

Herausforderungen bei der Prüfung und Diagnose von magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschaltern

Charles Sweetser, OMICRON electronics Corp. USA

Zusammenfassung

Die Geschichte der Leistungsschalterttypen und der hierfür verwendeten Technologien ist lang. Und im Lauf der Zeit haben sich sowohl im Bereich der Verfahren zur Lichtbogenlöschung (z.B. Öl, Druckluft, Magnetblastechnik, SF6, Vakuum) als auch bei den Verfahren zur Energiespeicherung (z.B. mechanische Federn, Pneumatik und Hydraulik) die verwendeten und bevorzugten Technologien immer wieder stark geändert.

Nun hat ein Neuling die Szene betreten: der magnetisch betätigte Vakuum-Leistungsschalter. Dieser Leistungsschalter wird für die Mittelspannungsklasse verwendet und benötigt keine Auslösespulen, Motoren und Federspeicher mehr, wie sie bisher für Leistungsschalter dieser Spannungsklassen erforderlich waren. Stattdessen erfolgt hier die Energiespeicherung und -übermittlung durch eine Kombination aus Kondensatoren und einem magnetischen Antrieb. Diese Änderung zwingt uns dazu, die Diagnoseprüfung für solche Leistungsschalter zu überdenken und neu zu bewerten. Nun müssen Größen wie die Kondensatorspannung und der Auslösestrom zur Liste der Messsignale hinzugefügt werden. Und diese Signale müssen nicht nur gemessen, sondern auch richtig analysiert werden.

Aus Sicht der technischen Wartung liefern diese zusätzlichen Signale wichtige Informationen über die korrekte Funktion und den korrekten Zustand des magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalters.

Dieser leicht nachvollziehbare Beitrag bezieht sich im Wesentlichen auf die neuen Herausforderungen bei der Prüfung und Diagnose von magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschaltern. Unterstützt durch Fallstudien erhält der Leser Grundlagen und Hintergründe sowie Einblicke in die Anwendung und Analyse dieser Prüfungen.

Einführung

Die Auswahl des Leistungsschalterttyps und der verwendeten Leistungsschaltertechnologie ist von der jeweiligen spezifischen Anwendung abhängig. Für Anwendungen im Mittelspannungsbereich wird verbreitet die Vakuum-Technologie eingesetzt. Durch die Einführung des magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalters haben sich in den letzten Jahren auch die Verfahren zur Steuerung und Betätigung von Vakuum-Leistungsschaltern geändert, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen und die Wartungsaufwände zu verringern. Auslösespulen, Federspeicher und Motoren wurden durch Stromversorgungen, Kondensatoren und magnetische Antriebe ersetzt. Durch diese große Veränderung hat sich die Anzahl der beweglichen Teile reduziert. Die Hersteller dieser Schalter rühmen sich gar, dass ein solcher Magnetmechanismus den Vakuum-Unterbrecher selbst lange überdauern kann.

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Einstufung des magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalters im Vergleich zu den anderen Leistungsschaltern. Die Eigenschaften des in Tabelle 1 **ROT** hervorgehobenen Vakuum-Leistungsschalters mit magnetischer Betätigung stehen in diesem Artikel im Vordergrund

Table 1 – Circuit breaker classifications

LEISTUNGSSCHALTERTYP	MECHANISMUS
Kessel-Ölschalter (OCB)	Mechanisch (Feder)
SF6 Dead Tank-Schalter	Hydraulisch
Druckluft Live Tank-Schalter	Pneumatisch
SF6 Live Tank-Schalter	Magnetische Betätigung
Vakuum-Schalter	
Magnetblasschalter	ISOLATIONSSYSTEM
Niederspannungs-Druckluftschalter	Öl
Recloser	SF6
Circuit Switcher	Luft
Sectionalizer	Vakuum

Wie bei allen Schaltern muss gespeicherte Energie in mechanische Bewegung umgewandelt werden. Der wesentliche Unterschied beim mechanisch betätigten Vakuum-Leistungsschalter ist das Element zum Speichern der Energie. Anstelle traditioneller Verfahren zur Energiespeicherung (also durch Federn, Hydraulik oder Pneumatik) werden beim magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalter Kondensatoren verwendet, die elektrische Energie in Form von Joule speichern.

Bisher konnten wir sehen und hören, wenn der Mechanismus des Leistungsschalters durch einen Motor geladen wurde. Beim magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalter dagegen erfolgt das Aufladen leise, da ja nur ein Kondensatorsystem geladen wird. Dieser gewünschte leise Ladevorgang liefert aber leider, keine Hinweise mehr darauf, ob das System korrekt funktioniert. Und das korrekte Laden und Entladen des Kondensatorsystems ist von entscheidender Bedeutung. Die Überwachung der korrekten Funktion und Unversehrtheit des Kondensator- und Betätigungssystems kann durch einfache Messsignale erfolgen, die dem herkömmlichen Prüfprotokoll zur Prüfung des Zeitverhaltens hinzugefügt werden.

Steuerkreise

Die Steuerkreise von magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschaltern sind ein moderner Ausbau der traditionellen Steuerkonzepte für Leistungsschalter. Elektronikplatinen haben ältere elektromechanische Komponenten wie Befehlsspulen und Sperren ersetzt. Diese modernen Schaltkreise können für den Betrieb mit verschiedenen Spannungen ausgewählt werden. Teilweise können Sie sogar wahlweise mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden, wodurch sie sich natürlich sehr gut für den Ersatz bestehender Leistungsschalter eignen.

Der Anschluss der Leistungsschalter-Steuerkreise für die Prüfung erfolgt meist an den Anschlussklemmen 5, 7 und 9 (+)V, Anschluss Einschaltspule und Anschluss Ausschaltspule). Bei traditionellen Steuerkreisen müssen die tatsächlichen erforderlichen Leistungen (VA) an die Auslösespulen angelegt bzw. eingespeist werden. Für die Prüfung von magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschaltern ist dagegen nur ein Spannungssignal mit kleiner Leistung erforderlich. Nun müssen wir jedoch über die Pins "Remote TRIP" und "Remote CLOSE" (5, 7 und 9) auf die zugehörigen Anschlussklemmen der Steuerplatine zugreifen. Diese Pins sind im Bedienungshandbuch angegeben. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Unterschiede zwischen alten und neueren Steuerkreisen. In diesem Beispiel sind die Anschlussklemmen 5, 7 und 9 immer noch relevant.

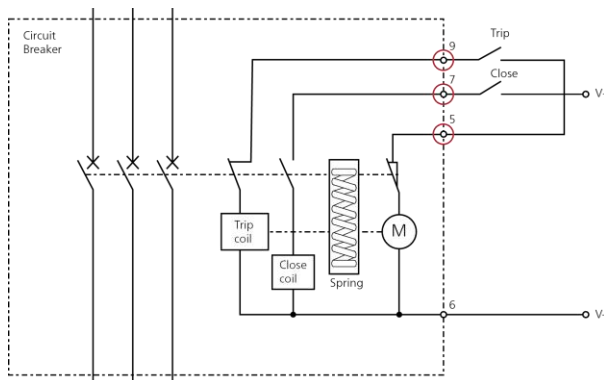


Abbildung 1: Traditioneller Steuerkreis

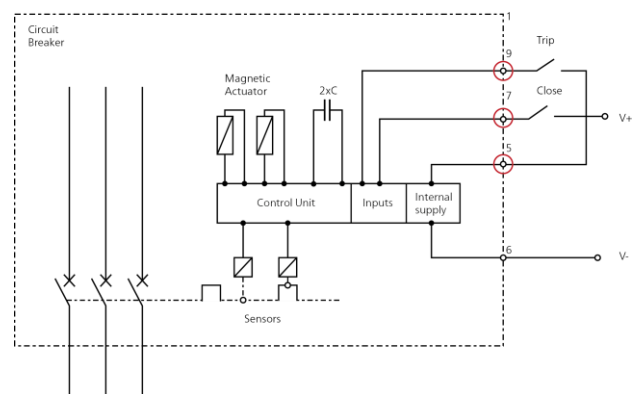


Abbildung 2: Neuer Steuerkreis

Die Befehlseingänge erzeugen bei der Aktivierung keine typische Stromantwort in der Befehlsspule. Stattdessen handelt es sich um hochohmige Spannungseingänge für potenzialbehaftete Signale. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Stromantwort von traditionellen elektromechanischen Befehlsspulen und der neuen hochohmigen Eingänge.

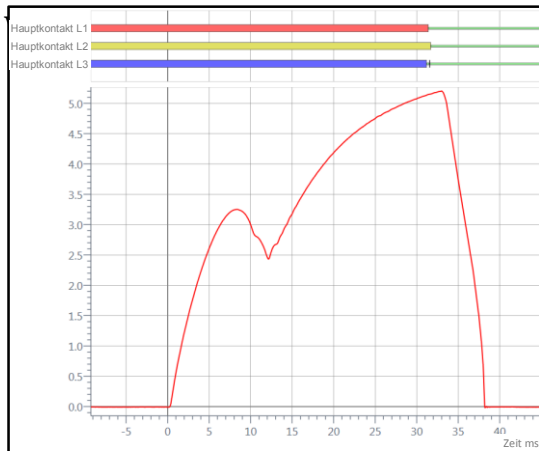


Abbildung 3: Stromantwort traditionelle Spule

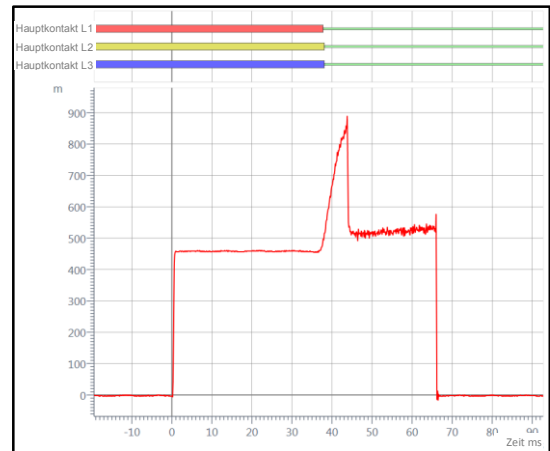


Abbildung 4: Hochohmiger Eingang

Diese sehr geringen Stromantworten können bei manchen Prüfinstrumenten ein Erkennungsproblem mit sich bringen. Das Prüfinstrument muss in der Lage sein, den Start der Prüfung (t_0+) exakt zu bestimmen. Hierfür kann es erforderlich sein, sowohl den Strom als auch die am Befehlseingang anliegende Spannung zu messen.

Mechanismus und Energiespeicher

Da magnetisch betätigte Vakuum-Leistungsschalter elektrische Energie speichern, benötigen sie weniger bewegliche Teile. Die Hauptkomponenten von magnetisch betätigten Vakuum-Leistungsschalter sind:

- Steuerplatine
- Ladesystem
- Kondensator
- Magnetische Betätigung
- Unterbrechereinheit

Abbildung 5 zeigt die Unterbrechereinheit des Leistungsschalters.

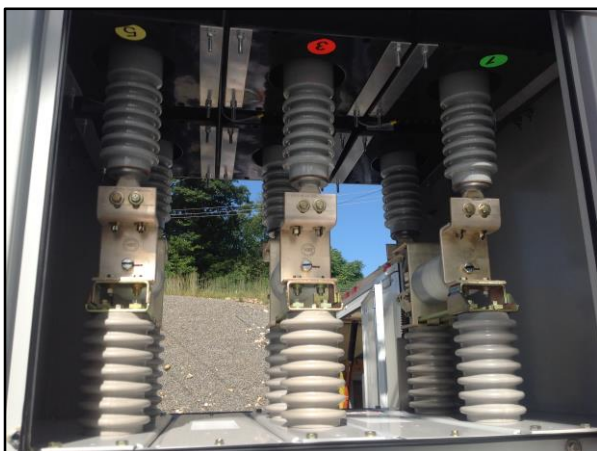


Abbildung 5: Unterbrechereinheit

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Komponenten der magnetischen Betätigung und die Kondensatoren.

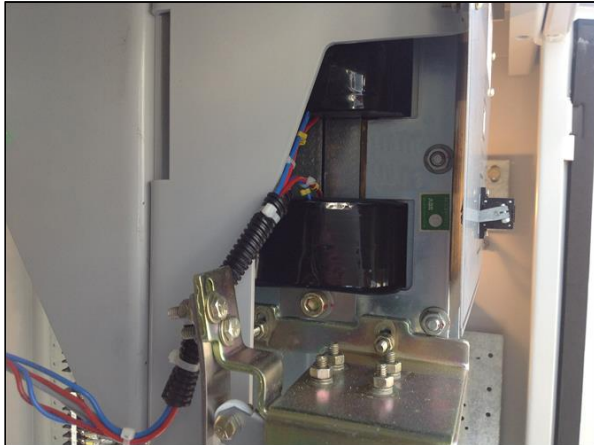


Abbildung 6 .– Magnetische Betätigung
(AUS / EIN)



Abbildung 7: Kondensatoren

Schaltzeiten- und Funktionsprüfung

Die Messungen zur Ermittlung der Schaltzeiten und der korrekten Funktion des Leistungsschalters erfolgen in drei Schritten:

1. Messungen zur Ermittlung der korrekten Funktion
2. Berechnung und Analyse der Eigenschaften bzw. des Verhaltens im Betrieb
3. Vergleich der Ergebnisse mit Empfehlungen des Herstellers oder benutzerdefinierten Grenzwerten

Tabelle 2 zeigt die grundlegenden Prüfungen und Berechnungen für die Ermittlung der Schaltzeiten und die Diagnose des Leistungsschalters.

*Tabelle 2: Grundlegende Messungen und Berechnungen zur Ermittlung
der Schaltzeiten von Leistungsschaltern*

STEUERBEFEHL	MESSUNG	BERECHNUNG
Öffnen (O)	Weg	Schaltzeiten des Hauptkontakts
Schließen (C)	Kontaktzustand (O-R-C)	Schaltzeiten Widerstandsschalter
Wiedereinschaltung (O-C)	Strom in der Befehlsspule	Schaltzeitendifferenz (Polspreizung)
Freiauslösung (C-O)	Zustand Hilfskontakt (OW-OD-C)	Geschwindigkeit
(O-CO)	Batteriespannung	Gesamthub
(O-CO-CO)*	Leiterströme (1. Ausschaltung)	Dämpfungshub
Slow Close ©	Dynamischer Widerstand (DRM)	Kontaktprellen
Erste Ausschaltung (O)	Kondensatorspannung	Hub
	Strom für Betätigung	Kontaktreiben
	Befehlsreferenz	Wartezeit (Freiauslösung C-O)
		Spannungslose Pause (Wiedereinschaltung O-C)
		Ladegeschwindigkeit Kondensator
		Spitzenstrom Betätigung (O, C)
		Betätigungsdauer (O, C)

* ANSI Betätigungszyklus O-0,3s-CO-3Min-CO

Messsignale

Für die Messung der Schaltzeiten und der korrekten Funktion von Leistungsschaltern sind lediglich vier Primärsignale von Interesse.

1. Kontaktzustand (offen-geschlossen)
2. Remote-Eingangssignal (t_0+) Befehlsreferenz: Prüfungsstart
3. Kondensatorspannung
4. Strom für Betätigung

Abbildung 8 zeigt eine Prüfung mit den oben genannten Messsignalen.

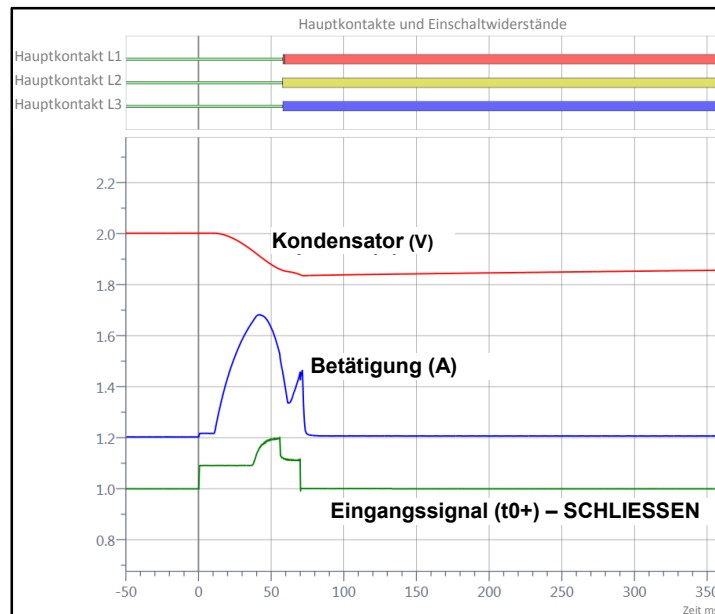


Abbildung 8: Messsignale

Die Kondensatorspannung wird sehr wahrscheinlich größer sein als die erlaubte Berührspannung. Daher müssen entsprechende Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden. Es sollte immer davon ausgegangen werden, dass der Kondensator geladen ist. Der Betätigungsstrom muss mit einer korrekt skalierten Hall-Effekt-Stromzange gemessen werden. Da der Schalter immer nur eine Seite der Betätigung speist, ist auch nur eine Stromzange erforderlich. Dabei können mit einer Stromzange jeweils beide Drähte gemessen werden, sowohl der Draht für die Öffnen-Betätigung als auch der Draht für die Schließen-Betätigung. In der Praxis hat sich gezeigt, dass hierbei die korrekte Polarität an den Drähten ausprobiert werden muss. Bei einer falschen Polarität ist lediglich die Wellenform des Stromes am Messinstrument umgedreht, was jedoch keinen Einfluss auf die Prüfung hat. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Messung mit einer Hall-Effekt-Stromzange und die Messung der Kondensatorspannung.

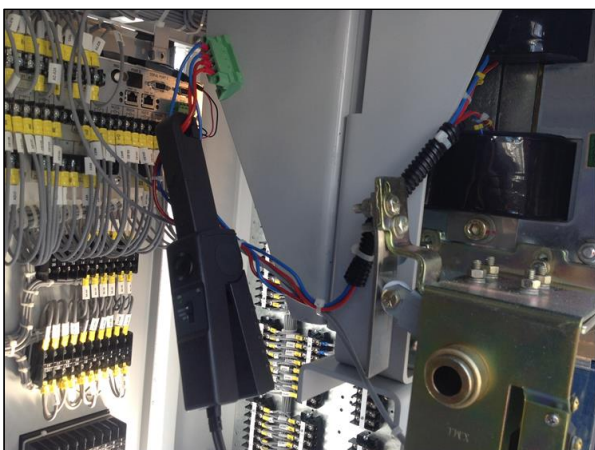


Abbildung 9: Hall-Effekt-Stromzange

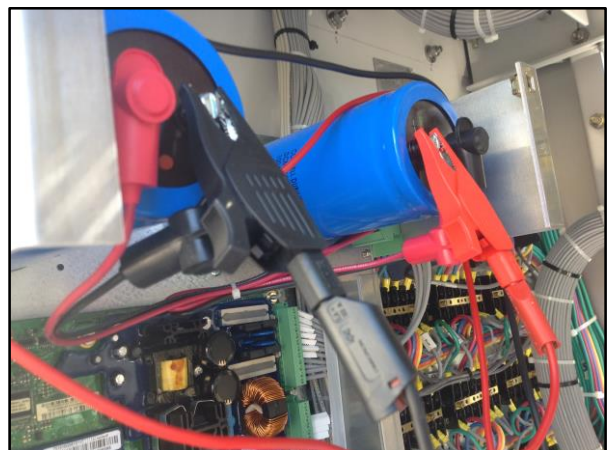


Abbildung 10: Messung der Kondensatorspannung

Eigenschaften/Verhalten im Betrieb

Tabelle 3 zeigt die einschlägigen Eigenschaften des Leistungsschalters. Insgesamt sind sieben Eigenschaften von Bedeutung, vier in Bezug auf die traditionellen Schaltzeiten und drei in Bezug auf die Kondensatoren und die magnetische Betätigung.

Tabelle 3: Eigenschaften in Bezug auf die Schaltzeiten

Schaltzeiten des Hauptkontakts	Zeit zwischen dem Start der Prüfung und der Zustandsänderung des Hauptkontakts (Schaltzeiteigenzeit).
Schaltzeitendifferenz (Polspreizung)	Zeitdauer zwischen der Zustandsänderung des ersten Kontakts und der Zustandsänderung des letzten Kontakts (innerhalb eines Schalters, einer Phase oder eines Moduls).
Wartezeit (Freiauslösung C-O)	Zeitdauer, für die die Hauptkontakte während einer Freiauslösung geöffnet bleiben.
Spannungslose Pause (Wiedereinschaltung O-C)	Zeitdauer, für die die Hauptkontakte während einer Wiedereinschaltung geschlossen bleiben.
Ladegeschwindigkeit Kondensator	Konstante Geschwindigkeit, mit der die Kondensatoren nach einer Betätigung geladen werden. Die Ladegeschwindigkeit ist definiert durch die Erhöhung der Kondensatorspannung über die Zeit (V/s).
Spitzenstrom Betätigung (O, C)	Spitzenstrom in der Betätigung bei einem Öffnen- oder Schließen-Vorgang.
Betätigungsdauer (O, C)	Zeitdauer, für die die Betätigung bei einem Öffnen- oder Schließen-Vorgang gespeist wird.

Ergebnisanalyse

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Schaltzeiten und der Funktion werden direkt mit den Angaben des Herstellers oder mit früheren Ergebnissen verglichen [1]. Alle oben genannten Eigenschaften erhalten eine "pass/fail"-Bewertung. Tabelle 4 zeigt typische Eigenschaften. Es ist zu beachten, dass nicht alle Hersteller sämtliche Grenzwerte dokumentieren. Daher kann es sinnvoll sein, für fehlende Grenzwerte im Rahmen einer Inbetriebnahmeprüfung die Ausgangswerte zu ermitteln.

Tabelle 4: Typische vom Hersteller vorgegebene Grenzwerte für die Eigenschaften

Eigenschaft	CB1
Kondensatorspannung (statisch)	80 VDC
Kondensatorspannung (Schwellwert OFFEN)	49 VDC
Kondensatorspannung (Schwellwert CO)	72.5 VDC
Kondensatorspannung (O-0.3-CO)	78 VDC
ANSI Betätigungszyklus	O-0.3s-CO-3Min-CO
Kurzschlussstrom-Ausschaltdauer	< 50 ms
Wiedereinschaltzeit (spannungslose Pause)	Mind. 300 ms

Die Abbildungen 11 bis 14 zeigen tatsächliche Messungen für ÖFFNEN, SCHLIESSEN, FREIAUSLÖSUNG (CO) und AUTOMATISCHE WIEDEREINSCHALTUNG (O-CO). Mehrere Eigenschaften bezüglich der Kondensatoren und der magnetischen Betätigungen werden berechnet. Die Abbildungen zeigen beispielsweise die Mindest-Kondensatorspannung, die Ladegeschwindigkeit sowie den Spitzenstrom und die Aktivierungsdauer der Betätigung.

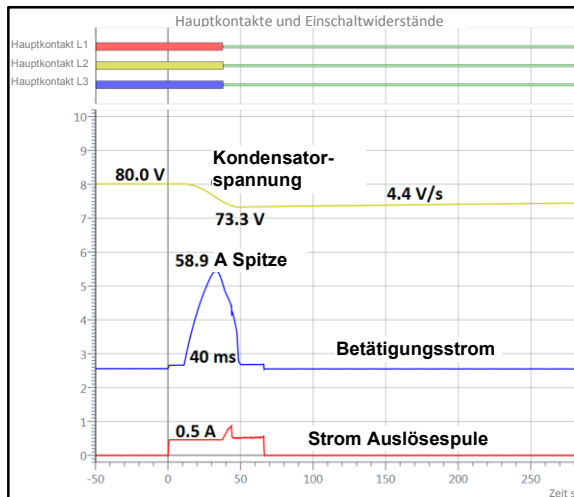


Abbildung 11: ÖFFNEN

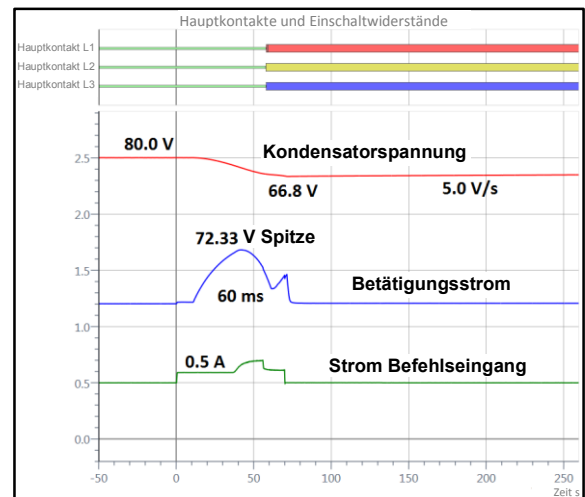


Abbildung 12: SCHLIESSEN

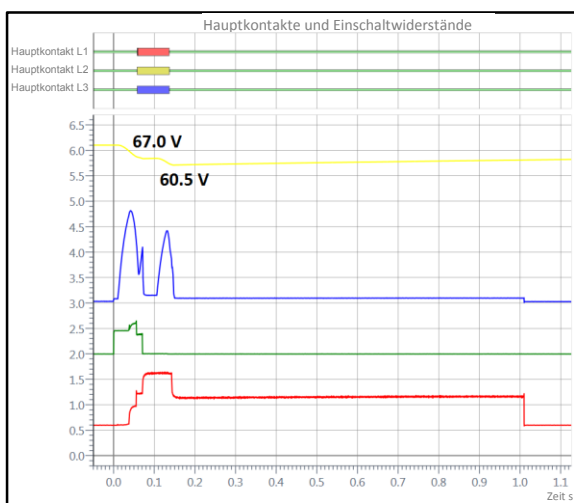


Abbildung 13: FREIAUSLÖSUNG (CO)

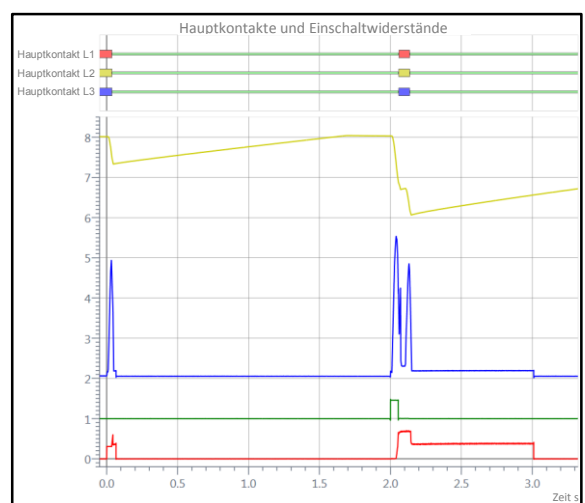


Abbildung 14: OC-2.0-O

Diverse Diagnoseindikatoren, wie beispielsweise Kontaktprellen, können ebenfalls identifiziert werden. In Vakuum-Leistungsschaltern kann es während des Schließvorgangs zu Unterbrechungen der Kontakte kommen. Abbildung 15 zeigt ein ungewöhnliches Prellen eines Hauptkontaktes. Um diesen Effekt zu zeigen, wurde in diesem Beispiel der dynamische Kontaktwiderstand erfasst und dargestellt. Wie es aussieht, schwingt der Kontakt an Phase L1 nicht problemlos ein.

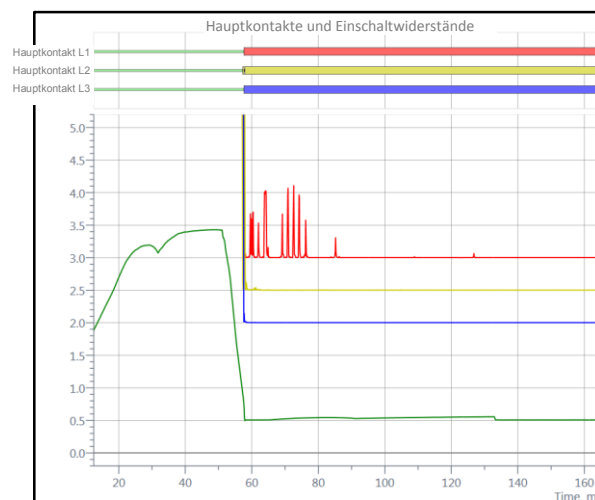


Abbildung 15: Ungewöhnliches Kontaktprellen

Kontaktwiderstand

Mit der Mikroohmmessung (Messung des statischen Kontaktwiderstands) wird ermittelt, ob die Hauptkontakte korrekt kontaktieren. Ungewöhnliche Messwerte können auf nicht korrekte Ausrichtung, falschen Druck oder Beschädigungen der Kontaktoberflächen (Beläge) hindeuten.

Dies ist eine Standardprüfung zur Ermittlung des tatsächlichen Durchgangswiderstands der Kontakte und der zugehörigen in Reihe liegenden Komponenten (wie Durchführungsverbindungen und Tulpen). Die statische Messung liefert einen einzigen temperaturabhängigen Wert in Ohm (Ω).

Eine statische Kontaktwiderstandsmessung muss für jede einzelne Phase mittels einer Gleichstromquelle vorgenommen werden. Bei Vakuum-Leistungsschaltern liegen die typischen Messwerte bei weniger als $100 \mu\Omega$. Der jeweilige tatsächliche Sollwert sollte allerdings in den Herstellerunterlagen nachgeschlagen werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Messwerte üblicherweise zwischen 10 und $100 \mu\Omega$ liegen, abhängig davon, wo die Messung angesetzt wird, also direkt an den Vakuumröhren oder an den Durchführungsanschlüssen. Empfohlen wird die Messung an den Durchführungsanschlüssen. Sollte die Messung höhere Werte ergeben, können einzelne Komponenten abgetrennt und weitere Messungen durchgeführt werden. Abbildung 16 zeigt die Messleitungen direkt an den Vakuumröhren.



Abbildung 16: Anschluss der Messleitungen direkt an den Vakuumröhren

Tabelle 5 zeigt einige typische Messergebnisse für den Kontaktwiderstand. Deutlich sichtbar ist der Unterschied der Ergebnisse für die direkt an den Vakuumröhren durchgeführten Messungen und die an den Durchführungsanschlüssen durchgeführten Messungen.

Tabelle 5: Typische Messwerte für den Kontaktwiderstand

Messung an	Phase L1	Phase L2	Phase L3
Durchführungsanschlüsse	$100.02 \mu\Omega$	$99.44 \mu\Omega$	$99.15 \mu\Omega$
Vakuumröhren	$28.40 \mu\Omega$	$28.67 \mu\Omega$	$26.72 \mu\Omega$

Es wird empfohlen, für diese Prüfung einen Strom von mindestens 100 A DC einzuspeisen [2]. Falls der Leistungsschalter mit Stromwandlern ausgestattet ist, sollte außerdem beachtet werden, dass es mehrere Sekunden dauern kann, bis entgegengerichtete Effekte gesättigt sind. Es sollten Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass der eingespeiste hohe Primärstrom keine Auswirkungen auf die Schutzkreise hat.

Fazit

- Magnetisch betätigte Vakuum-Leistungsschalter speichern die für die Betätigung des Leistungsschalters benötigte Energie in Kondensatoren. Dieses Verfahren erfordert zwar nur wenige bewegliche Teile, unterscheidet sich aber sehr stark von den herkömmlichen Verfahren mit mechanischen Federn oder pneumatischen oder hydraulischen Systemen.
- Steuerplatinen ersetzen die elektromechanischen Ausschalt- und Einschaltspulen. Es ist keine Einspeisung von tatsächlichen elektrischen Leistungen zum Ansteuern der Befehlsspulen mehr erforderlich. Stattdessen wird ein Spannungssignal an einen hochohmigen Eingang angelegt.
- Es ist zu empfehlen, die Liste der Messsignale zur Prüfung der Schaltzeiten und der korrekten Funktion um die Kondensatorspannung und den Betätigungsstrom zu erweitern. Diese Signale ermöglichen es, die korrekte Funktion des Ladesystems, der Kondensatoren und der magnetischen Betätigung sicherzustellen.
- Die Kondensatoren und die magnetische Betätigung bringen drei neue Eigenschaften mit sich, die für die Prüfung relevant sind: Ladegeschwindigkeit des Kondensators sowie Spitzenstrom und Aktivierungsdauer der Betätigung. Für diese Eigenschaften existieren derzeit aber noch keinerlei Normen oder Empfehlungen für Werte. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden diese Leistungsschalter jedoch zukünftig sehr beliebt werden, wenn erst einmal mehr Erfahrungen damit gesammelt wurden.

Literaturverzeichnis

[1] ANSI/NETA MTS-2011, "Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems"

[2] P. Gill: "Electrical Power Equipment Maintenance and Testing" Second Edition, CRC Press, 2009



Charles Sweetser erhielt 1992 seinen B.S. und 1996 seinen M.S. in Elektrotechnik von der Universität von Maine. Seit 2009 arbeitet er für OMICRON electronics Corp. USA und ist aktuell PRIM Engineering Services Manager für Nordamerika. Bevor er zu OMICRON kam, arbeitete er 13 Jahre lang in der Diagnose von elektrischen Geräten und im Consulting. Er hat mehrere technische Artikel für die IEEE und andere Industrieforen veröffentlicht. Er ist seit 15 Jahren Mitglied der IEEE Power & Energy Society (PES) und aktiv im IEEE Transformers Committee, wo er bis zur Veröffentlichung im März 2013 den Vorsitz der FRA-Arbeitsgruppe PC57.149 inne hatte. Außerdem ist er Mitglied bei mehreren anderen Arbeitsgruppen und Unterausschüssen. Seine weiteren Schwerpunkte liegen unter anderem bei der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und der Teilentladung.

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 140 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies und ein starkes Netz von Vertriebspartnern haben OMICRON zum Marktführer in der Energietechnik gemacht.

Weitere Informationen und Literatur sowie detaillierte Kontaktinformationen finden Sie auf unserer Internet-Website.

www.omicronenergy.com