



ALTERNATIVE FLÜSSIGKEITEN FÜR STUFENSCHALTER.

AUTOR: RAINER FROTSCHER





Inhalt

Seite

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Einführung | 3 |
| 2. Schwer entflammare Isolierflüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen | 4 |
| 3. Anforderungen an geeignete Flüssigkeiten für Stufenschalter | 6 |
| 4. Für alternative Flüssigkeiten geeignete Stufenschalter | 7 |
| 5. Qualifizierung von Stufenschaltern für ausgewählte Alternativflüssigkeiten | 8 |
| 6. Konfiguration regelbarer Leistungstransformatoren für Alternativflüssigkeiten | 10 |
| 7. Ausblick | 11 |
| 8. Literaturhinweise | 11 |



ALTERNATIVE FLÜSSIGKEITEN FÜR STUFENSCHALTER.

1. Einführung

In der elektrischen Energieversorgung werden elektrische Netze und Leistungstransformatoren zur Regelung und Steuerung des Lastflusses eingesetzt. Regelbare Leistungstransformatoren sind mit Laststufenschaltern (OLTC) oder Umstellern (DETC) ausgerüstet, die das Übersetzungsverhältnis ändern und so die Ausgangsspannung des Transformators den jeweiligen Bedingungen anpassen können. Dadurch wird das Stromversorgungsnetz auch unter wechselnden Lastverhältnissen stabil gehalten. Stufenschalter sind hoch entwickelte mechanische Geräte, die auch hochspannungstechnischen Anforderungen genügen müssen. Diese Kombination macht sie zu einzigartigen Komponenten in der Energieversorgungstechnik.

Regelbare Leistungstransformatoren sind in großer Mehrheit mit einer Isolierflüssigkeit gefüllt, deren Hauptaufgabe es ist, elektrisch zu isolieren und Verlustwärme abzuführen. Damit müssen die Flüssigkeiten zum einen eine entsprechende Spannungsfestigkeit aufweisen, um der im Betrieb auftretenden elektrischen Beanspruchung standzuhalten, zum anderen müssen sie eine adäquate Kombination aus Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärme und Viskosität besitzen, damit ein ausreichender Wärmetransport gewährleistet ist. Des Weiteren müssen sie mit allen im Transformatorenbau verwendeten Werkstoffen kompatibel sein und dürfen weder sich, noch den Werkstoff in funktionsgefährdender Weise verändern. In Bezug auf Stufenschalter ist weiterhin ein ausreichendes Schmiervermögen und eine gute Lichtbogenlöschfähigkeit notwendig. Die am weitesten verbreitete Isolierflüssigkeit, die all diese Anforderungen erfüllt, ist mineralisches Isolieröl gemäß den Spezifikationen nach IEC 60296, ASTM D3487 oder vergleichbaren Normen. Aus Erdöl raffiniertes Isolieröl ist bewährt und vergleichsweise kostengünstig. Neu ist die Verwendung sogenannter GtL-Öle (GtL: Gas-to-Liquid), die in einem komplexen Fertigungsprozess aus Erdgas (Methan) synthetisiert werden [1]. Aufgrund ihrer Verwandtschaft zu mineralischen Isolierölen und in Ermangelung eigener Standards gelten für GtL-Öle die gleichen Normen wie für herkömmliches Mineralöl. Mineralöle und GtL-Öle werden sinnvollerweise überall dort eingesetzt, wo ein erhöhter Brand- oder Umweltschutz nicht unbedingt erforderlich ist.

Der steigende Energieverbrauch in Ballungsräumen führt jedoch dazu, dass Hochspannungsleitungen vermehrt direkt in die Städte hineingeführt und damit Leistungstransformatoren in urbanem Umfeld installiert werden müssen. Geltende Sicherheitsvorschriften stellen an Hochspannungs-Installationen in unmittelbarer Umgebung bewohnter Gebiete hohe Anforderungen hinsichtlich Brandschutz, (toxischer) Rauchentwicklung und Folgeschäden durch Explosionen im Falle einer Fehlfunktion der Anlage. Für derartige Anwendungen sind schwer entflammare bzw. unbrennbare Isolierflüssigkeiten vorteilhaft. Bestimmte Isoliergase (SF₆ und dessen umweltfreundlichere Ersatzgase mit geringerem Treibhauspotential, sowie Stickstoff und Luft) bieten vergleichbare Vorteile, werden aber (hauptsächlich aus technischen Gründen) nur sehr vereinzelt eingesetzt.

Die Ausweitung von Wassereinzugsgebieten hat dazu geführt, dass immer mehr Umspannwerke, die ursprünglich „auf der grünen Wiese“ errichtet wurden, mittlerweile in ökologisch sensiblen Gebieten stehen. Da es sich hierbei nicht selten um Überschwemmungsgebiete handelt, sind offene Ölauffangwannen im Fundament des Transformators in der Regel nicht ausreichend. In solchen Anlagen sollten biologisch abbaubare Flüssigkeiten eingesetzt werden.

2. Schwer entflammable Isolierflüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen

Seitdem die Verwendung polychlorierter Biphenyle (PCB) in elektrischen Geräten Mitte der 1970er-Jahre nach und nach eingestellt und die Verwendung von PCBs im Jahre 2001, u. a. wegen seiner Bioakkumulation, weltweit verboten wurde, sind diverse Isolierflüssigkeiten entwickelt worden, die PCBs ersetzen sollten. Nicht alle dieser nicht-mineralischen Flüssigkeiten sind schwer entflammbar, wie beispielsweise niedrigviskose aromatische Kohlenwasserstoffe, auf die hier nicht näher eingegangen wird [2]. Als schwer entflammbar werden Flüssigkeiten ab einem Brennpunkt von $> 300^\circ\text{C}$ eingestuft (Flüssigkeiten der K-Klasse). Derartige Flüssigkeiten lassen sich in vier Kategorien einteilen.

a) Schwer entflammbare Kohlenwasserstoffe (HMWH: High Molecular Weight Hydrocarbons) gehörten zu den ersten umweltverträglicheren Alternativen nach der weltweiten Ächtung von PCBs. Sie werden aus paraffinischem, raffiniertem und bis zur elektrischen Güte gereinigtem Erdöl gewonnen. Ihre langkettigen Kohlenwasserstoffmoleküle sorgen für eine vergleichsweise hohe Viskosität und hervorragende Schmierfähigkeit, ihr Einsatz in kalten Regionen ist jedoch eingeschränkt. HMWH werden vorwiegend in Verteiltransformatoren eingesetzt. Aufgrund ihrer Nachteile (Kälteverhalten, eingeschränkte Bioabbaubarkeit) und Verfügbarkeit besserer Alternativen werden heutzutage kaum noch regelbare Leistungstransformatoren mit HMWH ausgerüstet.

b) Silikonöle bestehen aus Siliziumoxid-Ketten, die mit Methylgruppen abgesättigt wurden, und werden synthetisch hergestellt. Ihre hohe Flammwidrigkeit in Kombination mit hoher Temperaturstabilität macht sie zum bevorzugten Isolieröl für hochbeanspruchte, kompakte Transformatoren wie zum Beispiel Traktionstransformatoren. Silikonöle zeichnen sich durch eine weitgehend temperaturunabhängige Viskosität sowie einen sehr hohen Flammpunkt aus, besitzen jedoch eine unzureichende Schmierfähigkeit sowie ein nicht tolerierbares Verhalten unter Lichtbogenbelastung und in elektrischen Feldern. Auf blanken Elektroden bilden sich gelartige Ablagerungen aus Siliziumoxid, die Brücken in der Isolierstrecke ausbilden können (Abb. 1), wodurch die Spannungsfestigkeit der Isolierstrecke signifikant abnimmt. Ferner erzeugt die durch Schaltlichtbögen verursachte pyrolytische

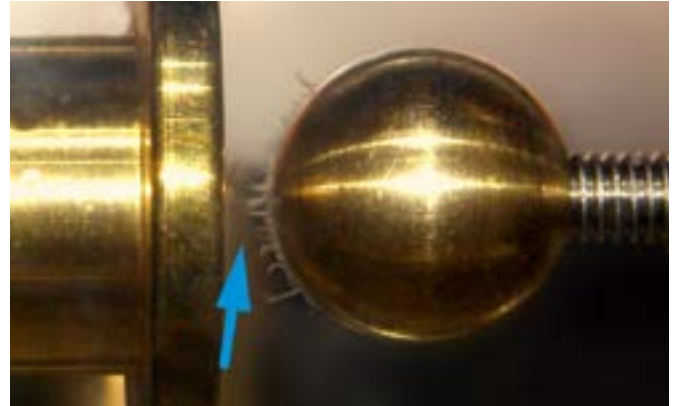


Abbildung 1: Flocken aus Siliziumoxid nach drei Wochen bei 20°C , bei einer Maximalfeldstärke von 2 kV/mm

Zersetzung Siliziumsand, der sich katastrophal auf die mechanische Lebensdauer beweglicher Stufenschalterkomponenten auswirken kann.

c) Synthetische Ester (Pentaerythritol-Tetra-Fettsäureester) sind synthetisch hergestellte Verbindungen aus Alkoholen und gesättigten Fettsäuren (Carboxylsäuren). Während des Herstellungsprozesses können die Flüssigkeitsparameter exakt eingestellt werden, wobei die Viskosität durch die Länge der Kohlenwasserstoffketten der Carboxylsäuren (i. d. R. zwischen C8 und C10) eingestellt wird. Die Viskosität synthetischer Ester für elektrotechnische Anwendungen liegt zwischen Mineralöl und HMWH. Synthetische Ester sind biologisch abbaubar und sehr feuchtigkeitstolerant, d. h. sie können große Mengen an Feuchtigkeit binden, wobei sie dennoch ihre guten elektrischen Eigenschaften beibehalten [3].

d) Natürliche Ester (Triglyceride) werden aus erneuerbaren Rohstoffen (Pflanzenölen) hergestellt. Die derzeit global verfügbaren Pflanzenöl-Ester für elektrotechnische Anwendungen basieren allesamt auf Soja- oder Rapsöl. In lokal begrenzten Märkten werden auch Isolieröle auf Sonnenblumen-, Nuss- oder Palmöl-Basis angeboten. Auch sind Mischungen aus verschiedenen Ölsaaten erhältlich. Die Mehrheit der Pflanzenöl-Ester setzt sich aus mehrfach ungesättigten, einfach ungesättigten und gesättigten Fettsäuren zusammen. Ungesättigte Fettsäuren sind oxidationsanfällig, gesättigte hingegen nicht, Letztere können dafür aber sehr dickflüssig sein. Die optimale Mischung verschiedener Fettsäuren führt zu einem Kompromiss zwischen ausreichender Oxidationsstabilität und akzeptabler Viskosität. Diese Eigenschaften

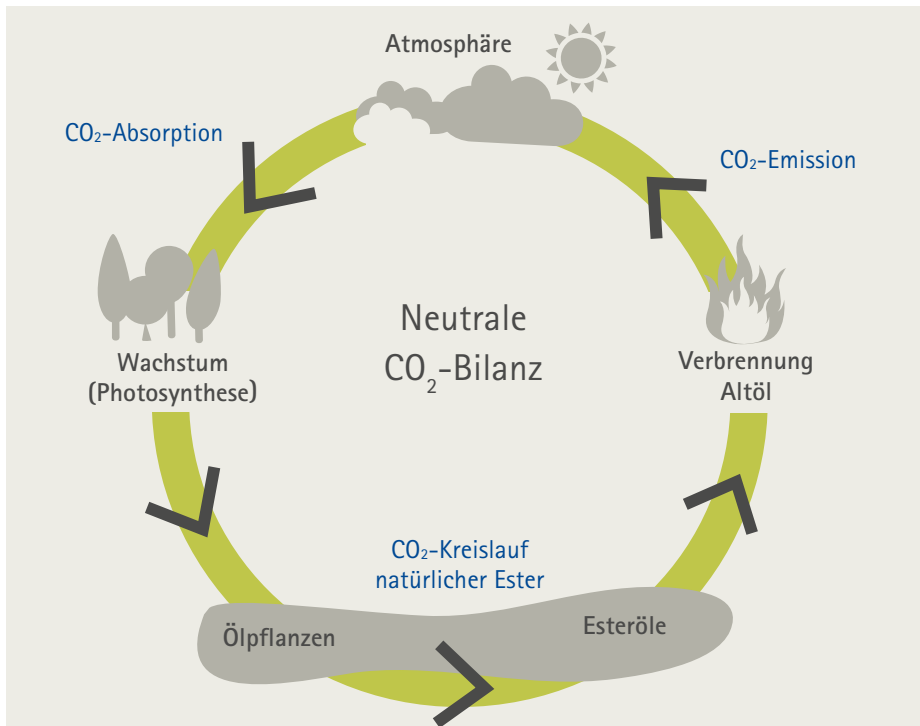


Abbildung 2: CO₂-Bilanz natürlicher Ester

können durch Zugabe von Additiven (Inhibitoren, Stabilisatoren, Fließpunkt-Erniedriger) verbessert werden, reichen aber derzeit noch nicht an die Fähigkeiten von mineralischem Isolieröl heran. Eine Ausnahme bildet Palmöl (PFAE: Palm Fatty Acid Ester), das ausschließlich gesättigte Fettsäuren enthält (gute Oxidationsstabilität), gleichzeitig aber extrem dünnflüssig ist (niedriger Fließpunkt). Das Schmiervermögen von PFAE ist exzellent, jedoch erreicht es bezüglich seiner Entflammbarkeit nicht die K-Klasse.

Da HMWH und Silikonöle aufgrund der vorstehend beschriebenen Nachteile in Stufenschaltern nur beschränkt einsetzbar sind, erweisen sich Flüssigkeiten auf der Basis von natürlichem oder synthetischem Ester als die deutlich bessere Wahl, insbesondere wenn biologische Abbaubarkeit und Brandsicherheit gleichzeitig gefordert werden. Ein unbestreitbarer Vorteil natürlicher Ester gegenüber ihrem synthetischen Pendant liegt in ihrer günstigen CO₂-Bilanz. Natürliche Ester sind CO₂-neutral, d. h. das von Pflanzen während des Wachstums absorbierte Kohlendioxid wird

während der Entsorgung des Öles in derselben Menge wieder in die Atmosphäre abgegeben (Abb. 2).

Andererseits ist die langfristige Oxidationsstabilität natürlicher Ester unzureichend. Oxidation bewirkt eine negative Veränderung diverser Eigenschaften wie zum Beispiel eine Erhöhung der Viskosität [4]. Ein Anstieg der Viskosität verschlechtert das Fließverhalten des Öles im Transformator und verändert so dessen Kühleigenschaften. Bei Stufenschaltern kann eine hohe Viskosität den Schaltablauf in nicht akzeptablem Maße beeinträchtigen. Daher muss durch geeignete Maßnahmen dauerhaft das Eindringen von Umgebungsluft sowohl beim Transformator als auch beim Stufenschalter verhindert werden. Ein hermetischer Abschluss von Leistungstransformatoren und Stufenschaltern gegenüber der Umgebungsluft wird meist durch Stickstoffpolster, Gummitaschen oder -membranen innerhalb des Ölausdehnungsgefäßes erreicht. Bei freiatmenden Anlagen sollten ausschließlich synthetische Esterflüssigkeiten verwendet werden.

3. Anforderungen an geeignete Flüssigkeiten für Stufenschalter

In Transformatoren hat die Isolierflüssigkeit die Aufgabe, Aktivteil und Durchführungen zu kühlen und elektrisch zu isolieren. Hierbei wird durch entsprechende Formgebung und geschickten Einsatz der Isolierstoffe darauf geachtet, optimale Kühlung und eine möglichst homogene elektrische Feldverteilung zu erzielen. Letzteres ist bei Stufenschaltern funktionsbedingt nicht immer möglich. Jeder Stufenschalter besitzt notwendigerweise moderat inhomogene Elektrodenanordnungen (Kontaktgeometrien) mit blanken oder beschichteten Metalloberflächen, die entweder als reine Ölstrecken oder, in Verbindung mit festen Isolierstoffen, als Öl-Feststoff-Längsgrenzflächen ausgeführt sein können. In Verbindung mit den vielen unterschiedlichen Potentialen der Anzapfungen der Regelwicklung ergeben sich daraus komplexe Isolieranordnungen.

Die Anforderungen eines Stufenschalters an die Isolierflüssigkeit hängen von der Art des Stufenschalters ab (OLTC oder DETC, Ölschalttechnik oder Vakuumschalttechnik). Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, stellen die „klassischen“ Stufenschalter in Ölschalttechnik die höchsten Anforderungen an das Medium. Für diese Stufenschalter ist beispielsweise ein ausreichend gutes Lichtbogen-Löschverhalten unabdingbar. Die für Mineralöl definierten Grenzwerte für Lichtbogenzeiten müssen zur Sicherstellung einer fehlerfreien Lastumschaltung auch in Alternativflüssigkeiten eingehalten werden.

Ein Stufenschalter besteht aus einer Vielzahl verschiedener mechanisch bewegter Teile (Getriebe, Wählerkontakte etc.), die passend zur Lebensdauer des Transformators von ca. 40 Jahren und bis zu 1,2 Millionen Schaltungen ausgelegt sind. Damit eine derart hohe Standfestigkeit erreicht wird, muss das umgebende Öl eine ausreichend gute Schmierfähigkeit aufweisen. Dies wird besonders bei hohen Öltemperaturen relevant, da das Schmiervermögen bei höheren Öltemperaturen (sinkende Ölviskosität) abnimmt. Die Viskosität ändert sich innerhalb des gesamten zulässigen Betriebstemperaturbereichs (in der Regel von -25 bis +125° C) um den Faktor 100. In diesem Viskositätsbereich muss ein zeitlich korrekter Schaltablauf des Kontaktsystems des federkraftgetriebenen Lastumschalters gewährleistet sein.

Zur Erzielung einer hohen elektrischen und mechanischen Funktionalität sowie einer hohen Lebensdauer werden in modernen Stufenschaltern zudem viele verschiedene HighTech-Materialien eingesetzt, die alle mit der verwendeten Isolierflüssigkeit kompatibel sein müssen.

Stufenschalter sind für ihren Einsatz in mineralischem Isolieröl optimiert. Bei Verwendung alternativer Isolierflüssigkeiten ergeben sich abweichende Beanspruchungen. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen ist der Stufenschalter die maßgebliche Komponente, die hinsichtlich der Einsetzbarkeit einer Alternativflüssigkeit berücksichtigt werden muss.

Parameter	Transformator	DETC	OLTC		
			Wähler	Ölschalttechnik	Vakuumschalttechnik
Elektrische Isolierung	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■
Kühlung	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■
Lichtbogen-Löschverhalten			■ Vorwähler	■ ■	■ Kommutierung
Viskosität	■			■ ■	■ ■
Schmierfähigkeit		■	■ ■	■ ■	■ ■
Verträglichkeit	■ Umwelt	■ Werkstoffe	■ Werkstoffe	■ ■ Werkstoffe	■ ■ Werkstoffe

Tabelle 1: Anforderungen an Flüssigkeiten für Transformatoren, Umsteller (DETC) und Laststufenschalter (OLTC)

■ wichtig ■ ■ sehr wichtig

OLTC Typ	HMWH	Synthetischer Ester	Natürlicher Ester	Silikonöl
VACUTAP® VV®	✓	✓	✓	✗
VACUTAP® VM® (außer VM® 300)	✗	✓	✓	✗
VACUTAP® VRC/VRE	✓	✓	✓	✗
VACUTAP® VRS/VRM/VRL/VRF	✗	✓	✓	✗
VACUTAP® RMV-II	✓	✓	✓	✗
ECOTAP VPD	✗	✓	✓	✗
OILTAP® V Mineralöl im OLTC-Ölgefäß	✓	✓	✓	(✓) ¹
COMTAP® ARS	✗	✓	✓	✗
DEETAP® DU	(✓) ¹	(✓) ¹	(✓) ¹	(✓) ¹

Tabelle 2: Mögliche Kombinationen von MR-Stufenschaltern mit alternativen Flüssigkeiten

✓ : zulässig ✗ : nicht zulässig ¹ Sonderfall, bitte mit MR abstimmen

4. Für alternative Flüssigkeiten geeignete Stufenschalter

Die hohe Lichtbogenbelastung, die im normalen Betrieb von Stufenschaltern in Ölschalttechnik (Lichtbogenlöschung erfolgt in der Isolierflüssigkeit) auftritt, zersetzt die Isolierflüssigkeit und führt bei mineralischem Isolieröl zur Bildung von Säuren sowie Ruß- und Cracking-Produkten. Bei alternativen Isolierflüssigkeiten ist das Lichtbogen-Löschverhalten noch weitgehend unbekannt, da es von zahlreichen Parametern bestimmt wird, nämlich von der Viskosität, den thermischen Eigenschaften und der molekularen Zusammensetzung der Flüssigkeit. Lichtbögen bewirken eine pyrolytische Zersetzung des Öles, bei der auch flüchtige toxische Spaltprodukte auftreten können [5].

Bei der Vakuumschalttechnik (Lichtbogenlöschung erfolgt in Vakuumschaltröhren) werden hingegen die Schaltlichtbögen vollständig im Innern der hermetisch gekapselten Vakuumschaltröhre eingeschlossen. Das Lichtbogen-Löschverhalten des Öles verliert an Bedeutung. OLTCs mit Vakuumschalttechnik sind daher für den Betrieb in alternativen Flüssigkeiten sehr gut geeignet, da sie dieselbe Schaltleistung wie in Mineralöl erbringen. Da das Öl (wie im Transformator) nur noch thermisch bzw. durch Oxidation altert, ergeben sich weitere Vorteile wie erweiterte Wartungsintervalle von bis zu 600.000 Schaltungen. Damit ist in den meisten Fällen ein Wechsel des Stufen-

schalteröles während der gesamten Lebensdauer des Transformators nicht notwendig, wodurch auch die Entsorgung von gebrauchtem Öl nach einer Wartung entfällt. Wie beim Transformator selbst muss natürlich regelmäßig die Qualität des Stufenschalteröles hinsichtlich Durchschlagsspannung und Wassergehalt überprüft werden.

Tabelle 2 zeigt die möglichen Kombinationen von MR-Stufenschaltern mit alternativen Flüssigkeiten.

Einige OLTC-Typen in Ölschalttechnik (OILTAP®) eignen sich ebenfalls für den Einsatz in Verbindung mit alternativen Flüssigkeiten, sofern das Ölgefäß des Stufenschalters mit Mineralöl gefüllt wird. Die große Modellvielfalt der DEETAP®-Umsteller macht eine allgemeingültige Zulassung aufgrund des extrem hohen Prüfaufwandes nahezu unmöglich, jedoch lassen sich jederzeit individuelle Zulassungen generieren. Möglicherweise ist dabei die Verwendung einer höheren Spannungsreihe U_m oder eine individuelle Anpassung bestimmter Isolierstrecken erforderlich.

Je nach verwendeter Flüssigkeitsfamilie ergeben sich unterschiedliche Grenzen hinsichtlich der zulässigen Stehspannungen (Wechselspannung und Blitzstoßspannung), des maximalen Durchgangsstroms, des Betriebs bei niedrigen Öltemperaturen sowie der Schaltleistung des Vorwählers.

In Tabelle 2 nicht aufgeführte Stufenschaltertypen sind entweder generell ungeeignet oder wurden mit alternativen Flüssigkeiten aufgrund fehlender Marktnachfrage bislang nicht getestet. Sollte ein nicht zugelassener Stufenschaltertyp vermehrt angefragt werden, so wird MR entsprechend reagieren.

Neuentwicklungen von Stufenschaltern in Vakuumschalttechnik (VACUTAP®) gewährleisten eine maximale Kompatibilität mit natürlichen und synthetischen Estern, da deren Eigenschaften bereits in den Entwicklungsprozess mit einbezogen und entsprechend getestet werden.

5. Qualifizierung von Stufenschaltern für ausgewählte Alternativflüssigkeiten

Im MR-Versuchszentrum wurden in den letzten fünfzehn Jahren umfangreiche Prüfungen mit ausgewählten Alternativflüssigkeiten durchgeführt, und zwar bezüglich:

- Elektrischer Spannungsfestigkeit
- Kühlung stromführender Kontakte
- Lichtbogen-Löschverhalten am Vorwähler
- Temperaturverhalten
- Schmierfähigkeit
- Materialkompatibilität

Die Mehrzahl der Tests wurde in 1:1-Versuchen an Stufenschaltern durchgeführt. Einige Tests basieren auf Modellanordnungen, bei denen die realen Bedingungen ausreichend genau nachgebildet wurden. Die untersuchten Flüssigkeiten wurden anhand ihrer Marktrelevanz und der realen Marktnachfrage ausgewählt. Sie wurden „wie geliefert“ eingesetzt, jedoch wurde zur Sicherstellung realistischer Prüfbedingungen die Ölqualität (Spannungsfestigkeit, Wassergehalt) kontinuierlich überwacht.

HMWH verhalten sich aufgrund ihrer identischen Herkunft (Erdöl) ähnlich wie klassisches Mineralöl. Das große Manko der HMWH – ihre hohe Viskosität – schränkt jedoch deren Einsetzbarkeit in kaltem Öl erheblich ein. Während sich die höhere Viskosität der synthetischen und natürlichen Ester nur moderat auf das Umschaltverhalten bei Kälte auswirkt, sind mit HMWH Schalthandlungen bei Ötemperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$ nicht möglich.

Die charakteristischen Eigenschaften von Silikonöl beschränken dessen Anwendbarkeit auf Anwendungen mit geringen Schaltzahlen und auf Spannungsreihen $U_m \leq 72,5\text{ kV}$. Die Entstehung von Siliziumoxidbrücken zwischen Schirmelektroden kann durch eine Begrenzung der maximal zulässigen Feldstärke, oder, falls möglich, durch Beschichtung bzw. Papierisolierung vermieden werden.

Hinsichtlich der elektrischen Spannungsfestigkeit wurde festgestellt [6, 7], dass sich in Esterflüssigkeiten bereits bei niedrigeren Spannungspegeln als in Mineralöl eine hohe Streamer-Ausbreitungsgeschwindigkeit einstellt, die Durchschläge begünstigt. Dieser Effekt ist nicht nur bei extrem inhomogenen Elektrodenanordnungen (Spitze/Platte-Konturen) sichtbar, sondern auch bei moderat inhomogenen Kontaktanordnungen, wie sie in vielfältigen Ausprägungen bei Stufenschaltern zu finden sind (vgl. Abb. 3, 4). Bei diesen Anordnungen ergeben sich in



Abbildung 3: Wähler mit vielfältigen, moderat inhomogenen Elektrodenanordnungen, bestehend aus reinen Ölstrecken und Öl/Feststoff-Grenzflächen



Abb. 4: Detail einer typischen Wähler-Kontaktanordnung

Esterflüssigkeiten geringere Steh-Wechsel- und Steh-Blitzstoßspannungen als in Mineralöl. Dies kann die Auswahl der nächsthöheren Spannungsreihe bzw. der nächstgrößeren Wählerbaureihe erfordern. Alternativ können auch die an der Regelwicklung auftretenden Spannungsbeanspruchungen reduziert werden, z. B. durch Einbau von Überspannungsableitern, oder möglicherweise auch durch ein geändertes Wicklungsdesign. Bei homogenen Schirmringanordnungen hingegen, wie sie bei Phase-zu-Phase- oder Phase-zu-Erde-Isolationsabständen (vgl. Abb. 5) realisierbar sind, kann in Esterflüssigkeiten nahezu die gleiche Spannungsfestigkeit wie in Mineralöl erreicht werden. An diesen Isolierstrecken können die Schirmringe zur weiteren Reduzierung der Durchschlagswahrscheinlichkeit ggf. zusätzlich beschichtet werden.

Das Kühlverhalten von Esterflüssigkeiten ist geringfügig anders als das von Mineralöl. Dies wirkt sich auf die Erwärmung von Kontakten und Überschaltwiderständen aus und führt möglicherweise zu einer leichten Reduktion des maximal zulässigen Durchgangsstroms, damit Normforderungen eingehalten werden können.

In HMWH und Esterflüssigkeiten werden längere Lichtbogenzeiten beobachtet, was in erster Linie durch die höhere Viskosität dieser Flüssigkeiten verursacht wird. Dies gilt auch für die kapazitiven Lichtbögen oder Funken mit niedriger Energie, die beim Schalten des Vorwählers (Wender oder Grobstufenwähler) entstehen. Um diesem Effekt zu begegnen, muss die maxi-

mal zulässige Schaltleistung des Vorwählers reduziert werden. Jedoch kann durch eine geeignete Auslegung der Polungswiderstände diese Einschränkung zumeist vollständig kompensiert werden [8].

Mechanische Dauerversuche über 1,5 Millionen Schaltungen ergaben, dass sowohl HMWH als auch Esterflüssigkeiten hervorragende Schmiereigenschaften aufweisen. Silikonöl lässt sich wegen des beobachteten hohen mechanischen Abriebs nur in Kombination mit Umstellern (DETCs) einsetzen, die üblicherweise nur eine geringe Schaltzahl erreichen. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass ein Normtest zur Ermittlung der Eigenschaften abriebmindernder Flüssigkeiten (ASTM D4172, Methode B) die Ergebnisse der mechanischen Dauerversuche ausreichend gut nachbildet, so dass dieser Test als gleichwertiger Ersatz für die aufwendigen Dauerversuche dienen kann.

Anhand von Schaltablaufversuchen in heißem und kaltem Öl wurde der Temperaturbereich ermittelt, in dem ein korrekter Schaltablauf des federgetriebenen Kontaktsystems gegeben ist. Bei starker Erhöhung der Viskosität verlängert sich die Umschaltzeit des Lastumschalters, so dass zulässige Grenzwerte verletzt werden. Da die Viskosität von Esterflüssigkeiten deutlich höher ist als die von Mineralöl, liegt der untere zulässige Temperaturgrenzwert für Schalthandlungen höher als bei Mineralöl.

Dichtungen aus bestimmten Kautschukrezepturen (NB: Nitril-Butadien) werden in synthetischem Ester hart und brüchig, in natürlichem Ester quellen sie auf



Abb. 5: Typische Phase-zu-Erde-Isolieranordnung mit homogener Feldverteilung und pulverbeschichteten Schirmringen

und werden weich. Daher werden bei Esterflüssigkeiten ausschließlich Fluor-Polymer-Dichtungen (FP, z. B. VITON®) verwendet, die sich als kompatibel erwiesen haben.

Die durchgeführten Tests liefern ein vollständiges und homogenes Bild der untersuchten Alternativflüssigkeiten. Basierend auf den Testergebnissen wurden für die zugelassenen Stufenschaltertypen (Tabelle 2) und zugelassenen Flüssigkeiten (Tabelle 3) Grenzwerte definiert und Anwendungsrichtlinien erstellt. Die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse sind eindeutig und erlauben eine fundierte Bewertung aller Kundenanfragen bezüglich der Anwendung von Stufenschaltern mit Alternativflüssigkeiten.

Neu auf dem Markt angebotene Alternativflüssigkeiten (vorwiegend natürliche und synthetische Ester) ähneln oft sehr stark einiger der bisher getesteten Flüssigkeiten. Es ist daher nicht immer notwendig, das vorstehend beschriebene Versuchsprogramm in vollem Umfang für jede neue Flüssigkeit zu wiederholen. Sofern der Hersteller der Flüssigkeit ausreichend Daten zu allen stufenschalterrelevanten Parametern bereitstellen kann, ist eine Zulassung allein auf Basis eines Datenvergleichs mit einer bereits getesteten Flüssigkeit möglich [9]. Hierfür wurde ein entsprechender Fragenkatalog erstellt, der dem Hersteller übermittelt wird. Sensible Daten werden durch eine Vertraulichkeitsvereinbarung zwischen MR und dem Hersteller der Flüssigkeit geschützt.

6. Konfiguration regelbarer Leistungs- transformatoren für Alternativflüssigkeiten

Aufgrund der Vielzahl möglicher Konfigurationen erfordern Stufenschalteranwendungen mit alternativen Flüssigkeiten im Rahmen der Auftragsbearbeitung besondere Aufmerksamkeit [10]. Die umfangreichen durchgeführten Tests ergaben, dass einige Bewertungen individuell und kundenbezogen erfolgen müssen. Die individuellen Betriebsbedingungen der jeweiligen Anwendung sollten daher ausführlich zwischen Betreiber, Transformator-Hersteller und Stufenschalter-Hersteller besprochen werden. In dieser Hinsicht bietet MR dem Kunden ein solides Know-how und gewährleistet damit durchdacht konfigurierte und sicher funktionierende Stufenschalteranwendungen. Dank mehr als 700 OLTC-Installationen mit alternativen Flüssigkeiten weltweit, darunter auch Spezialanwendungen wie Traktionstransformatoren, Prüffeldtransformatoren, Transformatoren für Offshore-Windparks oder mobile Notfall-Transformatoren für Öltemperaturen bis 150° C, verfügt MR über eine einzigartige Bandbreite von Erfahrungen [11]. Unser kompetentes Verkaufsteam analysiert zusammen mit unserer Entwicklungs- und Auftragsbearbeitungsabteilung gewissenhaft jede Anwendung und bietet Unterstützung bei der Auswahl und Konfiguration des richtigen Stufenschalters. Bei erstmaligen Anwendungen begleitet unser Serviceteam auf Wunsch die Inbetriebnahme und überwacht den anfänglichen Betrieb des Stufenschalters.

Synthetischer Ester	Natürlicher Ester	Silikonöl
MIDEL 7131 (M&I Materials) Nycodiel 1255/ 1258 (Nyco)	ENVIROTEMP FR3 (Cargill) MIDEL eN1215 (M&I Materials) SunOhm Eco (Kanden Eng.) MIDEL eN 1204 (M&I Materials) Pastell NEO (Lion Corp.) SK Supervolt Eco-M (Hanyu Energy) BioTransol HF (Savita)	Dow Corning 561 ShinEtsu KF96-20

Tabelle 3: Zugelassene Alternativflüssigkeiten für geeignete MR-Stufenschalter nach Tabelle 2

7. Ausblick

Die vollständige biologische Abbaubarkeit von Esterflüssigkeiten passt hervorragend zur umweltfreundlichen Stromerzeugung, z. B. durch Wind- und Solarparks. Derartige Anlagen finden sich häufig in sensiblen Umgebungen (z. B. in Naturschutzgebieten) und sollten daher besonders umweltverträglich sein. Erst die Verwendung von natürlichen oder synthetischen Esterflüssigkeiten macht diese Anlagen wirklich umweltfreundlich. Natürliche Ester stellen den besten Kompromiss zwischen Anwendbarkeit, Preis und Umweltfreundlichkeit dar, jedoch steht ein Anbau von Ölpflanzen für industrielle Zwecke in Konkurrenz zur Lebensmittel produzierenden Landwirtschaft. Wie in anderen Bereichen auch, so muss hier die Balance zwischen sozialen, ökonomischen und umweltrelevanten Belangen eingehalten werden. Die fortschreitende Entwicklung immer ertragsstärkerer Ölsaaten kann die weitere Zunahme von Anbauflächen für industrielle Pflanzenölprodukte verlangsamen. Eine Verwendung von PFAE als Isolierflüssigkeit für Transformatoren ist wegen der für den Anbau von Ölpalmen tolerierten Rodung tropischer Regenwälder äußerst umstritten.

Derzeit ist die Entwicklung von Elektroisolierölen aus nachwachsenden Rohstoffen noch nicht abgeschlossen. Ihre Qualität dürfte sich insbesondere im Hinblick auf die Oxidationsstabilität mit jeder neuen Generation weiter verbessern.

Zunehmend werden Esterflüssigkeiten auch in größeren Leistungstransformatoren bis zu 400 MVA eingesetzt; die Systemspannungen reichen mittlerweile bis hinauf zu 550 kV. Ebenso wird der Einsatz im urbanen Umfeld sowie in industriellen Anwendungen mit höheren Anforderungen an Brand- und/oder Umweltschutz weiterhin zunehmen. MR bietet mit seiner breiten VACUTAP[®]-, ECOTAP[®]- und DEETAP[®]-Produktpalette passende Lösungen für alle Transformator-Baugrößen.

8. Literaturhinweise

- [1] J. Friedel: Praxisvorteile eines inhibierten Transformatoröles auf Basis von Gas-to-Liquid Fluids, Conference Presentation SHELL Global Solution GmbH, Leistungstransformatoren im täglichen Betrieb, Gelsenkirchen, Deutschland, Dec 2013
- [2] IEC 60695 1-40 Ed. 1.0: Fire hazard testing – Part 1-40: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products – Insulating Liquids; Appendix A, C. IEC 2012
- [3] www.midel.com, Technisches Datenblatt Nr. 9
- [4] Tenbohlen, S., Seibold R.: Wasseraufnahmevermögen und Alterungsverhalten von Pflanzenölen für Leistungstransformatoren. Stuttgarter Hochspannungssymposium, Stuttgart, Deutschland 2008
- [5] Breuer, W., Hegemann, G., Behavior of On-Load Tap-Changers in MIDEI 7131 – A PCB-Alternative for Transformers. CIGRE-Symposium 05-87, Vienna, 1987
- [6] C. T. Duy, O. Lesaint, A. Denat, and N. Bonifaci: Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, pp. 1582-1594, 2009
- [7] P. Jarman, G. Wilson, P. Dyer, F. Perrot, Q. Liu, Z.D. Wang et.al.: Electrical Performance of Ester Insulating Liquids for Power Transformers, CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium 2011, Kyoto Japan, Paper PS2 0-5
- [8] R. Frotscher: Tap-changer know-how: Enhancing the switching capacity of change-over selectors with minimized gas production, Transformers Magazine Vol. 3, Issue 4, Oct 2016
- [9] R. Frotscher: Qualification of Insulating Liquids for Tap-Changers, MyTransfo, Torino, Dec 2018
- [10] R. Frotscher, D. Vuković, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, J. Harthun, M. Schäfer, C. Perrier: Behaviour of Ester Liquids under Dielectric and Thermal Stress – From Laboratory Testing to Practical Use, CIGRE Conference 2012, Paris, Paper D1-105
- [11] D. Dohnal, R. Frotscher: The Importance of Alternative Insulating Liquids for Power Transformers and Tap-Changers, CEPIS Symposium, Taipei, Oct 2010

Maschinenfabrik Reinhausen GmbH

Falkensteinstrasse 8
93059 Regensburg, Germany

Phone: +49 941 4090-0

E-mail: info@reinhausen.com

www.reinhausen.com

Please note:

The data in our publications may differ from
the data of the devices delivered. We reserve
the right to make changes without notice.

PB 3518312/03 DE – Alternative Flüssigkeiten für Stufenschalter

F0310203 – 11/19 – dp –

©Maschinenfabrik Reinhausen GmbH 2013

THE POWER BEHIND POWER.

