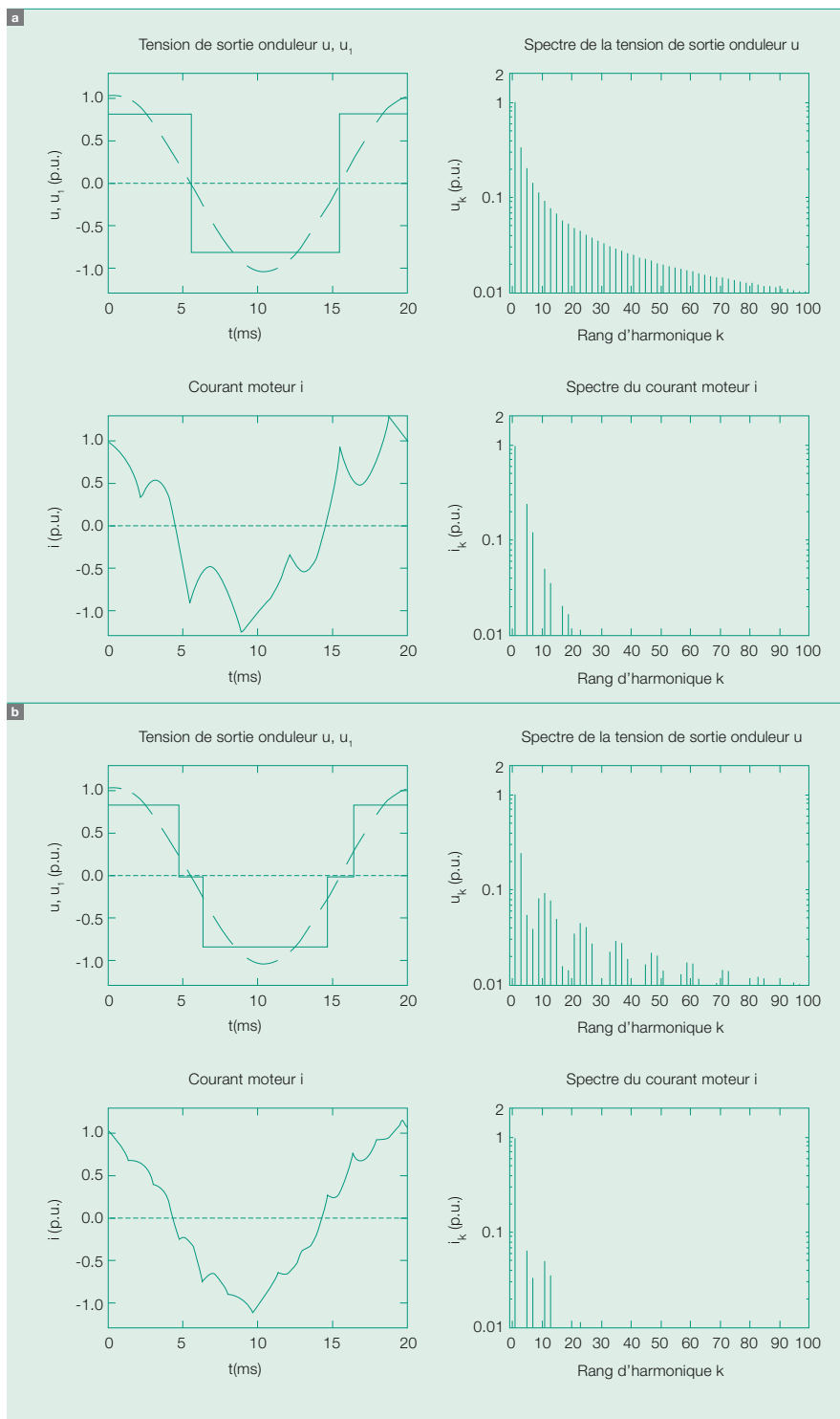
Variateurs de vitesse ABB

ABB, leader mondial de la variation de vitesse, propose une gamme complète de variateurs pour les applications de 0,12 kW à plus de 100 MW.

Ces produits sont destinés aux marchés de l'énergie et de l'eau, de même qu'à de nombreux secteurs industriels : ciment, extraction minière et minerais, chimie, pétrole & gaz, marine, métallurgie et papier.

Pour en savoir plus, rendez-vous sur www.abb.com/drives.

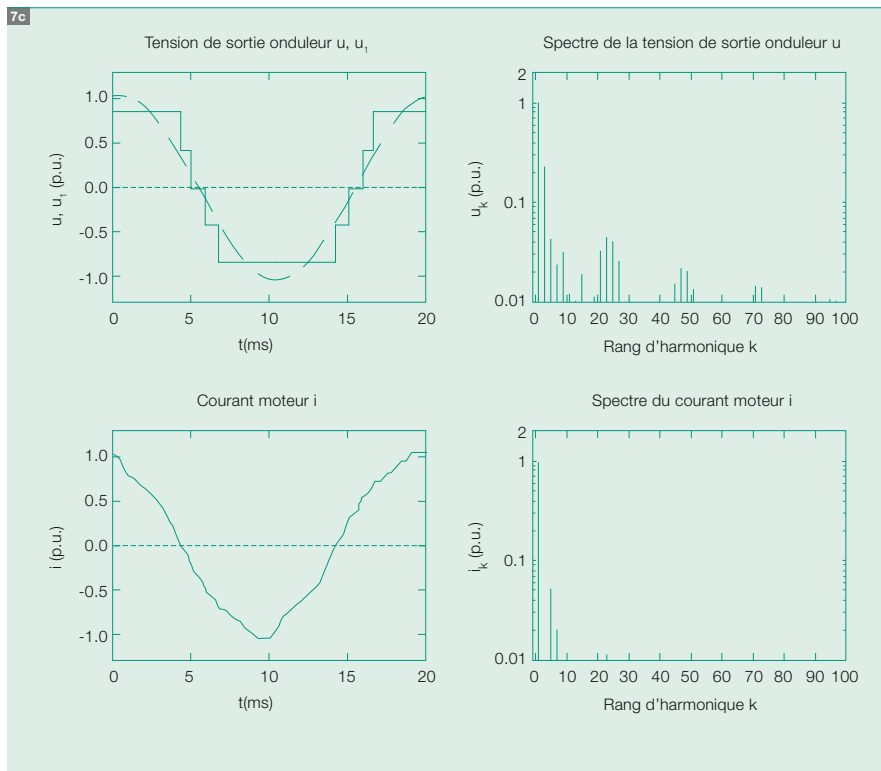
7 Comparaison des formes d'onde des onduleurs à deux a, trois b et cinq niveaux c. En augmentant le nombre de niveaux, on améliore considérablement la forme d'onde, même à la fréquence de commutation minimale.



étaient généralement incompatibles avec les technologies existantes de stockage d'énergie sur condensateurs et les propriétés des semi-conducteurs du marché. De surcroît, ces solutions réutilisaient peu les modules de puissance standards et leur fiabilité était

sujette à caution au vu du grand nombre de constituants.

Pour le dernier-né de sa famille de convertisseurs de fréquence MT, l'ACS 5000, les ingénieurs ABB sont repartis de produits traditionnels à



base de thyristors comme les cyclo-convertisseurs et, avec les modules de puissance à trois niveaux standards illustrés en 4b, ont imaginé une solution d'une simplicité étonnante pour un onduleur à cinq niveaux de tension de sortie (et donc neuf niveaux entre phases) 8. L'idée était d'appliquer la technologie éprouvée à trois niveaux à la connexion étoile d'un système électrique, indépendamment sur chaque phase.

Le schéma de principe 5 est dérivé respectivement des modules de puissance identiques pré-existants S et S'.

Pourquoi cinq niveaux de tension ?

7c compare la forme de l'onde de tension entre phases d'un onduleur à deux niveaux et d'un onduleur à trois niveaux à celle du nouveau convertisseur à cinq niveaux. L'onduleur à cinq niveaux utilisé dans l'ACS 5000 6 fournit au moteur neuf niveaux de tension entre phases 8. Rien qu'en examinant la forme d'onde, on s'aperçoit que le nouvel onduleur à cinq niveaux produit une tension de sortie beaucoup plus proche de l'onde sinusoïdale pure, à tel point qu'on peut désor-

mais utiliser des moteurs conçus pour un démarrage direct sur le réseau sans aucun déclassement. Cette solution est optimale pour un convertisseur 6 kV.

Reste une question : l'ajout de niveaux de commutation supplémentaires permettrait-il d'améliorer encore la forme d'onde ? Oui, mais au prix d'une complexité considérable, hors de proportion avec les gains escomptés ! Surtout, la fiabilité du variateur se dégraderait du fait du nombre accru de composants.

Des solutions éprouvées

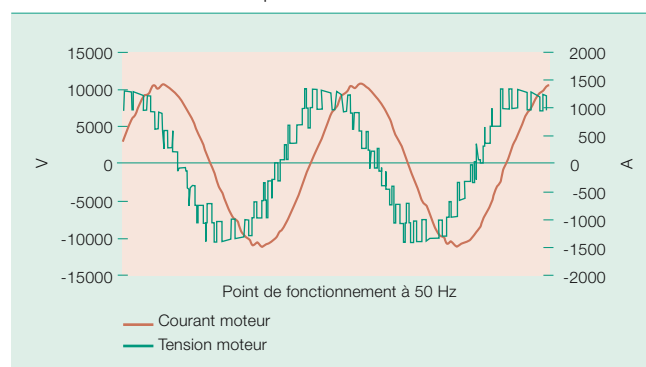
ABB a développé une solution d'une simplicité déconcertante pour créer

Un module PEBB pour 5 niveaux de tension s'insère aisément dans l'armoire du convertisseur.



des ondes de tension quasi-sinusoïdales avec un convertisseur de fréquence élaboré essentiellement à partir de composants existants et fiabilisés. La technologie éprouvée de l'onduleur à trois niveaux est réutilisée dans une configuration innovante qui autorise cinq niveaux de tension par phase, soit neuf niveaux entre phases. Le recours à des modules de puissance standardisés est une des clés de ces excellentes performances. Les moteurs MT normalisés peuvent désormais être exploités au maximum de leur rendement avec un convertisseur moins complexe.

8 Un convertisseur à cinq niveaux de tension fournit au moteur neuf niveaux de tension entre phases.



Pieder Jörg
Gerald Scheuer
Per Wikström

ABB Switzerland Ltd.
Turgi (Suisse)
pieder.joerg@ch.abb.com
gerald.scheuer@ch.abb.com
per.wikstroem@ch.abb.com

Note

2) A la différence de la plupart des composants semi-conducteurs de forte puissance qui ne conduisent les courants que dans un sens.