

TEILENTLADUNGSVERHALTEN VON SF₆ UND UMWELTFREUNDLICHEN ALTERNATIVGASEN

Bernhard SCHOBER¹, Uwe SCHICHLER¹

Einleitung

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) wurden in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Bis dahin dominierten luftisolierte Schaltanlagen den Energieübertragungssektor. Heutzutage stehen beide Technologien in Konkurrenz, wobei die gekapselten Anlagen durch die Verwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) als Isoliergas sehr viel kompakter gebaut werden können (Reduzierung des Platzbedarfs um bis zu 90 %). Für Offshore-Anwendungen (z. B. Offshore-Windparks) bieten GIS im Vergleich zu luftisolierten Schaltanlagen eine kompakte Lösung mit geringem Platzbedarf. Auch an Land verringert der Einsatz von GIS den Platzbedarf, was in städtischen Gebieten von entscheidender Bedeutung ist. Außerdem erhöht die geringere optische Wirkung die Akzeptanz in der Öffentlichkeit.

Seit vielen Jahrzehnten wird SF₆ aufgrund seiner hervorragenden elektrischen Eigenschaften als Isoliergas und zur Lichtbogenlöschung angewendet. Allerdings besitzt es das höchste bekannte Treibhauspotential. Aus diesem Grund wurde die Forschung nach umweltfreundlichen Alternativgasen angeregt.

Umweltaspekte ausgewählter Isoliergase

Aufgrund des hohen Treibhauspotenzials geriet SF₆ zunehmend in die Kritik. Laut IPCC AR5 ist es mit einem GWP₁₀₀ von 23.500 das potenteste Treibhausgas und verbleibt 3.200 Jahre in der Atmosphäre. Trotz Beschränkungen und Maßnahmen zur Reduzierung kann ein ständiger Anstieg in der Atmosphäre beobachtet werden. SF₆ ist oberhalb einer Temperatur von -64 °C gasförmig, chemisch inert, ungiftig und nicht brennbar. In GIS beträgt der Gasdruck in der Regel 0,7 MPa, wodurch das Gas bis -40 °C eingesetzt werden kann. Die Durchschlagsfestigkeit beträgt 88 kV/cm und SF₆ kommt in der Hochspannung (HS) und Mittelspannung (MS) zur Anwendung. Der Entwurf zur neuen F-Gase-Verordnung der EU vom 05.10.2023 verbietet ab Januar 2028 Anlagen von 52 kV bis 145 kV und bis 50 kA mit einem GWP₁₀₀ von 1 oder mehr, ab Januar 2032 sollen Anlagen mit höheren Spannungen und Strömen folgen, wobei Ausnahmen gelten. In den letzten Jahren haben sich für die HS hauptsächlich zwei Alternativgase herauskristallisiert. Die erste Alternative ist Green gas for grid (g³), basiert auf einer Mischung aus < 10 % Novec™ 4710 sowie CO₂ und reduziert die Treibhausgasemissionen um bis zu 98 %. Die Durchschlagsfestigkeit beträgt zwischen 84 % und 100 % der von SF₆, wobei der Hauptnachteil der relative hohe GWP₁₀₀ ist. Das zweite Alternativgas ist trockene Luft (Clean Air), ein Gemisch aus 20 % O₂ und 80 % N₂, wobei die Durchschlagsfestigkeit lediglich 35 kV/cm beträgt und der Gasdruck auf 0,8 MPa erhöht werden muss. Diese umweltfreundliche Alternative kommt in der MS und HS zur Anwendung und besitzt kein Treibhauspotential [1 – 9]. Eine Gegenüberstellung der Gase ist in *Tabelle 1* zu finden.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Isoliergase [1, 2, 6]

	SF ₆	g ³	Clean Air
Chemische Formel	SF ₆	C ₄ F ₇ N und CO ₂	O ₂ /N ₂
Siedetemperatur	-63,8 °C	-4,7 °C	-196 °C
Anwendungsbereich	MS/HS	MS/HS	MS/HS
Dielektrische Eigenschaften	88 kV/cm	74 – 88 kV/cm	35 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	3.200 Jahre	11 Jahre	0 Tage
GWP₁₀₀	23.500	< 760	0
Minimale Temperatur	-40 °C	-30 °C	-50 °C

Teilentladungsverhalten ausgewählter Isoliergase

Zur Analyse des Teilentladungsverhaltens und Interpretation typischer Defekte von GIS/GIL-Anlagen haben sich bei Gleichspannung die NoDi*-Diagramme bewährt. In diesen wird die Ladungsdifferenz

¹ Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Österreich, Tel.: +43 316 873 7423, E-Mail: bernhard.schober@tugraz.at, www.ihs.tugraz.at

$\Delta q_i = q_i - q_{i+1}$ und die Zeitdifferenz $\Delta t_i = t_i - t_{i+1}$ zweier aufeinander folgender Teilentladungen (TE) in drei Kombinationen dargestellt. Für die TE-Messungen bei Wechselspannung wurden die etablierten phasen aufgelösten TE-Muster (PRPD pattern, Phase Resolved Partial Discharge pattern) verwendet. Die untersuchten TE-Defekte stellen Spitze am Innenleiter und Spitze am Gehäuse, freies Potential, Gleitentladungen und verschiedene freie metallische Partikel dar. Die Defekte wurden unter SF₆ und synthetischer Luft (Clean Air) bei Drücken von 0,1 MPa, 0,3 MPa und 0,5 MPa untersucht.

Bild 1a zeigt beispielhaft die Absolutbeträge der TE-Einsetzspannung U_e einer Spitze am Innenleiter unter SF₆ und synthetischer Luft (O₂/N₂) bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität. Mit zunehmendem Druck steigen die TE-Einsetzspannungen bei beiden Gasen und Polaritäten der Gleichspannung an. Erwartungsgemäß liegen die TE-Einsetzspannungen bei Gleichspannung mit negativer Polarität niedriger. Aufgrund der geringeren elektrischen Festigkeit von synthetischer Luft, verglichen mit der von SF₆, liegen die TE-Einsetzspannungen jeweils niedriger. Bild 1b zeigt die Absolutwerte der gemittelten gemessenen Ladungswerte q_m . Mit zunehmendem Druck sinken die Ladungspegel, wobei diese bei synthetischer Luft um bis zu 10-mal größer sind. Dieses Verhalten konnte größtenteils auch für alle anderen untersuchten Defekte bestätigt werden. Bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit (SF₆ bei 0,1 MPa und O₂/N₂ bei 0,5 MPa) konnte näherungsweise das gleiche Teilentladungsverhalten erzielt werden. Somit ist bei der Verwendung von synthetischer Luft als Isoliergas eine Erhöhung des Betriebsdrucks notwendig, um ein annähernd gleiches TE-Verhalten bei Wechsel- und Gleichspannung zu erzielen.

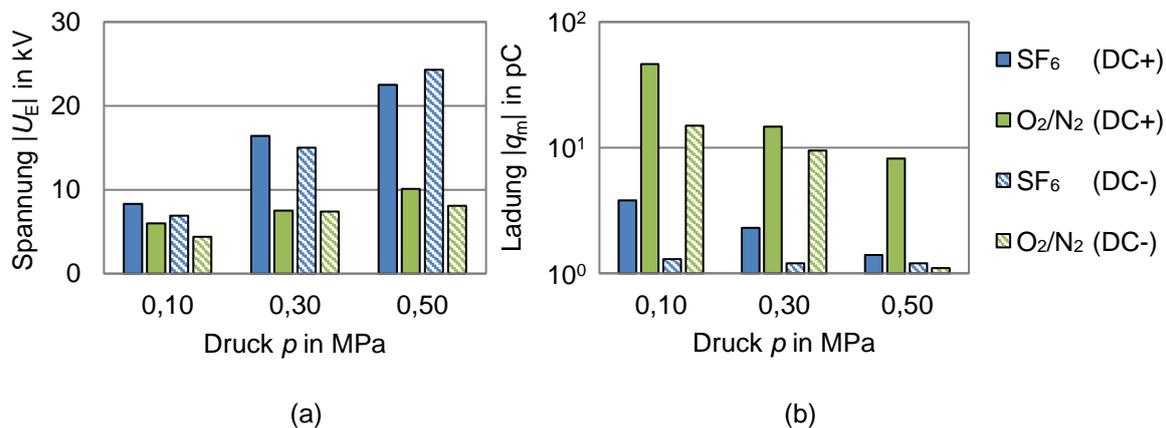


Bild 1: Vergleich der Absolutwerte (a) der TE-Einsetzspannungen U_E und (b) der mittleren Ladungswerte q_m einer Spitze am Innenleiter unter SF₆ und O₂/N₂ für Gleichspannung mit positiver (DC+) und negativer Polarität (DC-) in Abhängigkeit vom Druck p

Referenzen

- [1] K. Burges, M. Döring, C. Hussy, J.-M. Rhiemeier: „Concept for SF₆-free transmission and distribution of electrical energy“, Ecofys, Final report, 2018
- [2] S. Glomb, M. Göppel, P. Pilzecker: „„Alternative Gase“ und Gasmischungen Teil 1“, White Paper, 2020
- [3] Global Monitoring Laboratory: „Sulfur hexafluoride (SF₆) - Combined Dataset“, 2022. [Online]. Webseite: <https://gml.noaa.gov/hats/combined/SF6.html>. [abgerufen am 20.12.2023]
- [4] M. Rabie, C. Franck: „Assessment of Eco-friendly Gases for Electrical Insulation to Replace the Most Potent Industrial Greenhouse Gas SF₆“, Environmental science & technology, 2018
- [5] P. Konrad: „Einsatz von alternativen Isoliergasen in Hochspannungsschaltanlagen“, 2016. [Online]. Webseite: <https://www.strommarkttreffen.org/2016-1-Priebe-Einsatzvon-alternativen-Gasen-in-Hochspannungsschaltanlagen.pdf>. [abgerufen am 01.16.2023]
- [6] R. Mohamed, H. Charlotte: „Einordnung von Alternativen zum Einsatz von SF₆ in der elektrischen Energieversorgung, Überblick zum Stand einer Untersuchung im Auftrag des BMUB / UBA“, Ecofys, 2016
- [7] U. Schichler: „Application of SF₆-free High Voltage Circuit Breakers“, Omicron Diagnostic Forum, 2021
- [8] Siemens Energy: „Siemens Energy Blue High-Voltage Products, Sustainable switchgear technology for a CO₂ neutral future“, Produktbroschüre, 2021
- [9] K. Torsten: „Spreewind – Blue Portfolio SF₆-freie Hochspannungstechnik“, Siemens AG, 2018