Neue Kommunikation für den Differenzialschutz

Autor(en): **Bächli, R. / Kranich, M. / Häusler, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **107 (2016)**

Heft 10

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857212

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Neue Kommunikation für den Differenzialschutz

Sichere Schutzsignalübertragung über paketvermitteltes WAN

Als Schutz von Mensch und Infrastruktur leistet der Differenzialschutz eine wichtige Funktion. Er muss entsprechend zuverlässig sein. Konventionelle Kommunikationsnetzwerke auf der Basis bewährter Zeitmultiplexverfahren wie PDH und SDH bieten dies heute. Zunehmend steigt aber der Druck auf Stromversorger, neue Paketvermittlungstechnologien wie MPLS einzusetzen. Dass auch sie die hohen Anforderungen erfüllen können, wenn eine spezifische Circuit Emulation eingesetzt wird, hat nun ein Feldtest gezeigt.

R. Bächli, M. Kranich, M. Häusler, M. Graf, U. Hunn

Die heutige hohe Verfügbarkeit der Stromnetze wird durch verschiedene Applikationen gewährleistet. Diese beruhen auf Echtzeitdaten und Statusinformationen, welche es erlauben, im Störungsfall schnell und zuverlässig die nötigen Massnahmen einzuleiten. Je nachdem wie kritisch eine Anwendung ist, werden ganz unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikationskanäle gestellt. Wichtige Schlüsselparameter sind: Bandbreite, Latenzzeit sowie die Stabilität in Bezug auf die Symmetrie und Latenzzeitvariationen (Jitter und Wander) der Kommunikationskanäle. Bei kritischen Anwendungen müssen diese Parameter im Sub-Millisekunden-Bereich gewährleistet sein.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass in vielen Anlagen bereits diverse Schutz- und Steuergeräte vorhanden sind. Diese Geräte werden aufgrund des langen Lebenszyklus und der Komplexität eines möglichen Ersatzes mit entsprechenden Betriebsausfällen noch viele Jahre in Betrieb bleiben. In der Regel haben diese Geräte traditionelle Kommunikationsschnittstellen wie RS-232, IEEE C37.94 oder 2/4-Wire E&M (Bild 1). Die rauen Umgebungsbedingungen in Unterstationen setzen eine hohe EMV-Störfestigkeit sowie einen erweiterten Temperaturbereich der Kommunikationsgeräte voraus. Bewegliche Teile (Lüfter) sind wenn möglich zu vermeiden, da diese die Lebensdauer reduzieren.

Operationelle Kommunikationsnetzwerke auf der Basis bewährter TDM-Technologien (time division multiplex) wie PDH und SDH haben über Jahre hinweg bewiesen, dass sie diese Anforderungen zuverlässig erfüllen. Durch den Technologiewandel in den öffentlichen Kommunikationsnetzwerken, mit deutlich anderen Bedürfnissen und Eigenschaften in Bezug auf die Dienste, wird auch der Druck auf die Stromversorger erhöht, zunehmend neue Paketvermittlungstechnologien wie MPLS einzusetzen.

ABB hat Lösungen entwickelt, welche diese Technologiemigration in Zukunft erlauben werden. Zusammen mit Axpo wurden Feldtests mit einer neuen Circuit Emulation (CE) Lösung durchgeführt, die spezifisch entwickelt wurde, um Differenzialschutzsignale über ein paketvermitteltes Netz zu übertragen. Die Lösung ist angelehnt an IEC 61850-90-1 [2] und garantiert die relevanten Qualitätsparameter des Kommunikationskanals gemäss den sehr strikten Anforderungen der Schutzapplikation.

Die Feldtests wurden sowohl im normalen Betrieb, d.h. der Übertragung einer Mischung aus kritischen und unkritischen Daten, als auch unter Stressbedingungen, insbesondere bei Linküberlastung, starken Latenzzeitschwankungen oder asymmetrischen Kommunikationskanälen, und Pfadumschaltungen, durchgeführt.

Differenzialschutz-Anforderungen

Der Differenzialschutz stellt harte Anforderungen an den Kommunikationskanal. Dieser muss nicht nur eine geringe Latenzzeit aufweisen, sondern auch über streng deterministische Charaktereigenschaften verfügen (sehr geringe Latenzzeitvariation sowie eine weitgehend symmetrische Verbindung). Das Prinzip des Differenzialschutzes beruht auf dem Vergleich simultaner (synchronisierter) Strommesswerte beider Leitungsenden.

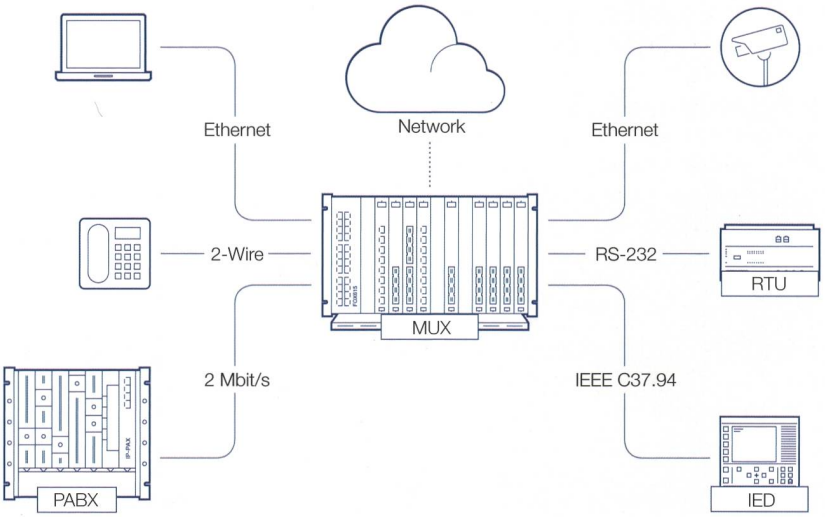

Bild 1 Typische Anwendungen und entsprechende Schnittstellen in elektrischen Unterwerken.

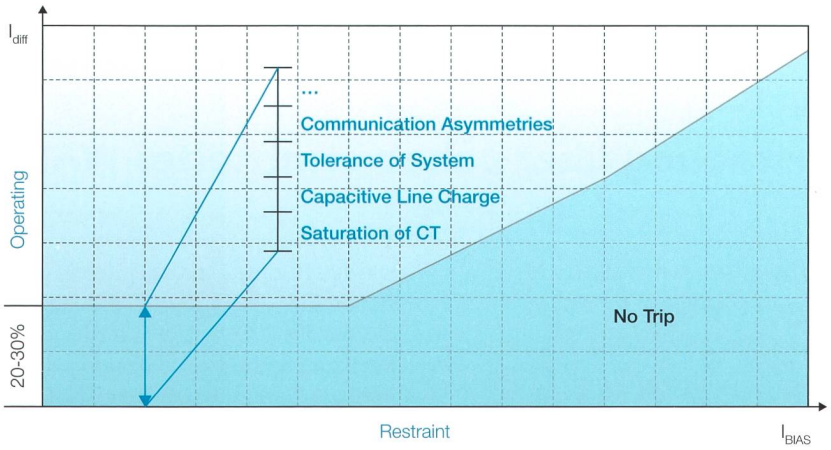

Bild 2 Auslösecharakteristik des Differenzialschutzrelais.

Nichtdeterministische Kommunikationskanäle beeinflussen direkt die Qualität des Differenzialschutzes, indem sie zum Beispiel einen virtuellen Fehlerstrom imitieren und somit im Extremfall zur ungewollten Auslösung des Leistungsschalters führen. **Bild 2** zeigt die typische Auslösecharakteristik eines Stromdifferenzial-Schutzrelais. Der «No-Trip»-Bereich schützt vor ungewollter Auslösung aufgrund von Fehlern und Toleranzen der verschiedenen Systemkomponenten. Dazu zählen z.B. nicht deterministische Kommunikationskanäle. Deshalb verlangt Cigré [1], dass ein Kommunikationskanal für Differenzialschutz eine maximale Asymmetrie von < 0,1 ms aufweist. Der Effekt von Asymmetrie soll an einem Beispiel dargestellt werden: 0,4 ms Kanal-Asymmetrie entspricht einem Phasenwinkelfehler von 3,6° oder 6,3 % Fehlerstrom in einem 50-Hz-System. Dieser Fehler geht zulasten der Selektivität des Schutzrelais. Asymmetriefehler treten beispielsweise bei den Pfad-Umschaltungen in redundanten Systemen auf. Diese Probleme können mittels GPS-Zeitstempel der zu übertragenden Messwerte oder durch den Einsatz von separaten Fasern zwischen den Differenzialschutzrelais umgangen werden. Beide Optionen sind in Bezug auf Verfügbarkeit, Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten nicht optimal.

Schutzsignal-Übertragung über WAN-Paketvermittlung

Während TDM inhärente Quality of Service (QoS) bietet, können dies paketvermittelte Netzwerke (PSN) nicht. Wie erwähnt, werden PSN für operationelle Netze der Stromversorger evaluiert. Um ein korrektes Funktionieren kritischer Applikationen zu garantieren, d.h. um die Leistung und Charaktereigenschaften von traditionellen TDM-Netzwerken zu erreichen oder zu übertreffen, müssen in solchen Netzen besondere Vorkehrungen getroffen werden, besonders weil heute fast alle Schutzsignale über traditionelle TDM-Schnittstellen verbunden sind (z.B. IEEE C37.94 oder X.21). Um solche Daten über ein PSN übertragen zu können, müssen die TDM-Daten am Eingangspunkt in Pakete verpackt und am Ausgangspunkt wieder in einen kontinuierlichen Datenstrom umgewandelt werden. Die erforderliche Technologie heisst Circuit Emulation (CE) und ist absolut entscheidend für das korrekte Funktionieren der kritischen Applikationen. Es gibt verschiedene Ausprägungen von CE, welche nun genauer angeschaut werden.

Standard Circuit Emulation

Zwei gängige Methoden für Circuit Emulation sind SAToP und CESoPSN. Beide Lösungen folgen dem ITU-T G.8261 Standard und können bei Langzeitbetrieb die maximalen Asymmetriewerte nicht garantieren, denn sie leiten die Taktfrequenz ohne Paketsynchronisierung aus dem eingehenden Paketstrom mittels adaptiven Zeitmesskreisen ab.

Bild 3 zeigt eine Messung des langfristigen Zeitintervallfehlers (TIE, Time Interval Error) des akkumulierten Jitter & Wander. Die fehlende Phasenanpassung ist gut zu erkennen. Normale Anwendungen im kommerziellen Telekommunikationsumfeld tolerieren dieses Verhalten, weshalb die üblichen CE-Verfahren so ausgelegt worden sind. Moderne Switches ermöglichen dem SDH vergleichbare Frequenzstabilität mittels Synchronem Ethernet (Sync-E). Die Stärken dieser Technologie liegen in der Implementierung auf der physikalischen Schicht. Deshalb unterliegt sie keiner Beeinträch-

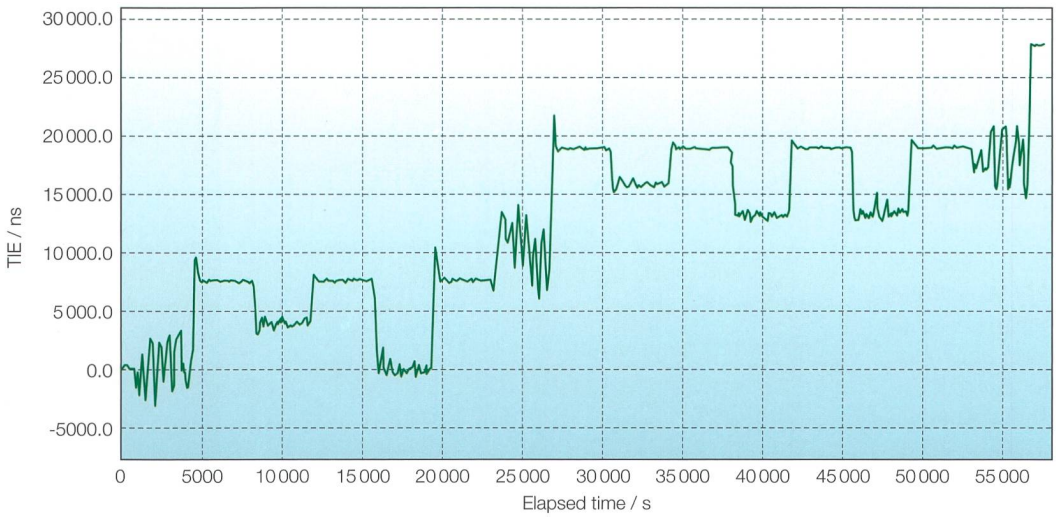

Bild 3 Akkumulation der langfristigen Verzögerung des Jitterbuffers je nach Verkehrsmuster.

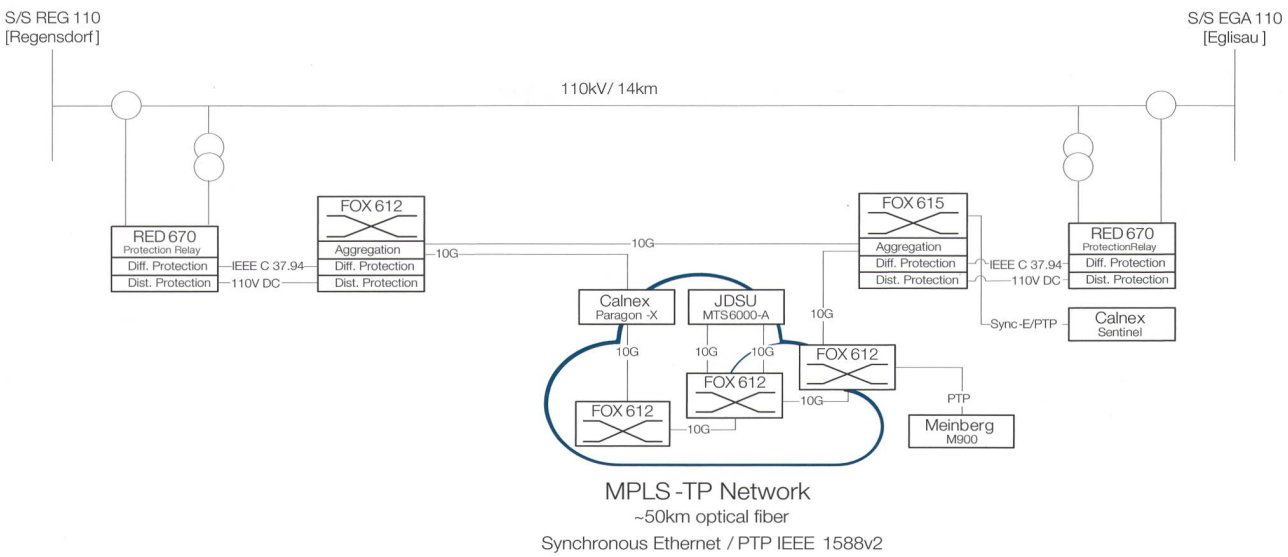

Bild 4 Layout des Feldtests bei Axpo.

tigung durch den Nutzdatenverkehr. Zudem ist die Lösung linkbasierter Natur und verfügt über eine gute Holdover-Stabilität bei topologischen Veränderungen. Der Nachteil ist, dass keine Phaseninformationen zur Verfügung stehen. Dies kann zu Phasensprüngen nach Umschaltung der Quelle oder Signalstörungen führen.

Diese Lösung ist für den Differenzialschutz nicht zweckmässig, da akkumulierter Jitter & Wander sowie Phasensprünge für die Applikation kritische Werte erreichen können.

Spezifische CE für Schutzsignal-Übertragung über PSN

Da die sehr strikten Anforderungen von Schutzapplikationen von einer Standard-CE nicht garantiert werden können, hat ABB eine spezifische CE-Lösung für Schutzapplikationen entwickelt. Diese benutzt unter anderem eine weitere standardisierte Technologie (IEEE 1588v2) zur Verteilung der Frequenz- und/oder Phaseninformationen in einem Netzwerk mit einer Genauigkeit im Sub-Mikrosekunden-Bereich. Das Protokoll bedarf einer teilweisen Hardwareunterstützung. Das erlaubt eine hohe Genauigkeit der Zeitinformation, aber es verlangt einen bidirektionalen Austausch von Synchronisierungspaketen und die Verarbeitung von Zeitnachrichten durch die CPU. Der Nachteil ist, dass der Phase-Learning-Algorithmus und das erneute Lernen nach dem Umschalten der Quelle aufgrund der begrenzten Anzahl Zeittakte (z.B. 1 pro Sekunde) mehrere Minuten dauern kann.

Die spezifische CE-Lösung unterstützt verschiedene traditionelle Zubringer-Schnittstellen (z.B. IEEE C37.94 oder X.21), die für jede Art von Schutzrelaistyp verwendet werden können. Während die erwähnte Standard-CE-Methode die benötigte Kommunikationskanalqualität nicht garantieren kann, bietet die hier vorgestellte Lösung, welche in der OPIC2-Karte als Teil vom FOX615/612 implementiert ist, eine (Re-)Phasensynchronisierung des CE-Jitterbuffers mit Hilfe eines hybriden Sync-E/PTP-Betriebs. Dies ermöglicht einen garantierten, streng deterministischen Kommunikationskanal für kritische Differenzialschutzanwendungen.

Eine Paketduplizierung der Datenströme erlaubt den störungsfreien Betrieb mittels redundanter Kommunikationspfade. Das garantiert eine hohe Kanalverfügbarkeit, die für die Differenzialschutzapplikation erforderlich ist.

Präsentation der Feldtests

Der Feldtest wurde im Netz des Versorgers Axpo implementiert und besteht aus fünf hybriden TDM/PSN-Multiplexerplattformen des Typs FOX615/612, die über das Axpo-Glasfasernetzwerk verbunden wurden (Bild 4).

Die Ethernet-Bandbreite der einzelnen Links beträgt 10 Gbit/s. Als Netzwerktechnologie wurde MPLS-TP eingesetzt, die bidirektionale Pfade ohne aufwendige Programmierung zur Verfügung stellt. Sowohl Sync-E als auch PTP werden von einem Grandmaster-Gerät eingespiesen und werden im Netz verteilt. PTP wird über eine Kette von Boundary Clocks verteilt und funktioniert zusammen mit Sync-E im Hybrid-Modus. Die Redundanz der Datenkanäle und der Synchronisierung ist durch die Ringstruktur des Netzwerks gegeben.

Die authentifizierte phasensynchronisierte CE-Implementierung für den Differenzialschutz bietet eine sichere, bidirektionale Punkt-zu-Punkt-Verbindung über MPLS-TP. Dem Dienst wurde die höchste Priorität zugewiesen, ohne dass Systemprotokolle und Systemstabilität beein-

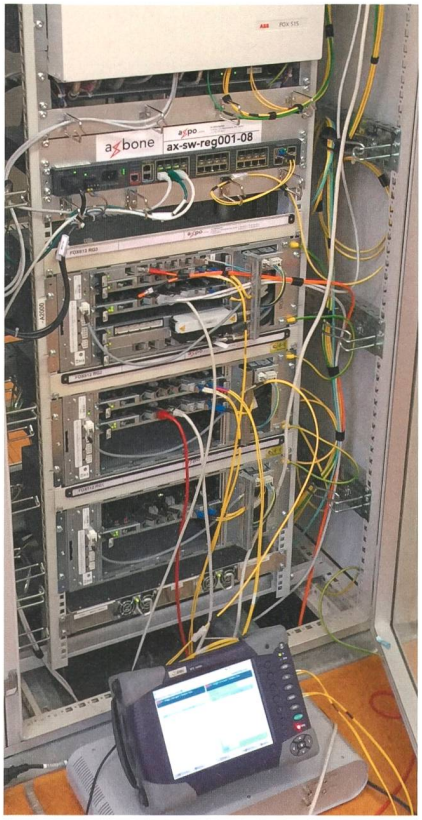

Bild 5 Feldinstallation in Regensdorf.

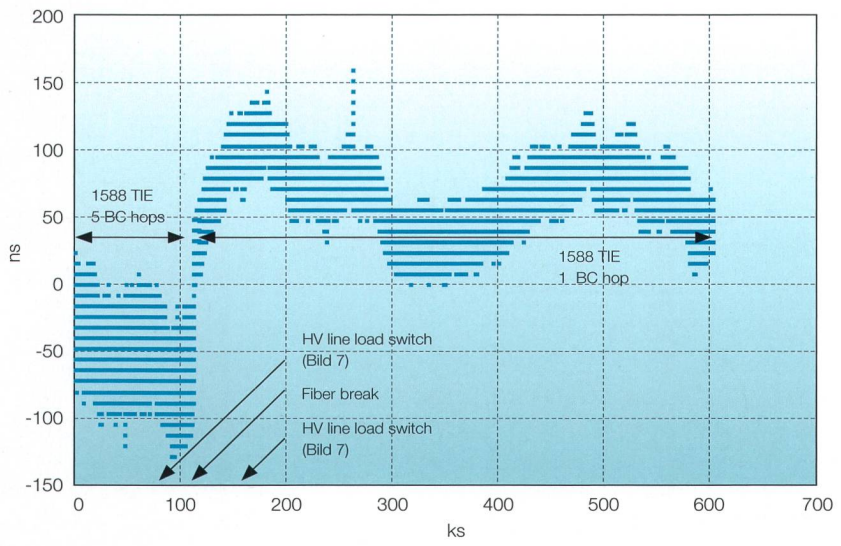

Bild 6 Gemessene TIE (y-Achse) Stabilität des Netzwerks (max. CE-Asymmetrie) im Verhältnis zur Zeit (x-Achse).

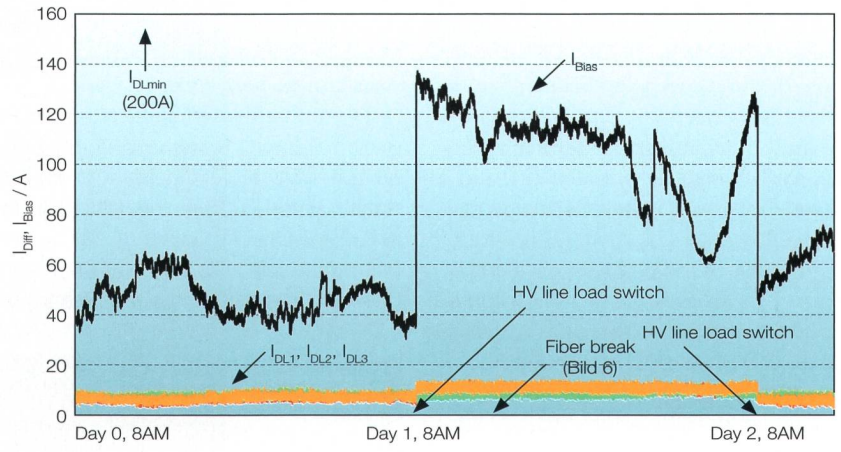

Bild 7 Differenzialströme des Schutzrelais I_{dL1}, I_{dL2}, I_{dL3} und I_{Bias} über die Zeit.

Bilder: ABB

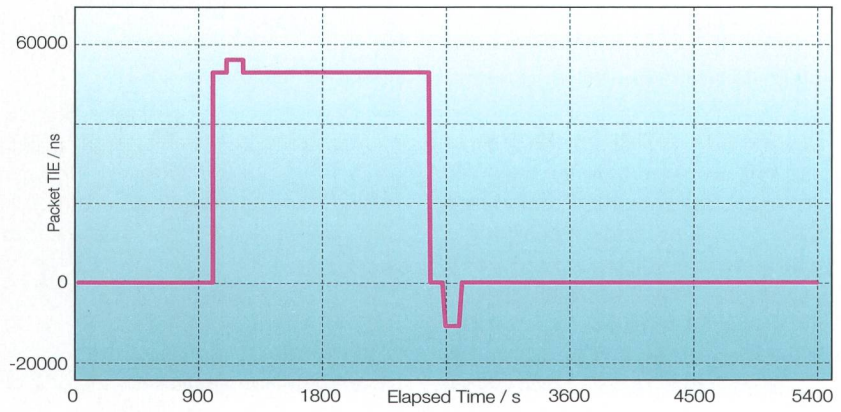

Bild 8 Messung eines unidirektionalen Verzögerungssprungs des PTP-Stroms und die Wiederherstellung (53 µs) Kanalunterdrückungsschwelle.

trächtigt sind. Die CE-Puffergrösse ist auf 6 ms ausgelegt, was gewöhnlich eine stabile Funktionalität bei angemessener Leistung des Differenzialschutzes gewährleistet. Das CE-Timing ist mit der Frequenz und der Phaseninformation gekoppelt, um die benötigten deterministischen Kommunikationskanäle zu gewährleisten. Das Leitungsdifferenzialschutzrelais bezieht die Synchronisierung direkt vom C37.94-Signal.

Das Ziel des Feldtests besteht darin, die kritischen Anforderungen des Schutzstandards zu erreichen oder zu übertreffen, und zwar nicht nur unter normalen, sondern auch unter Stress- und Fehlerbedingungen.

Anforderungen des Differenzialschutzes:

- Systemphasenstabilität im Sub-Mikrosekunden-Bereich bei stabilem Betrieb
- Asymmetrie des Kanals < 0,1 ms unter allen Bedingungen
- Absolute Kanalverzögerung < 10 ms

Ergebnisse der Feldtests

Um die Langzeitstabilität aus Kommunikationsperspektive zu prüfen, wurden TIE-Messungen ausgeführt. Diese Messungen geben die Ungenauigkeit von Sync-E und PTP über fünf Synchronisierungsknoten gegenüber GPS wieder. Die Genauigkeit wird durch die Genauigkeit des GPS limitiert, was in diesem Fall ausreicht. Die Synchronisierungskette ist stabil und reguliert um die Referenz-ToD des Grandmasters herum. In **Bild 6** ist auch ein Stresstest mit erzwungenem Faserbruch abgebildet. Deutlich ersichtlich ist die Differenz zu den anderen CE-Technologien (vgl. dazu **Bild 3** mit **Bild 6**). Über den gesamten Beobachtungszeitraum von sieben Monaten wurde eine Systemstabilität von unter 1 µs erreicht. Der Wert liegt unter allen Netzwerklimits oder Standardisierungsmasken. Die Anforderung der Langzeitphasenstabilität im Sub-Mikrosekunden-Bereich wurde somit erfüllt.

Die Phasenstabilität des CE-Endpunkts hat einen direkten Bezug zur Asymmetrie des Kommunikationskanals für die Differenzialschutzapplikation. Somit wurde die Zielvorgabe der maximalen Pfadasymmetrie zwischen den beiden Endpunkten (FOX615/612 mit OPIC2 C37.94-Schnittstellen) von weniger als 0,1 ms problemlos erreicht.

Parallel dazu wird der vom Relais gemessene Differenzialstrom aufgezeichnet. Den grössten Beitrag zu den gemessenen Differenzialströmen liefert üblicherweise die kapazitive Leitungsimpedanz. **Bild 7** zeigt die gemessenen Differenzialstromwerte. Eine Akkumulation- oder Variation von Asymmetrie des Kommunikationskanals würde sich als Variation von I_{Diff}. zeigen.

Die mittels Differenzialrelais (Echo-Timing) ausgeführten Messungen der End-zu-End-Verzögerung zeigen, dass die

absolute Verzögerung des Kommunikationskanals inkl. Differenzialschutzrelais-Schnittstelle die Anforderung von < 10 ms erfüllt, denn sie lag zwischen 6,301 und 6,306 ms bei einer Bandbreite von 1,248 Mbit/s.

Während des gesamten Zeitraums wurde kein Dienstverlust registriert. Die Auslesung des Event- und Fehlerrecorders im Schutzrelais zeigten im gesamten Beobachtungszeitraum keine Auslösungen an.

Betrieb unter Stress- und Fehlerbedingungen

In einem zweiten Schritt wurden Netzwerkfehler und Überlast forciert und somit die Störfestigkeit überprüft. Ausgewertet wurde der Differenzialschutzkanal, weil er sehr empfindlich gegenüber Fehlerbedingungen ist. Die folgenden Stress- und Fehlerszenarios wurden forciert.

Auswirkungen des Faserbruchs

Ein Faserbruch führt zur Pfadumschaltung, mit und ohne Überlastung der Verbindung. Die implementierte Paketduplizierung in OPIC2 garantierte bei allen Faserbruchtests eine ungestörte Pfadumschaltung und einen kontinuierlichen Betrieb.

Auswirkungen durch Verkehrsüberlastung

Die Belastung zeigte keine Auswirkungen auf Sync-E und vernachlässigbare Auswirkungen für PTP. Keine der angewandten Belastungen hatte eine Auswirkung auf den Differenzialschutz. Durch die Priorisierung der hohen Daten dieses kritischen Dienstes war ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet.

Kanal- und PTP-Asymmetrie

Schwer zu bewältigende Situationen entstehen bei einer Asymmetrie der CE- und PTP-Datenströme. Diese wurde während den Tests künstlich forciert. Solange nur die CE-Ströme beeinträchtigt wurden, z.B. aufgrund einer asymmetrischen Belastung oder Pfadumschaltung und die Phasenstabilität erhalten blieb, kompensierte der Jitterbuffer die entstandenen Verzögerungen (bis zu 6 ms). Das Schutzrelais setzte den normalen Betrieb fort. Bei mehr als 6 ms Verzögerung wurde der Dienst unterdrückt. Auf dem Schutzrelais wurde ein Alarmanzeigesignal (AIS) angezeigt, bis der Kommunikationskanal wieder verfügbar war. Das Schutzrelais war während dieser Zeit im Fallback-Betrieb; d.h. im Distanzschutz-Betrieb.

Im Falle von Asymmetrie der PTP-Datenströme oder Phasensprünge (z.B. aufgrund der Wiederherstellung des GPS-Signals nach einem Antennenfehler) garantiert ein Schwellenwert in der FOX615-Lösung, dass die Asymmetrie unter 0,1 ms liegt. So führte der in **Bild 8** gezeigte Phasensprung zu einem kontrollierten Unterbruch des Dienstes und anschliessender Resynchronisation. Somit sind die Applikationsanforderungen erfüllt und eine Fehlauslösung des Schutzrelais ist nicht möglich. Der kontinuierliche Betrieb des Kanals unterhalb des Schwellenwerts ist garantiert. Oberhalb des Schwellenwerts wurde der Dienst unterdrückt, bis die Phasenverschiebung/-asymmetrie durch das PTP-Protokoll eliminiert worden war.

Eine durch eine Phasenverschiebung oder eine asymmetrische Kanalverzögerung verursachte, ungewollte Auslösungsbedingung trat nie ein. Sofern die Leistung des Kommunikationsnetzwerks im Rahmen der erwarteten Variationen blieb, war auch unter schwierigsten Bedingungen der kontinuierliche Betrieb gewährleistet. Wenn die Werte die konfigurierten Schwellen überstiegen (z.B. Asymmetrie oder Latenz > Jitterbuffergrösse), wurde das System in einen sicheren Zustand versetzt. Dies führte zu einer kontrollierten Unterbrechung des Dienstes. In allen Fällen stellte sich das System selbst wieder her.

Schlussfolgerung

Die Feldtests, die im Kommunikationsnetz von Axpo durchgeführt wurden, bestätigen die Tauglichkeit der ABB-Lösung für kritische Applikationen wie Differenzialschutz. Im Gegensatz zu Standard-CE-Lösungen können nicht nur Latenzzeiten, sondern auch maximale Asymmetrie, Jitter- und Wander/Driftwerte garantiert werden.

Die vorgestellte Lösung erlaubt nicht nur die Migration von kritischen Schutzapplikationen von traditionellen TDM-Netzwerken auf zukünftige paketvermittelte Netze, sondern kann zudem die Leistungsfähigkeit von Schutzapplikationen verbessern. Dies geschieht durch garantierte Kommunikationskanalqualität oder höchste Verfügbarkeit durch die eingebauten Redundanzfunktionalitäten.

Nach Abschluss aller Stresstests in den Stationen bestätigte Axpo, dass der neue Ansatz für den Differenzialschutz über PSN eine vielversprechende Lösung ist und ein attraktives Migrationsszenario für das Kommunikationsnetzwerk darstellt.

Referenzen

[1] Cigré Technical Brochure 192, Protection using Telecommunications, August 2001.
[2] IEC TR 61850-90-1: Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations 2010-3.

Autoren

Ramon Bächli ist Product Manager Fibre Optic Multiplexer bei ABB.
ABB Schweiz AG, 5401 Baden, ramon.baechli@ch.abb.com

Mathias Kranich leitet das Product Management für Kommunikationslösungen bei ABB.
mathias.kranich@ch.abb.com

Martin Häusler ist System Engineer Telecommunication Networks bei ABB.
martin.haeusler@ch.abb.com

Markus Graf ist Leiter Asset & Projekte bei Axpo Power AG.
Axpo Power AG, 5401 Baden, markus.graf@axpo.com

Urs Hunn ist Projektleiter Telecom bei Axpo Power AG.
urs.hunn@axpo.com

Résumé

Nouvelle communication pour la protection différentielle

Transfert sécurisé de signaux de sécurité par un réseau WAN à commutation de paquets

La protection différentielle remplit une fonction importante pour la protection des personnes et des appareils. Elle se doit par conséquent d'être fiable. Les réseaux de communication conventionnels basés sur les procédés éprouvés de multiplexage temporel comme PDH et SDH proposent aujourd'hui cette fiabilité. Toutefois, la pression exercée sur les fournisseurs d'électricité pour l'utilisation des nouvelles technologies de commutation de paquets telles que MPLS augmente. Des essais in situ ont désormais démontré qu'elles aussi sont en mesure de satisfaire aux hautes exigences. Pour ce faire, une émulation de circuit (CE) spécifique a été utilisée.

Les essais in situ réalisés sur le réseau de communication d'Axpo confirment également l'aptitude de la solution d'ABB pour des applications critiques telles que la protection différentielle. Contrairement aux solutions standard d'émulation de circuit, cette solution permet non seulement de garantir une latence mais également une asymétrie, une gigue et un dérapage limités.

La solution présentée permet non seulement la migration d'applications de protection critiques des réseaux TDM traditionnels aux futurs réseaux à commutation de paquets, mais peut même améliorer la performance des applications de protection. No