Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 12

Artikel: Ist SF6 in Hochspannungsschaltanlagen ersetzbar?
Autor: Gautschi, David / Pohlink, Karsten
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856332

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ist SF_6 in Hochspannungsschaltanlagen ersetzbar?

Neue Forschungsarbeiten bringen ermutigende Resultate

SF_6 ist heute das dominierende Isolations- und Schaltmedium sowie Lichtbogenlöschgas in Gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen (GIS). Aus Umweltschutzgründen wird seit einigen Jahren nach einem Ersatz geforscht. Ein Gas aus der Familie der Fluorierten Nitrate erweist sich in Kombination mit CO_2 als interessante Kompromisslösung und hat das Potenzial, SF_6 in Zukunft als Medium in Hochspannungsschaltanlagen zu ersetzen.

David Gautschi, Karsten Pohlink

Schwefelhexafluorid (SF_6) ist heute das dominierende Isolations- und Schaltmedium sowie Lichtbogenlöschgas in Gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen (GIS). Neben den vielen Vorteilen weist SF_6 aber ein sehr hohes relatives Treibhauspotenzial mit einem Faktor von zirka 22 800 auf (verglichen mit CO_2 über einen Zeitraum von 100 Jahren). Es wurde deshalb am Weltklimagipfel 1997 in Kyoto in die Liste der Treibhausgase aufgenommen. Die Mitgliedstaaten verpflichteten sich mit dem verabschiedeten Protokoll, die Treibhausemissionen von 6 verschiedenen Gasen respektive Gasgruppen bis im Jahr 2012 um mehr als 5 % zu verringern. Hersteller von Hochspannungsschaltanlagen haben zwar bereits vor diesem Beschluss verschiedene alternative Gase untersucht. Damals lag der Fokus allerdings auf der Suche nach noch leistungsfähigeren Gasen als SF_6 und weniger auf der Umweltverträglichkeit. Nach 1997 wurde der Aspekt der Umweltverträglichkeit eines Ersatzgases stärker gewichtet und zugleich der Druck auf die Industrie erhöht, Alternativen zu SF_6 zu suchen.

Über die Jahre wurden verschiedenste Gasgruppen und -gemische hinsichtlich ihrer Verwendung untersucht. [1, 2, 3, 4] **Tabelle 1** zeigt eine Zusammenfassung von verschiedenen in der Vergangenheit untersuchten Gasen. Daraus ist ersichtlich, dass einige der Gase eine tiefe dielektrische Festigkeit aufweisen, sodass Geräte überdimensioniert werden müssten und das Bauvolumen sowie die Anlagenkosten damit ansteigen würden. Andere weisen ein immer noch hohes relatives Treibhauspotenzial gegenüber CO_2 auf. Weitere Kandidaten wie z.B. CF_3I können wegen der hohen Toxizität nicht berücksichtigt werden. Ausserdem wird bei CF_3I bei der Unterbrechung von grossen Strömen Jod freigesetzt [5], und unter Umständen können sogar feste Partikel entstehen, die sich über Stunden in einem feldstarken Raum akkumulieren und die dielektrische Festigkeit stark reduzieren. [6]

Fluorierte Moleküle mit niedrigem Treibhauspotenzial

Aufgrund der in **Tabelle 1** dargestellten Mängel von verschiedenen Gasen wurde die Suche auf weitere vielversprechende Alternativen ausgeweitet:

- Fluorierte Oxirane ($C_nF_{2n}O$): Die dielektrische Festigkeit dieser Gasgruppe liegt oberhalb derjenigen von SF_6. Aufgrund des molekularen Aufbaus mit einer Verbindung des Sauerstoffatoms zu zwei Kohlenstoffatomen resultiert eine hohe UV-Beständigkeit. Dies resultiert in einer langen Lebensdauer in der Atmosphäre und dadurch einem immer noch hohen relativen Treibhauspotenzial. C_4F_8O weist beispielsweise eine um 1,6-mal höhere dielektrische Festigkeit als SF_6 auf, das relative Treibhauspotenzial liegt aber immer noch bei zirka 4100.
- Hydrofluorierte Olefine (HFO): Diese Gasgruppe wurde ebenfalls intensiv untersucht. [7] Die Moleküle weisen eine ungesättigte Kohlenstoffdoppelverbindung auf. Die dielektrische Festigkeit kommt trotzdem meist nicht an diejenige von SF_6 heran. Als weitere Nachteile von dieser Gasgruppe sind bei einigen Mo-

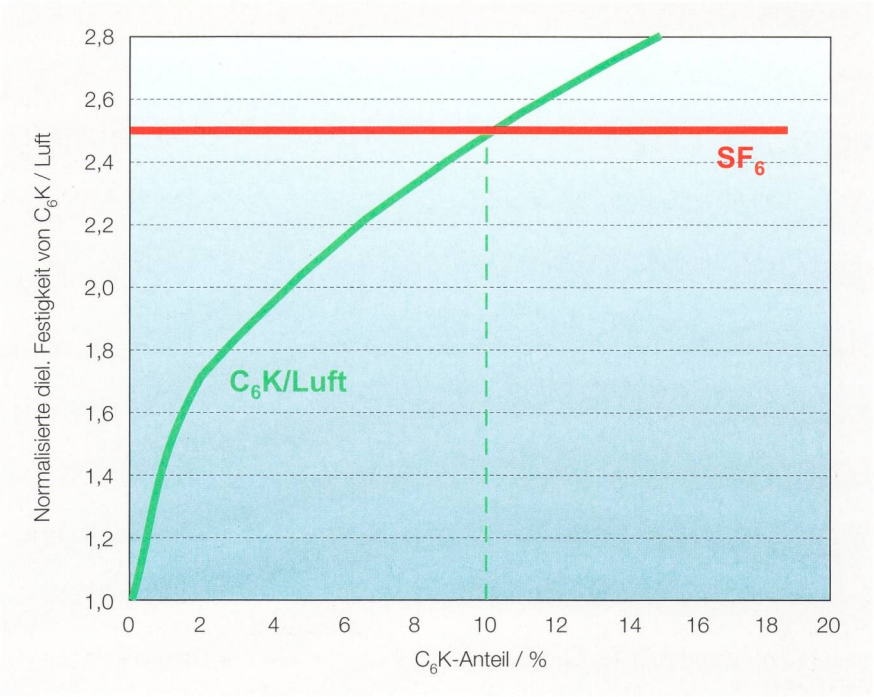

Bild 1 Normalisierte dielektrische Festigkeit von C_6K bei Mischung mit Luft.

Molekül	Molmasse (g/mol)	Dielektrische Festigkeit verglichen mit SF_6 (ca.)	Siedepunkt bei 0.1 MPa (°C)	Treibhauspotenzial verglichen mit CO_2
CF_4	88	~0,4	–128	7400
C_2F_6	138	~0,8	–78	12200
C_3F_8	188	~0,9	–37	8800
c-C_4F_8	200	~1,25	–6	10300
C_4F_{10}	238	~1,25	–2	8900
CF_3I	196	~1,2	–22.5	5
CO_2	44	~0,45	–78,51[1)]	1
N_2	14	~0,4	–196	0
trockene Luft	29	~0,5	–194	0
SF_6	146	1	–63	22800

Tabelle 1 Eigenschaften von verschiedenen alternativen Gasen gegenüber SF_6.
[1)] Angegeben wurde der Sublimationspunkt. CO_2 geht bei Normaldruck direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über.

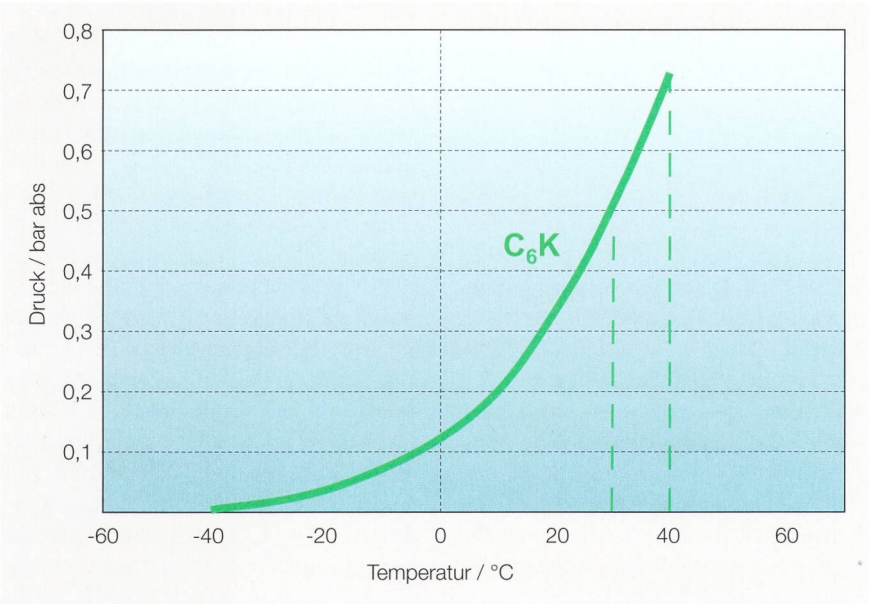

Bild 2 Dampfdruckkurve von reinem C_6K.

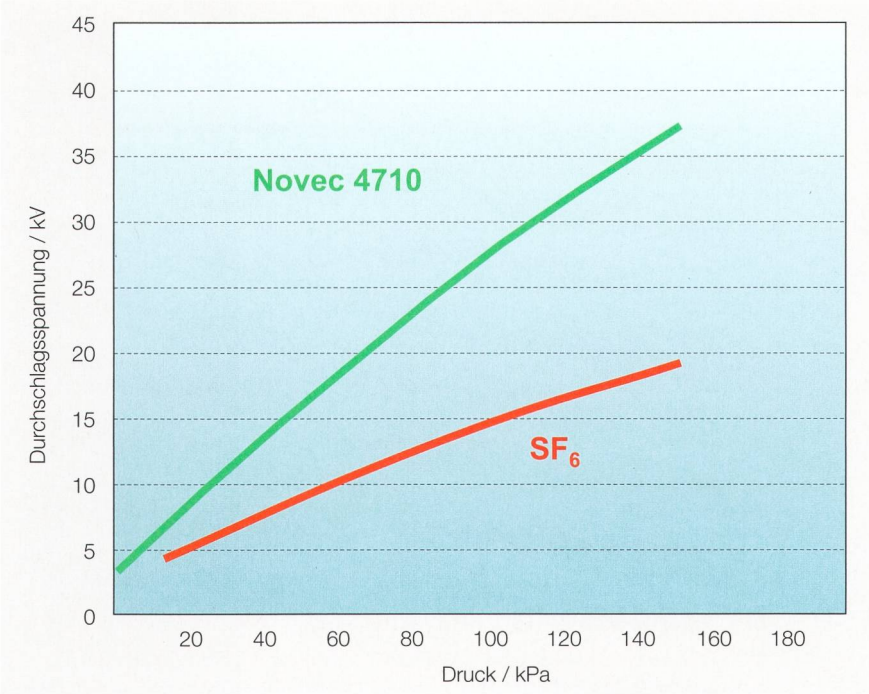

Bild 3 Dielektrische Festigkeit von Novec 4710 in Bezug auf SF_6.

lekülen die mögliche Entflammbarkeit unter Druck sowie leitfähige Ablagerungen auf Isolierteilen von Leistungsschaltern zu erwähnen.

■ Fluorierte Ketone ($C_nF_{2n}O$): Diese Gasgruppe weist dieselbe chemische Formel wie Fluorierte Oxirane auf. Im Gegensatz zu den Oxiranen ist das Sauerstoffatom jedoch über eine Doppelverbindung an ein einzelnes Kohlenstoffatom gebunden. Die dielektrische Festigkeit dieser Gasgruppe liegt weit oberhalb von SF_6. [8] Das fluorierte Keton $C_6F_{12}O$, das üblicherweise als C_6K bezeichnet wird, wird bereits als Brandbekämpfungsmittel kommerziell z.B. in automatischen Löscheinrichtungen eingesetzt. Dieses Molekül weist eine atmosphärische Lebensdauer von unter einer Woche auf, d.h. es wird rasch durch UV-Strahlung zersetzt. Dies resultiert in einem tiefen relativen Treibhauspotenzial von zirka 1. Der Siedepunkt des Gases liegt bei 49° C, d.h. es ist bei Zimmertemperatur flüssig. Aufgrund dieser Tatsache kann es in reinem Zustand nicht als Isoliergas verwendet werden. Da das reine Gas eine um den Faktor 1,7 höhere dielektrische Festigkeit als SF_6 aufweist, wäre es aber möglich, es in Kombination mit einem Hintergrundgas zu verwenden. In **Bild 1** ist ersichtlich, dass die dielektrische Festigkeit dieses Moleküls bei Mischung mit Luft bereits bei einem Anteil von zirka 10 % diejenige von SF_6 erreicht.

In **Bild 2** ist die Dampfdruckkurve von C_6K dargestellt. In typischen GIS-Anlagen liegen die SF_6-Drücke im Bereich von 0,5 bis 0,7 MPa (5 bis 7 bar). Wenn man von einem Gemisch von 10 % C_6K und 90 % trockener Luft ausgeht, würde der Siedepunkt zwischen 30 und 40° C liegen. Eine Anwendung in diesem Bereich ist deshalb ausgeschlossen. Bei tieferem Anwendungsdruck von beispielsweise 0,13 MPa Gesamtdruck würde die minimale Betriebstemperatur im Bereich um den Gefrierpunkt liegen. In diesem Fall ist die dielektrische Festigkeit des Gasgemisches weit tiefer als diejenige von reinem SF_6. Der Einsatz dieses Moleküls mit einem Hintergrundgas ist deshalb aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich attraktive Lösung, da der Einsatz bis -25° C angestrebt wird. Zudem wäre es für den Anwender uninteressant, für Innenraumanlagen mit Ausleitungen verschiedene Druckkonzepte oder Gasgemische verwenden zu müssen.

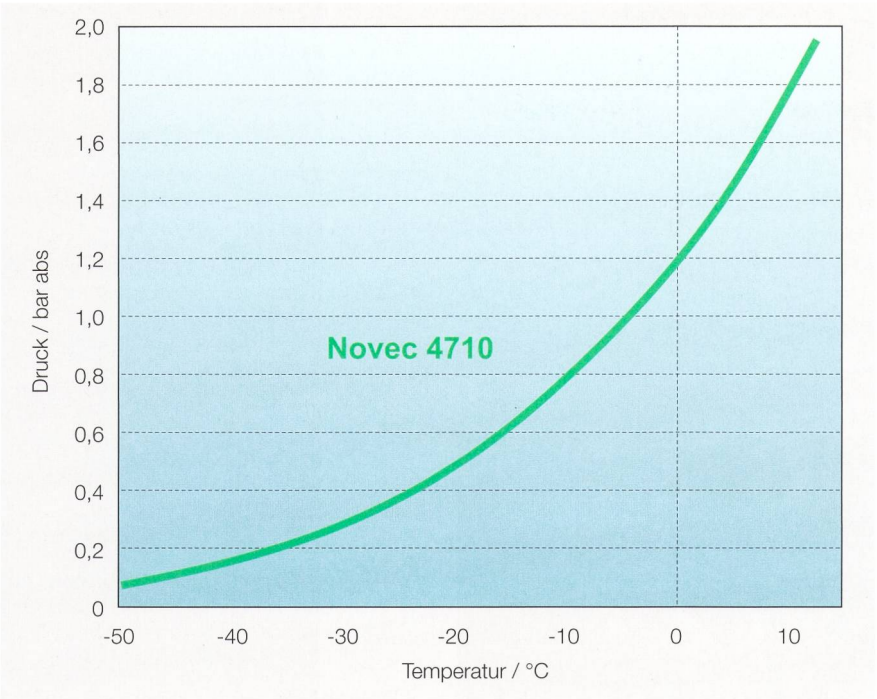

Bild 4 Dampfdruckkurve von Novec 4710

Neben dem oben beschriebenen Molekül wurden auch weitere mögliche Kandidaten aus der Gruppe der Fluorierten Ketone untersucht. Je kleiner das Molekül wird, desto tiefer liegt auch sein Siedepunkt, was den Anwendungsbereich verbessern würde. Als Nachteil steigt aber die Toxizität der Moleküle an. C_4F_8O (respektive C_4K) weist beispielsweise einen Siedepunkt von 0°C auf, aber die lethale Konzentration[1] (LC_{50}) liegt in einem sehr niedrigen Bereich (zirka 200 ppm_v).

Die Forschungsarbeiten der Gasfamilien Fluorierte Oxirane, Olefine und Ketone haben gezeigt, dass eine Substitution von SF_6 als dielektrisches Isolationsmedium in GIS-Anlagen durch ein einziges Gas eher unwahrscheinlich ist.

Fluorierte Nitrile als Lösung?

Als weitere Gasfamilie wurde die Familie der Fluorierten Nitrile untersucht. Ein Fluoriertes Nitril, das unter dem Handelsnamen Novec 4710 erhältlich ist, zeigte sehr positive Eigenschaften hinsichtlich Siedepunkt und dielektrischer Festigkeit.

In **Bild 3** sind die druckabhängigen Durchschlagsspannungen von Novec 4710 und SF_6 dargestellt.[9] Die Durchschlagsspannungen wurden anhand der ASTM-D877-Methode mit einem 2,5-mm-Spalt ermittelt. Es ist sichtbar, dass Novec 4710 in reinem Zustand eine rund doppelt so hohe dielektrische Festigkeit aufweist wie SF_6.

In **Bild 4** ist die Dampfdruckkurve von reinem Novec 4710 dargestellt. Der Siedepunkt beträgt bei Umgebungsdruck -5°C. Obwohl diese Werte gegenüber anderen untersuchten Gasen wesentlich besser sind, kann dieses Gas in GIS-Anlagen ebenfalls nicht als reines Gas verwendet werden. Als Hintergrundgas wird CO_2 vorgeschlagen, da die Lichtbogenlöscheigenschaften von CO_2 verglichen mit Luft, Sauerstoff oder Stickstoff besser sind.[3]

In **Bild 5** ist die dielektrische Festigkeit von Novec 4710 in Abhängigkeit des Mischverhältnisses mit CO_2 dargestellt.[9] Die dielektrische Festigkeit liegt bereits bei einem Mischverhältnis von 10% Novec 4710 und 90% CO_2 bei rund 90% von SF_6. Mit einer leichten Erhöhung des Druckes respektive durch eine geringfügige Optimierung von Komponenten kann damit eine dielektrische Festigkeit wie bei SF_6 erreicht werden. Mit diesen Massnahmen kann in Zukunft dieselbe Kompaktheit der Anlagen wie bei heutigen SF_6-Pendants erreicht werden.

Obwohl das vorgeschlagene Fluorierte Nitril als reines Gas immer noch ein relativ hohes Treibhauspotenzial besitzt, reduziert sich das Treibhauspotenzial bei der Mischung mit CO_2 auf einen Wert von unter 400. Dies führt zu einer Reduktion des Treibhauspotenzials von 98% im Vergleich zu SF_6.

Neben den bereits erwähnten Resultaten wurden weitreichende Untersuchungen hinsichtlich Langzeitstabilität, Toxizität (reines und mit Zersetzungsprodukten verschmutztes Gas), Entflammbarkeit, Materialkompatibilität und Wärmeleitfähigkeit durchgeführt und zum Teil publiziert.[9,10] In **Tabelle 2** sind die wichtigsten Eigenschaften des Gases Novec 4710 zusammengefasst.

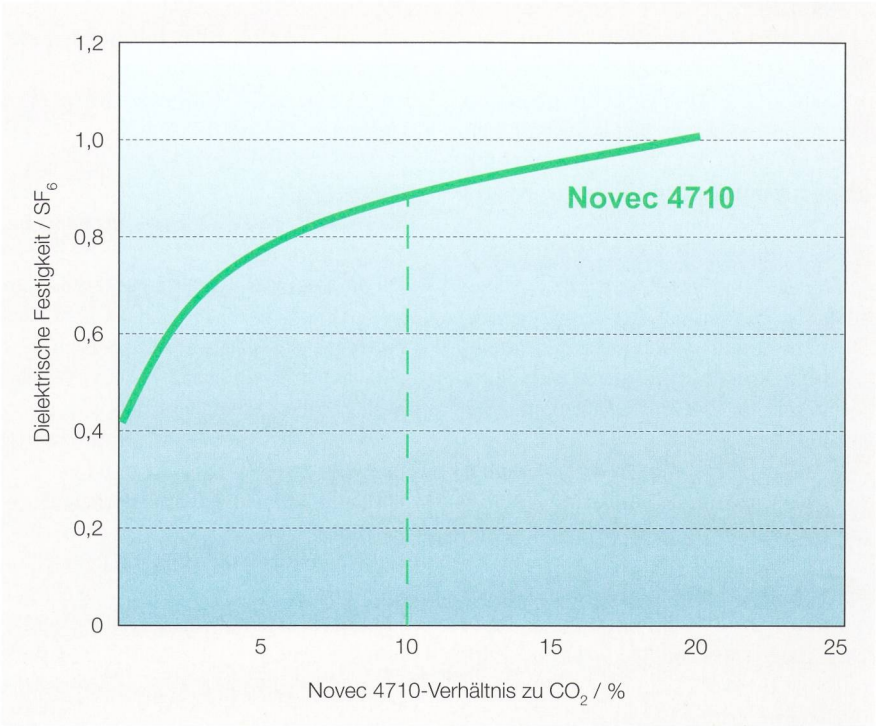

Bild 5 Dielektrische Festigkeit von Novec 4710 bei Wechselspannung in Abhängigkeit mit dem Mischverhältnis mit CO_2.

Eigenschaft	Wert
Siedepunkt	–5 °C
Dielektrische Festigkeit verglichen mit SF_6	~2
Toxizität	Vergleichbar mit SF_6 sowohl im reinen wie auch verschmutzten Zustand
Relatives Treibhauspotenzial im Vergleich zu CO_2	<400
Korrosion	nicht korrosiv gegenüber den gängigen Materialien
Entflammbarkeit	nicht entflammbar
Langzeitstabilität	sehr gut
Anwendungsbereich	–25 °C (GIS), –30 °C (AIS)
Einsatzbereich	Mittelspannung bis Ultrahochspannung

Tabelle 2 Wichtige Eigenschaften von Novec 4710.

Bilder: Autoren

Bild 6 Dielektrische Typprüfung einer 145 kV-GIS-Schaltanlage im Hochspannnungslabor in Oberentfelden.

Ausblick

Mit dem Fluorierten Nitril Novec 4710 wurden bereits diverse Typprüfungen an Hochspannungskomponenten durchgeführt. **Bild 6** zeigt ein Feld einer 145 kV-GIS-Anlage bei der Hochspannungsprüfung im Labor beim Hersteller.

Neben dielektrischen Versuchen wurden auch Erwärmungsversuche durchgeführt. Die Resultate zeigen ein gegenüber SF_6 geringfügig schlechteres Wärmeabfuhrvermögen. Mit konstruktiven Massnahmen kann dieser Effekt kompensiert werden.

Schaltversuche mit Trennern zeigten, dass das induktive Schaltvermögen weitgehend identisch zu SF_6 ist. Die Lichtbogenzeiten und der Abbrand an den Kontakten verhalten sich sehr ähnlich. Bei kapazitiven Schalthandlungen wurde festgestellt, dass das Design der Kontakte aufgrund der schwächeren Elektronenaffinität des Gases leicht angepasst werden muss. Dieser Effekt ist in [11] ausführlich beschrieben. Schaltversuche mit Hochspannungsleistungsschaltern zeigten ebenfalls sehr positive Resultate. Erste kommerziell erhältliche Produkte mit dem Gas Novec 4710 werden Mitte 2015 erwartet.

Referenzen

[1] M. Hairbour et al., Dielectric Withstand of N_2, CO_2 and SF_6 in GIS, Cigré SC B3, Publication No. 203, Berlin, 2007.
[2] New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) Report, Feasibility Study on Application of SF_6 Alternative Gas (CF_3I) to the Market of Electric Equipment for Power Transmission, Transformation and Substation System (FY2004) final Report, Japan, 2005.
[3] M. Taki et al., Interruption Capability of CF_3I Gas as a Substitution Candidate for SF_6 Gas, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2, 2007.
[4] M. Hikita et al., Insulation Characteristics of Gas Mixtures including Perfluorocarbon Gas, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 4, 2008.
[5] H. Katagiri et al., Investigation of the Performance of CF_3I Gas as Possible Substitute for SF_6, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 5, 2008.
[6] M. Nguyen Ngoc et al., Electrical Breakdown of CF_3I and CF_3I-N_2 Gas Mixtures, CEIDP, 2009.
[7] Luly et al., Gaseous dielectrics with low global warming potentials, US Patent 8080185 B2, 2011.
[8] Phil E. Tuma, A Low-GWP Fluoroketone Potential Alternative to SF_6 in Some Dielectric Applications?, NEMA Ad Hoc Task Group on SF_6, Hyatt Regency Phoenix, 2009.
[9] Y. Kieffel et al., SF_6 alternative development for high voltage switchgears, Cigré Paper D1-305, Paris, 2014.
[10] D. Gautschi, K. Pohlink, R. Lüscher, Y. Kieffel, Limitations, trends and potentials in the design of modern gas-insulated high voltage switchgear, Cigré Paper B3-112, Paris, 2014.
[11] D. Gautschi, F. Meyer, Y. Kieffel, Verwendung alternativer Gase für metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen, Stuttgarter Hochspannungssymposium 2014, Stuttgart, 2014.

Autoren

David Gautschi ist Leiter der Abteilung Technische Dienste der Alstom Grid AG.
Alstom Grid AG, 5036 Oberentfelden
david.gautschi@alstom.com

Karsten Pohlink ist Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Alstom Grid AG.
karsten.pohlink@alstom.com

[1] LC_{50}: Konzentration des Gases in Luft, die innerhalb eines definierten Zeitraums für 50% der Lebewesen tödlich ist.

Résumé **Peut-on remplacer le SF_6 dans les installations de couplage à haute tension?**

De nouveaux travaux de recherche livrent des résultats prometteurs

De nos jours, l'hexafluorure de soufre (SF_6) est le moyen d'isolation et de commutation dominant, ainsi que le gaz d'extinction de l'arc électrique dans des installations de couplage à haute tension à isolation gazeuse. Malheureusement, ce gaz a un potentiel d'effet de serre élevé. C'est la raison pour laquelle les préoccupations quant à la protection de l'environnement ont poussé la branche depuis longtemps à faire des efforts pour remplacer le SF_6. Au cours des dernières années, de nombreux fonds ont été investis dans la recherche et divers gaz et mélanges de gaz ont été analysés. Le point d'ébullition de divers gaz de remplacement potentiels étant plus bas, il s'est avéré avec le temps qu'un seul gaz ne répondait pas à toutes les exigences.

C'est pourquoi les travaux se sont étendus à divers mélanges de deux, voire trois gaz. Le gaz Novec 4710 de la famille des nitriles fluorés s'est avéré très prometteur en combinaison avec le CO_2. C'est un compromis idéal entre la température d'application, la capacité diélectrique et und potentiel d'effet de serre peu élevé. Raisons pour lesquelles ce gaz pourrait bien, à l'avenir, remplacer le SF_6 dans les installations à haute tension. Les premiers produits avec le gaz Novec 4710 sont attendus au cours de l'année 2015. Se