

Teilentladungsverhalten von umweltfreundlichen Isoliergasen

Untersuchungen mit neuem Versuchs-
aufbau und modularer Testzelle



Messeinrichtung mit
Testzelle rechts. Bilder: FKH

Nur wenn bekannt ist, wie sich Fehlerstellen wie scharfkantige Spitzen an Elektroden, Verschmutzungen auf Isolatoren oder frei bewegliche metallische Partikel in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) unter realen Bedingungen verhalten, können sie zuverlässig detektiert und das von ihnen ausgehende Risiko für den Betrieb abgeschätzt werden. GIS führen die Ströme gekapselt in Aluminium- oder Stahlgehäusen, die mit Gasen unter Druck gefüllt sind, um die spannungsführenden Leiter gegeneinander und gegen die Gehäuse auf Erdpotenzial zu isolieren. Da solche Anlagen ein geschlossenes System darstellen, können Fehlerstellen nur indirekt nachgewiesen werden.

Fehlerstellen schwächen die Isolation und führen dazu, dass ein kleiner Teil der Isolationsstrecke Hunderte Male pro Sekunde überbrückt wird, ohne dass dabei ein totaler Erdschluss entsteht. Dabei entstehen mehrere «Mikrolichtbögen» im Gas oder in einem Isolierstoff, die als Teilentladungen bezeichnet werden. Teilentladungen können sich über verschiedene Mechanismen und über Zeitskalen von einem Bruchteil einer Sekunde bis mehreren Jahrzehnten zu einem vollständigen Durch-

IN KÜRZE

schlag der Isolationsstrecke entwickeln und somit zum Ausfall der Schaltanlage bzw. von Teilen der Schaltanlage führen. Vor der Inbetriebnahme (FAT/SAT) können Fehlstellen mit entsprechend hoher Teilentladungsmessspannung am effektivsten diagnostiziert und lokalisiert werden. Im Betrieb können bei Betriebsspannung aktive TE-Quellen durch Monitoring oder Diagnosemessung detektiert werden. TE-Quellen mit höherer Einsatzspannung, die erst bei Transienten zum Durchschlag führen, können bei Betriebsspannung nicht detektiert werden.

Die physikalischen Entladungsvorgänge lassen sich auf verschiedene Arten indirekt nachweisen:

- Mittels konventioneller TE-Messung wird das Integral der Ladungsverschiebung an einem parallel geschalteten Koppelkondensator gebildet und mit einem bekannten Kalibrierpuls verglichen.
- Mittels UHF-Antenne wird die von der Entladung ausgestrahlte elektromagnetische Welle empfangen, die sich im Gasraum ausbreitet und innerhalb des Gehäuses in komplizierter Weise reflektiert, gedämpft und gefiltert wird.
- Mittels akustischer Sensoren kann unter günstigen Voraussetzungen auf der Oberfläche der Gehäuse eine von der Teilentladung erzeugte Körperschallwelle gemessen werden, die sich vom Entladungsort auf das Gehäuse überträgt.
- Mittels Lichtsensoren werden beispielsweise an einem Schauglas ankommende direkte oder indirekte Lichtemissionen der Entladungserscheinung gemessen.

Teilentladungserscheinungen weisen eine charakteristische Verteilung der Entladungspulse relativ zur Spannungsamplitude und zum Phasenwinkel der Spannung auf. Bild 1 zeigt das ladungsbasierte Teilentladungsmuster einer Fehlerstelle «Spitze an Erdpotenzial». Das charakteristische Muster für diesen Fehlertyp entsteht dadurch, dass physikalisch bedingt die Entladungspulse nahe dem positiven Spannungsmaximum entstehen, sodass sich gemessen über mehrere Perioden eine Punktwolke ausbildet.

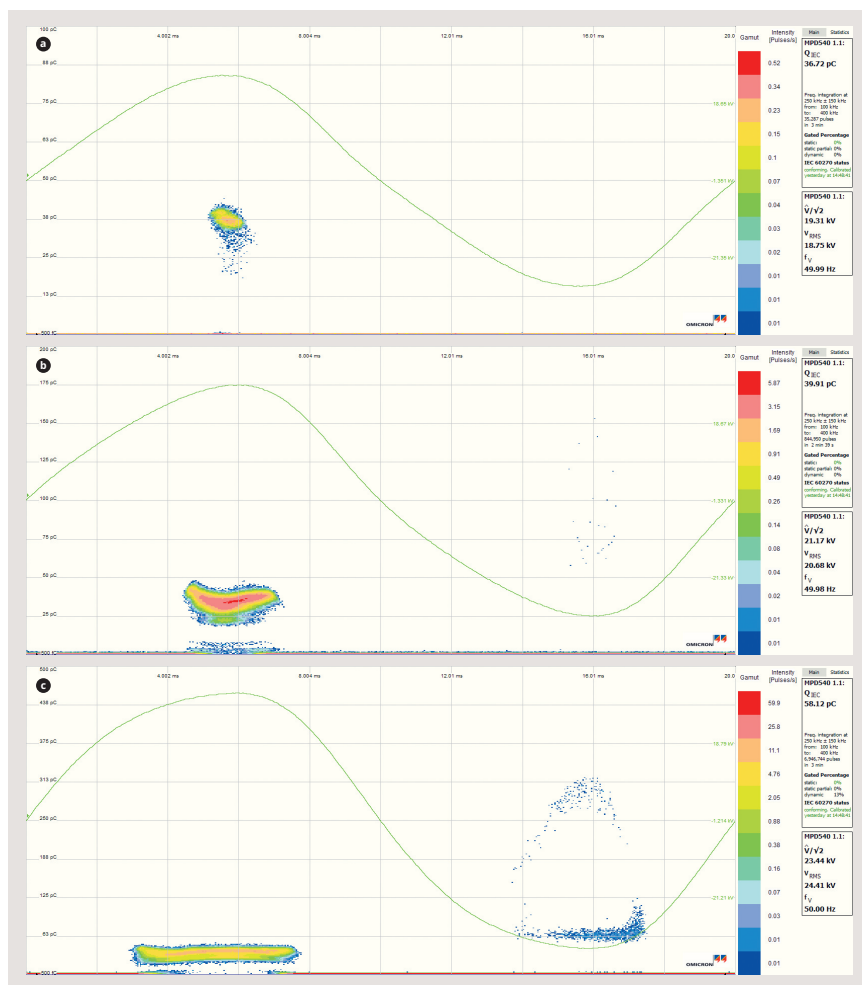


Bild 1 Typisches Beispiel eines Teilentladungsmusters einer Spitze auf Erdpotenzial in synthetischer Luft bei einem absoluten Druck von 5 bar.

a) PD-Einsatzspannung PDIV, b) 1,1 x PDIV, c) 1,2 x PDIV.

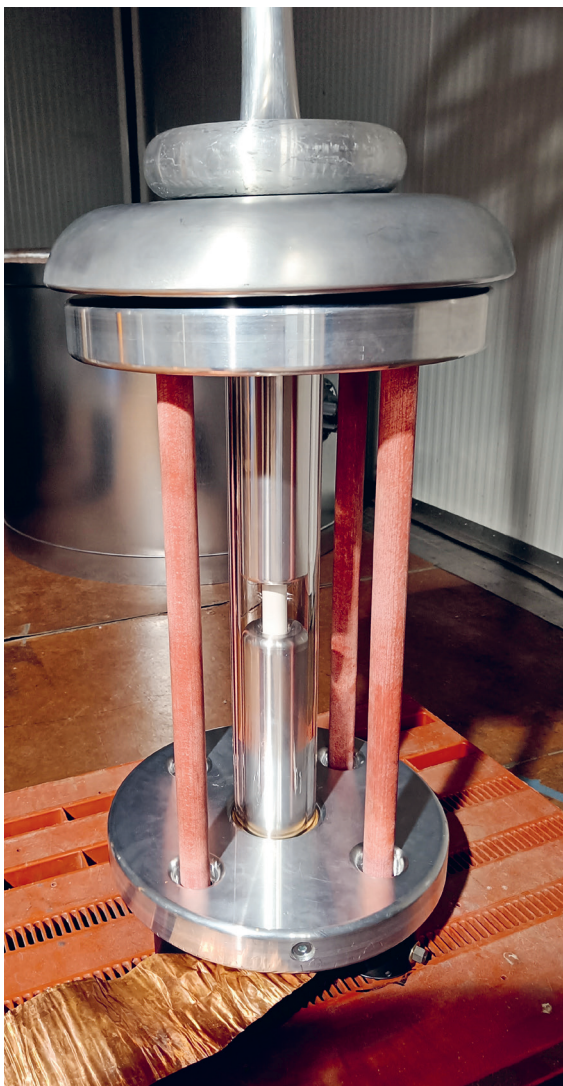


Bild 2 Durch Cigre WG D1.78 entwickelte modulare Testzelle, die den Einbau von Defektarten erlaubt und reproduzierbare Messungen ermöglicht.



Bild 3 Die Fehlerstelle «frei bewegliches Partikel» ist eine der drei Fehlerstellen der Testzelle.

Jeder Punkt auf dem Bild entspricht einem Entladungspuls (oder mehreren farbcodierten Pulsen). Mit steigender Spannung verändert sich das physikalische Verhalten, und es können sich auch in der zweiten Halbwelle nahe dem negativen Spannungsmaximum Entladungspulse bilden.

Unsere Erfahrung in der Beurteilung von Teilentladungen in GIS basiert hauptsächlich auf dem Verständnis der physikalischen Vorgänge, wie sie in Referenzanordnungen in SF₆ oder in Luft ablaufen. Für SF₆-gefüllte Schaltanlagen wurden zudem über Jahrzehnte zahlreiche Teilentladungsmuster von realen Fehlerstellen in Schaltanlagen gesammelt, von denen aufgrund der anschliessenden Fehlerbehebung nachweislich bekannt ist, welche Fehlerstelle sie verursacht hat.

Grundlagenexperimente an der FKH

Wie sieht es aber bei anderen Isoliergasen aus? Denn mit ihnen verändern sich die Parameter der physikalischen Prozesse, die die Ladungsverschiebungen hervorrufen und die elektromagnetischen Wellen, die optischen Signale und die akustischen Druckwellen aussenden? Um dies zu beurteilen, werden kontrollierbare Referenzanordnungen eingesetzt.

Für typische Fehlerstellen muss der Einfluss des Gastyps auf die Entladungsprozesse systematisch ausgemessen und der beobachtete Einfluss auf die ausgesendeten Signale dokumentiert werden, die zur Beurteilung des Fehlertyps verwendet werden. Genau dies wurde im vergangenen Jahr durch die Fachkommission für Hochspannungsfragen in aufwendigen Experimenten im Kleinlabor getan.

Moderne, umweltfreundliche Schaltanlagen werden mit einer Mischung der Gase N₂, CO₂, O₂ oder C₄-FN befüllt. Die verwendeten Gase und Gas-mischungen variieren von Hersteller zu Hersteller und Anwendungsgebiet. Die Autoren dieses Beitrags, Michael Walter (Convenor), Glenn Behrmann (Secretary) und Stefan Neuhold, sind Mitglieder der internationalen Cigre-Arbeitsgruppe D1.78, die das Teilentladungsverhalten in diesen alternativen Isoliergasen in einem Ringversuch mit bis zu zehn teilnehmenden Laboren untersucht. Der Praktikant Paul Demel aus Magdeburg (Deutschland) und Rona Dehari aus Nordmazedonien unterstützten das Projekt, indem sie entsprechende Experimente als Teil ihrer Praktikumsarbeiten durchgeführt haben.

Versuchsaufbau und Testzelle

Der durch die Arbeitsgruppe entwickelte Versuchsaufbau umfasst einen Transformator, eine Testzelle (Bild 2), in der einer von drei austauschbaren Defekten eingebaut ist, einen herkömmlichen ladungs-basierten Teilentladungs-Messaufbau nach IEC 60270 sowie einen UHF-Teilentladungs-Messaufbau.

Die Testzelle kann mit einem beliebigen Gasgemisch mit einem Druck bis zu 15 bar (rel.) befüllt

werden. Die in der Praxis häufig vorkommenden Fehlerstellen «Spitze-Platte», «frei bewegliches Partikel» (Bild 3) und «Partikel auf Isolator» können eingebaut werden.

Um die Abhängigkeit der Experimente von möglichen Einflussfaktoren zu minimieren und die optimale Messprozedur zu ermitteln, wurde ein grosser Aufwand beim Design der Testzelle betrieben. Dadurch können künftige Experimente unter exakt denselben Bedingungen in einem anderen Labor durchgeführt werden. Im Idealfall führen sie zu identischen Resultaten.

Das Teilentladungsverhalten ist nicht nur vom Mischverhältnis der Gase, sondern auch vom Gasdruck abhängig sowie von der Grösse, Position und Form der Fehlerstelle, von mikroskopischen Veränderungen an der Fehlerstelle durch die Entladungserscheinung, von Aufladungseffekten des Isolierstoffs und von zahlreichen weiteren Faktoren.

Auswirkung der Gasmischung auf Teilentladungssignale

Bei Gasmischungen handelt es sich um eine Gasisolation unter Druck als Isoliermedium. Das Design der SF₆-freien Schaltanlagen ist vergleichbar, wobei mit Luftmischungen betriebene Schaltanlagen die geringere dielektrische Festigkeit mit leicht grösseren Gehäusedimensionen kompensieren. Die Teilentladungsmuster weisen bezüglich der Phasenlage eine hohe Ähnlichkeit zur SF₆-Isolation auf. Ein- und Aussetzspannung sowie Frequenzinhalt der TE-Signale können dagegen von Gas zu Gas variieren. Dies ist Gegenstand der aktuell laufenden Untersuchungen. Aufgrund des aktuellen Wissensstands bzw. der Versuche gehen wir davon aus, dass viele der mit SF₆-Anlagen gemachten Prüferfahrungen auch auf Anlagen mit alternativen Isoliergasmischungen übertragbar sind.

Der Einfluss des Gases auf das Entladungsverhalten variiert mit dem Typ der Fehlerstelle, da ihnen unterschiedliche physikalische Entladungsmechanismen zugrunde liegen. Beispielsweise bleibt das feldabhängige Teilentladungsverhalten in einem Lunker unverändert, solange er abgeschlossen in einem Isolator existiert und nicht in Kontakt mit dem Isoliergas kommt.

Die Entladungserscheinung eines hüpfenden metallischen Partikels wird dominiert durch die Kräfte des elektrischen Feldes, die die Bewegung des Partikels auslösen. Obwohl diese unabhängig vom Isoliergas sind, kann die Viskosität des Gases die Flugbahn der Partikel trotzdem beeinflussen.

Bei der Spitze-Platte-Anordnung hingegen wird die Entladungserscheinung dominiert durch eine Lawine von Elektronen, die sich an der Spitze bildet und vorwächst. Indem die Gasmischung das Vorwachsen des Entladungskanals über die Elektronegativität und die Elektronenaffinität beeinflusst, wirkt sie sich verglichen mit dem Teilentladungsverhalten von hüpfenden Partikeln stärker auf das Teilentladungsverhalten bei Spitzen aus.

Für die eigenen Versuche der Cigre-Arbeitsgruppe werden die folgenden kritischen Defekte untersucht, die statistisch häufig vor Ort anzutreffen sind und in Kontakt mit dem Gas auftreten:

- Spitze-Platte (kleines TE-Signal, Kritikalität bei Blitzstossspannung)
- frei bewegliches Partikel (grosses TE-Signal, Kritikalität bei Wechselspannung)
- haftendes Partikel auf einem Isolierstoff (sehr kleines TE-Signal / Kritikalität bei Blitzstossspannung)

Es werden folgende von den Herstellern vorgeschlagenen Gase und Gasmischungen untersucht und unter identischen Experimentbedingungen mit SF₆ verglichen:

- SF₆
- Synthetische Luft mit 80 % N₂ / 20 % O₂
- 3,5 % C₄-FN / 10 % O₂ / 86,5 % CO₂
- 90 % CO₂ / 10 % O₂
- 62 % N₂ / 38 % CO₂

Wie auch in SF₆-Gas ist für die Defektart Spitze-Platte das Verhältnis zwischen der Teilentladungseinsetzspannung (PDIV) und der mittleren Durchschlagsspannung bei AC (ACBD), stark druck-, gas- und geometrieabhängig. Der Spitzenradius einer Nadel wirkt sich stark auf die PDIV aus, aber nur begrenzt auf die ACBD.

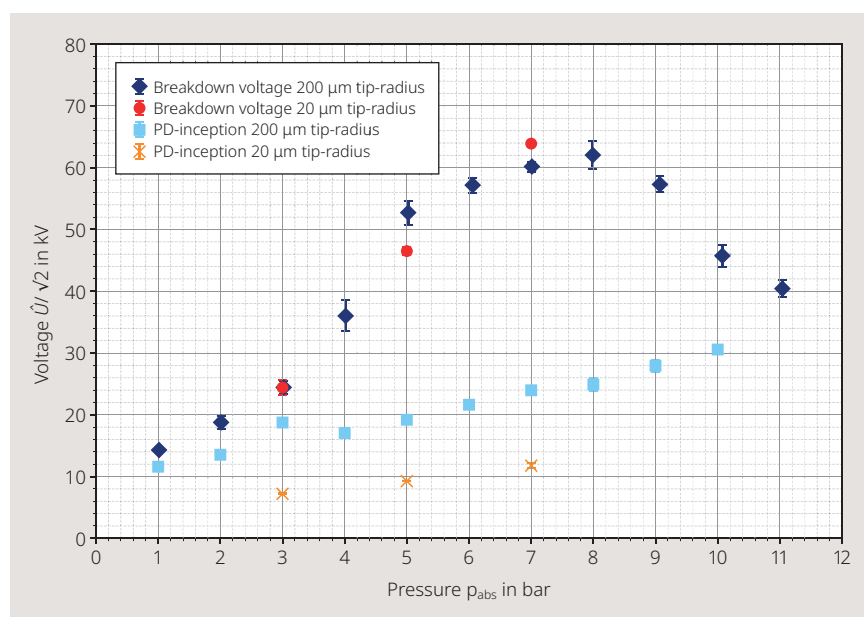


Bild 4 Je höher der Druck, desto näher kommen sich die TE-Einsetzspannung und die Durchbruchspannung (Medium synthetische Luft). | Bild: Cigre

Bei alternativen Isoliergasen wird die geringere dielektrische Festigkeit mit höheren Drücken kompensiert. Dies kann zu einer Herausforderung werden, denn bei höheren Drücken wird der Abstand zwischen PDIV und ACBD wieder kleiner, wodurch Teilentladungen erst auftreten, wenn die Durchschlagsspannung fast erreicht ist.

Schlussfolgerungen

Die experimentellen Untersuchungen von Teilentladungsaktivitäten sind komplex. Für reproduzierbare aussagekräftige Messungen muss der Einfluss von vielen Parametern verstanden und beherrscht werden. Für den Defekt Spitze-Platte stimmen die modellierten PDIV ziemlich genau mit den experimentellen Daten überein.

Die D1.78 Testzelle hat sich für die Defekte «Spitze-Platte» und «hüpfendes Partikel» als optimal erwiesen, um das Teilentladungsverhalten und das AC-Durchschlagsverhalten unter kontrollierbaren Bedingungen mit Unsicherheiten von wenigen kV zu untersuchen. Die Vorversuche zum Defekt hüpfendes Partikel auf Isolierstoff (physikalisch komplexester Defekt) sind noch nicht abgeschlossen.

Autoren

Dr. Michael Walter ist Geschäftsleiter der FKH.

> FKH, 8050 Zürich

> walter@fkh.ch

Dr. Stefan Neuhold ist Fachverantwortlicher GIS bei der FKH.

> neuhold@fkh.ch

Glenn Behrmann ist Fachingenieur bei der FKH.

> behrmann@fkh.ch

Comportement en matière de décharges partielles des gaz isolants écologiques

Études réalisées à l'aide d'un nouveau dispositif expérimental et d'une cellule d'essai modulaire

Ce n'est qu'en connaissant le comportement, dans des conditions réelles, des défauts tels que les corps étrangers, les impuretés ou les particules libres présents dans les appareillages de commutation isolés au gaz qu'il est possible de les détecter de manière fiable et d'évaluer le risque qu'ils représentent pour l'exploitation. Ces appareillages acheminent les courants encapsulés dans des enveloppes métalliques remplies de gaz sous pression, afin d'isoler les conducteurs sous tension les uns des autres ainsi que par rapport aux enveloppes mises à la terre. Si ces installations ne sont pas ouvertes, les défauts ne peuvent être détectés qu'indirectement.

Avec des gaz isolants alternatifs au SF₆ tels que le N₂, le CO₂, l'O₂ ou le C₄-FN, les paramètres des processus physiques qui provoquent les transferts de charge et émettent des ondes électromagnétiques, des signaux optiques et des ondes de pression acoustiques changent. Ces changements sont évalués à l'aide de dispositifs de référence contrôlables. L'influence du type de gaz sur les phénomènes de décharge doit être systématiquement mesurée pour les défauts typiques, et l'influence observée sur les signaux émis, qui sont utilisés pour évaluer le type de défaut, doit être documentée.

Le dispositif expérimental développé par un groupe de travail du Cigre comprend un transfor-

mateur, une cellule d'essai dans laquelle est intégré l'un des trois défauts interchangeable, un dispositif de mesure des décharges partielles classique basé sur la charge selon la norme CEI 60270, ainsi qu'un dispositif de mesure des décharges partielles UHF. La cellule d'essai peut être remplie d'un mélange gazeux quelconque à une pression pouvant atteindre 16 bar. Il est possible d'y intégrer les défauts fréquemment rencontrés en pratique «pointe-plan», «particule libre» et «particule sur isolateur». Lors des expériences, les gaz alternatifs sont directement comparés au SF₆ dans des conditions expérimentales identiques.

Les essais préliminaires avec le défaut «pointe-plan» ont montré que le rapport entre la tension d'apparition des décharges partielles (PDIV) et la tension moyenne de claquage en régime AC (ACBD) dépend fortement de la pression, du gaz et de la géométrie. Le rayon de la pointe d'une aiguille a un impact important sur la PDIV, mais seulement limité sur l'ACBD.

Avec les gaz isolants alternatifs, la rigidité diélectrique plus faible est compensée par des pressions plus élevées. Cela peut constituer un défi, car à des pressions plus élevées, l'écart entre la PDIV et l'ACBD diminue à nouveau, ce qui fait que les décharges partielles n'apparaissent que lorsque la tension de claquage est presque atteinte.