

Une technologie novatrice sans SF₆ pour les futurs interrupteurs MT : SVI (Shunt Vacuum Interruption)

par Christophe Prévé
François Trichon
Romain Maladen
et Daniel Piccoz

Résumé

Plus de 30 millions d'appareillages électriques installés dans le monde entier utilisent de l'hexafluorure de soufre (SF₆), gaz à effet de serre très élevé avec un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) de 23500. Renoncer à l'emploi de SF₆ constitue un pas décisif pour la protection de l'environnement. Une technologie novatrice sans SF₆, avec une coupure dans le vide et isolation dans l'air est proposée. Avec des coûts optimisés et une empreinte au sol aussi faible que celle des appareillages habituels isolés au SF₆, elle offre une alternative prometteuse à l'actuel statu quo.

Introduction

Les entreprises du monde entier considèrent actuellement la réduction des émissions de gaz à effet de serre comme priorité absolue. Des équipements électriques plus «verts» requièrent de nouvelles solutions.

Cet article présente une solution innovante d'interrupteur-sectionneur compact sans SF₆ alliant les technologies d'interruption dans le vide et de sectionnement dans l'air. Cette solution est plus sûre que celles, non éprouvées, utilisant d'autres gaz fluorés.

Depuis les années 70, le SF₆ a été largement employé dans les équipements électriques haute et moyenne tension comme gaz isolant et/ou de coupure sans aucun problème de toxicité ni d'inflammabilité. Cependant, s'il se caractérise par d'excellentes propriétés d'isolation électrique et de coupure du courant, le SF₆ contribue à l'effet de serre en raison de son important potentiel de réchauffement global (PRG) de 23500 (ce chiffre signifie qu'1 kg de SF₆ a un impact équivalent à 23500 kg de CO₂).

D'autres gaz fluorés ont été identifiés comme candidats de substitution au SF₆ pour l'extinction d'arc dans les équipements électriques de moyenne tension.¹²³ Bien que le PRG d'un certain nombre de ces autres gaz fluorés est bas, leur manipulation nécessite de grandes précautions ainsi que des exploitants spécifiquement formés, ceci à toutes les étapes du cycle de vie de l'équipement, de son installation à sa gestion en fin de vie. L'ensemble de ces gaz fluorés présente des limitations d'utilisation en basse température (inférieure à -20°C) et la majorité de ces gaz fluorés doit être utilisée en mélange avec un autre gaz porteur (air, CO₂ ou azote) dans les conditions normales d'utilisation.

Certains de ces gaz fluorés présentent des propriétés d'isolation électrique et une capacité de coupure intéressantes. Cependant, ils font l'objet de préoccupations quant aux risques qu'ils présentent pour la santé. En effet, leur non toxicité n'est pas encore totalement démontrée. Leurs caractéristiques carcinogéniques, mutagéniques et reprotoxiques (CMR) ne sont pas complètement connues, tout comme leur neurotoxicité, cytotoxicité, ... De plus, les gaz fluorés ne doivent pas être rejetés dans l'atmosphère et doivent être retraités en fin de vie de l'équipement.

Une meilleure solution sans SF₆ plus sûre a été développée pour les interrupteurs-sectionneurs avec coupure dans le vide et isolation dans l'air.

Les avantages de cette solution :

- préservation de l'environnement,
- sécurité des personnes,
- facilité d'utilisation,
- utilisation à très basse température,
- empreinte au sol identique ou similaire aux équipements avec du SF₆,
- interchangeabilité avec une cellule AIS (Air Insulated Switchgear) équivalente contenant un interrupteur-sectionneur SF₆ existant,
- récupération du gaz en fin de vie non nécessaire,
- longue durée de vie dans les conditions normales de service

¹ S. KOSSE, P.G. NIKOLIC, G. KALCHELRIESS, "Holistic evaluation of the performance of today's SF₆ alternatives proposals," (Évaluation holistique des performances d'alternatives actuelles aux SF₆), document 0819, CIRED 2017, Glasgow, Royaume-Uni, juin 2017.

² C. PRÉVÉ, D. PICCOZ, R. MALADEN, "Validation protocol of potential SF₆ alternatives," (Protocole de validation des alternatives potentielles aux SF₆) MATPOST, Lyon, France, novembre 2015.

³ A. BEROUAL, A HADDAD, "Recent advance in the quest of new insulation gas with a low impact on environment to replace Sulphur hexafluoride (SF₆) gas in high-voltage power network applications" (Avancées récentes dans la recherche de nouveaux gaz d'isolation de faible impact environnemental en substitution à l'hexafluorure de soufre (SF₆) dans les applications de réseau haute tension), MDPI – Energies 2017, 1à, 1216, août 2017.

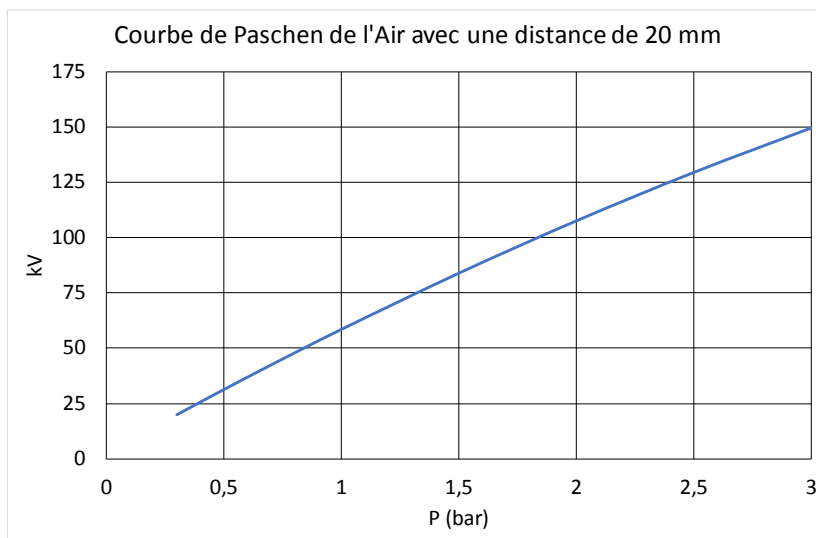
Coupure dans le gaz ou dans l'air ?

La coupure dans le gaz peut représenter une solution économique intéressante pour un interrupteur-sectionneur à 3 positions. Cependant, les gaz fluorés candidats au remplacement du SF₆ génèrent des produits de décomposition très toxiques, en particulier, une quantité importante de monoxyde de carbone (CO) et de perfluoroisobutène (PFIB) dus aux manœuvres de coupure du courant.

Des personnes pouvant être présentes à proximité des tableaux moyenne tension installés dans des zones publiques, la santé et la sécurité sont les préoccupations principales à prendre en considération lorsque l'on recherche des alternatives au SF₆. En effet, en cas de fuite accidentelle, le risque d'intoxication peut être très élevé pour ces personnes. L'utilisation des gaz fluorés alternatifs au SF₆ est donc difficilement envisageable notamment lorsque leur toxicité (et celles de leurs produits de décomposition après coupure) n'est pas suffisamment connue.

L'air sec n'est pas un aussi bon isolant électrique que les gaz fluorés mais présente par contre, les avantages considérables d'être sûr, utilisable à très basse température, de manipulation simple, et de pouvoir être relâché dans l'atmosphère à la fin de vie de l'équipement.

L'azote (N₂) seul présente des propriétés d'isolation électrique inférieures à l'air sec mais offre l'avantage de ne pas oxyder les matériaux. Le dioxyde de carbone (CO₂) seul a des propriétés d'isolation électrique inférieures à l'air et à N₂ et, en tant que gaz d'origine naturel, peut être relâché dans l'atmosphère. Les propriétés d'isolation électrique de ces gaz s'accroissent avec leur pression (voir courbe de Paschen ci-dessous). Augmenter la pression permet donc de garder les dimensions d'un appareillage au SF₆.



Par ailleurs, l'air et le N₂ offrent un faible pouvoir de coupure, tandis que celui du CO₂ est meilleur que celui de l'air sec et de N₂, mais toutefois, reste bien en deçà de celui du SF₆. Ces gaz naturels, au contraire des alternatives fluorées, sont facilement disponibles.

Ainsi, une solution optimale consiste à prendre de l'air sec comme gaz d'isolation électrique et une ampoule à vide pour la coupure. Cette solution permet d'éviter l'emploi d'autres gaz ainsi que la création de produits de décomposition toxiques lors de la coupure et empêche ainsi tout risque pour la sécurité des personnes en cas de fuite accidentelle de gaz.

Solution d'appareillage sans SF₆ : air et coupure dans le vide

Cette solution AIS sans SF₆ utilise de l'air sec dans une enceinte époxy à une pression relative de 0,4 bar pour les appareillages 12 kV et 1,1 bar pour 24 kV. L'interrupteur-sectionneur à 3 positions se caractérise par une coupure dans le vide, un sectionnement dans l'air et une mise à la terre à l'intérieur de l'enceinte. Le mode opératoire est identique à celui de l'interrupteur-sectionneur habituel à 3 positions dans le SF₆ : coupure/sectionnement en une seule opération et mise à la terre en une seconde opération. La combinaison des différents dispositifs et leur architecture permettent la conception d'une solution compacte ayant les mêmes dimensions que les interrupteurs-sectionneurs traditionnels au SF₆ à 3 positions. Par conséquent, la cellule intégrant cet interrupteur-sectionneur novateur est entièrement interchangeable avec une cellule SM6 secondaire habituelle équivalente mais avec coupure dans le SF₆.

Coupure avec des ampoules à vide en série avec un sectionneur à 3 positions

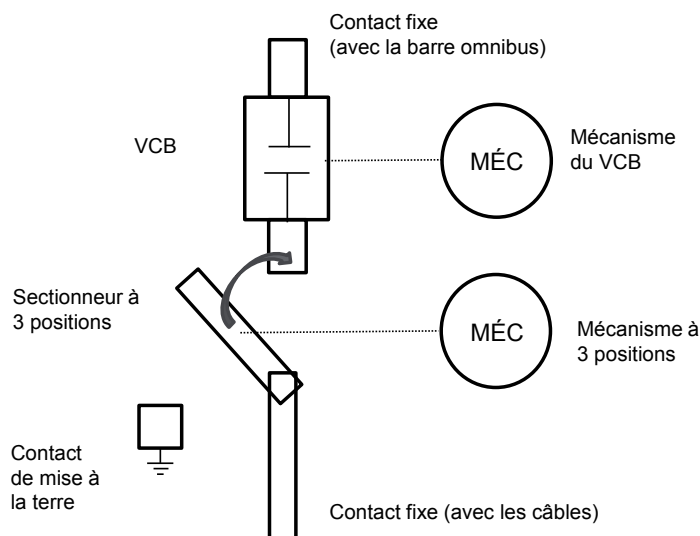
L'approche traditionnelle pour la coupure par ampoule à vide consiste à disposer une ampoule à vide en série avec un sectionneur à 3 positions (schéma 1). Cette solution est déjà appliquée dans les RMU au SF₆ pour les fonctions disjoncteurs avec ampoule à vide. Pour les fonctions d'interrupteurs-sectionneurs, l'ampoule à vide doit assurer la fermeture sur court-circuit, la tenue d'isolement électrique, la tenue au courant de courte durée admissible (y compris sa valeur de crête), et la tenue au courant permanent (échauffement). La seule différence entre une ampoule à vide pour disjoncteur et une ampoule pour interrupteur est la capacité de coupure. Ainsi, les ampoules à vide pour interrupteurs-sectionneurs ont les mêmes dimensions et ont des coûts similaires à celles des disjoncteurs.

Cette solution est bien connue et fiable. Cependant, elle présente trois inconvénients majeurs :

- le mode opératoire est différent de celui d'un interrupteur-sectionneur à 3 positions au SF₆. Les manœuvres sont réalisées par deux mécanismes : un pour le disjoncteur et un pour le sectionneur à 3 positions. L'ouverture/le sectionnement s'effectue en 2 opérations,
- la sûreté de fonctionnement est diminuée par l'augmentation du nombre de composants associés à la manœuvre,
- les coûts de cette solution sont élevés.

Schéma 1

Solution traditionnelle d'interrupteur-sectionneur avec ampoule à vide montée en série avec un sectionneur à 3 positions



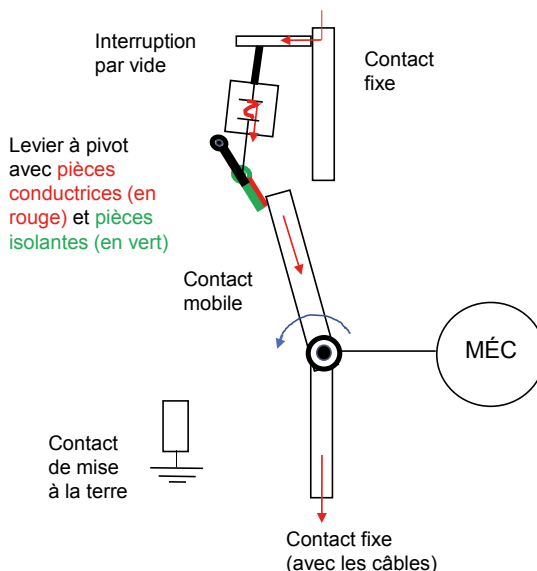
Technologie de coupure novatrice : shunt vacuum interruption (SVI)

Cette nouvelle approche (schéma 2) consiste à combiner une ampoule à vide et un sectionneur dans l'air, ce qui permet de réduire le nombre de composants ainsi que les coûts. Le mode opératoire est le même que celui d'un interrupteur-sectionneur 3 positions dans le SF₆.

L'ampoule à vide est disposée en parallèle du sectionneur. Les contacts mobiles du sectionneur entraînent l'ouverture de l'ampoule à vide par une palette. Dans cette configuration, l'ampoule à vide n'est sollicitée que pendant la phase de coupure. Elle doit tenir la tension transitoire de rétablissement (TTR) lors de la coupure, mais ne requiert ni capacité de fermeture sur court-circuit, ni tenue au courant permanent, ni tenue au courant de court-circuit de courte durée. Ce sont les contacts du sectionneur qui assurent la tenue au courant de court-circuit. Le courant ne traverse pas l'ampoule à vide pendant la phase de fermeture. Le courant ne traverse effectivement l'ampoule à vide que pendant quelques millisecondes lors de la phase d'ouverture. Ces aspects permettent de réduire les coûts et les dimensions de l'ampoule à vide.

Schéma 2

Une solution novatrice d'interrupteur-sectionneur sans SF₆ avec technologie shunt vacuum interruption (SVI)



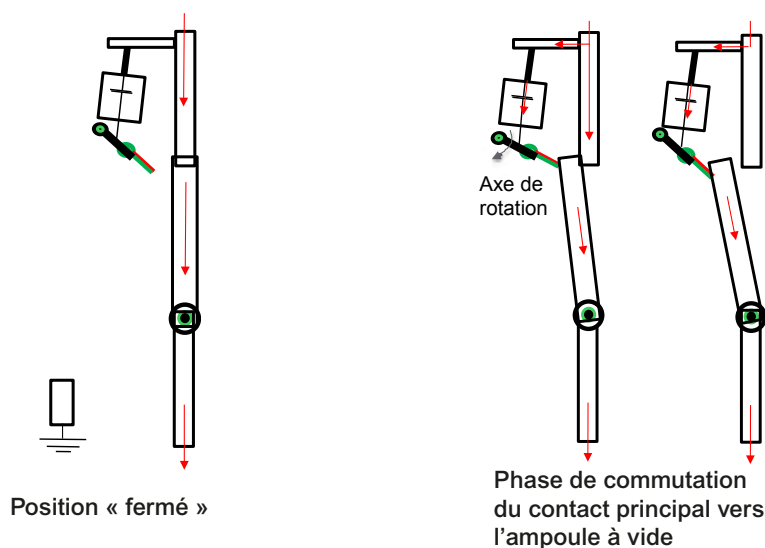
Description des phases d'ouverture et de fermeture

Les contacts principaux sont fermés (schéma 3). Le courant ne traverse que les contacts principaux et pas l'ampoule à vide qui est en position fermée.

Au cours d'une phase de commutation du courant, le contact mobile commence à se déplacer (schéma 4) : le contact mobile est en contact avec la partie conductrice de la palette tout en restant relié au contact fixe. Le courant se répartit alors entre les deux circuits : les contacts principaux et l'ampoule à vide (toujours en position fermée). Pendant cette étape de commutation, les contacts étant au même potentiel électrique, il n'y a aucun arc électrique.

Schéma 3 (à gauche)
Position « fermé »

Schéma 4 (à droite)
Phase de commutation

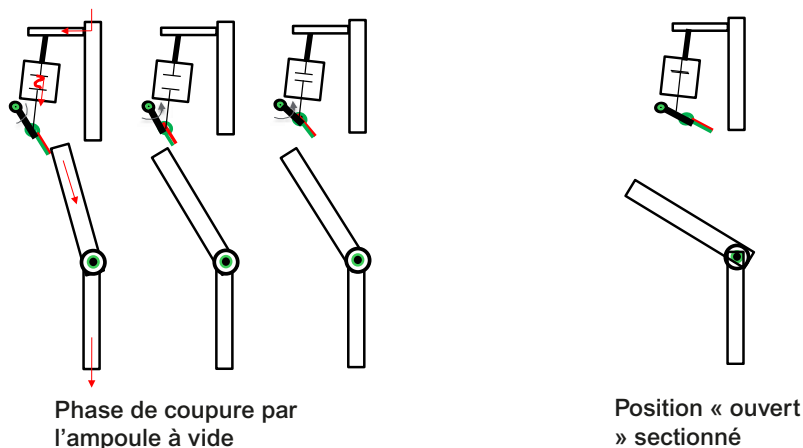


Lorsque la phase de commutation est terminée, le courant passe dans le circuit parallèle via l'ampoule à vide (le contact fixe supérieur est shunté). L'ampoule à vide est toujours en position fermée. Le contact mobile pousse ensuite la palette dont la rotation entraîne l'ouverture de l'ampoule à vide. Le courant est interrompu par l'ampoule à vide au premier « passage par zéro » du courant (schéma 5).

Lorsque l'opération de coupure de courant est terminée, le contact mobile relâche la palette et continue sa rotation jusqu'en position de sectionnement (schéma 6). Un ressort de rappel ramène la palette dans sa position initiale, refermant ainsi l'ampoule à vide.

Schéma 5
Phase de coupure par l'ampoule à vide

Schéma 6
Position « ouvert » sectionné

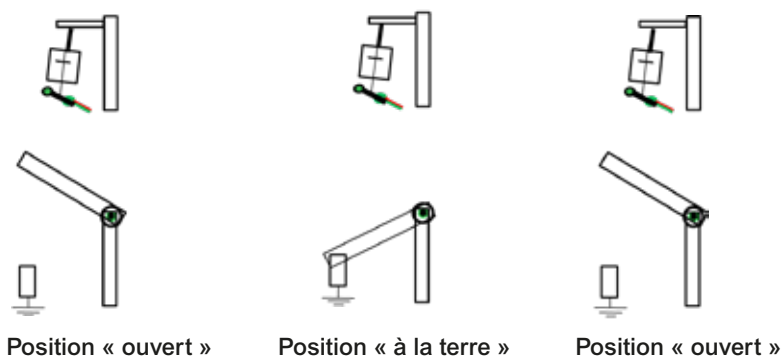


Description de la phase de mise à la terre

La phase de mise à la terre s'effectue comme pour l'interrupteur-sectionneur SF₆ à 3 positions. Le circuit parallèle ne joue aucun rôle lors de la mise à la terre du contact mobile.

Schéma 7

Phase de mise à la terre

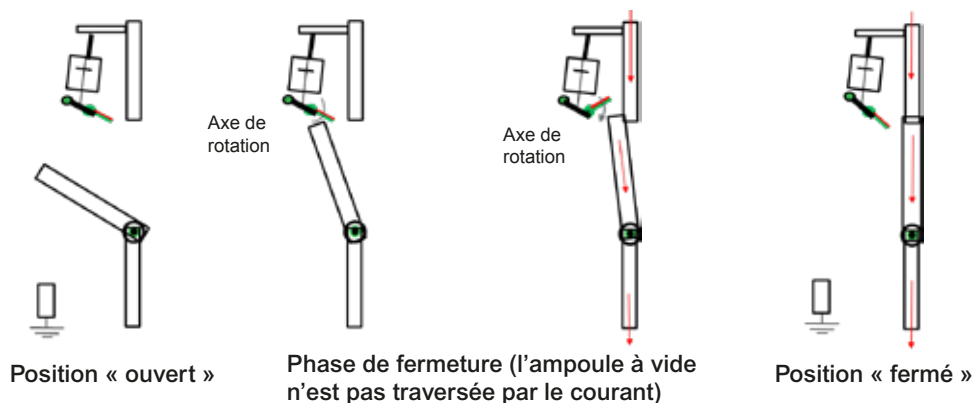


Description de la phase de fermeture

Comme représenté sur le schéma 8, le contact mobile entre en contact avec la face isolante de la palette et la pousse pour la faire tourner. Le contact mobile effectue la fermeture du courant sur le contact fixe. La fermeture/l'établissement du courant électrique est effectué par les contacts principaux. Le courant ne traverse pas l'ampoule à vide pendant cette phase. Lorsque le contact mobile a atteint sa position fermée, la palette est relâchée et revient dans sa position initiale. L'interrupteur est alors prêt à réaliser une nouvelle opération de coupure du courant.

Schéma 8

Phase de fermeture



Avantages de la solution

Cette conception offre une solution économique et compacte, permettant de garder les mêmes dimensions que les solutions au SF₆. Ce système est capable de couper des courants de charge, des courants de transition et des courants d'intersection pour les combinés interrupteur-fusibles. Il convient pour les interrupteurs de réseau et les interrupteur-fusibles de protection des transformateurs

Cette solution est intégrée dans une enceinte en époxy remplie d'air sec à une pression relative de 0,4 bar pour les appareillages à 12 kV et 1,1 bar pour ceux à 24 kV. La cellule intégrant cette nouvelle technologie SVI est entièrement interchangeable avec la cellule AIS SM6 équivalente isolée au SF₆. Il est donc possible de remplacer un ancien équipement équivalent AIS SM6 en toute simplicité, la hauteur du jeu de barres et de la connexion des câbles restant identiques. De même il est possible d'étendre facilement et rapidement un tableau SF₆ existant par l'ajout d'une nouvelle fonction sans SF₆.

Schéma 9

Technologie AIS en cellule SM6 avec interrupteur-sectionneur au SF₆ (à droite) et sans SF₆ par SVI (à gauche)



Le mode opératoire est le même que celui des interrupteurs-sectionneurs à 3 positions au SF₆ : coupure/sectionnement en une opération et mise à la terre en une seconde opération. Cette interchangeabilité permet de combiner les différentes technologies sur le même tableau et de remplacer un interrupteur au SF₆ par un interrupteur sans SF₆ dans un même tableau.

Cette configuration de tableaux AIS sans SF₆ a été testée avec succès lors d'essais réalisés selon les normes CEI. Cette solution est également bien adaptée pour la conception de RMU de technologie GIS (Gas Insulated Switchgear).

Conclusion

Au cours de leur exploitation, les appareillages électriques moyenne tension sont exposés aux défauts internes libérant leur gaz de coupure dans l'air. L'utilisation de gaz dont la non-toxicité n'a pas encore été démontrée est inacceptable pour ces produits exploités dans des zones exposées au public. Les gaz de décomposition en cas de coupure peuvent être encore plus toxiques. Dans ces deux cas, il n'est pas possible de garantir la préservation de la santé et de la sécurité des personnes en cas de fuite de gaz accidentelle.

La seule solution connue à ce jour consiste donc à réaliser la coupure par une ampoule à vide. Cette technologie est éprouvée et fiable. La solution actuelle, consistant à mettre en série une ampoule à vide et un sectionneur, est coûteuse et le mode opératoire est différent de celui des interrupteurs-sectionneurs «traditionnels» au SF₆.

Une solution innovante consiste à disposer une ampoule à vide en parallèle des contacts principaux d'un sectionneur 3 positions. Cet interrupteur-sectionneur à 3 positions avec coupure dans le vide offre une solution compacte et économique. Elle est plus respectueuse de l'environnement, sûre et élimine le besoin de récupération du gaz en fin de vie de l'équipement. Le mode opératoire est le même que celui des interrupteurs-sectionneurs existants. Elle dispose également d'une durée de vie et de dimensions identiques aux interrupteurs SM6 actuels. Elle est donc facilement et totalement interchangeable avec ceux-ci. Elle convient autant aux installations AIS que GIS ainsi qu'aux fonctions interrupteur de réseau et protection transformateur par interrupteur-fusible.