

Systembasierter Ansatz für automatisierte Prüfungen des Sammelschienen-Differenzialschutzes

Christopher Pritchard | OMICRON electronics
Produktmanagement
Klaus, Österreich
christopher.pritchard@omicronenergy.com

Zusammenfassung – Die hohe Kurzschlussleistung in Umspannwerken und Netzstationen erfordert den Einsatz eines entsprechenden Sammelschienen-schutzes. Aufgrund der Auswirkungen eines Ausfalls der Sammelschiene gelten für die Geschwindigkeit und Stabilität eines Sammelschienen-schutzes hohe Anforderungen. Durch die unterschiedlichen Sammelschienen-topologien in Anlagen ist jede Konfiguration und insbesondere die Logik des Schutzes einmalig. Um die genaue Funktion gewährleisten zu können, ist deshalb eine Prüfung des gesamten Sammelschienen-schutzes vor der Inbetriebnahme unerlässlich.

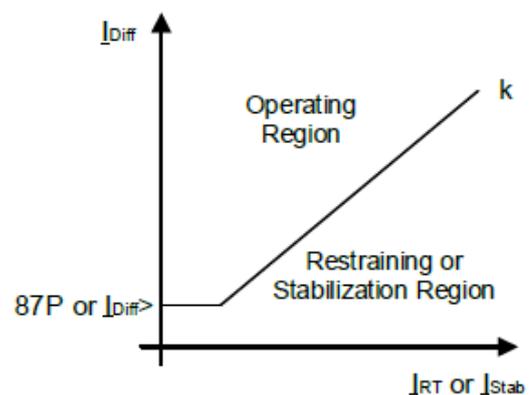
Die Prüfung und Überprüfung eines Sammelschienen-schutzes für komplexe Sammelschienen-topologien mit mehreren Sammelschienenabschnitten, Kupplungsschaltern und Feldern war schon immer eine der anspruchsvollsten Aufgaben bei der Inbetriebnahme. Eine einzige Prüfung der Stabilisierungskennlinie bietet keine ausreichende Sicherheit für die korrekte Funktion des Schutzes. Ein systembasierter Ansatz, bei dem die gesamte Sammelschienen-topologie mit allen Trennerkonfigurationen nachgebildet wird, bietet neue Möglichkeiten für alle Fehler Szenarien, die es zu überprüfen gilt.

In diesem Artikel wird über die Erfahrungen von Versorgungsunternehmen auf der ganzen Welt berichtet, die mit diesem neuartigen Prüfansatz arbeiten und wie sie damit Fehler ermitteln.

Keywords: Prüfung Sammelschienen-schutz, systembasierte Prüfung

I. PRÜFUNG VON DIFFERENZIALGLIEDERN

Die Hauptschutzfunktion eines Sammelschienen-schutzes übernehmen Differenzialglieder, die mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln Fehler in ihrem Bereich ermitteln. Die differentiellen Messungen werden in der Regel mit einer Stabilisierungskennlinie wie in Abbildung 1 stabilisiert.



$$I_{RT} = |I_1| + |I_2| \dots + |I_3|$$

$$I_{diff} = |I_1 + I_2 \dots + I_n|$$

ABB. 1: STABILISIERUNGSKENNLINIE

Modernste Prüflösungen können diese Kennlinie abbilden. Das Softwaremodul berechnet für einen Schuss in der Ebene die Ströme für das Prüfgerät und bewertet im Anschluss jeweils das Auslösen oder Nicht-Auslösen. Das Prüfgerät injiziert zwei Dreiphasenströme in zwei Abzweiggeräte.

Aber schon die Prüfung einer einfachen Stabilisierungskennlinie kann beim Sammelschienen-schutz zur Herausforderung werden. Für eine Selektivauslösung der Sammelschiene, bildet der Schutz die Topologie der Sammelschiene auf der Grundlage der Trennerposition (Trennschalter- oder Trennerabbild) nach. Zur Gewährleistung der Sicherheit, wird eine zusätzliche Checkzone eingerichtet, die ebenfalls ansprechen muss. Die Checkzone ist ein zusätzliches Differenzialglied mit einer Zone, die alle Feld-Stromwandler (CT) enthält. Die Checkzone ist vom Trennerabbild unabhängig. [1] Zur Vermeidung einer Überstabilisierung wendet eine

Checkzone eine spezielle Logik an, um die Stabilisierungsgröße auszuwählen, welche einen speziellen Prüfaufbau vorschreibt, bei dem ein Dreiphasenstrom durch zwei Felder durchgeschliffen und ein zweiter Strom in ein drittes Feld eingespeist wird. [2] Die selektive Schutzfunktion für die Sammelschiene und die der Checkzone können sich ebenfalls überlagern.

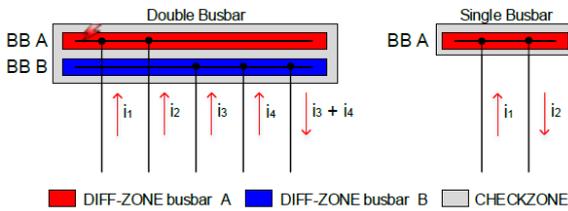


ABB. 2: UNTERSCHIEDLICHE SAMMELSCHIENENZONEN

Um die Prüfung zu vereinfachen, werden alle Einstellungen der Kennlinie geändert, Schutzfunktionen deaktiviert oder Prüfkontakte während der Prüfung verwendet. Wir halten dies für einen sehr gefährlichen und fragwürdigen Ansatz. Es besteht die potenzielle Gefahr, dass der Schutz nach der Prüfung in einem inkonsistenten Zustand verbleibt oder die tatsächliche Schutzlogik, die im Betrieb vorhanden ist, umgeht.

Bislang kann mit einer solchen einstellungsbasierten Prüfung ermittelt werden, ob das Stellglied und das Relais entsprechend den gegebenen Einstellungen funktionieren. Eine Beendigung der Prüfung an diesem Punkt würde der Komplexität des modernen Sammelschienen-schutzes nicht gerecht werden. Folgende Prüfungen verlangen besondere Aufmerksamkeit:

- logische Funktionen wie z. B. ein Leistungsschalterversager (LSV) oder Fehlererkennung in der toten Zone
- korrekte Konfiguration des Trennerabbilds
- Gesamtschutz inklusive, dass alle Funktionen zusammenarbeiten
- alle Stromeingänge arbeiten mit dem richtigen Stromwandlerverhältnis
- Koordination mit Feld-, Abzweig- und Reserveschutz

Potenzielle Probleme in diesen Bereichen werden in der Regel als Logikeinstellungen und Designfehler klassifiziert. Wie Studien belegen [3], ist dies die häufigste Fehlerursache für jeden Schutz. Da man bei einer Schutzprüfung immer das richtige Verhältnis zwischen der Prüftiefe und den Ressourceneinsatz finden muss, sollte man dort in die Prüfung investieren, wo Fehler am wahrscheinlichsten auftreten. Daher empfehlen wir eine systembasierte Prüfung als festen Bestandteil der Prüfung von Sammelschienen.

II. SYSTEMBASIERTE PRÜFUNG

Eine einstellungsbasierte Prüfung überprüft die Stellglieder und Funktionen eines Relais entsprechend den gegebenen Einstellungen. Im Gegensatz dazu prüft eine systembasierte Prüfung, ob das Schutzsystem unter realen Netzbedingungen korrekt funktioniert. Anstelle der Prüfung einer

Kennlinie mit statischem Ausgang werden Fehler (oder andere Systembedingungen) mit einer Netzwerksimulation berechnet und direkt ausgegeben. Auf diese Weise wird geprüft, ob das Schutzsystem mit seiner Logik und seinen Einstellungen tatsächlich in dem Netzwerk, für das es entwickelt wurde, so funktioniert wie geplant. Darüber hinaus werden wir in den folgenden Abschnitten sehen, dass eine systembasierte Prüfung viel Zeit bei der Vorbereitung, Durchführung und letztlich auch der Fehlerbehebung spart.

Aufgrund der Vielzahl möglicher Sammelschientopologien ist fast jeder Aufbau eines Sammelschienen-schutzsystems einmalig. Deshalb gibt es keine Standardprüfung für das Trennerabbild und andere Logiken. Für einen korrekten Betrieb muss der Sammelschienen-schutz die Topologie und Trennerpositionen für alle Felder, Längstrenner und Kuppelungen kennen, die im Betriebs auftreten. Ein Prüfsystem muss also das gesamte Sammelschienen-netzwerk mit allen binären Informationen der Trennerzustände, sowie unterschiedlichen Feldströme einheitlich nachbilden. „Einheitlich“ bedeutet, dass die Analogwerte plausibel sind. So sollte beispielsweise ein Strom nur dann gemessen werden, wenn alle Trenner im jeweiligen Strompfad geschlossen sind. Anderenfalls verhindern Funktionen wie die Überwachung der Messung, die Überwachung von Trenner und Schalter-versagerfunktionen, dass der Schutz wie unter realen Bedingungen funktioniert, und die Prüfung schlägt fehl.

Idealerweise wird Strom in alle Felder gleichzeitig eingespeist. Je nach Menge der Felder und den verfügbaren Prüfgeräten ist dies allerdings nicht immer möglich. Es können jedoch bereits zwei sechsphasige Prüfgeräte in drei Einspeisefelder und ein Kupplungsfeld einspeisen und so nahezu alle wichtigen Prüffälle durchführen. Nachdem alle Einspeisefelder die Prüfung erfolgreich bestanden haben, können die Prüfgeräte an die nächsten Abzweiggeräte angeschlossen werden. Je nach Ausführung der Anlage können Abzweiggeräte bei einem dezentralen Schutz mehrere Meter voneinander entfernt liegen. Hieraus ergeben sich die wesentlichen Merkmale eines Prüfsystems:

- Simulation der Trennerzustände
- Berechnung aller Ströme des Prüfgeräts für jeden Prüfschritt und jeden Zustand in der Prüfsequenz
- Steuerung mehrerer zeitsynchronisierter Prüfgeräte

Wo keine systembasierte Prüflösung zur Verfügung steht, wird häufig eine Kalkulationstabelle herangezogen. Jede Zeile oder jeder Prüfschritt hat mehrere Spalten, in denen Trennerzustände und Feldströme definiert sind. Bei der Ausführung werden die Trennerpositionen durch Überbrückung der Binärkontakte an den Abzweiggeräten oder mit einer individuellen Schalttafel entsprechend der aktuellen Zeile reproduziert. Bei mehreren Prüfgeräten werden die Ströme auf eine oder mehrere Sequenzer-Dateien übertragen. Die Erstellung und Einrichtung einer solchen Kalkulationstabelle kann sehr zeitaufwendig sein. Der Aufwand wächst mit der Anzahl der Felder einer Sammelschiene. Hinzu kommt das eher nicht technische Problem, dass solche Tabellen schwer verständlich sind. In der Regel werden sie von einem Prüfingenieur vorbereitet, der ein reales Szenario in eine Kalkulation

onstabelle überträgt. Wenn der Techniker vor Ort eine andere Person ist und versucht, die Prüfschrittreihe nachzuvollziehen, wandelt er die Kalkulationstabelle in ein reales Szenario in seinem Kopf um. Dieses kontinuierliche Mindmapping ist ineffizient und eine potenzielle Fehlerquelle.

Ein systembasiertes Prüfwerkzeug kann eine Komplettlösung für dieses Problem darstellen. Zur Nachbildung des Netzwerks bearbeitet man mit einem Single-Line-Editor die Sammelschienentopologie mit den Stromwandlerverhältnissen und idealerweise den Kurzschlussströmen der Speiseleitungen. Die Definition eines Prüfschritts kann jetzt innerhalb des Single-Line-Editors durchgeführt werden.

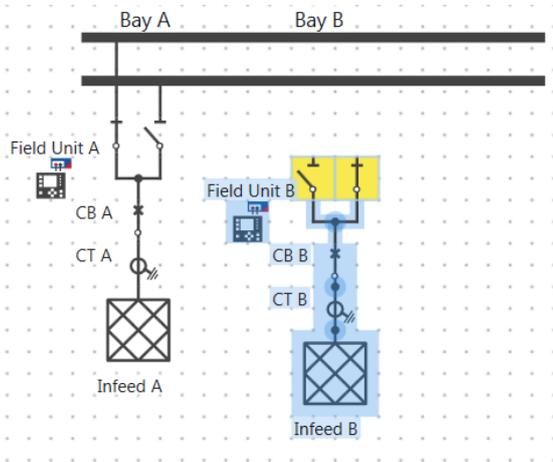


ABB. 3: SINGLE-LINE-EDITOR

A. Simulation von Trennerpositionen

Innerhalb eines Prüffalls können die Trennschalter direkt im Editor bedient werden. Auf diese Weise wird die korrekte Stromaufteilung des Netzwerks simuliert. Darüber hinaus kann eine systembasierte Prüflösung die Doppelbitposition des Trenners auf die Binärausgänge des Prüfgeräts abbilden. Vor der Ausführung eines Prüfschritts stellt die Software alle Binärausgänge des Prüfgeräts entsprechend der festgelegten Trennerposition ein. Auf diese Weise kann die Prüfung vollständig automatisiert werden, ohne dass der Trennerkontakt vor jedem Prüfschritt manuell überbrückt werden muss: Fehlerquellen werden reduziert und die Effizienz wird erhöht. Wenn die Prüflösung alle Trenner simulieren soll, werden viele Ausgänge benötigt. Hierfür können manche Prüfgeräte zu einem Bruchteil der Kosten für ein zusätzliches Prüfgerät problemlos mit Binärausgängen erweitert werden.

B. Berechnung des Stroms

Die Berechnung des Stroms erfolgt nahezu mühelos und konstant und das unabhängig von der Komplexität der Topologie. Durch Änderung des Lastflusses, einer Platzierung von Fehlern und Hinzufügen von Schalterereignissen, jeweils in der Software, berechnet die Netzwerksimulation die Strombeispiele für alle beteiligten Stromwandler in einem Durchgang.

C. Gleichzeitiges Arbeiten mit mehreren Prüfgeräten

Die Stromsignale werden nach der Berechnung auf ein oder mehrere Prüfgeräte übertragen. Im Anschluss legt die Software die Startzeit für die Ausführung fest. Alle Prüfgeräte sind zeitsynchronisiert und starten deshalb die Ausführung zur selben Zeit. Nach der Ausführung senden die Prüfgeräte die gemessenen Binäreignisse an die Software zurück, wo sie ausgewertet werden können. Alle Schritte können mit einer einzigen Software gesteuert werden und beginnen mit einem Klick auf die Start-Schaltfläche. Die Koordination der Geräte durch den Benutzer oder ein getrenntes Prüfdokument pro Prüfgerät entfallen.

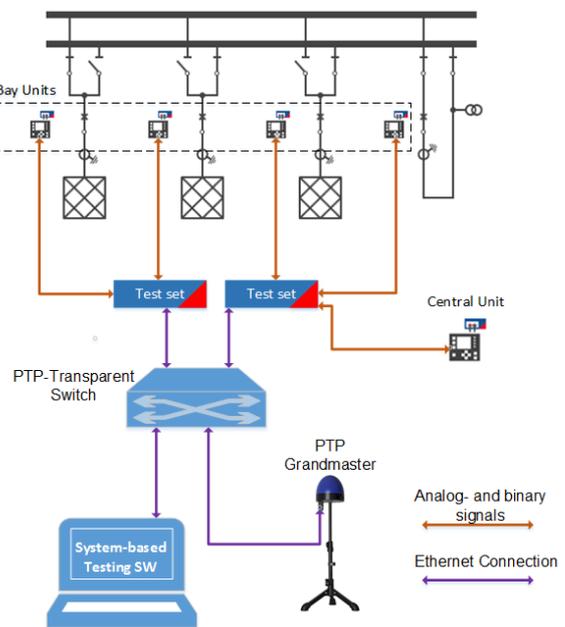


ABB. 4: PRÜFAUFBAU FÜR EINE SYSTEMBASIERTE SAMMELSCHIENENSCHUTZPRÜFUNG

Beim Arbeiten mit mehreren Prüfgeräten ist eine Zeitsynchronisation notwendig. Jedes Zeitglied in der Ausführung führt zu einer Phasenverschiebung zwischen den Strömen der Prüfgeräte, die letztlich auch unter normalem Lastfluss ein Auslösen des Differenzialglieds zur Folge haben kann. Wenn man den Aufbau mit einer GPS-Antenne für jedes einzelne Prüfgerät vermeiden möchte, können die Prüfgeräte an ein PTP-fähiges Ethernet-Netzwerk angeschlossen werden. Dann ist nur eine Referenz-PTP-Master-Zeitquelle erforderlich, die an einen speziellen Schalter (Transparent Clock) angeschlossen ist. Von dort wird die Zeit an alle Prüfgeräte übermittelt. Gleichzeitig kann dieses Netzwerk zur Kommunikation zwischen der systembasierten Prüfsoftware und den Prüfgeräten verwendet werden.

D. Prüfung von komplexen logischen Abläufen

In vielen Prüfschritten ist es wichtig, auf die Schutzbefehle zu reagieren. Wenn ein Auslösebefehl gesendet wird, muss sich der Schalter im simulierten Netzwerk öffnen und der simulierte Stromfluss muss beendet werden. Auch hier muss die Simulation konsistent sein, andernfalls würde ein Leistungsschalterversagen angenommen und Logiken, die

nach dem ersten Auslösen aktiv werden, könnten nicht mehr ausgeführt werden. Die Fähigkeit einer Simulation, auf einen Befehl des zu prüfenden Systems zu reagieren, wird in der Regel als Echtzeit-Closed-Loop bezeichnet. Allerdings sind Systeme mit Echtzeit-Simulation nur für das Labor geeignet. Sie setzen Expertenwissen und hohe Investitionen voraus, während Prüfgeräte dezentral sein können. Eine geeignete Alternative zur Echtzeit-Simulation ist die Verwendung eines iterativen Closed-Loop-Algorithmus. Bei Anwendung dieses Algorithmus auf eine Simulation mit einem Sammelschienenfehler, wird die erste Iteration ohne Leistungsschalterbefehle eingespeist. Dennoch reagiert der Schutz auf den Fehler mit einem Ausschaltbefehl, der in der Prüfsoftware aufgezeichnet wird. Da wir annehmen, dass das Relais mit der gleichen Auslösezeit bei gleicher Stromwellenform wie

bei der vorherigen Einspeisung reagiert, speisen wir von Anfang an die gleiche Stromwellenform ein, gefolgt von einem LS-Ausschaltereignis kurz nach der erwarteten Auslösung. Wenn ein weiterer Ausschalt- oder Schließbefehl gesendet wird, der nicht Teil der vorherigen Simulationen war, wird eine dritte Iteration mit zwei LS-Ereignissen ausgeführt. Dieser Algorithmus läuft weiter, bis kein neuer unbekannter Ausschalt- oder Schließbefehl durch den Schutz gesendet wird. Die letzte Iteration erzielt dann ein ähnliches Ergebnis wie ein Echtzeitsimulator. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Einfachheit der Prüfung der Logik. Nach der Platzierung von Fehlern übernimmt der iterative Closed-Loop. Abb. 5 zeigt ein Beispiel mit zwei Iterationen.

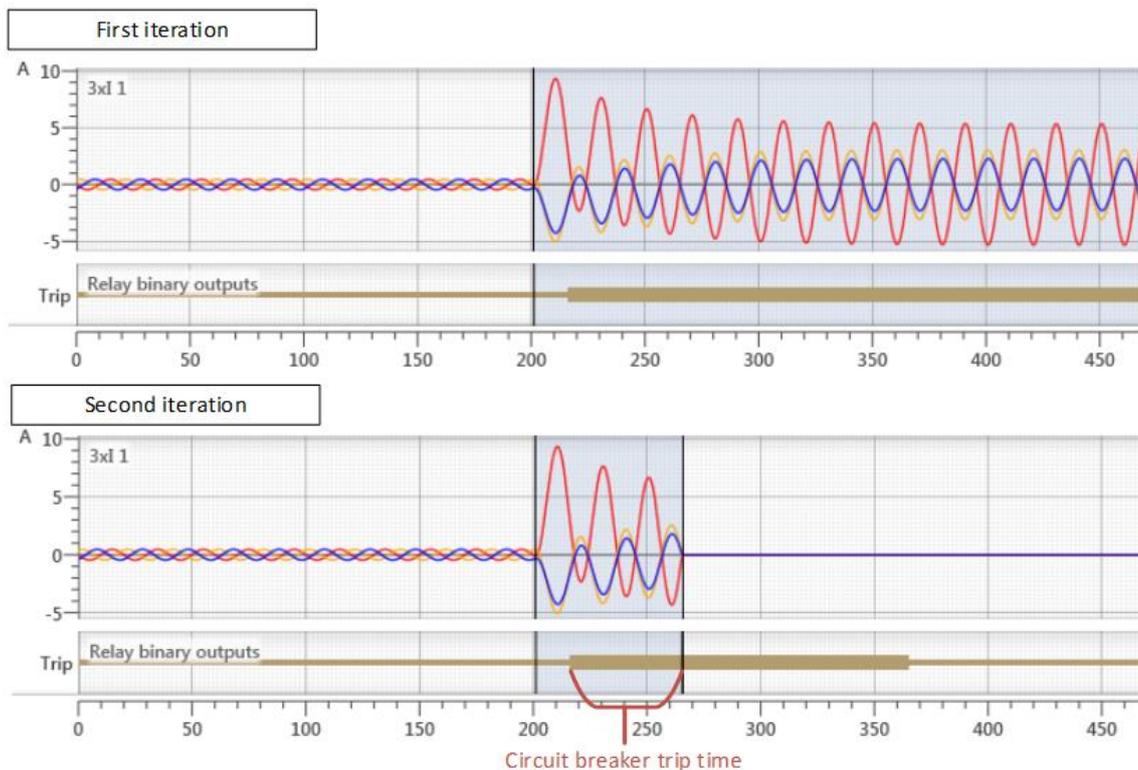


ABB. 5: BEISPIEL EINER ITERATIVE CLOSED-LOOP-SEQUENZ

III. ERFAHRUNGEN AUS DER PRAXIS

In den letzten Jahren haben wir viele Erkenntnisse beim Prüfen von Sammelschienenschutz mit einer speziellen systembasierten Prüflösung gewonnen. Entsprechende Details finden Sie unter [4] und [5]. In diesem Artikel wollten wir die Bedeutung einer systembasierten Prüfung hervorheben. Aus diesem Grund haben wir einige Fehler zusammengefasst, die bei mehreren Vor-Ort- und Werksprüfungen ge-

funden wurden. In den meisten Fällen wurde der systembasierte Ansatz zum ersten Mal vom Prüfeningenieur oder Techniker angewendet. Deshalb war der Schutz oftmals bereits mit einigen bewährten Prüfwerkzeugen und -verfahren geprüft worden. Man kann also sagen, dass die meisten Fehler ohne das systembasierte Prüfwerkzeug nicht gefunden worden wären. Rückblickend lassen sich alle hier beschriebenen

Fehler auch mit traditionellen Prüfwerkzeugen ermitteln. Allerdings haben wir die Erfahrung gemacht, dass die Einfachheit einer speziell angepassten systembasierten Prüflösung die Qualität positiv beeinflusst. Wenn das Erstellen und Ausführen eines Prüffalls so einfach wie das Ziehen eines Fehlers und das Klicken auf die Start-Schaltfläche ist, führen Prüfer mehr Prüfungen mit größerer Prüftiefe durch.

A. Fehler in der toten Zone

Für eine 100%ige Trennschärfe in Kupplungsfeldern werden in der Regel zwei Stromwandler auf jeder Seite des LS eingebaut, sodass sich die selektiven Zonen der Sammelschiene überlappen. Oft wird jedoch aus wirtschaftlichen Gründen mit nur einem Stromwandler gearbeitet, wodurch zwischen dem Stromwandler und dem Leistungsschalter eine sogenannte tote Zone entsteht. Moderner Sammelschienenschutz hat eine spezielle Logik zur Ermittlung von Fehlern in der toten Zone, indem die Zustandsbits des Leistungsschalters im Kupplungsfeld gemessen werden. Für die Inbetriebnahme eines Sammelschienenschutzes für eine Topologie mit Doppelsammelschiene wurde ein Prüffall definiert, der bestätigen sollte, dass ein Fehler in der toten Zone bei offenem Leistungsschalter nur zu einer Auslösung in Schnellzeit von Sammelschiene B führt. (Bei geschlossenem Leistungsschalter würde Sammelschiene A gefolgt von Sammelschiene B ausgeschaltet.) Innerhalb der Prüfung löste der Schutz unselektiv aus. Der Verdrahtungsfehler wurde in den Einstellungen des Sammelschienenschutzes behoben.

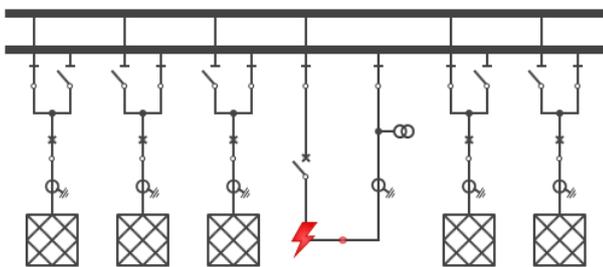


ABB. 6: FEHLER IN DER TOTEN ZONE

B. Zwei Feldgeräte im Kupplungsfeld

Der folgende Fehler wurde in einem dezentralen Sammelschienenschutz für eine Topologie mit Doppelsammelschiene mit zusätzlicher Umgehungschiene gefunden. Aufgrund der begrenzten Eingänge des ersten Abzweigergäts wurde das zweite Abzweiggerät im Kupplungsfeld installiert. Während der Inbetriebnahme schlugen die Prüffälle mit Fehlern in der toten Zone zunächst fehl. Aufgrund der Konfiguration hätten beide Abzweiggeräte LS-Zustandsbits liefern müssen. Es war aber nur ein Abzweiggerät mit den LS-Statuskontakten verdrahtet. Dieser Fehler wurde behoben, indem die LS-Statuskontakte auch mit dem zweiten Gerät verdrahtet wurden.

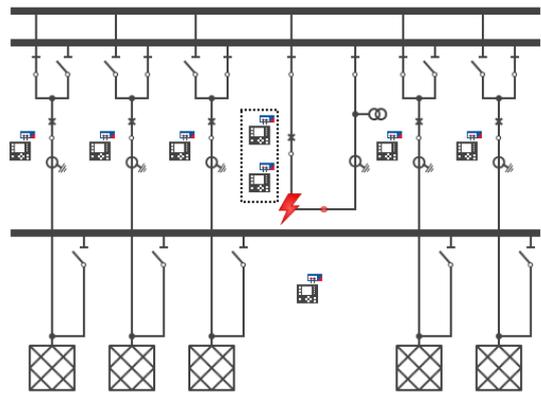


ABB. 7: ZWEI ABZWEIGGERÄTE IM KUPPLUNGSFELD

C. Unerwünschte Abschaltung bei LSV-Befehl

Der folgende Fehler wurde während der Validierung eines Schutzkonzeptes im Prüflabor festgestellt. Das zu prüfende System umfasste einen niederohmigen Sammelschienenschutz und die jeweiligen Abzweigschutzrelais. Im Prüffall wurde ein Fehler außerhalb der Differenzialzone simuliert. Auch wenn dieser Fehler durch den Abzweigschutz behoben werden sollte, startet der Sammelschienenschutz bei Ansprechen des Abzweigschutzes sofort einen internen LSV-Timer. Da die systembasierte Prüfung auch die LS-Ausschaltverzögerung simulieren kann, wurde festgestellt, dass die Einstellung des LSV-Timers keine ausreichende Sicherheitsreserve hatte, was zu einer unselektiven Abschaltung der Sammelschiene führen könnte.

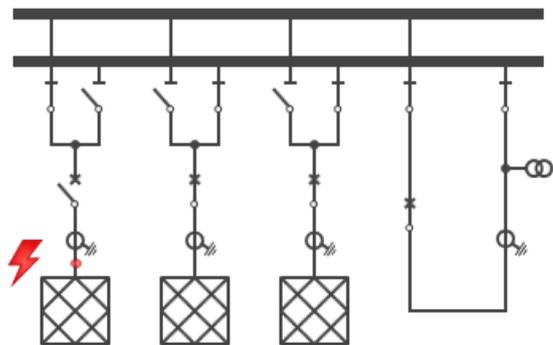


ABB. 8: AUSSEN LIEGENDER FEHLER

D. Falsch verdrahteter Neutralleiter-Eingang

Der folgende Fehler wurde in einem Sammelschienenschutz für eine Doppelsammelschiene in einem verteilten Netz festgestellt. Das Netz wurde mit niederohmiger Erdung betrieben, was jedoch zu kleinen Strömen für einphasige Erdfehler führte. Im Standard-Differenzialglied würde ein so kleiner Fehlerstrom bei vollem Laststrom überstabilisiert werden. Das Versorgungsunternehmen hat dieses Problem gelöst, indem es einen Sammelschienenschutz mit Stabilisierungskennlinie für den Strom im Neutralleiter (I_N) wählte. I_N wurde über einen separaten Stromeingang, der an eine Holmgreen-Schaltung angeschlossen war, gemessen. Ein

systembasierter Prüffall zeigte, dass die externen einphasigen Erdschlüsse eine unselektive Abschaltung der Sammelschiene verursachten. Ursache hierfür war die falsche Polarität des Stromeingangs I_N . Eine frühere, nicht systembasierte Prüfung hatte diesen Fehler nicht aufgedeckt, da nur jedes Feld mit einer einzigen Stromeinspeisung geprüft worden war.

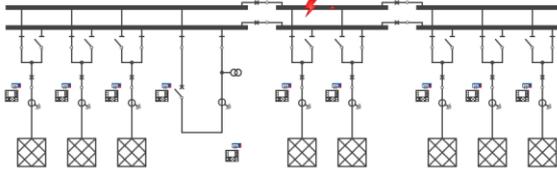


ABB. 9: SAMMELSCHIENENFEHLER IM MITTELTEIL

IV. FAZIT

Die vor Ort gefundenen Fehler zeigten, dass die Systemprüfung für die Verifizierung der korrekten Funktionsweise eines modernen Sammelschienenschutzes unerlässlich ist. Eine spezielle systembasierte Prüflösung vereinfacht die Durchführung solcher Prüfungen erheblich.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Ziegler, Numerical Differential Protection: Principles and Applications, Erlangen: Publicis Publishing, 2012.
- [2] Siemens, SIPROTEC 7ss52x Manual, Siemens, 2004.
- [3] Protection System Misoperations Task Force, „Misoperations Report“, North American Electric Reliability Corporation (NERC), Atlanta, 2013.
- [4] C. Pritchard und T. Hensler, „Test and verification of a busbar protection using a simulation-based iterative closed-loop approach in the field“, in *Australian Protection Symposium*, Sydney, 2014.
- [5] F. Fink, J. Köppel und T. Hensler, „Effective commissioning of busbar protection systems using a dynamic simulation in the field“, in *Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, Birmingham, 2016.

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 160 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, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.