



Roland Gallay,  
*Dr ès sciences, montena components SA*

*Moins encombrants et plus performants*

# Les nouveaux condensateurs arrivent

Connus de longue date, les condensateurs de puissance ont néanmoins subi, ces dernières années, des développements technologiques intenses. La raison majeure de cet effort réside dans la généralisation de leur usage dans les convertisseurs de traction des bateaux et des locomotives. Leur encombrement et leur poids excessifs constituaient à cet égard un désavantage significatif.

## Changement de cap

Suite au désinvestissement des Etats et à la surcapacité mondiale, il apparaît que le prix moyen des locomotives a chuté de moitié depuis le début des années 90. Ce mouvement a entraîné tout naturellement une forte pression sur les coûts des composants. Seul un développement technologique intensif était en mesure de relever ce défi. Et avec succès: en analysant aujourd'hui le prix des condensateurs par unité d'énergie, nous constatons qu'en cinq années la baisse des prix a atteint un facteur 3, alors que, pendant cette même période, le volume des appareils se réduisait de moitié.

Ce changement est dû à un changement radical de technologie. Les deux films métalliques parallèles du condensateur classique sont remplacés par de minces couches métalliques évaporées sur des

feuilles de polymère. Ces films métallisés sont ensuite bobinés. Les deux électrodes métalliques, auxquelles la tension est appliquée, sont isolées par le polymère qui fait office de diélectrique.

Les condensateurs sont des composants électriques passifs, tout comme les résistances et les inductances. Ils sont constitués de deux électrodes conductrices, séparées par une ou par plusieurs couches diélectriques isolantes. Pour des raisons de productivité, le système diélectrique est enroulé sous forme de bobines plates ou rondes. Dans le cas d'applications de puissance avec des capacités élevées, le condensateur est constitué de bobines connectées en parallèle — ou en série — pour les applications à haute tension. Le condensateur a pour fonction d'emmagasiner puis de restituer les charges électriques au gré des besoins du circuit électronique. Il permet d'isoler une partie du circuit, de stocker de l'énergie et de fournir rapidement les puissances nécessaires. Il existe, selon les applications en vigueur, plusieurs types de condensateurs, qui assument les fonctions suivantes: stockage d'énergie, filtrage, amélioration du facteur de puissance, protection, commutation et impulsion.

## Le rôle des diélectriques

Pour obtenir une diminution substantielle du volume des appareils, il fallait orienter la recherche vers le développement de diélectriques de constante et de rigidité élevées. Le pas suivant consistait à réduire l'épaisseur des armatures métalliques. On pouvait même la ramener à zéro en remplaçant les armatures par des électrodes

obtenues par déposition de couches métalliques de quelques nanomètres d'épaisseur.

Malheureusement, une règle générale de physique, mise en évidence dans un diagramme de Cole-Cole, veut que les matériaux dotés de constantes diélectriques élevées subissent des pertes diélectriques importantes. Et puis, de manière générale, il apparaît que les matériaux dotés d'une constante diélectrique élevée présentent une faible rigidité diélectrique.

## Recours aux huiles

Que faire? En fait, les matériaux utilisés pour l'isolation diélectrique entre les armatures sont choisis en fonction de la tâche que doit remplir le condensateur. Chaque diélectrique a un comportement caractéristique qui dépend de la fréquence, de la température et de la nature des chocs électriques subis. Pour des applications alternatives, par exemple, on évite dans la mesure du possible d'utiliser comme diélectrique le papier ou le polyéthylène téréphtalate (PET), qui provoquent des échauffements excessifs du composant. A cet égard, le polypropylène se comporte de manière plus favorable.

En revanche, si le condensateur est soumis à des chocs ou à des impulsions électriques, on évite d'utiliser du polypropylène, dans lequel la formation de charges d'espace favorise des claquages précoces lors des inversions de polarisation. Des mélanges diélectriques de papier et de polypropylène sont plus adéquats. Le polypropylène reste toutefois le diélectrique le plus utilisé dans l'industrie du condensateur. Il bénéficie d'ailleurs du développement réalisé dans l'industrie de l'emballage où il joue un rôle considérable.

L'imprégnant est un autre composant essentiel des condensateurs. Son choix est déterminé par l'application visée. Ce peut être de l'huile végétale, minérale ou aromatique. La première présente l'avantage d'une constante diélectrique et d'un point d'éclair élevés, ainsi que d'un impact écologique très faible. En revanche, sa rigidité diélectrique et son facteur de perte sont moins performants. L'huile végétale est principalement utilisée dans les condensateurs d'impulsion et de filtrage DC (filtres intermédiaires et résonants).

L'huile aromatique convient très bien aux applications alternatives. Elle présente en outre un grand pouvoir d'absorption des atomes d'hydrogène produit lors de décharges partielles. Cette propriété permet d'éviter la formation de bulles de gaz qui affaiblissent la tenue électrique du condensateur. Ces huiles sont néanmoins délicates à mettre en oeuvre à cause de leur agressivité chimique.

### électrodes autocicatrisantes

Le gaz est utilisé pour les applications qui ne tolèrent pas d'huile. Sa rigidité diélectrique réduite doit être compensée par de plus grandes distances d'isolation. La répartition des champs électriques aux interfaces de différents milieux d'un mélange se fait selon les constantes diélectriques en régime alternatif et en fonction des conductivités en régime continu. Dans un gaz, le champ électrique est au moins deux fois plus intense que dans l'huile.

Les électrodes constituent un autre composant déterminant des condensateurs. Elles sont réalisées avec des films d'aluminium extrêmement fins ou par des applications de fines couches métalliques sur la surface du diélectrique. L'avantage des électrodes obtenues par métallisation réside dans leur capacité d'autocicatrisation. Si un point faible de l'isolation diélectrique provoque un court-circuit entre les électrodes, l'intensité du courant induit une évaporation des électrodes dans le voisinage du défaut. Après la suppression du courant, souvent au moyen d'un fusible, le défaut se retrouve complètement isolé électriquement.

En application alternative, c'est le zinc qui est utilisé pour la métallisation, car l'aluminium se dégrade par réaction électrochimique. Le zinc possède une résistivité supérieure, ce qui accroît les pertes ohmiques et améliore la dynamique du phénomène d'autocicatrisation. La maîtrise de ce phénomène est particulièrement délicate. Elle dépend de la résistivité et du coefficient d'adhésion de la couche métallique, ainsi que de la température de sublimation du métal.

### Phénomènes à gérer

Avec le papier, l'autoextinction de l'arc durant la décharge électrique ne posait guère de problème, même si elle dégageait une certaine quantité de gaz. Avec le polypropylène, les champs électriques deviennent beaucoup plus importants, tout comme la quantité d'énergie qui doit être gérée lors des phénomènes de "claquage". Pour résoudre ce problème, les auteurs du projet suisse ont structuré l'électrode en un grand nombre de surfaces élémentaires, reliées entre elles par des fusibles. Dans un condensateur de puissance, le nombre de ces surfaces peut être proche du million.

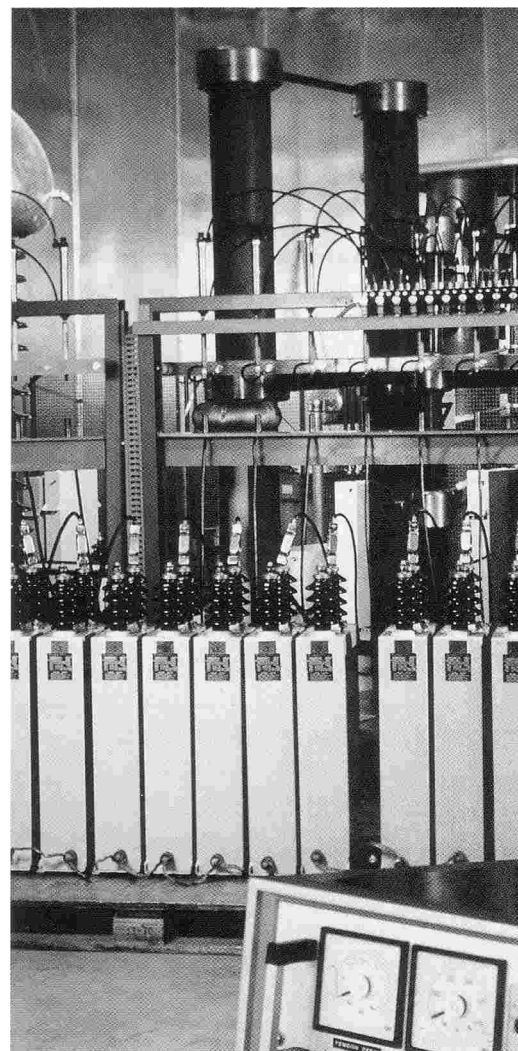
Maîtrise des surtensions et des échauffements, étanchéité, résistance mécanique aux chocs et aux vibrations, isolation des électrodes, comportement en cas de températures extrêmes et d'atmosphères corrosives: la mise au point de condensateurs plus performants suppose la connaissance et la maîtrise de nombreux processus techniques. La sécurité de fonctionnement est essentielle. Il faut prévenir les risques d'explosion et de pollution. Or il est incontestable que des progrès remarquables ont été réalisés dans les domaines de la fiabilité et de [a sûreté des condensateurs de puissance. Les appareils traditionnels comprennent plusieurs dizaines de bobines à armatures protégées par autant de fusibles. Le fonctionnement correct des fusibles est tributaire de plusieurs paramètres: énergie emmagasinée, inductivité du montage, résistivité.

Un claquage du diélectrique dans une bobine met en jeu d'importantes quantités d'énergie. Le fusible doit "fondre" avant que toute l'énergie du condensateur n'accède au défaut.

### Gardiens ou réseau

Le remplacement des armatures en feuilles d'aluminium par des électrodes métallisées permet de diviser le condensateur en de multiples capacités élémentaires. Ainsi, l'énergie qui entre en jeu lors d'un claquage du diélectrique a pu être ramenée de plusieurs centaines de joules à un joule seulement. Pour garantir un fonctionnement impeccable du processus d'autocicatrisation, chaque capacité élémentaire est désormais protégée par un ou par plusieurs fusibles.

Le risque de pollution environnementale par les condensateurs a été lui aussi considérablement réduit. Les produits toxiques, tels les PCB, ne sont plus utilisés dans les condensateurs modernes, tout comme les



Condensateurs de puissance "secs" en essai.



*L'Euro-Shuttle, qui tire les convois lourds sous la Manche, est équipé de nombreux condensateurs.*

huiles minérales ou les silicones, encore très répandues dans les transformateurs. On leur a substitué des huiles végétales (colza, ricin, soja), dont le seuil d'inflammabilité est très élevé. Dans le domaine de la traction, les condensateurs sont des composants passifs qui convertissent l'énergie du réseau en un courant propre à entraîner les moteurs des locomotives, des trams ou des bateaux. Ils équipent les sous-stations qui jalonnent les lignes ferroviaires et alimentent l'électronique de puissance à bord des véhicules. Des progrès décisifs ont été réalisés ces dernières années dans la réduction de leur taille et, grâce à la mise en oeuvre des films diélectriques métallisés autocatrisants, en matière de sécurité et de fiabilité.

## Tensions variées

Dans la majorité des réseaux électriques, le choix de la tension et de la fréquence du courant d'alimentation est un héritage du passé. Autrefois, le niveau technologique des composants haute tension et des moteurs de puissance n'était pas suffisamment avancé pour assurer un fonctionnement à des tensions et à des fréquences élevées. Au début du siècle, en France, les premières lignes ferroviaires électrifiées transportaient du courant continu à 600 volts pour alimenter des moteurs à courant continu de 600 volts. Pour suivre l'évolution de la puissance des moteurs de traction, cette tension a été rapidement portée à 750, puis à 1500 et à 3000 volts.

D'autres pays ont porté leur choix sur une tension de 15 kilovolts et une fréquence de 16 hertz afin d'assurer une alimentation directe des moteurs séries. Or ces deux systèmes

présentent un inconvénient: ils ne correspondent pas aux valeurs adoptées pour les réseaux industriels. Entre-temps, les progrès techniques réalisés ont permis d'électrifier le réseau ferroviaire français avec une tension alternative de 25 kilovolts et 50 hertz. Aujourd'hui, les lignes ferroviaires sont le plus souvent alimentées à partir du réseau industriel haute tension triphasé 50 hertz. Tension et fréquence doivent être adaptées aux moteurs de traction. Ainsi, par exemple, la tension continue est obtenue au moyen d'un transformateur triphasé et d'un redresseur à diodes ou à thyristors.

## Filtrage

Le condensateur intervient au niveau du filtre de lissage de la tension de sortie du redresseur. Quant à l'alimentation monophasée, elle nécessite un onduleur à la sortie du redresseur. Quel que soit le montage choisi, des condensateurs sont indispensables pour la protection des semi-conducteurs et pour la mise en forme de la tension qui est envoyée dans la ligne (filtrage et absorption des harmoniques).

Des batteries de condensateurs sont installées dans les sous-stations pour compenser la puissance réactive générée par les machines à induction. Cet artifice permet d'éviter la dissipation d'énergie inutile dans les lignes électriques du réseau d'alimentation. La commande de commutation dans les convertisseurs statiques est assurée par des composants actifs semi-conducteurs (diodes, thyristors, IGBT, transistors bipolaires). Les commutations de la diode se déroulent de manière spontanée,

contrairement à [l'amorçage du thyristor qui peut être enclenché à volonté, mais dont le blocage est spontané. Pour provoquer le blocage d'un thyristor, il suffit d'ajouter un circuit auxiliaire équipé de condensateurs, d'inductances et de semi-conducteurs. On parle alors de commutation forcée.

Dans les véhicules de traction, les moteurs à excitation séries ont été progressivement remplacés par des dispositifs à excitation séparée. Les variateurs de courant continu, à l'origine des gradateurs à résistance et des contacteurs, puis des thyristors avec circuits d'extinction pour la commutation forcée, ont été finalement remplacés par des hacheurs à thyristors GTO, à l'exemple du TGV Sud-Est. Le moteur synchrone présente d'ailleurs une puissance bien supérieure à celle des moteurs à courant continu. Il peut être, à l'image du TGV Atlantique, triphasé et alimenté par un commutateur de courant à thyristors.

## Tensions stables

Aujourd'hui, les plus grandes puissances sont offertes par le moteur asynchrone à rotor en court-circuit. Il comporte plusieurs avantages décisifs: poids réduit, vitesse de rotation supérieure, entretien simplifié (pas de collecteur), restitution de l'énergie au réseau en cours de freinage. Ce moteur est alimenté par un onduleur de tension triphasé à modulation de largeur d'impulsions. Pour des raisons économiques, l'onduleur est aujourd'hui équipé de thyristors GTO.

Pour fonctionner de manière optimale, l'onduleur exige une tension continue parfaitement stable. Celle-ci est fournie par un convertisseur statique qui fonctionne en redresseur. La stabilité de la tension est assurée par l'insertion entre le redresseur et les onduleurs d'un circuit intermédiaire et d'un circuit absorbant. Le premier, qui fonctionne comme filtre passe-bas, est réalisé au moyen d'une batterie de condensateurs. Le second absorbe la deuxième harmonique du courant de ligne générée par le redresseur. Il est formé d'une self en série avec une batterie de condensateurs. Le courant et la tension aux bornes du condensateur du circuit d'absorption sont plus élevés que ceux du condensateur du circuit intermédiaire.

Lors de la commutation, le courant est bloqué par l'ouverture du circuit par le GTO. Pour éviter des variations de tension excessives aux bornes de ce composant, il est nécessaire de lui associer en parallèle un circuit "snubber" de faible inductivité dans lequel se trouve un condensateur. Un exemple, parmi d'autres, qui illustre le rôle central du condensateur dans le domaine de la traction électrique.

R. G.

### Références bibliographiques

H. Foch, Y. Cheron, M. Metz, T. Meynard: *L'évolution des convertisseurs statiques*, RGE 5, 48, 1992.

J. Leclercq: *L'électronique de puissance dans les véhicules de transport ferroviaire*, RGE 6, 55, 1992.

H. P. Eggenberger: *Locomotives à convertisseurs avec entraînement triphasé*, Revue ABB 10, 1990.

M. W. Carlen, R. Bruesch, R. Gallay: *Conference Proceeding Dielectric Materials, Measurements and Application*, Bath (GB), 1995.

## Partenaires efficaces

*La mise en oeuvre, couronnée de succès, de condensateurs plus légers, plus performants et plus écologiques sur les trains à grande vitesse est le fruit d'une collaboration exemplaire de trois partenaires: l'Université de Fribourg, le groupe Asea Brown Boveri et la société fribourgeoise montena components SA.*

Chez ABB, les travaux théoriques sur la modélisation de la segmentation de l'électrode ont débouché sur une nouvelle structure de segmentation. On y a aussi réalisé des expériences de vieillissement accéléré sous différentes tensions et températures avec des bobines de feuilles de polypropylène imprégnées. Les résultats de ces travaux seront utilisés pour l'élaboration d'un modèle de vieillissement des matériaux.

A l'Université de Fribourg, on a étudié la rigidité électrique des feuilles de polypropylène, compte tenu de la température, en présence d'huile d'imprégnation. Ces travaux, combinés avec des mesures calorimétriques réalisées chez Ciba-Geigy, à Marly, ont fourni de précieux enseignements sur le vieillissement des matériaux.

De son côté, la société montena components (anciennement Condis SA) a développé un condensateur doté d'un accroissement de densité énergétique d'un facteur de 1,8 et moyennant la garantie d'une durée de vie minimale de trente années. Des condensateurs avec une densité augmentée d'un facteur 2,5 fonctionnent depuis 1995 sur un convoi TGV. Grâce à un modèle de vieillissement accéléré de Weibull, les chercheurs de montena ont démontré que les résultats expérimentaux étaient conformes aux évaluations théoriques. Certaines mesures comptabilisent aujourd'hui plusieurs dizaines de milliers d'heures d'expérience.