

Eine Frage des Timings

Ein aktives Schutzsystem, das schnell auf die Bildung interner Lichtbögen reagiert, trägt zur Verbesserung der Bedienersicherheit und Betriebsmittelverfügbarkeit bei.

Carlo Gemme, Michele Pasinetti, Renato Piccardo

Die Bildung von Lichtbögen in Schaltanlagen kann schwerwiegende Folgen haben. Es dauert nur wenige Millisekunden, bis sich ein Lichtbogen gebildet hat, doch die Energie, die sich während der Brenndauer aufbaut, ist erstaunlich und kann zu schweren Verletzungen oder in sehr seltenen Fällen sogar zum Tode führen. Es gibt eine Vielzahl von Lichtbogenschutzsystemen, die zwar die Dauer des Fehlerstroms begrenzen, aber die auftretenden Schäden nicht unbedingt verhindern. Die bei einem Lichtbogenunfall auftretenden Schäden hängen von der Höhe des Lichtbogenstroms und der Zeitspanne bis zum Löschen des Bogens ab – und nur letztere lässt sich beeinflussen.

Das ABB-Produktangebot umfasst mehrere zuverlässige Schutzsysteme, von denen einige in der Lage sind, einen Lichtbogen in weniger als 50 ms zu löschen. Dieses Angebot wurde durch ein weiteres System mit der Bezeichnung Arc Eliminator erweitert, das wie ein Airbag beim Auto als zusätzliches Sicherheitsmerkmal für Schaltanlagen erhältlich ist und die positiven Eigenschaften anderer ABB-Schutzsysteme in sich vereint. Dabei



handelt es sich um einen schnellen Erdungsschalter, der in der Lage ist, eine Stromschiene in weniger als 5 ms vollständig kurzzuschließen. Der Arc Eliminator ist als aktives Schutzsystem ausgelegt, das in die Schaltanlagen der ABB UniGear-Reihe integriert wurde. Neben seiner Geschwindigkeit zeichnet sich das System durch bedeutende Einsparungsmöglichkeiten im Hinblick auf Reparaturkosten und Ausfallzeiten aus.

Interne Lichtbögen in Schaltanlagen können durch schadhafes Isoliermaterial, unsachgemäße Stromschienenverbindungen, schlechte Wartung, das Eindringen von Tieren oder einfach durch menschliches Fehlverhalten verursacht werden. Wenn es zur Lichtbogenbildung kommt und nur wenig bzw. gar kein Schutz vorhanden ist, können die Folgen teuer oder gar tödlich sein [1]. Bei der Bildung eines Lichtbogens¹⁾ steigen die Lufttemperatur und der Druck innerhalb des Schaltanlagegehäuses rasch an, wobei die Energie explosionsartig freigesetzt wird.

Störungen dieser Art mit Personenschäden sind in modernen luftisolierten Schaltanlagen (AIS) und gasisolierten Schaltanlagen (GIS) für den Mittelspannungsbereich äußerst selten. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Bediener durch passive Schutzsysteme wie die Struktur der Schaltanlage geschützt sind. Mit anderen Worten, das Schaltanlagegehäuse ist in der Lage, dem vom Lichtbogen erzeugten Druck und der Wärme standzuhalten, während die heißen Gase durch einen Abgaskanal aus dem Arbeitsbereich des Bedieners geleitet werden **1**. Zusätzlich wird die Brenndauer eines Lichtbogens – und somit der verursachte Schaden – durch die Wahl eines geeigneten Relaischutzsystems begrenzt.

Die Vernunft wie auch einschlägige internationale Normen **Infobox** fordern, dass keine Personen an frei zugänglichen spannungsführenden Teilen arbeiten oder sich gar in ihrer Nähe auf-

Infobox Normen für elektrische Sicherheit am Arbeitsplatz

Der führende Standard für elektrische Sicherheit ist die US-Amerikanische Norm NFPA 70E „Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces“ [2]. Diese Norm besagt, dass Personen keine Arbeiten an frei zugänglichen spannungsführenden Teilen durchführen oder sich in der Nähe solcher Teile aufhalten dürfen, bis auf zwei Ausnahmen, die in der NFPA 70E-2000 Teil II 2-1.1.1*) aufgeführt sind:

- Wenn durch das Abschalten der Spannung zusätzliche oder größere Gefahren entstehen (z. B. beim Abschalten der Lüftung in gefährlichen Umgebungen).
- Wenn es konstruktions- oder betriebsbedingt schwierig ist, die Arbeiten durch-

zuführen (z. B. wenn Spannungsprüfungen für Diagnosezwecke erforderlich sind).

In den USA gilt die Nichteinhaltung dieser Vorschriften als gesetzeswidrig und kann mit Geld- oder Haftstrafen geahndet werden. In Kanada wird zurzeit eine ähnliche Norm (CSA Z460 „Arc flash/electrical safety in the workplace“) im Hinblick auf die Gefahren durch interne Lichtbögen bzw. Funkenschlag definiert.

Fußnote

*1 Weitere Informationen unter http://ecmweb.com/ops/electric_top_five_keys (Stand Oktober 2007)

halten sollten. Doch auch bei sorgfältiger Befolgung der Sicherheitsvorschriften bleiben bei elektrischen Anlagen gewisse Risiken bestehen. So gibt es immer Situationen, in denen zum Beispiel ein Problem nicht erkannt werden kann, solange die Anlage spannungslos ist, d. h. unter Spannung gearbeitet werden muss. In diesen Fällen benötigt der Schalter eines herkömmlichen Schutzrelais mindestens 100–200 ms, um einen Fehler zu löschen. Während dieser Zeit wird die Bediener-sicherheit durch die Struktur der Schaltanlage gewährleistet. Leider gilt dies nicht für die elektromechanische Ausrüstung innerhalb des Gehäuses, in dem der Lichtbogen auftritt. In den ersten 120 ms der Störung – der dynamischen

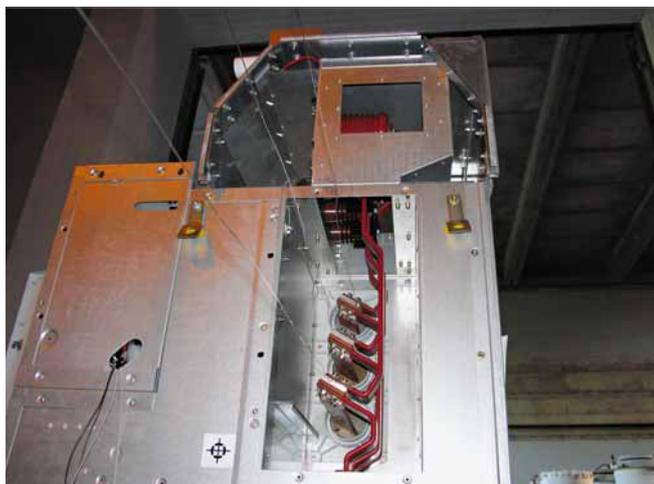
- 1** Das Schaltanlagegehäuse hält dem vom Lichtbogen verursachten Druck und der Hitze stand.



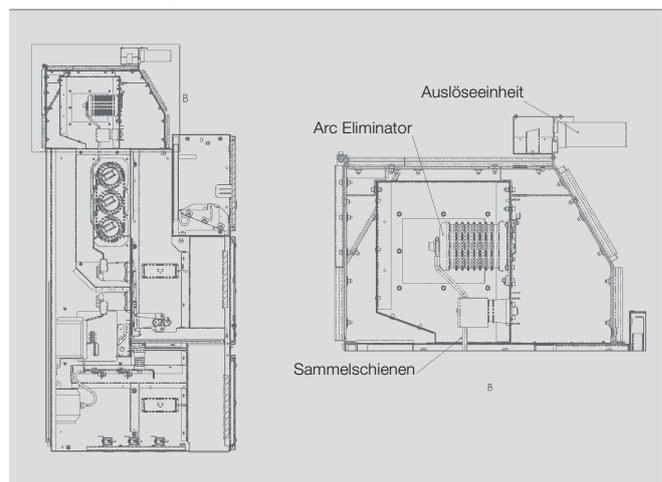
Fußnote

*1 Die im Lichtbogen freigesetzte Energie ist proportional zum Quadrat des Kurzschlussstroms und der Brenndauer des Bogens.

2a Anwendung des Arc Eliminators (AE) an einer ABB UniGear-Schaltanlage



2b Detailzeichnung

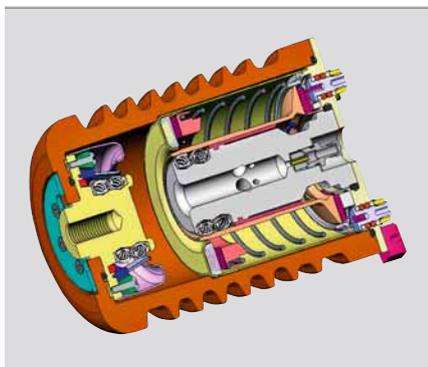


Energieverteilung

Phase der Lichtbogenbildung – baut sich ein hoher Druck auf, und heiße Gase dehnen sich aus. Dadurch wird alles zerstört, was sich im Gehäuse befindet. Die Folge sind ein vorübergehender Ausfall und hohe Reparaturkosten.

Es gibt Lichtbogenschutzsysteme, die in der Lage sind, die Dauer des Fehlerstroms, der den Lichtbogen speist, zu verkürzen und somit die Energiezufuhr zur Störung deutlich zu begrenzen. Tatsächlich sind viele ABB-Schaltanlagen mit einem der verschiedenen Lichtbogenschutzsysteme aus dem ABB-Produktportfolio (TVOC, REA oder FRD) ausgestattet. Diese elektronischen Systeme sind in der Lage, die Präsenz eines internen Lichtbogens mithilfe optischer Sensoren bzw. Drucksensoren innerhalb weniger Millisekunden zu erkennen. Dennoch liegt die erforderliche durchschnittliche Eingriffszeit zur Beseitigung der Störung unter Berücksichtigung der Schaltzeit von Relais und Leistungsschalter bei etwa 100 ms.

3 Einphasiger Pol des Arc Eliminators (AE) im Querschnitt



Strombegrenzungsgeräte können die Höhe und die Dauer des Fehlerstroms reduzieren. Dazu muss das Gerät innerhalb der ersten Viertelperiode reagieren, um zu verhindern, dass der Fehlerstrom den ersten Scheitel der asymmetrischen Wellenform erreicht. Ein Beispiel für ein solches Gerät ist der Is-Begrenzer von ABB mit einer extrem kurzen Entkoppelungszeit von 1 ms. Der Begrenzer kann in eine spezielle Schaltanlageneinheit in Kupplungen zwischen Systemen oder in Sammelschienenabschnitten installiert werden, die bei Verbindung über einen Leistungsschalter nicht ausreichend kurzschlussfest wären. Dies ist zwar teurer als andere Lichtbogenschutzsysteme, doch die Verwendung eines Is-Begrenzers in hoch sensiblen Prozessen ist besonders unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten sinnvoll.

Der Arc Eliminator (AE) vereint alle positiven Eigenschaften der oben genannten Begrenzer in sich und stellt im Hinblick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis die optimale Lösung dar, denn ein Gerät genügt, um ein ganzes Sammelschienenensystem zu schützen. Außerdem ist er in der Lage, einen Lichtbogen innerhalb von 5 ms gegen Erde kurzzuschließen. Eine typische Installation für Systeme, die mit offenen Kuppel-schaltern betrieben werden, besteht aus einer AE-Einheit an den Einspeisungen für jede Sammelschienenhälfte. Damit sind bis zu 10 Schaltfelder geschützt. Schäden durch Hitze und die daraus resultierende Freisetzung von giftigen Gasen werden drastisch reduziert (auf unter 1% dessen, was bei einer Prüfung mit einem einsekündigen internen

Lichtbogen auftreten würde), sodass Druckentlastungssysteme und Abgas-kanäle nicht notwendig sind. Trotz Begrenzung des Druckanstiegs kann der Druck vor dem Eingriff durch den AE ein erhebliches Maß erreichen, weshalb vorhandene Druckentlastungssysteme zum Einsatz kommen. Es werden aber keine heißen oder giftigen Lichtbogengase freigesetzt.

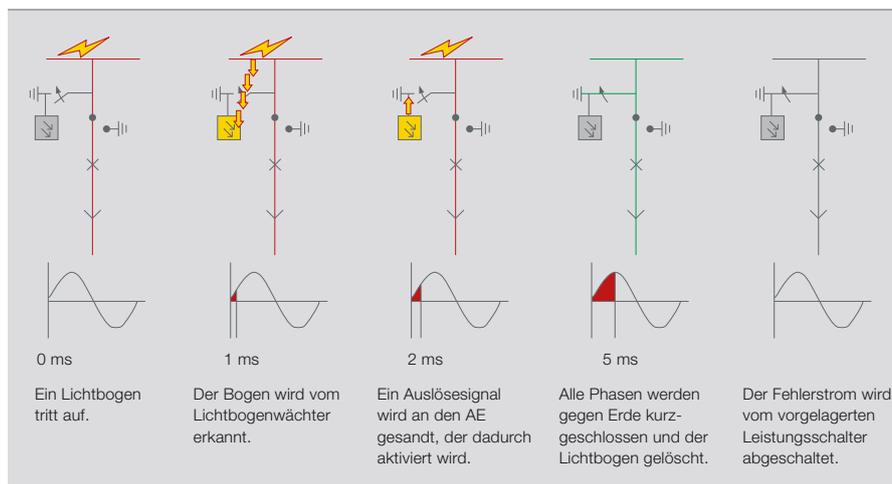
Ursprünglich für die luftisolierten Schaltanlagen vom Typ AX1 [3] entwickelt und patentiert, ist der AE mittlerweile ein integrierter Bestandteil der luftisolierten ABB-Schaltanlagenfamilie UniGear [2]. Dabei ist der AE in einem Metallgehäuse am Sammelschienen-system untergebracht. Lichtwellenleiter, die in jedem Teil der Schaltanlage angebracht sind, sorgen für eine schnelle Erkennung von Lichtbögen. Eine mit AE ausgestattete UniGear-Schaltanlage wurde erfolgreich in den CESI-Labors in Italien getestet (die Ergebnisse sind in [4] und [5] aufgeführt).

Der AE kann auch als „Stand-alone“-Gerät in bestehenden Schaltanlagen eingesetzt werden, wo er als „aktives“ Schutzsystem in der Lage ist, eine Störung in wenigen Millisekunden zu erkennen und zu löschen (ähnlich wie das ABS-System im Auto). Darüber hinaus fungiert der AE auch als „Airbag“, indem er dem Bediener einen erhöhten Schutz bietet.

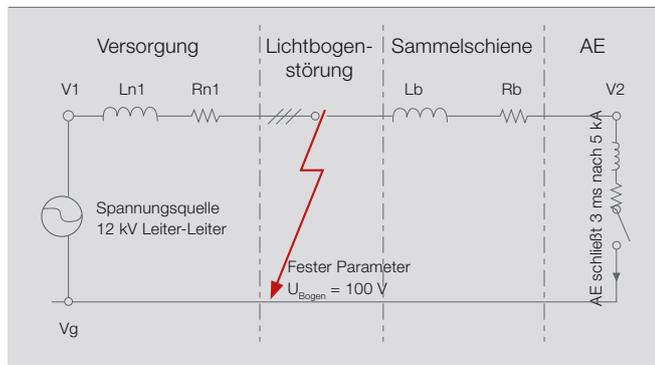
Das Arc Eliminator-System

Physikalisch ist der AE ein sehr schneller Schalter. Ein Querschnitt durch einen einphasigen Pol ist in 3 dargestellt. Jeder Schalterpol befindet sich in einem Isolator aus Epoxidharz. Kommt es im Hochspannungsteil der Schaltanlage zu einem Störlichtbogen, liefern Lichtsensoren über die AE-Stuereinheit (ECU) das Auslösesignal. Der bewegliche Kontakt, der mit hoher Geschwindigkeit durch den Abstoßungseffekt einer Thompson-Spule angetrieben wird, überbrückt die SF₆-Isolierstrecke, um in weniger als 5 ms einen Kurzschluss zwischen der Erdungsplatte aus Kupfer und dem Hochspannungsanschluss herzustellen [4]. Der Lichtbogen benötigt eine Spannung von mindestens 100 V, um bestehen zu können. Doch nach dem Schließen der Kontakte fällt die Spannung plötzlich auf einen Wert, der nicht ausreicht, um den Bogen zu speisen.

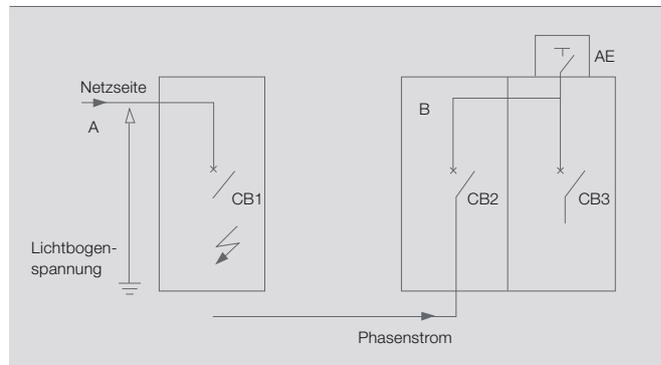
4 Funktionsablauf im Arc Eliminator



5 Simulierte Schaltung zur Überprüfung, ob die Parallelimpedanz des Leistungsstromkreises niedrig genug ist, um eine Löschung des Bogens sicherzustellen



6a Prüfanordnung



Die Isoliereigenschaften von SF₆ ermöglichen ein äußerst kompaktes Design, und der gleiche Pol wird für den gesamten Spannungsbereich von 12 bis 24 V verwendet. Die Betätigungsenergie für die Schaltkontakte wird elektrisch gespeichert, wobei die verfügbare Energie ebenso kontinuierlich überwacht wird [6] wie die Stromversorgung, der Auslösestromkreis und die Integrität des Controllers.

Ein typisches UniGear-Schaltfeld enthält drei physikalisch getrennte Hochspannungs-Einbauräume (Sammelschiene, Leistungsschalter und Leitung). Da ein AE-Elektronikmodul in der Lage ist, bis zu sechs Lichtwellenleiter und einen elektrischen Eingang zu verarbeiten, können bis zu zwei Schaltfelder mit einem AE geschützt werden. Dank einer speziell entwickelten elektronischen Schnittstelle, die einen AE mit bis zu fünf TVOC-Systemen mit jeweils neun

Lichtwellenleitern verbindet, kann diese Zahl auf 17 erhöht werden. Die Auslösezeit wird durch das TVOC-System nicht beeinflusst.

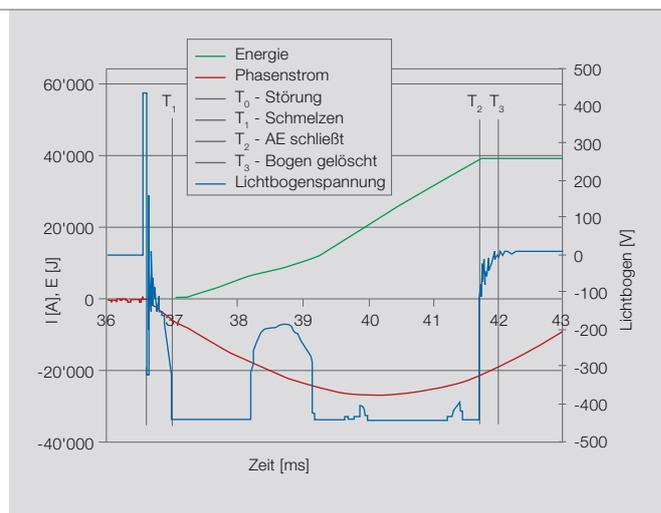
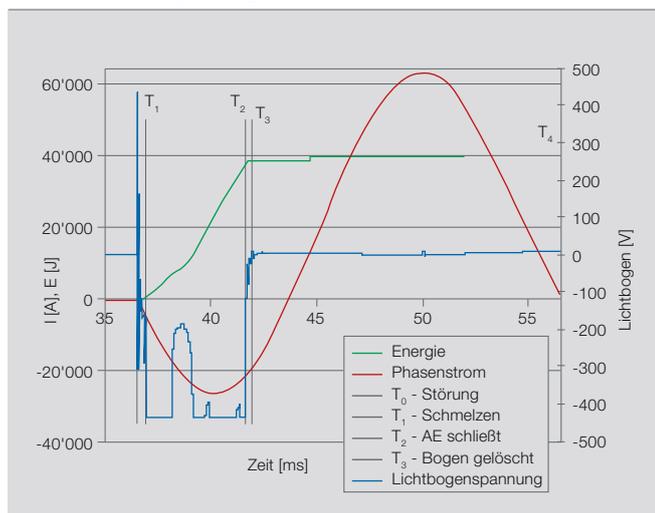
Systemfunktion

Um die Anwendung von AE in einer UniGear-Schaltanlage zu prüfen, muss die Systemfunktion und die maximale Anzahl von Schaltfeldern, die von einem einzigen System geschützt werden kann, evaluiert werden. Dies hängt von der Impedanz des Leistungsstromkreises und der typischen Impedanz der UniGear-Stromschiene (Lb und Rb) ab. Mit der in 5 dargestellten Schaltung wird überprüft, ob die parallele Impedanz des Leistungsstromkreises, d. h. von der Position des internen Lichtbogens zum AE-Kurzschluss gegen Erde, gering genug ist, um die den Lichtbogen speisende Spannung bei Aktivierung des AE genügend zu senken, um den Bogen zu löschen.

Ergebnisse von Simulationen mit 4 bis 10 Schaltfeldern zeigen, dass die Teilung des Stroms zwischen der Störung (Lichtbogen) und dem AE auch bei einer relativ großen Zahl von Schaltfeldern kein Problem darstellt. Ebenso klar ist, dass das L/R-Verhältnis die Form der Stromwelle und somit die Löschfähigkeit beeinflusst. Größere L/R-Werte führen zu einem langsameren Abklingen der Wechselstromkomponente, wobei der Lichtbogen etwas länger bestehen bleibt. Die Simulationsergebnisse wurden durch Tests in den CESI-Labors bestätigt [7], bei denen mithilfe eines Starkstromkabels eine entsprechende parallele Impedanz zwischen dem Lichtbogen und dem AE hergestellt wurde.

6a zeigt eine Prüfanordnung, bei der ein interner 31-kA-Lichtbogen im Schaltfeld CB1 beginnt und zum AE übertragen wird, der sich am Schaltfeld CB3 befindet.

6b Übertragung des 31,5-kV-Lichtbogens zum AE. Die rote Linie zeigt den Phasenstrom, die blaue Linie die Lichtbogenspannung. Die Energie ist grün dargestellt.



Energieverteilung

7 Auswirkungen eines 40-kA-Lichtbogens mit Eingriff durch den AE



det. Die dazugehörigen Verläufe des Phasenstroms (rot), der Lichtbogenspannung (blau) und der Energie (grün) sind mit zwei unterschiedlichen Zeitskalen in **6b** dargestellt. Zum Zeitpunkt T_0 wird die Versorgungsspannung durch einen dreiphasigen Fehler kurzgeschlossen, der durch einen dünnen Draht über den Phasen im Kabelraum von CB1 hervorgerufen wird. Während der Draht schmilzt und sich ein interner Lichtbogen bildet, steigt die Spannung auf mehrere Hundert Volt an (T_1). Gleichzeitig steigt auch der Strom, der von der Netzseite zur Position des Lichtbogens in CB1 fließt. Die Energiezufuhr zum Lichtbogen sorgt – begleitet von einem Lichtblitz – für einen Anstieg der Lufttemperatur und des Drucks. Der Lichtblitz löst die ECU aus, die wiederum den AE aktiviert.

Zum Zeitpunkt T_2 erdet der AE die drei Phasen und schließt parallel zum Lichtbogen einen niederohmigen Pfad, was einen erheblichen Abfall der Lichtbogenspannung bewirkt. Der im Lichtbogen fließende Strom wird geringer und beginnt, aus CB1 über die Kabelverbindung in CB2 und von dort aus zum AE zu fließen. Der gesamte Vorgang vom Auftreten der Störung über die Erkennung des Lichtbogens bis hin zum Schließen des AE dauert 5 ms. Zum Zeitpunkt T_3 ist der Strom vollständig auf den AE übertragen, und die Spannung fällt – je nach Länge und Impedanz des parallelen Pfads – auf wenige Volt. Der Strom fließt weiter, bis das vorgelagerte Schaltfeld CB1 schließ-

lich die Versorgung trennt. Aufgrund seiner Kurzschlussleistungen (31,5 kA, 3 s und 50 kA, 1 s) ist der AE leicht in der Lage, dem übertragenen Strom standzuhalten, bis dies geschieht.

Die Übertragungszeit T_2 – T_3 , die zwischen 0 und 2 ms betragen kann, wird beeinflusst von der Position des AE in Bezug auf die Netzseite und die Parallelimpedanz, die durch das Schließen des AE entsteht. Der Höchstwert von 2 ms wurde bei einer Lichtbogenprüfung mit 40 kA Effektiv- / 100 kA Spitzenstrom evaluiert, wobei CB1 mithilfe eines 10 m langen Kabels mit einem Querschnitt von 240 mm² mit CB2 verbunden wurde.

Während der netzseitige Strom im gesamten Ablauf nicht verändert wird, sorgt der Betrieb des AE für eine starke Begrenzung der Spannung und somit der Energiezufuhr zur Störung. Mit anderen Worten, sobald der AE aktiviert wird, sinkt die Energiezufuhr pro Periode auf unter 1% der Menge, die beim freien Brennen des Lichtbogens (d. h. die 5 ms vom Beginn des Stromflusses bis zum Schließen des AE) zugeführt wird. Dies wird aus der grünen Energiekurve bei T_2 in **6b** ersichtlich. So werden alle Auswirkungen, die normalerweise mit internen Lichtbögen verbunden sind, eingedämmt und bedeutende Schäden in der Anlage verhindert.

Bei dieser Prüfung betrug die Energiezufuhr zum Lichtbogen während des 5 ms langen freien Brennens ca. 40 kJ

von Phase 1 und 94 kJ von allen drei Phasen. Hätte der Lichtbogen eine Sekunde länger gebrannt, hätte die freigesetzte Gesamtenergie ungefähr das 200-fache der vom AE begrenzten Energie – also bis zu 2 MJ – betragen und alle Komponenten im Inneren des Gehäuses zerstört.

Auf jeden Fall muss die Schaltanlage in der Lage sein, während der 5 ms, in denen der Lichtbogen frei brennt, den Spitzenströmen und dem Überdruck standzuhalten, der die Druckentlastungsklappen öffnet. Dabei können schwache Teile der Struktur beschädigt werden. In **7** sind solche Schäden in Form von Rauchspuren um den Außenleiter und einer verbogenen Aluminium-Bodenplatte zu sehen.

Alles für die Sicherheit

Die Sicherheit des Bedienpersonals sollte für Hersteller von Mittelspannungsgeräten an erster Stelle stehen. Dies lässt sich mithilfe des AE von ABB leicht realisieren. Die AE-Lösung ist einfach, flexibel, leicht zu installieren und äußerst kostengünstig. Ein AE Service Kit bietet Kunden die Möglichkeit, die Lösung mit geringfügigen Modifikationen in bestehende Schaltanlagen zu installieren und somit die Sicherheit vorhandener Anlagen zu erhöhen.

Carlo Gemme

Michele Pasinetti

Renato Piccardo

ABB PT (SACE)

Mailand, Italien

carlo.gemme@it.abb.com

michele.pasinetti@it.abb.com

renato.piccardo@it.abb.com

Literaturhinweise

- [1] **Dyrnes, S., Bussmann, C.:** „Electrical safety and arc flash protection“, Electrical Safety and Arc Flash Handbook – Vol. 2 (2005), S. 12–23
- [2] NFPA 70E 2000, Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces, siehe www.nfpa.org (Oktober 2007)
- [3] **Arnborg, C.:** AX1 Technical Description and Ordering Guide (2001)
- [4] CESI: Test Report A6/004406 (2006)
- [5] CESI: Test Report A6/004285 (2006)
- [6] **Breder, H.:** „Frequently Asked Questions on the AX1 Arc Eliminator system“ (2003)
- [7] CESI: Test Report A7/015852 (2007)