

VG Koordination

Einleitung

Die Koordination von Überspannungsschutzgeräten (Surge Protective Devices, SPDs) ist eine zentrale Anforderung in Niederspannungsinstallationen, insbesondere in Umgebungen, in denen hochenergetische transiente Ereignisse und nachgeschaltete empfindliche Betriebsmittel gleichzeitig auftreten. In standardisierten Anlagenarchitekturen wird ein Typ 1 SPD – ausgelegt für die Ableitung von Blitzteilströmen gemäß der Impulsform $10/350 \mu s$ – am Netzanschlusspunkt oder in der Hauptverteilung installiert, während Typ 2 SPDs – konzipiert zur Ableitung von Schaltüberspannungen mit der Impulsform $8/20 \mu s$ – in nachgeordneten Verteilungen eingesetzt werden. Dieses gestufte Schutzkonzept stellt sicher, dass die Energie eines Impulses schrittweise reduziert wird und jedes Schutzgerät innerhalb seines vorgesehenen Schutzbereichs arbeitet. Abbildung 1 zeigt eine allgemeine Konfiguration koordinierter SPDs.

Internationale Normen, wie die Normenreihe IEC 61643, geben Hinweise zur räumlichen Anordnung dieser Geräte. Zwischen Typ 1 und Typ 2 SPDs wird eine Mindestleiterlänge von etwa 10 Metern empfohlen, um eine ordnungsgemäße Energiekoordination sicherzustellen. Diese Distanz bringt eine inhärente Impedanz in das System ein, die dazu beiträgt, die Beanspruchung eines Impulses zwischen der vorgeschalteten und der nachgeschalteten Schutzstufe aufzuteilen. Reale Installationen weichen jedoch häufig deutlich von dieser idealisierten Konfiguration ab. Platzbeschränkungen, Nachrüstprojekte und Installationen mit mehreren Verteilungen führen



Abbildung 1: Generelle Konfiguration

oftmals zu Leiterlängen, die weit unterhalb der normativen Referenz liegen.

Diese praktischen Abweichungen werfen eine zentrale Frage für Planer und Systemintegratoren auf: Findet eine ordnungsgemäße SPD-Koordination auch dann noch statt, wenn der erforderliche Trennabstand nicht eingehalten werden kann? Diese Fragestellung ist insbesondere für moderne Anlagen relevant, in denen Schutzgeräte in räumlich sehr enger Nähe zueinander installiert werden müssen – teilweise sogar unmittelbar nebeneinander.

Zur Untersuchung dieser Problematik wurde eine Reihe von Laborversuchen durchgeführt, um die Koordination von SPDs unter Bedingungen minimaler Leiterlängen zu bewerten. Die Tests umfassten Kombinationen aus Typ 1 und Typ 2 Geräten verschiedener Hersteller sowie Konfigurationen mit mehreren Typ 1 oder mehreren Typ 2 SPDs innerhalb derselben Installation. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Performance der VG-Technologie von CITEL, die Typ 1, Typ 2 und Typ 3 Schutzstufen in einer

einzig funktionale Einheit integriert. Diese Architektur folgt einer anderen Schutzphilosophie als konventionelle Ableiter und hat direkte Auswirkungen auf das Koordinationsverhalten bei kurzen Abständen.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Prüfmethode und stellen detaillierte Ergebnisse zur beobachteten Koordinationsperformance der unterschiedlichen SPD-Kombinationen vor. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern praxisnahe Einblicke in das Verhalten von Überspannungsschutzsystemen unter realen räumlichen Randbedingungen und geben konkrete Hinweise für Installationen, in denen der normative Trennabstand von 10 Metern nicht realisiert werden kann.

Zielsetzung

Ziel dieses Kapitels ist es, die technischen Beweggründe der Untersuchung darzulegen und die konkreten Fragestellungen zu definieren, die das Testprogramm geleitet haben. Während etablierte Normen einen strukturierten Rahmen für die Koordination von Schutzstufen in Niederspannungsinstallationen vorgeben, entsprechen reale Anlagenarchitekturen diesen idealisierten Konfigurationen nur selten. Diese Diskrepanz zwischen normativen Vorgaben und praktischen Randbedingungen hat zu einer erheblichen Lücke in den verfügbaren technischen Daten geführt – insbesondere für Anwendungen, bei denen Schutzgeräte in räumlich sehr enger Nähe installiert werden müssen. Ziel dieser Untersuchung ist es, einen Teil dieser Lücke zu schließen, indem experimentell validierte Erkenntnisse über das Verhalten von SPDs unter solchen Bedingungen bereitgestellt werden.

Ein zentrales Ziel besteht darin zu untersuchen, ob eine ordnungsgemäße Koordination zwischen

vorgeschalteten und nachgeschalteten Schutzstufen auch dann erhalten bleibt, wenn die Leiterlänge zwischen ihnen so stark reduziert wird, dass die in den Koordinationsempfehlungen der IEC 61643 Reihe üblicherweise vorausgesetzte Impedanz nicht mehr vorhanden ist. Da viele moderne Installationen die Platzierung mehrerer Verteilungen, zusätzlicher Schaltschränke oder nachgerüsteter Komponenten innerhalb stark begrenzter Bauräume erfordern, ist diese Fragestellung von unmittelbarer Relevanz für Planer und Systemintegratoren. Die Testreihe wurde daher so aufgebaut, dass praxisnahe Installationsszenarien nachgebildet werden, bei denen der Abstand zwischen den Schutzgeräten effektiv vernachlässigbar ist. Ziel war es nicht, theoretische Mindestabstände zu modellieren, sondern die Koordination unter den kritischsten Bedingungen zu untersuchen, wie sie auftreten können, wenn SPDs unmittelbar nebeneinander positioniert werden. Die Durchführung erfolgte dabei unter kontrollierten Laborbedingungen.

Ein weiteres Ziel ist die Bewertung des Einflusses der internen Architektur unterschiedlicher SPDs auf ihr Zusammenspiel unter diesen Randbedingungen. Die VG-Technologie von CITEL stellt im Vergleich zu herkömmlichen Geräten mit diskreten Schutzkomponenten einen grundlegend anderen Ansatz dar. Zu verstehen, wie sich diese Technologie auf die Interaktion mit nachgeschalteten Geräten auswirkt – insbesondere bei minimalem Trennabstand – ist entscheidend für die Beurteilung der Robustheit des Schutzkonzepts. Die Untersuchung legt daher einen besonderen Schwerpunkt auf Konfigurationen, bei denen ein VG Gerät vorgeschaltet ist und ein konventioneller Typ 2 Ableiter eines anderen Herstellers nachgeschaltet eingesetzt wird.

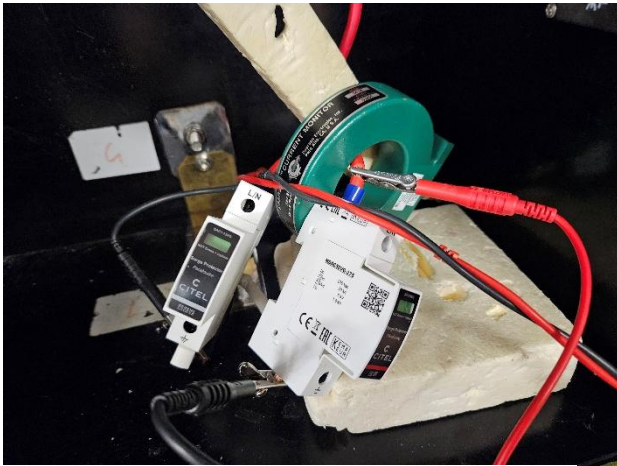


Abbildung 2: Prüfaufbau

In der Praxis ist eine vollständige Vereinheitlichung hinsichtlich Hersteller oder Produktserie häufig nicht realisierbar. Bereits installierte Geräte, Beschaffungsgewohnheiten, wirtschaftliche Aspekte sowie Änderungen an bestehenden Anlagen führen regelmäßig zu Installationen mit gemischten Schutzgeräten. Ein weiteres Ziel der Untersuchung ist daher die Analyse des Koordinationsverhaltens zwischen Geräten unterschiedlicher Hersteller. Dies umfasst die Prüfung eines vorgeschalteten Typ 1+2+3 VG Gerät zum Schutz eines nachgeschalteten Geräts eines anderen Herstellers. Diese Szenarien spiegeln realistische Feldbedingungen wider und sind entscheidend für die Bewertung, ob die Koordination auch bei herstellerübergreifenden Kombinationen zuverlässig erhalten bleibt.

Über die klassische Typ 1 / Typ 2 Kaskade hinaus wurde der Untersuchungsumfang auch auf Konfigurationen mit mehreren SPDs derselben Klassifizierung erweitert. Installationen mit mehreren Typ 1 Geräten können entstehen, wenn neue Einspeisepunkte in bestehende Infrastrukturen integriert werden, während mehrere Typ 2 Geräte häufig in über die Zeit wachsenden Verteilungssystemen anzutreffen sind. Werden Geräte derselben Schutzklasse in

räumlich enger Nähe installiert, stellen sich Fragen hinsichtlich gegenseitiger Auslösung, unbeabsichtigter Energieaufteilung oder veränderter Ableitcharakteristik. Ein weiteres Ziel besteht daher darin zu beobachten, ob und wie sich SPDs gleichen Typs unter hochenergetischer Belastung gegenseitig beeinflussen und ob diese Wechselwirkungen planerische oder nachrüstungsrelevante Konsequenzen haben.

Ein übergeordnetes Ziel der Untersuchung ist es schließlich, das experimentell beobachtete Verhalten in klare ingenieurtechnische Handlungsempfehlungen zu überführen. Ziel ist es nicht, theoretische Annahmen zu formulieren, sondern datenbasierte Schlussfolgerungen bereitzustellen, die praxisorientierte Entscheidungen unterstützen. Dazu gehören die Identifikation von Installationen, in denen die Koordination trotz minimaler Leiterlängen zuverlässig erhalten bleibt, das Erkennen von Konfigurationen mit erhöhter elektrischer Beanspruchung oder grenzwertigem Verhalten sowie die Klärung der Bedingungen, unter denen interne Koordinationsmechanismen moderner SPDs – insbesondere integrierter Mehrstufenarchitekturen – einen messbaren Vorteil bieten.

Das übergeordnete Ziel besteht darin, Planer, Installateure und technische Entscheidungsträger mit spezifischen Informationen auszustatten, die Unsicherheiten in der Planung reduzieren und robuste Schutzkonzepte ermöglichen – selbst dann, wenn physikalische Randbedingungen die Einhaltung der in bestehenden Normen typischerweise genannten Trennabstände nicht zulassen.

Prüfmethodik

Die vergleichende Bewertung wurde in einem akkreditierten Hochstromprüflabor unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Sämtliche Abläufe, Messmethoden und Sicherheitsvorgaben entsprachen den Anforderungen der Normenreihe IEC 61643. Ziel war es, realistische Überspannungsszenarien nachzubilden und gleichzeitig eine präzise Erfassung der Strom- und Spannungsverläufe für die anschließende Analyse sicherzustellen.

Die Stoßströme wurden mithilfe eines Impulsgenerators erzeugt, der in der Lage ist, Blitzstromimpulse bis zu 100 kA mit der Impulsform 10/350 μ s zu generieren. Zur Erfassung der einzelnen Stoßströme sowie der resultierenden Restspannungen (U_{res}) an den Überspannungsschutzgeräten kam ein kalibriertes digitales Hochgeschwindigkeitsszilloskop in Kombination mit Stromwandlern und Hochspannungstastköpfen zum Einsatz. Für alle Typ 1 Untersuchungen wurde der Prüfstrom auf den jeweiligen Iimp Nennwert der beteiligten Typ 1 SPDs eingestellt. Um eine Vergleichbarkeit aller geprüften Geräte unabhängig vom Hersteller sicherzustellen, wurden ausschließlich SPDs ausgewählt, die der Blitzschutzklasse LPL III entsprechen und jeweils einen nominalen Iimp Wert von 12,5 kA aufweisen. Bei den zusätzlichen Typ 2 zu Typ 2 Vergleichsprüfungen wurden die Geräte mit ihrem jeweiligen maximalen Ableitstoßstrom der Impulsform 8/20 μ s (I_{max}) belastet.

Aufgrund der physikalischen Randbedingungen des Prüfaufbaus – insbesondere der erforderlichen Luft- und Kriechstrecken, der sicheren Platzierung der Sensorik sowie der notwendigen Leitungsführung zur Vermeidung von Störeinflüssen – war eine Leiterlänge von etwa 30 cm zwischen den Geräten und den Messpunkten

unvermeidbar. Für die Interpretation der Messergebnisse entspricht dies in der Praxis einer Installation mit vernachlässigbarer Leitungslänge, da ein derart kurzer Leiter nur einen minimalen zusätzlichen induktiven Spannungsanteil einbringt. Der in Abbildung 2 dargestellte Aufbau zeigt exemplarisch die verwendete Prüfkfiguration.

Die Testkampagne umfasste Überspannungsschutzgeräte mehrerer Hersteller und deckte ein breites Spektrum unterschiedlicher Gerätekonzepte ab. Von CITEL wurden die Geräte DAC1-13VG (Typ 1+2+3) und DAC50VG (Typ 2+3) ausgewählt. Darüber hinaus wurden vier verschiedene kombinierte Typ-1+2 Ableiter sowie fünf Typ 2 Ableiter anderer Hersteller im direkten Vergleich untersucht. Jede Konfiguration wurde mit mehreren Prüfmustern getestet, um eine statistische Aussagekraft sicherzustellen und geräteindividuelle Streuungen als Einflussfaktor auszuschließen.

Das primäre Bewertungskriterium war die Stromaufteilung zwischen den beiden parallel installierten SPDs. Eine gute Koordination liegt dann vor, wenn der Typ 1 Ableiter die gesamte Energie des 10/350 μ s Stoßstroms ableitet und der nachgeschaltete Typ 2 Ableiter vollständig geschützt bleibt. Eine Koordination kann weiterhin als ausreichend angesehen werden, wenn der Typ 1 Ableiter den überwiegenden Anteil der Energie übernimmt, sodass der Typ 2 Ableiter lediglich einer Restenergie ausgesetzt ist, die er ohne Risiko einer Überlastung sicher ableiten kann. Eine Koordination ist nicht gegeben, wenn der Typ 2 Ableiter eine Energiemenge ableiten muss, die seine Leistungsfähigkeit überschreitet und zu einer Überlastung sowie einer anschließenden Trennung vom Netz führt. Als zweiter zentraler Parameter wurde die resultierende Restspannung betrachtet.

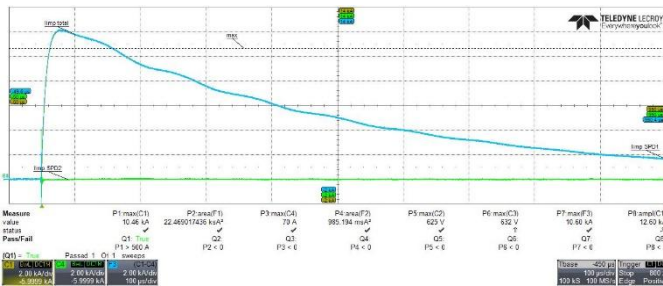


Abbildung 3: DAC1-13VG mit Marktmuster T2, Muster 1

Über diese Leistungskennwerte hinaus wurden die in der Normenreihe IEC 61643 definierten Sicherheitskriterien angewendet. Nach jeder Prüfsequenz wurden alle SPDs überprüft, um sicherzustellen, dass sie weiterhin betriebssicher, unbeschädigt und frei von kritischen Ausfallursachen wie mechanischer Beschädigung, Brand oder explosivem Versagen waren.

Testsequenz 1: Typ 1+2+3 VG und konventionelle Typ 2 SPDs

Das Koordinationsverhalten zwischen einem VG-basierten Typ 1+2+3 SPD von CITEL und nachgeschalteten konventionellen Typ 2 SPDs wurde unter kontrollierten 10/350 μ s Impulsbedingungen gemäß den Anforderungen für Blitzschutzpegel III ($I_{imp} = 12,5 \text{ kA}$, 10/350 μ s) untersucht. Über alle Prüfsequenzen und über alle fünf untersuchten Typ 2 Modelle hinweg zeigte das vorgelagerte VG-Gerät durchgängig eine hervorragende Energieaufnahme, sodass das nachgeschaltete SPD lediglich einen sekundären Reststromanteil ausgesetzt war.

Die detaillierte Analyse der Stromverläufe, Energieintegrale und Begrenzungscharakteristiken zeigte, dass die VG Technologie bereits an der Anstiegsflanke des Impulses anspricht und über die gesamte Stromdauer hinweg einen stabilen, niederimpedanten Ableitpfad bereitstellt.

Dadurch wird der Stoßstrom in ausgeprägter Weise durch das Typ 1+2+3 Gerät abgeleitet. Die gemessene Stromaufteilung belegt dieses Verhalten eindeutig: Das VG basierte Typ 1+2+3 SPD leitete den überwiegenden Anteil der eingespeisten 10/350 μ s Energie – durchschnittlich deutlich über 95 % des Stoßstroms und über 98 % der Gesamtenergie. In mehreren Prüfsequenzen wurde der gesamte Impuls vollständig vom VG Gerät aufgenommen, ohne dass eine messbare Beteiligung des nachgeschalteten Typ 2 SPDs auftrat. Die entsprechenden Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 bis 7 dargestellt.

Die Ursache für dieses ausgeprägte Koordinationsverhalten liegt in der gezielt ausgelegten Wechselwirkung der Schutzkomponenten innerhalb der VG Architektur, insbesondere im abgestimmten Zusammenspiel von Metalloxidvaristor (MOV) und gasgefüllter Funkenstrecke (GSG). In der VG Topologie sind beide Elemente so aufeinander abgestimmt, dass Zündverhalten, Anstiegsflanke und Übergang in den vollen Ableitzustand mit außergewöhnlicher Geschwindigkeit und Stabilität erfolgen. Der MOV sorgt für eine unmittelbare Spannungsreaktion an der Impulsfront, initiiert eine kontrollierte Vorionisation und führt die Funkenstrecke reproduzierbar und schnell in den Durchbruch. Nach der Zündung der GSG steht ein niederimpedanter Leitkanal zur Verfügung, der den vollständigen 10/350 μ s Strom ohne

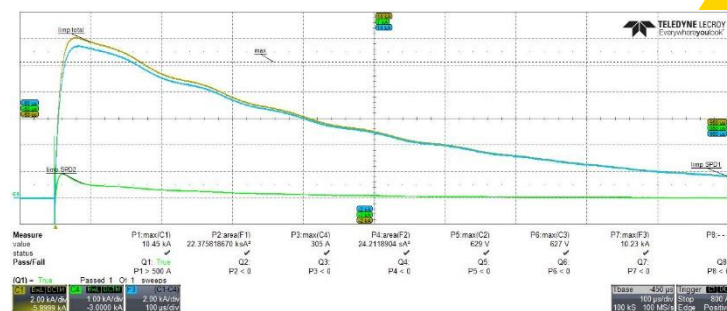


Abbildung 4: DAC1-13VG mit Marktmuster T2, Muster 2

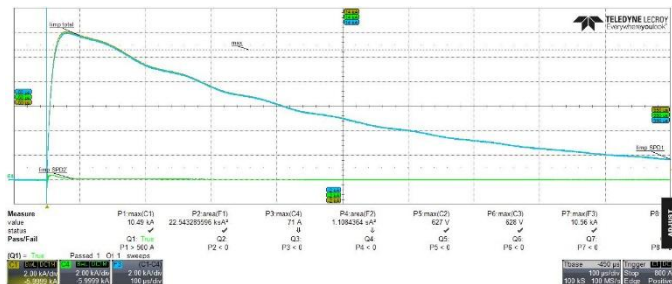


Abbildung 5: DAC1-13VG mit Marktmuster T2, Muster 3

Unterbrechung, Oszillation oder Wiederzündeffekte führen kann.

Dieser koordinierte Aktivierungsmechanismus führt zu einem deutlich schnelleren Beginn der Stromleitung im Vergleich zu konventionellen Geräten, bei denen Funkenstrecken eine längere Ionisationszeit benötigen und nachgeschaltete Komponenten mit systembedingter Verzögerung reagieren. Da das VG-Gerät sehr früh in einen leitenden Zustand übergeht, beginnt es mit der Ableitung der Stoßenergie, bevor das nachgeschaltete Typ 2 SPD überhaupt seine eigene Ansprechschwelle erreicht. Dadurch wird ein vorzeitiges Ansprechen der Typ 2 Stufe konsequent verhindert. Das nachgeschaltete Gerät verbleibt während des Großteils – häufig während der gesamten Dauer – des Impulses im nichtleitenden Zustand, sodass keine relevante Energieübertragung in der kritischen Frühphase des Stoßes stattfindet.

Das Verhalten der nachgeschalteten Typ 2 SPDs war über alle Prüfungen hinweg konsistent und gut reproduzierbar. In den Fällen, in denen ein Reststrom zur zweiten Schutzstufe gelangte, lagen dessen Amplituden deutlich innerhalb des thermischen und elektrischen Belastungsbereichs eines Typ 2 SPDs. Die gemessenen Restströme entsprachen einer Belastung, wie sie für Typ 2 Geräte unter 8/20 µs Bedingungen als normal anzusehen ist, obwohl das Gesamtsystem mit der deutlich energiereicheren 10/350 µs Wellenform beaufschlagt wurde. Die Typ 2 Geräte fungierten

somit lediglich als „Restableitstufen“ und nicht als aktive Energieübernehmer.

Entscheidend ist, dass bei keinem der nachgeschalteten SPDs Anzeichen einer Überbeanspruchung festgestellt wurden. Es traten weder thermische Instabilitäten noch Auslösungen interner Schutzmechanismen, Abschaltungen oder Beschädigungen auf, wie sie in der IEC 61643 Normenreihe als kritisch definiert sind. Die gemessenen Restspannungen (U_{res}) an den Typ 2 SPDs lagen in einem Bereich, der dem erwarteten Verhalten eines nur marginal beteiligten Schutzgeräts entspricht.

Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse, dass das VG basierte Typ 1 SPD nicht nur seine Funktion als primäre Ableitstufe erfüllt, sondern aktiv eine hochgradig kontrollierte Stromaufteilung erzwingt, die das nachgeschaltete Typ 2 SPD effektiv vor kritischer Belastung schützt. Dieses Verhalten war unabhängig vom jeweiligen Typ 2 Design und vom Hersteller und zeigt, dass der Koordinationsvorteil nicht auf spezifische Eigenschaften einzelner Typ 2 Geräte zurückzuführen ist, sondern inhärent aus der vorgelagerten VG Topologie resultiert.

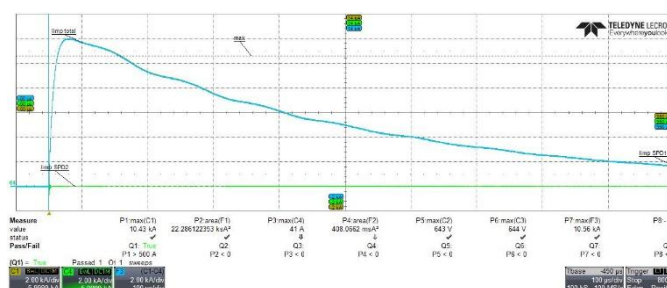


Abbildung 6: DAC1-13VG mit Marktmuster T2, Muster 4



Der hierfür entscheidende Parameter ist das Integral des quadrierten Stroms über die Zeit, ausgedrückt als I^2t Wert mit der Einheit kA^2s . Eine in den einschlägigen Normen ebenfalls gebräuchliche äquivalente Darstellung dieser Energie ist die Einheit kJ/Ω . Das I^2t Integral repräsentiert die gesamte Energie, die während der Leitphase im Überspannungsschutzgerät umgesetzt wird, und steht damit in direktem

Besonders relevant ist dieser Zusammenhang beim Vergleich unterschiedlicher Stoßstromwellenformen. Die Energie eines 10/350 μ s Impulses ist bei gleicher Spitzenstromamplitude etwa zwanzigmal höher als die eines 8/20 μ s Impulses. Tabelle 1 stellt die entsprechenden I^2t Werte beider Wellenformen in Abhängigkeit vom Spitzenstrom gegenüber. Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich unmittelbar ableiten, dass der Energieinhalt eines 10/350 μ s Impulses näherungsweise dem zwanzigfachen

Tabelle 1: Energie und Scheitelwert

7 / 11

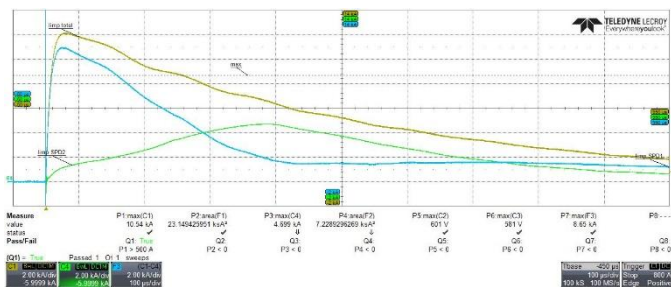


Abbildung 8: DAC1-13VG mit Marktmuster T1+2, Muster 3

Energieinhalt eines 8/20 μ s Impulses gleicher Amplitude entspricht.

Diese Relation verdeutlicht, weshalb eine rein auf Scheitelwerten basierende Betrachtung zu Fehlinterpretationen führen kann und weshalb die energiebasierte Bewertung über I^2t für die Beurteilung der tatsächlichen Beanspruchung von Überspannungsschutzgeräten unerlässlich ist.

Testsequenz 2: Typ 1+2+3 VG und Konventionelle Typ 1+2 SPDs

Diese Testreihe untersuchte Konfigurationen, bei denen sowohl das vorgelagerte als auch das nachgelagert installierte Schutzgerät der Klasse Typ 1+2 zuzuordnen ist. Verglichen wurden dabei integrierte VG Ableiter von CITEL (Typ 1+2+3) mit konventionellen hybriden Typ 1+2 Ableitern verschiedener Hersteller. Ziel war es zu analysieren, ob die VG Technologie die Energieverteilung im System signifikant beeinflusst und ob der Einsatz eines VG Geräts besondere Anforderungen an die Koordination stellt, wenn es mit anderen Typ 1+2 Produkten kombiniert wird.

Über alle gemessenen Kombinationen hinweg zeigte der VG Ableiter eine durchgängig dominante Rolle bei der Stoßstromableitung. In der Mehrzahl der Testläufe etablierte das VG Gerät bereits an der Impulsfront einen leitenden Zustand und übernahm den größten Anteil der eingespeisten Energie. Die Analyse der Stromverläufe zeigt einen

sehr schnellen Übergang zu einer niederohmigen Verbindung innerhalb des VG Ableiters, was zu einer klaren Bevorzugung des Energieflusses in Richtung der VG Stufe über den überwiegenden Teil der Impulsdauer führte. Dieses Verhalten entspricht qualitativ den zuvor beschriebenen Ergebnissen der Konfiguration „VG vorgelagert → Typ 2 nachgeschaltet“, wobei in diesem Fall beide Geräte nominell derselben Schutzklasse (Typ 1+2) angehören. Die Wechselwirkung findet somit zwischen zwei hybriden Ableitern statt und nicht zwischen einem reinen Typ 1 und einem reinen Typ 2 Gerät.

Eine erwähnenswerte Beobachtung besteht darin, dass nicht jede Kombination zu einer einseitigen Energieverteilung führte. Bei mehreren konventionellen Typ 1+2 Ableitern wurde die Energie gleichmäßiger auf die beiden Einheiten verteilt. In diesen Fällen zeigen die gemessenen Stromverläufe und Energieintegrale eine nahezu symmetrische Aufteilung des Impulses, ohne dass eines der beiden Geräte den Ableitpfad vollständig dominierte. Diese gleichmäßige Aufteilung führte nicht zu einem grenzwertigen Betriebszustand; vielmehr nahmen beide Ableiter Energieanteile auf, die innerhalb ihrer spezifizierten thermischen und elektrischen Belastungsgrenzen lagen. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen repräsentative Beispiele dieser Kombinationen und die entsprechenden Messergebnisse.

Aus Sicht von Sicherheit und Überlebensfähigkeit erfüllten alle getesteten Kombinationen die

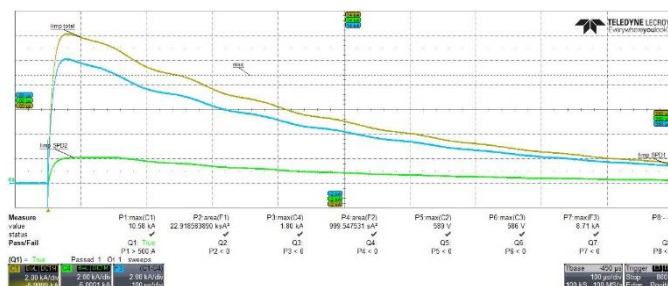


Abbildung 9: DAC1-13VG mit Marktmuster T1+2, Muster 4

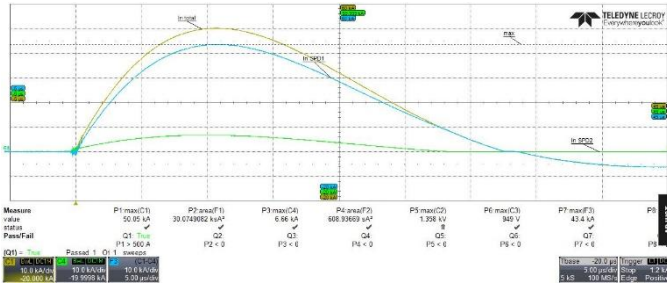


Abbildung 10: DAC50VG mit Marktmaster T2, Muster 6

Akzeptanzkriterien, die aus der Normenreihe IEC 61643 abgeleitet sind. Keines der Geräte zeigte Anzeichen von thermischer Instabilität, schwerwiegenden Beschädigungen, Brand oder Funktionsausfall nach den angewandten Impulssequenzen. Nachuntersuchungen und Funktionsprüfungen bestätigten, dass alle Geräte in sämtlichen geprüften Konfigurationen ihre strukturelle Integrität und Funktionsfähigkeit beibehielten.

Eine wichtige praktische Schlussfolgerung aus diesen Ergebnissen ist, dass die Integration eines VG Ableiters in eine Typ 1+2 Kaskade unter den getesteten Bedingungen keine zusätzlichen Koordinationsmaßnahmen über die übliche ingenieurmäßige Praxis hinaus erfordert. In allen Konfigurationen mit einem VG-Gerät übernahm dieses entweder den überwiegenden Anteil der Stoßenergie oder die Energie wurde stabil zwischen den beiden hybriden Ableitern aufgeteilt – in beiden Fällen innerhalb sicherer Betriebsgrenzen. Es waren somit weder zusätzliche Ausgleichsimpedanzen, vergrößerte Abstände noch spezielle Schutzmaßnahmen erforderlich, um die Koordination in den untersuchten Testaufbauten sicherzustellen.

Diese Aussage ist jedoch kontextbezogen zu verstehen: Sie gilt für die getesteten Geräteserien und Prüfmuster unter den spezifizierten Impulsbedingungen. Für die praktische Planung lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die Integration eines CITEL VG Ableiters in eine

bestehende Typ 1+2 Installation für sich genommen kein Koordinationsproblem erzeugt und häufig sogar zu einer verbesserten Kontrolle der Impulsströme führt. Umgekehrt kann festgestellt werden, dass das Einbringen eines konventionellen Typ 1+2 Ableiters in ein System, das bereits durch CITEL VG Technologie geschützt ist, praktisch keine Auswirkungen hat.

Testsequenz 3: Typ 2+3 VG und Konventionelle Typ 2 SPDs

Diese letzte Testreihe untersuchte das Zusammenwirken von nachgeschalteten Schutzstufen durch die Kombination von CITEL Typ 2+3 VG Ableitern mit einer Auswahl konventioneller Typ 2 SPDs. Ziel war es zu bewerten, wie sich ein Typ 2 VG Ableiter verhält, wenn er in räumlicher Nähe zu anderen Typ 2 Geräten installiert wird, und welche praktischen Auswirkungen die Nachrüstung einer bereits mit Typ 2 Ableitern geschützten Installation mit VG Technologie hat.

Über alle getesteten Kombinationen und Prüfmuster hinweg zeigte der VG Typ 2+3 Ableiter ein deutlich schnelleres Ansprechverhalten sowie ein dominantes Verhalten bei der Energieableitung. Hochauflösende Zeitaufzeichnungen und nachfolgende Berechnungen der Energieintegrale belegen, dass das VG Gerät in jeder Konfiguration mindestens 97 % der eingespeisten 8/20 µs Impulse bzw. der äquivalenten Prüfenergie ableitete. Der VG

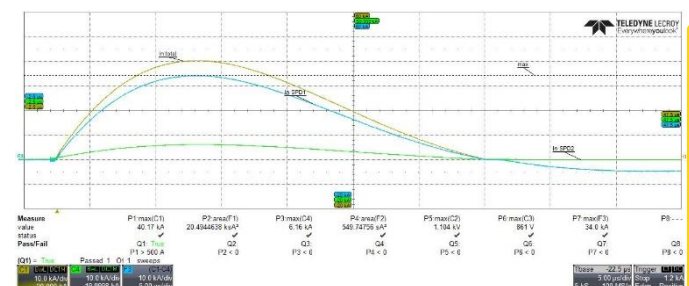


Abbildung 11: DAC50VG mit Marktmaster T2, Muster 7

Ableiter etablierte durchgängig bereits in der frühesten Phase des Impulses einen niederohmigen Ableitpfad und fing damit den überwiegenden Teil des Stoßstroms ab, bevor der konventionelle Typ 2 Ableiter überhaupt signifikant in den leitenden Zustand übergehen konnte. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen repräsentative Beispiele der für dieses Testszenario „Typ 2+3 VG gegen Typ 2“ gewonnenen Messergebnisse.

Aus thermischer und sicherheitstechnischer Sicht waren die Ergebnisse eindeutig. Die an den konventionellen Typ 2 Ableitern gemessenen Restströme waren im Verhältnis zu deren spezifiziertem I_{max} vernachlässigbar, und keines der Geräte zeigte Anzeichen thermischer Überlastung, funktionaler Abtrennung oder dauerhafter Beeinträchtigung nach den angewandten Prüfsequenzen. Praktisch bedeutet dies, dass die Anwesenheit des VG-Ableiters die elektrische und thermische Belastung der benachbarten Typ 2 Geräte auf ein Niveau reduziert, das deutlich innerhalb ihrer spezifizierten Belastbarkeitsgrenzen liegt.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich zwei praxisrelevante Schlussfolgerungen ableiten. Erstens verbessert die Nachrüstung einer Installation, die bisher ausschließlich mit konventionellen Typ 2 Ableitern ausgestattet ist, durch den Einsatz eines CITEL Typ 2+3 VG Ableiters den vorgelagerten Schutz signifikant. Das schnellere Ansprechen und die überlegene Energieführung der VG-Technologie konzentrieren die Stoßstromableitung auf die VG Stufe und reduzieren dadurch die Belastung anderer Typ 2 Geräte sowie der nachgeschalteten Betriebsmittel.

Zweitens bewirkt die umgekehrte Nachrüstung — also das Hinzufügen eines konventionellen Typ 2 Ableiters in eine Installation, die bereits durch VG Technologie geschützt ist — in der Praxis kaum

eine Veränderung des Schutzverhaltens. Da der VG Ableiter den Stoßstrom sehr frühzeitig und effektiv abfängt, wird ein zusätzlich installierter konventioneller Typ 2 Ableiter lediglich einer geringen Restenergie ausgesetzt. Seine Integration verändert somit weder die grundlegende Energieverteilung noch die gesamte Sicherheitsreserve der Installation in nennenswerter Weise.

Fazit

Die Testreihen liefern eine Reihe von kohärenten und praxisrelevanten Schlussfolgerungen für Planer, Installateure und technische Entscheider. Über alle untersuchten Konfigurationen hinweg zeigte sich, dass die schneller ansprechende VG Technologie die Energieverteilung konsistent so steuert, dass nachgeschaltete Schutzgeräte vor kritischer Belastung bewahrt werden. Befindet sich ein VG Ableiter an der primären Schutzposition, bleibt die Koordination selbst dann wirksam, wenn die physikalische Leitungslänge zwischen den Schutzstufen vernachlässigbar ist. Die VG Stufe fängt den Stoßstrom bereits an der Impulsfront ab und verhindert eine relevante Energieübertragung auf das nachgeschaltete Gerät. Praktisch bedeutet dies, dass Installationen mit einem vorgelagerten VG Ableiter auch bei sehr kurzen Abständen zwischen den Schutzstufen ein zuverlässiges Koordinationsverhalten aufweisen — Bedingungen, die in realen Anlagen unter der normativen 10 m Empfehlung normalerweise als kritisch gelten würden.

Aus ingenieurtechnischer und planerischer Sicht sind die praktischen Konsequenzen eindeutig und unmittelbar umsetzbar. Bei Erweiterungen oder Nachrüstungen sollte bevorzugt ein VG Ableiter an der ersten verfügbaren aktiven Schutzposition installiert werden. Dieses Vorgehen bietet

mehrere betriebliche Vorteile: reduzierte Belastung bestehender SPDs, verbesserte Beherrschung hochenergetischer Impulsfronten sowie ein einfacheres und robusteres Systemverhalten, das weniger stark von langen Leitungslängen zur Koordination abhängig ist. Die Nachrüstung eines VG Ableiters in eine Installation, die bislang mit konventionellen Typ 1+2 oder Typ 2 Geräten ausgestattet ist, führt zu einer messbaren Erhöhung der Schutzwirkung. Umgekehrt liefert das Hinzufügen eines konventionellen Typ 2 Ableiters in eine bereits durch VG Technologie geschützte Anlage kaum zusätzlichen Schutznutzen, da der VG Ableiter den überwiegenden Teil der Stoßenergie bereits abfängt.

Auf der Installationsebene bleibt die sorgfältige Ausführung von Potentialausgleich, Erdung und Leitungsführung entscheidend. Die Tests basierten auf ordnungsgemäßigem Potentialausgleich und laborüblichen Leitungsführungen; in realen Anlagen können mangelhafter Potentialausgleich oder induktive Schleifen die wirksamen Spannungsverläufe verändern und damit das Koordinationsverhalten beeinflussen. Es wird daher empfohlen, die Auswahl von VG Ableitern mit einer konsequenten Erdungspraxis, kurzen und direkten Verbindungsleitern sowie einer Überprüfung der Installationsqualität im Rahmen der Inbetriebnahme zu kombinieren.

Abschließend stützen die Messergebnisse eine klare Faustregel für praxisorientierte Entscheidungen: VG Technologie sollte bei erwarteten kurzen Abständen bevorzugt an der vorgelagerten Schutzstufe eingesetzt werden; und bei der Kombination von Produkten unterschiedlicher Hersteller sollten stets die gemessenen Geräteeigenschaften und die tatsächliche Energieableitfähigkeit herangezogen werden, statt sich auf theoretische Annahmen zu

verlassen. Diese Vorgehensweise reduziert das Risiko unerwarteter thermischer Belastungen nachgeschalteter Geräte und ermöglicht eine robuste, fehlertolerante Schutzstrategie, die den realen räumlichen Randbedingungen moderner Installationen gerecht wird.