



Les systèmes de mesure du courant électrique investissent le domaine de l'électro-extraction. D'habitude, la mesure de courants continus atteignant 500 kA s'effectue avec des capteurs de courants à effet Hall de haute technicité, mais lourds (jusqu'à 2 tonnes pour des courants forts) et volumineux.

Certes fiables et précis, ces appareils n'en restent pas moins complexes, difficiles à installer et à mettre en ser-

vice. Et gare aux risques d'erreurs dues aux champs magnétiques asymétriques ou aux parasites provenant de conducteurs voisins !

Grâce à la fibre optique, ABB a développé un capteur qui révolutionne la mesure de courants continus intenses en conciliant précision, compacité, légèreté et simplicité de conception.

La mesure du courant à la fibre optique

Un nouveau capteur ABB pour l'électro-extraction

Klaus Bohnert

Peter Guggenbach

La fibre optique a énormément contribué à la montée en puissance et en débit des réseaux de communication de la planète. Naguère cantonnée aux télécoms, elle trouve aujourd'hui sa place dans une multitude d'applications, notamment de détection et de mesure.

Les capteurs à fibre optique, dont les principaux constituants sont d'excellents isolants, insensibles aux perturbations électromagnétiques, se prêtent parfaitement à la mesure de courants et de hautes tensions dans les postes électriques en remédiant à la lourdeur des transformateurs de mesure traditionnels.

Dans ce domaine, ABB fait figure de pionnier: des années durant, il a fait progresser cette technologie en étroite partenariat avec les entreprises d'électricité européennes et nord-américaines. Cette synergie lui a d'ailleurs permis de bien cerner les besoins de ses clients.

Pour autant, l'emploi de capteurs de courant optiques ne se limite pas à la filière électrique. ABB est en effet persuadé que ces appareils procureront aussi d'énormes avantages au secteur de l'électro-extraction.

Là, les exigences des industriels portent sur des capteurs de courant continu extrêmement précis ($\pm 0,1\%$) pour piloter et surveiller leurs processus et opérations. La production d'aluminium, de cuivre, de manganèse, de

zinc, d'acier et de chlore est très énergivore: il n'est pas rare qu'une ligne de cuves d'aluminium fonctionne à une tension de 1000 VCC et à une intensité de plusieurs centaines de milliers d'ampères. Puiser cette énorme quantité d'électricité du réseau alternatif impose l'interconnexion d'un grand nombre de redresseurs.

ABB fait figure de pionnier dans le développement des capteurs à fibre optique pour la mesure de courants et de hautes tensions dans les postes électriques.

En optimisant l'existant, ces industriels peuvent à la fois réduire leur facture énergétique, surveiller leur consommation réelle et piloter ainsi leur processus avec plus de précision. Il faut savoir qu'une erreur de mesure de 0,1% à 500 kA entraîne un écart de 0,5 MW, soit l'électricité nécessaire pour alimenter 1000 foyers.

Capteur de courant à effet Hall

Depuis toujours, la mesure du courant continu en électro-extraction exploite l'effet Hall¹⁾. Un bon capteur de courant à flux nul **■** se compose d'un circuit magnétique entourant un jeu de barres. Un certain nombre de cellules

Hall, glissées dans l'entrefer le long du circuit, détectent le champ magnétique. Leurs signaux alimentent des amplificateurs de courant à gain élevé dont les sorties traversent les bobines encerclant le circuit magnétique. Celles-ci créent un champ magnétique qui compense le champ du courant primaire. La somme des courants secondaires est alors proportionnelle au courant primaire.

Malgré sa très grande précision, ce type de capteur est pénalisé par sa complexité et son poids (jusqu'à 2 tonnes). Il exige en outre des montages et des réglages sophistiqués de façon à éviter les erreurs de champ asymétrique et les perturbations engendrées par les jeux de barres situés à proximité.

C'est pour pallier ces inconvénients et bien d'autres qu'ABB a développé son nouveau capteur de courant à fibre optique «FOCS».

Optique ou effet Hall?

Comparativement à un capteur de courant continu à effet Hall, le capteur optique d'ABB l'emporte en per-

Rappel

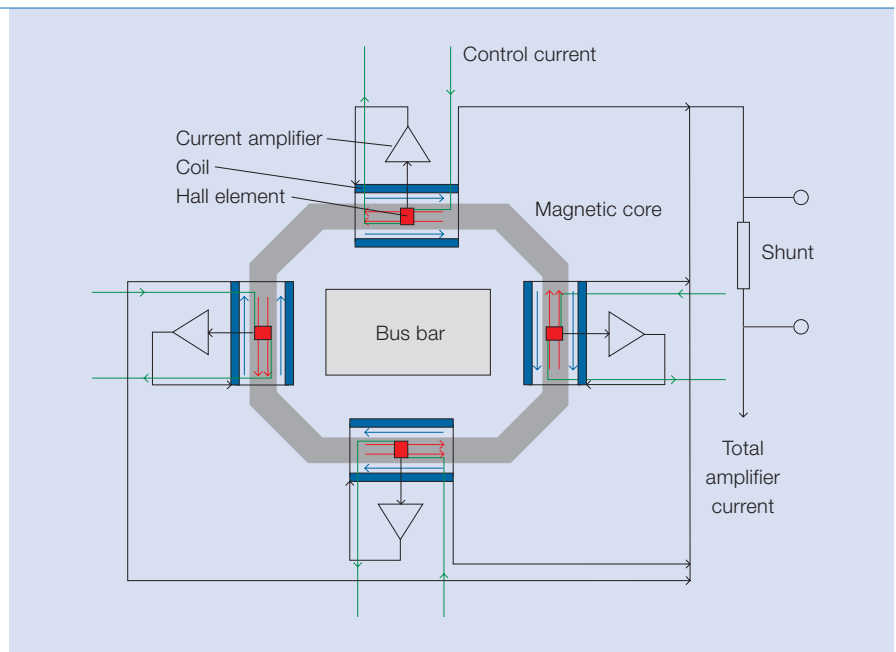
1) Effet Hall: en présence d'un champ magnétique, les charges positives et négatives traversant un matériau semi-conducteur sont déviées en sens opposé (force de Lorentz), créant une différence de potentiel proportionnelle au champ magnétique, appelée tension de Hall.

■ Capteur de courant continu à effet Hall

Deux capteurs de courant continu à effet Hall classiques pour 400 kA



Principe de fonctionnement d'un capteur de courant à flux nul



performances, en fonctionnalités, en légèreté et en compacité; son installation et sa mise en service sont en outre très simples et rapides. En particulier, les distributions complexes du champ ou les forts courants voisins n'ont pas d'incidence sur le capteur; d'où une plus grande liberté de choix dans son implantation.

Concrètement, ce type de capteur satisfait pleinement les clients en quête de produit :

- installé et mis en service en l'espace de quelques heures (non de jours);
- considérablement simplifié par rapport aux technologies classiques;
- insensible aux distributions complexes du champ magnétique et aux perturbations créées par les jeux de barres voisins;
- jusqu'à 10 fois plus précis;
- conservant sa précision de mesure sur une vaste plage de température;
- disposant d'une excellente stabilité à long terme;
- dont la bande passante élevée garantit une réponse rapide aux ondulations résiduelles et transitoires de courant;
- capables de traiter des courants continus aussi bien unidirectionnels que bidirectionnels jusqu'à ± 500 kA ($\pm 20\%$ de surintensité);
- très économes en énergie.

Le capteur de courant FOCS

Ce capteur de mesure de courants continus intenses **2** est l'héritier d'un capteur ABB développé pour les pos-

tes à haute tension. En électro-extraction, les dimensions latérales des jeux de barres sont bien plus imposantes que celles rencontrées dans les postes HT. Il fallait donc revoir la conception de la tête de mesure.

Le capteur exploite l'effet Faraday (cf. encadré page 9). Il se compose schématiquement **3** d'un module optoélectronique et d'une fibre optique à extrémité unique enveloppant le conducteur de courant [1].

Le nouveau capteur de mesure de courants continus intenses exploite l'effet Faraday.

Le module optoélectronique intègre une source lumineuse à semi-conducteur, un circuit de détection et un circuit de traitement numérique du signal (DSP). Deux ondes lumineuses à polarisation linéaire et orthogonale se propagent de la source de lumière dans la fibre de mesure, par l'intermédiaire d'une fibre d'interconnexion. Un retardateur de phase à fibre optique les convertit ensuite en ondes à polarisation circulaire gauche et droite, à l'entrée de la fibre de mesure.

Soumises au champ magnétique du courant, ces ondes lumineuses circulent à différentes vitesses dans la fibre de mesure, ce qui induit une différence de chemin optique ou, phénomène équivalent, un écart de phase noté $\Delta\phi$.

En bout de fibre, les ondes réfléchies refont le trajet optique inverse pour rejoindre l'optoélectronique. Les deux faisceaux de retour créent un phénomène d'interférence dans le circuit de détection.

Enfin, le DSP convertit leur écart de phase optique en signal numérique.

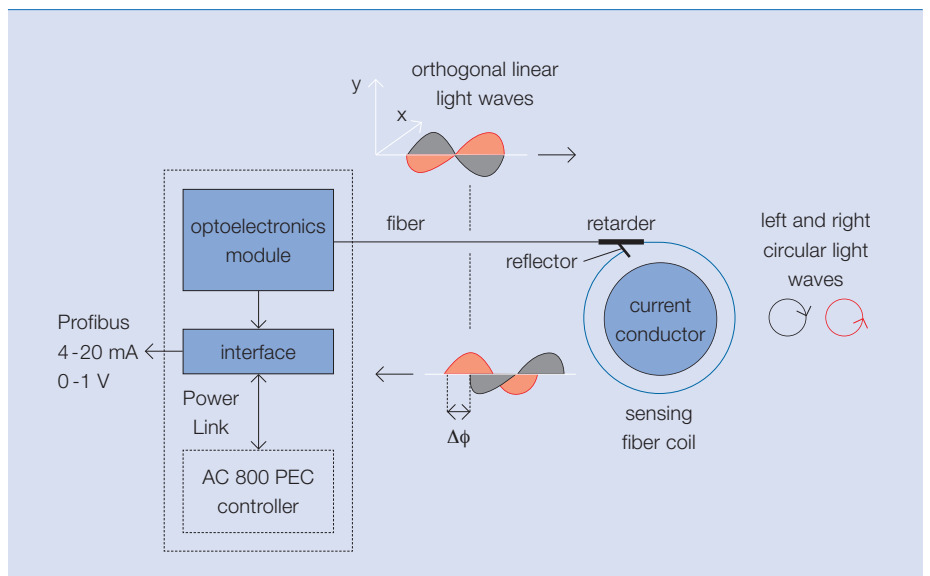
L'écart de phase aller et retour total est proportionnel à l'intégrale du champ magnétique le long du chemin fermé créé par la boucle de fibre et donne une mesure directe du courant. Le signal est indépendant de la distribution du champ magnétique, à condition que le nombre de boucles de fibres de mesure soit un entier. (Pour les courants forts de l'électro-extraction, une seule boucle fait souvent l'affaire.) La mesure est insensible aux champs magnétiques perturbateurs provenant de conducteurs hors de la boucle et ne dépend absolument pas du diamètre ou de la forme des boucles de fibre.

La différence de temps d'aller et retour entre les ondes lumineuses à polarisation circulaire gauche et droite est comprise entre 10^{-21} et 10^{-15} secondes, selon le courant. Sachant qu'il est impossible de réaliser une mesure directe, la différence de chemin ou de phase, laquelle correspond à une fraction de la longueur d'onde de la fibre optique (820 nm), se mesure avec une extrême précision. Pour cela, les ondes sont superposées pour donner un

2 FOCS, nouveau capteur de courant à fibre optique d'ABB



3 Les différents constituants du capteur optique ABB de mesure des courants continus forts



phénomène d'interférence constructive ou destructive, selon leur retard relatif. La plus petite différence de chemin mesurable est 100 fois inférieure au diamètre d'un atome d'hydrogène et équivaut à un courant de 0,25 A (pour une seule boucle de fibre et une durée de mesure de 1 seconde). A l'heure actuelle, la valeur maximale mesurable, correspondant à une différence de chemin sur toute la longueur d'onde, atteint ± 600 kA (soit ± 500 kA + 20% de surintensité).

L'un des avantages de la bobine de mesure exploitée en réflexion réside dans la parfaite résistance de la sortie du capteur aux chocs et vibrations. Dans ce mode, les états de polarisation des ondes lumineuses permutent à l'extré-

mité de la bobine. Résultat, les déphasages réciproques induits par les vibrations s'annulent et les déphasages magnéto-optiques non réciproques doublent durant le parcours aller et retour.

Tête de mesure

Pour garantir la précision du capteur optique de courant, il faut impérativement protéger la tête de mesure. La moindre contrainte perturberait en effet les ondes lumineuses et, ce faisant, le décalage de phase magnéto-optique détecté. Même le retrait du revêtement protecteur de la fibre, à basses températures, est inacceptable.

ABB a donc mis au point une technique exclusive de conditionnement de la fibre de mesure dans un «flexi-

ble» ⁴ facilitant le transport et l'installation; cette méthode offre une excellente précision ($\pm 0,1\%$) sur une plage de température de -40°C à $+85^\circ\text{C}$.

L'influence de la température sur l'effet Faraday (variation de 0,7% sur 100°C) est intrinsèquement annulée par l'action opposée du retardateur.

Autre avantage: l'étalonnage du capteur, effectué en usine, n'est en rien

La fibre de mesure est conditionnée dans un «flexible» qui facilite le transport et l'installation, et offre une excellente précision sur une large plage de température.

dégradé par le transport et la manutention; après installation, il est donc inutile de recalibrer sur site l'appareil.

Le flexible renfermant la fibre de mesure se loge dans un boîtier de tête de capteur modulaire constitué de plusieurs segments en résine époxyde renforcée de fibres. L'ensemble s'adapte aisément aux différentes sections de jeux de barres en jouant sur la longueur des segments droits ⁵ et le capteur peut être installé sans ouvrir les jeux de barres ⁶.

Optoélectronique

La conception du module optoélectronique s'apparente à celle des gyroscopes optiques, qui ont remplacé leurs homologues mécaniques dans bien des systèmes de navigation performants et ont prouvé leur aptitude à satisfaire des applications exigeantes tant en vol que sur terre et en mer.

Le processeur DSP intégré bénéficie d'une remarquable précision et d'une excellente stabilité à long terme. De plus, le circuit de détection en boucle fermée annule le décalage de phase optique induit par le courant et fournit une sortie rigoureusement linéaire sur toute la plage dynamique.

Cette optoélectronique s'intègre dans le contrôleur à électronique de puissance AC 800PEC d'ABB ⁷ que l'on peut installer à 70 m de distance max de la tête de mesure. Le capteur peut constituer un élément du système de conversion de puissance ABB ou un appareil autonome. En sortie, le mo-

L'effet Faraday

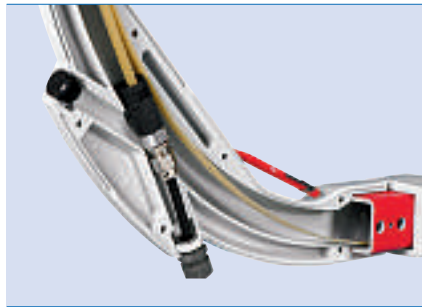
La mesure optique du courant utilise en général la polarisation rotatoire optique ou «effet Faraday» (du nom du physicien anglais qui en découvrit le principe en 1845), selon lequel le plan de polarisation d'une lumière rectiligne traversant un matériau (morceau de verre, par exemple) placé dans un champ magnétique et se propageant parallèlement à ce champ, tourne. Cette onde linéaire peut aussi prendre la forme de deux faisceaux parallèles, à polarisation circulaire droite et gauche; ceux-ci ne sont pas transmis à la même vitesse dans le champ magnétique, ce qui explique l'écart de phase engendrant la rotation (d'un angle ϕ_F) de la lumière résultante. Dans un capteur optique de courant, la lumière suit un parcours fermé défini par la fibre entourant le conducteur. En mode réflexion, l'écart de phase est donné par la relation:

$$\Delta\phi_F = 4VN \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = 4VNI$$

- V = constante de Verdet qui mesure l'ampleur de l'effet Faraday en fonction du matériau;
- N = nombre de spires de fibre optique autour du conducteur;
- I = courant.

Ce chemin fermé fait que le signal dépend essentiellement du courant et du nombre de spires de la fibre, et non du diamètre de la boucle.

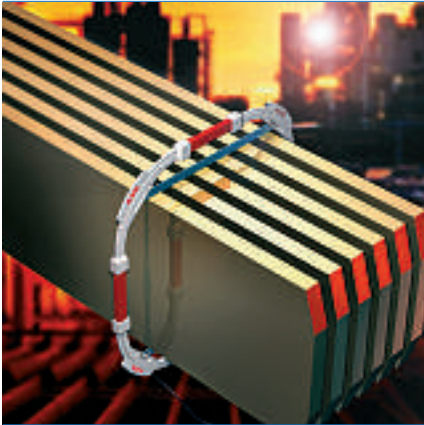
⁴ Partie du boîtier renfermant la tête de mesure: la fibre est nichée dans un flexible robuste.



⁵ Modulaire, le boîtier de la tête de mesure s'adapte sans peine à diverses sections de conducteurs.



6 Boîtier de la tête de mesure monté autour des jeux de barres sous tension



dule optoélectronique délivre un signal numérique de résolution 24 bits, par une interface synchrone. Ce dernier est transmis au contrôleur AC 800PEC sous protocole optique haut débit PowerLINK d'ABB.

Pour les applications autonomes, un signal numérique est aussi envoyé sur le bus de terrain PROFIBUS DP esclave. Sont également fournies des sorties courant 0(4)–20 mA et tension 0(0,2)–1 V. Le traitement des signaux numériques (historisation des données, analyse des harmoniques) est à la demande du client. L'intégrité fonctionnelle de l'appareil est contrôlée par des autotests internes, puis rapatriée au contrôleur maître.

Les nombreuses innovations ABB liées au développement du FOCS ont donné lieu au dépôt ou à l'obtention d'une dizaine de brevets.

Avantages clients et points forts du produit

Si on le compare aux capteurs de courant continu à effet Hall, le capteur optique multiplie les avantages:

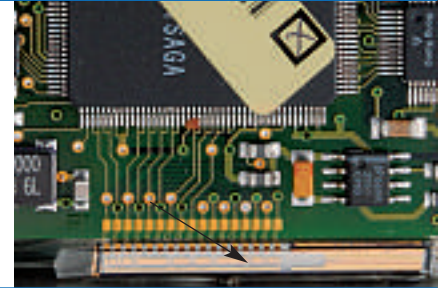
- *Il est beaucoup plus facile et rapide à installer;*
- *Le centrage magnétique de la tête ne demande ni effort, ni précaution particulière:* le client est totalement libre de placer son capteur à sa guise;
- *L'implantation des têtes de mesure ne connaît pratiquement aucune restriction.* Le capteur étant facilement installé, l'instrumentation industrielle existante peut être vite remplacée;
- *Les erreurs dues à la distribution asymétrique du champ et la sur-*

7 Contrôleur à électronique de puissance AC 800PEC

a) Le contrôleur AC 800PEC d'ABB abrite le module optoélectronique du capteur qui détecte les écarts de phase magnéto-optiques, selon le principe des gyroscopes optiques.



b) La pièce maîtresse du circuit de détection est un modulateur de phase à microguide d'ondes fait de niobate de lithium.



charge magnétique sont supprimées;

- *La tête de mesure a été considérablement simplifiée,* ce qui réduit d'autant les risques de défaillance;
- *Le capteur est capable de traiter des champs magnétiques bidirectionnels.* Une inversion locale du sens du champ, en raison d'intenses courants voisins, ne fausse en aucun cas la sortie du capteur. Mieux, le capteur signale les inversions de courant.
- *La large bande passante* (fréquence d'échantillonnage de 4 kHz) permet de rétablir les composantes alternatives du courant (ondes résiduelles et transitoires rapides) et autorise des temps de réponse très courts pour le pilotage du process et l'analyse des harmoniques. Ce capteur offre donc aux lignes à courant continu élevé de nouvelles possibilités d'acquisition de données.
- *La tête de mesure, parfaitement diélectrique, est sécurisée.* L'électronique de traitement du signal est totalement isolée galvaniquement des jeux de barres.
- *La consommation du capteur optique est négligeable* par rapport à celle des capteurs classiques qui englobent plusieurs kilowatts.

Points forts:

- Traitement des courants unidirectionnels et bidirectionnels jusqu'à ± 500 kA (surintensité ± 100 kA)
- Précision de $\pm 0,1\%$, sur 1 à 120% de la pleine échelle
- Fréquence d'échantillonnage de 4 kHz
- Température de service de la tête de mesure: -40 à $+85$ °C; de l'électronique de commande: -20 à

$+55$ °C (0 à 65 °C avec un coupleur PROFIBUS)

Perspectives

Avec son nouveau capteur optique de courant, ABB vise les marchés de la mesure, du contrôle-commande et de la protection des postes HT. Modèle de compacité et de légèreté, cet appareillage peut facilement se fondre dans l'existant (disjoncteurs, traversées...), réduisant ainsi les contraintes d'encombrement et de coût.

Ce capteur a aussi son intérêt pour les systèmes à courant continu haute tension (CCHT) servant au transport de l'électricité sur de longues distances. Le ferroviaire est un autre domaine porteur. ABB a d'ailleurs installé quelques dizaines de capteurs, basés sur une version prototype, dans des systèmes de protection des sous-stations des chemins de fer italiens.

Car ce n'est pas un effet d'optique: le FOCS d'ABB marque un réel progrès dans la mesure de courant!

Klaus Bohnert

ABB Switzerland Ltd., Corporate Research
klaus.bohnert@ch.abb.com

Peter Guggenbach

ABB Switzerland Ltd., High Power Rectifiers
peter.guggenbach@ch.abb.com

Bibliographie

[1] K. Bohnert, G. Gabus, J. Nehring, H. Brändle: Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor. Journal of Lightwave Technology 20 (2002) 2, 267–276.