

Sûrs, performants, écologiques

Transformateurs secs pour lignes
de distribution jusqu'à 72,5 kV

MARTIN CARLEN, MARIANO BERROGAIN – Le dernier-né des transformateurs de puissance ABB est un appareil de type sec destiné aux réseaux de répartition en haute tension, ce qui lui vaut l'appellation *HiDry*⁷² (pour *High-voltage Dry* et 72,5 kV). Libéré des contraintes de l'immersion dans l'huile, *HiDry*⁷² équipe aujourd'hui un grand nombre de postes électriques dont il facilite et sécurise l'installation dans n'importe quel bâtiment, notamment en ville et dans les espaces publics très fréquentés.

Photo

La nouvelle « arène » du football brésilien, en plein centre de Salvador de Bahia, abrite un poste de 69 kV équipé de transformateurs secs d'une puissance de 25 MVA.
Photo : World Cup Portal





Parmi les stades construits pour la Coupe du monde Brésil 2014 figure l'*Arena Fonte Nova*, à Salvador de Bahia, ville de 2,7 millions d'habitants bordant l'océan Atlantique, au nord-est du pays. Capable d'accueillir 55 000 spectateurs, ce nouveau temple du football se dresse en lieu et place de l'ancienne enceinte démolie en 2010, au cœur de la cité → [photo p. 69](#).

Le quartier était jusqu'ici alimenté en 69 kV par un poste électrique d'exté-

Les transformateurs secs évitent les traversées, les risques de pollution froide, l'huile inflammable et autres matières combustibles.

rieur, situé tout près du stade, dans une zone appelée à devenir un parc de loisirs. Profitant du chantier de démolition et de reconstruction, le distributeur d'énergie local décida d'intégrer un nouveau poste au stade. Par une heureuse coïncidence, ABB annonçait au même moment le lancement de son transformateur sec HiDry⁷² [1] pour lignes de distribution de 72,5 kV.

Les responsables du projet furent surpris d'apprendre que les transformateurs secs résistants au feu et antidéflagrants, traditionnellement employés en moyenne tension (MT), convenaient désormais aussi à la haute tension (HT) : la solution simplifiait la conception et la configuration du poste, réduisait les coûts et, sécurité oblige, levait tout souci d'implantation d'un poste électrique dans un stade fréquenté par des dizaines de milliers de spectateurs !

Principes de construction

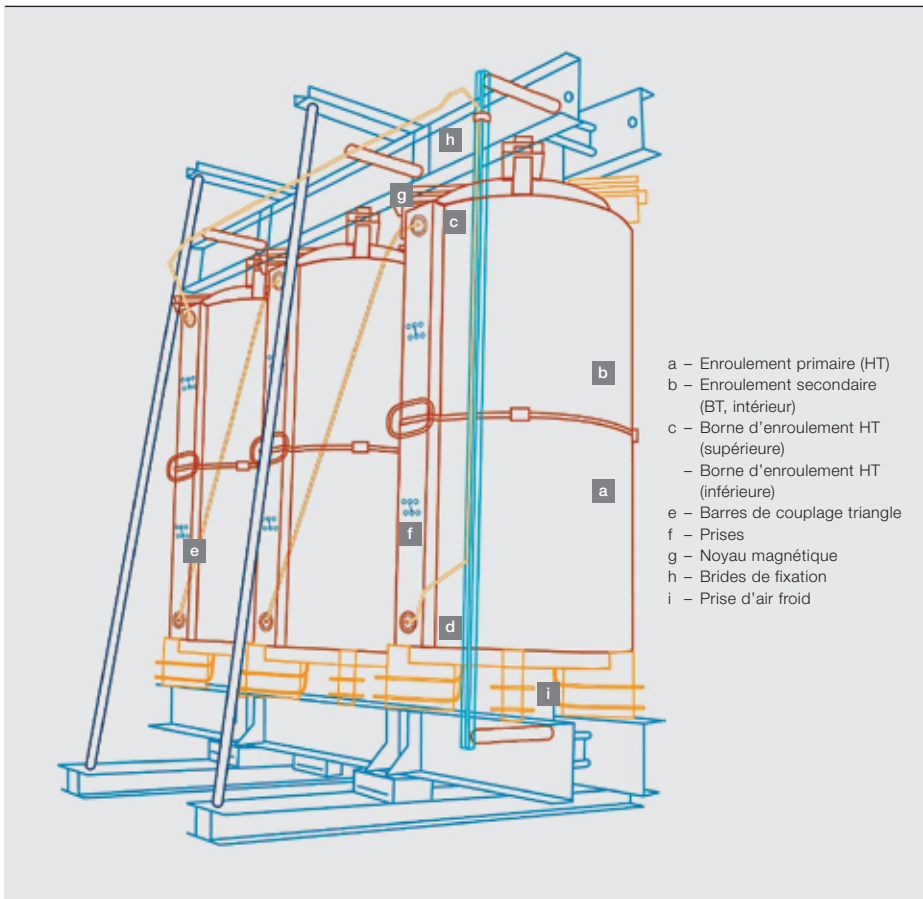
Les transformateurs secs ne sont pas isolés dans l'huile, mais dans l'air. Cet isolant a ses avantages et ses inconvénients : la rigidité diélectrique de l'huile étant environ 8 fois celle de l'air, les enroulements et le noyau d'un transformateur immergé sont plus petits. Par contre, nul besoin de traversées dans un transformateur sec, ni risque de pollution froide (épandage du diélectrique). Son point fort est en effet l'absence d'huile inflammable et autres matières combustibles : quand un transformateur de puissance type contient des milliers de litres d'huile, un transformateur sec offrant des propriétés au feu de classe F1 renferme des isolants auto-extinguibles. Il peut également remplacer les appareils à isolation gazeuse, tout en étant plus facile à manier.

Les transformateurs secs et leurs principaux constituants → 1 se déclinent en plusieurs technologies aux caractéristiques propres : enroulements moulés sous vide, enrobage de résine époxy renforcée de fibre de verre RESIBLOC[®] et tore ouvert.

Dans un transformateur à enroulements moulés sous vide, un conduit d'air est inséré entre le primaire et le secondaire. La constante

diélectrique de l'isolant solide autour de l'enroulement étant supérieure à celle de l'air, le champ électrique est confiné dans le conduit, lequel doit être de section suffisante pour tenir à l'essai de choc de foudre. Chaque appareil ABB est soumis à des mesures de décharges partielles, obligatoirement inférieures à la limite normalisée de 10 pC qui garantit la qualité de la résine solide et l'absence de vacuoles.

1 Transformateur sec



- a - Enroulement primaire (HT)
- b - Enroulement secondaire (BT, intérieur)
- c - Borne d'enroulement HT (supérieure)
- Borne d'enroulement HT (inférieure)
- e - Barres de couplage triangle
- f - Prises
- g - Noyau magnétique
- h - Brides de fixation
- i - Prise d'air froid

2 Caractéristiques HiDry⁷²

Tension primaire	Jusqu'à 72,5 kV
Puissance assignée	Jusqu'à 63 MVA
Tension de tenue au choc de foudre	CEI : 325 kV ANSI/IEEE : 350 kV
Tension de tenue alternative de courte durée	CEI : 140 kV ANSI/IEEE : 140 kV
Tension secondaire	Jusqu'à 36 kV
Couplage	Étoile ou triangle
Niveau de décharges partielles	<10 pC
Classe d'isolement	F (155 °C) ou H (180 °C)
Classe d'environnement	E2
Classe climatique	C2
Comportement au feu	F1
Refroidissement	AN : air naturel ANAF : air naturel/air forcé AFAF : air forcé/air forcé AFWF : air forcé/eau forcé
Changeur de prises en charge	17 positions (± 8 x 1,25 %)
Enveloppe de protection	Transformateur nu (IP00) ou sous enveloppe IP et NEMA pour installation à l'intérieur ou à l'extérieur

Ce conduit sert également à canaliser le flux d'air isolant qui, aspiré en partie basse de l'appareil et auto-entretenu par effet cheminée, se renouvelle automatiquement. D'autres canaux de refroidissement sont placés entre les enroulements basse tension (BT) et les colonnes. Les enroulements HT sont aussi refroidis en surface. Dans les transformateurs de forte puissance, des conduits d'air supplémentaires peuvent être insérés entre les enroulements HT et BT.

Les enroulements sont en fils d'aluminium ou de cuivre, au choix du client. Les câbles d'entrée ou les jeux de barres ouverts sont directement connectés aux enroulements HT.

À l'échelle mondiale, la tendance est à l'utilisation croissante de transformateurs secs, dont le marché potentiel est immense : s'ils dominent la BT, ils sont encore devancés par les transformateurs à huile, majoritaires en MT mais aussi en HT, à côté de quelques unités isolées dans l'hexafluorure de soufre (SF₆). Les transformateurs HiDry⁷² sont les premiers appareils isolés dans l'air de série pour le palier de tension 72,5 kV.

Caractéristiques et technologie

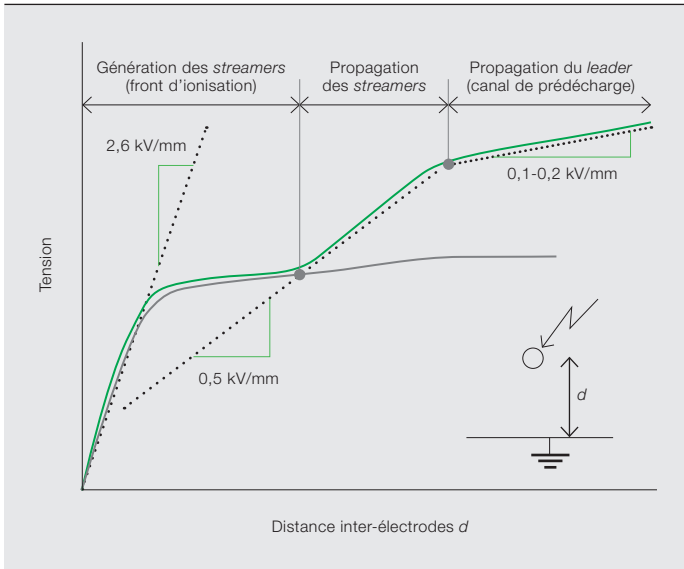
Transformateur de puissance jusqu'à 63 MVA, en version triphasée ou monophasée, HiDry⁷² remplit les mêmes fonctions qu'un appareil immergé [2,3], y compris le réglage de tension en charge dans une plage de ±10 %, à l'aide d'un changeur de prises de type sec → 2.

Il s'appuie sur les mêmes principes technologiques que ceux mis en œuvre en MT et dans les transformateurs secs ABB à enroulements sous vide et enrobés RESIBLOC. Néanmoins, les transformateurs de puissance utilisés dans les réseaux de répartition sont soumis à des exigences bien plus grandes qu'en distribution : niveaux supérieurs de tension et de puissance, plage étendue de réglage de tension, sollicitations diélectriques, thermiques et mécaniques.

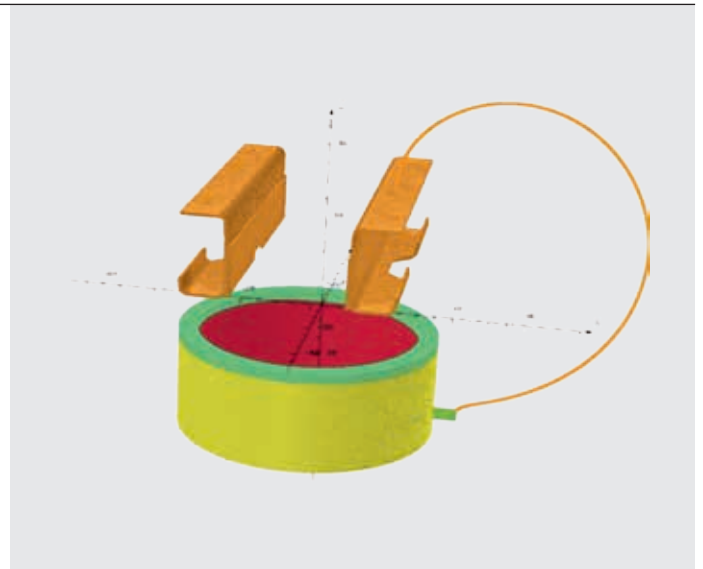
La maîtrise du domaine de tension supérieur à 36 kV, en particulier, passe par une compréhension fine des mécanismes de claquage des isolants gazeux afin de minimiser les distances diélectriques dans l'air → 3. On y parvient en introduisant des anneaux de blindage dans les enroulements, en blindant des

Alors qu'un transformateur de puissance type contient des milliers de litres d'huile, les transformateurs secs classés F1 renferment des isolants auto-extinguibles.

3 Comportement diélectrique de l'air

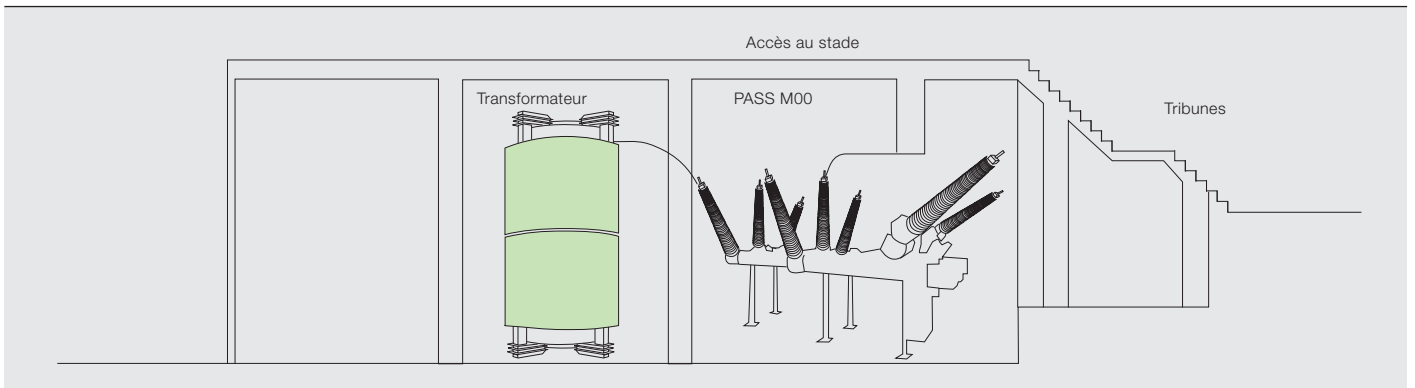


3a La courbe verte représente la tension de maintien en configuration sphère-plan [1].



3b Évaluation du chemin de décharge prospectif par simulations diélectriques

4 Poste électrique de l'Arena Fonte Nova équipé d'un transformateur HiDry⁷² de 69 kV et d'un appareillage à isolation gazeuse ABB



À l'échelle mondiale, la tendance est à l'utilisation croissante de transformateurs de type sec et le marché potentiel est immense.

parties de noyau et en multipliant les barrières isolantes et protections. Ces techniques influencent la répartition du champ électrique local et déterminent les chemins de décharge.

Postes d'intérieur souterrains : sécurité incendie

En milieu urbain, les postes HT occupent le plus souvent des bâtiments spéciaux pour parer principalement aux risques d'incendie et d'explosion. Néanmoins, l'utilisation croissante de la HT en centre-ville et le manque de place plaident en faveur de leur implantation dans les espaces publics ou privés : avec ses excellentes caractéristiques feu, le transformateur sec HiDry⁷² s'y prête parfaitement.

Les enroulements de HiDry⁷² sont moulés dans une résine époxyde. Ce polymère thermodurcissable a l'avantage de ne pas fondre à des températures élevées, contrairement aux thermoplastiques. La

résine est chargée d'une grande quantité de silice incombustible (petits grains de sable ou fines particules de fibre de verre) qui absorbe la chaleur et abaisse la température de combustion. Les hautes températures n'entraînent pas d'inflammation spontanée de la résine mais plutôt une dégradation, puis un début de dégazage et d'oxydation ; un processus qui, après interruption de l'apport de chaleur ou extinction du feu extérieur, s'arrête. Le transformateur HiDry⁷² ne risque donc jamais de s'enflammer.

Essais au feu F1

Conformément à la norme CEI 60076-11:2004, les transformateurs certifiés F1 doivent présenter une inflammabilité restreinte ainsi qu'un minimum de dégagements toxiques et de fumées opaques. L'essai de comportement au feu est réalisé sur une phase complète du transformateur (enroulements HT et BT, colonne du noyau magnétique et composants isolants). Un bac d'alcool éthylique est



5a Avec changeur de prises en charge sec (à gauche)



5b Appareillage hybride SF₆/air PASS M00 72,5 kV

HiDry⁷² remplit les mêmes fonctions qu'un transformateur immergé, y compris le réglage de tension en charge à l'aide d'un changeur de prises de type sec.

placé sous l'enroulement et l'alcool est enflammé. Un panneau radiant de 24 kW, face à l'enroulement HT, constitue une deuxième source de chaleur. L'essai se déroule dans une chambre d'essai spécifique, décrite dans la norme. La température et la densité optique des dégagements gazeux sont mesurées.

Sachant que ces gaz peuvent se propager dans d'autres parties du bâtiment ou se diffuser par le système de ventilation, menaçant la sécurité et la santé des occupants, ils ne doivent en aucun cas être toxiques ni corrosifs. De même, la transparence des fumées n'entrave pas l'intervention des secours, ni l'orientation et l'évacuation des personnes.

L'expérience ABB des transformateurs secs a montré que des défaillances internes ne provoquent ni explosion ni projection de pièces. Les défauts normalement constatés sont une fissuration des enroulements, un arc local, une car-

bonisation et une légère fumée. Selon le cas, les protections du système déconnectent l'appareil du réseau ou la sonde thermique détecte une température de déclenchement [4].

Au Brésil...

Le poste 69 kV de l'Arena Fonte Nova présente une confi-

guration redondante de deux transformateurs et deux groupes d'appareillage HT, logés sous l'accès principal au stade, à deux pas des tribunes → 4. Les appareils sont raccordés par des jeux de barres ouverts, fixés au plafond du local électrique. Le poste a été mis en service au printemps 2013 pour accueillir à temps la Coupe des Confédérations de la FIFA.

Les transformateurs de 25 MVA sont raccordés côté secondaire à l'appareillage MT → 5; leur tension secondaire peut être réglée dans la plage de 11,95 kV à 13,8 kV. La technique du moulage sous vide garantit aux enroulements robustesse et protection contre la pollution et la condensation (classe d'environnement E2). Le transformateur est refroidi par convection naturelle. Il subit un essai de tenue au choc de foudre à 350 kV.

6 Transformateur HiDry⁷² de 66/22 kV-31,5 MVA soumis à un essai en court-circuit au CESI (Italie)



Le changeur de prises en charge sec est installé devant le transformateur, chaque phase ayant son unité. Il est configuré pour régler la tension dans une plage de +4/-12 %, par échelon de 1,25 %; la charge est commutée à l'aide d'interrupteurs à vide. Transformateur et changeur de prises sont clôturés pour éviter tout contact direct, mais ne nécessitent pas d'enveloppe de protection.

... mais aussi en Espagne, en Suède

De nombreux transformateurs HiDry⁷² équipent aujourd'hui les postes électriques du monde entier. À Séville, par exemple, l'énergéticien Endesa a décidé de remplacer les appareils immergés de deux postes par des HiDry⁷² pour lever tout risque d'incendie et de pollution de l'environnement direct. Chacun abrite deux transformateurs de 66/22 kV-31,5 MVA. L'un deux, équipé d'un changeur de prises $\pm 8 \times 1,25 \%$, a réussi les essais de court-circuit réalisés en Italie par le laboratoire indépendant CESI (*Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano*) → 6, en conformité avec la norme CEI 60076-5. Ce fut le plus imposant transformateur de puissance sec jamais testé au CESI.

De même, à Ulricehamn, en Suède, un transformateur immergé installé en pleine forêt a fait place à un transformateur et un changeur de prises HiDry⁷² de 45/11 kV-16 MVA, supprimant totalement le risque écologique → 7. Les enroulements RESIBLOC résistent à des températures de -60°C .

7 Transformateur HiDry⁷² de 45/11 kV-16 MVA et changeur de prises en charge sous enveloppe pour poste d'extérieur (Suède)



Postes à pourvoir

L'appareillage d'interruption à isolation gazeuse peut se combiner à des transformateurs HiDry⁷² pour réaliser des postes électriques très compacts, logeables dans n'importe quel bâtiment. Les transformateurs HiDry⁷² sont ainsi capables d'alimenter les zones urbaines avec des tensions et des puissances plus élevées, sans nécessiter la construction de postes supplémentaires. Cette expérience très positive d'ABB dans le domaine des transformateurs de puissance secs de 72,5 kV est de bon augure pour passer au niveau de tension supérieur.

Martin Carlen

ABB Power Products, Transformers
Zurich (Suisse)
martin.carlen@ch.abb.com

Mariano Berrogain

ABB Power Products, Transformers
Saragosse (Espagne)
mariano.berrogain@es.abb.com

Bibliographie

- [1] Carlen, M., *et al.*, « Transformer innovation: Dry-type transformers for the 72.5 kV voltage class - safe and ecological », *Advanced Research Workshop on Transformers*, Saint-Jacques de Compostelle (Espagne), p. 8-13, 2010.
- [2] Carlen, M., Berrogain, M., « Dry-type transformers for the subtransmission voltage level », *EEA 2014 Conference*, Auckland (Nouvelle-Zélande), 2014.
- [3] Pedersen, A., *et al.*, « Streamer inception and propagation models for designing air insulated power devices », *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach (Virginie, États-Unis), 2009.
- [4] Carlen, M., *et al.*, « Dry-type subtransmission transformer: Compact and safe indoor substations », communication A2-304, *2014 CIGRE Session*, Paris, 2014.