

Protección por Comparación Direccional de Líneas Cortas de 115 kV con Canal de Comunicación por Radio

Martín R. Monjarás Méndez
División de Distribución Bajío, CFE
Guanajuato, GTO, México

Alfredo Dionicio Barrón
División de Distribución Bajío, CFE
Querétaro, QRO, México

J. Ignacio Muñoz González
Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V.
León, GTO, México

Héctor J. Altuve Ferrer
Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V.
Monterrey, N.L., México

Resumen: Este artículo analiza la aplicación de un esquema de protección para líneas cortas de 115 kV, con relevadores de protección direccional de sobrecorriente (67) y lógica de teleprotección POTT, que utiliza un canal de comunicación por radio. La necesidad de utilizar estos esquemas de protección se presenta en líneas cortas que forman parte de anillos de subtransmisión de 115 kV, en que no se dispone de fibra óptica u otro medio de comunicación adecuado para aplicar una protección diferencial de línea. En el artículo se presentan los criterios de aplicación y ajuste de los elementos y funciones de protección, y se hace un análisis de operación para fallas reales internas y externas a la línea protegida.

Palabras clave: Relevadores de protección, protección de líneas, teleprotección, canal de comunicaciones, oscilogramas.

I. INTRODUCCIÓN

La especificación de la Comisión Federal de Electricidad de México (CFE) referente a esquemas aplicables para protección de líneas, indica que para líneas cortas (longitud menor que 10 km) en voltajes de 161 kV y menores, la protección primaria debe ser diferencial de línea (87L) y la protección de respaldo debe ser direccional de sobrecorriente de tierra (67N).

Cuando entran en servicio nuevas subestaciones en ciudades o áreas densamente pobladas con anillos de 115 kV, la longitud de algunas líneas de interconexión generalmente se hace menor que 10 km. En la mayoría de los casos, debido a la rapidez del crecimiento de la demanda, no es posible dotar con fibra óptica y 87L a las líneas que se acortan, lo que hace difícil la protección de la línea. Esta protección típicamente se brinda por medio de relevadores de distancia (21) como protección primaria, con un relevador direccional de sobrecorriente de tierra (67N) como protección de respaldo.

En esta situación, en vista de la reducida longitud de la línea, es necesario acortar los alcances de la primera zona de los relevadores de distancia o, en casos extremos, dejarla bloqueada. Ambas opciones conducen a la pérdida de la operación en alta velocidad (menos de tres ciclos) de las protecciones de la línea. Esto pone en riesgo la integridad de los componentes del sistema de subtransmisión, y compromete la coordinación de protecciones entre las líneas del anillo de subtransmisión y los transformadores de las subestaciones de transmisión (230/115 kV).

El esquema apropiado para la protección de líneas en esta situación debe tener las siguientes características:

- Operación en alta velocidad (menos de tres ciclos) para fallas en cualquier punto de la línea.
- Canal de comunicaciones (no necesariamente por medio de fibra óptica).
- Lógica de teleprotección (preferentemente POTT con detectores de sobrecorriente de secuencia negativa para mejor cobertura de fallas con resistencia de arco).

La solución alternativa a la aplicación de protección diferencial de línea debe contemplar, en lo posible, utilizar los relevadores convencionales para protección de líneas (21/67N) que se tienen en operación, aumentando sus funciones por medio de programación, y añadir un mínimo de componentes externos.

En este trabajo se propone una solución al problema de protección de líneas cortas de 115 kV utilizando un esquema de comparación direccional con lógica POTT y un canal de comunicación por radio.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un caso real de aplicación de esta solución es en el anillo de 115 kV de Querétaro. El diagrama unifilar parcial, antes de la conexión de la subestación Satélite entre las subestaciones Querétaro (QRO) y Querétaro Poniente (QPE), se muestra en la Fig. 1.

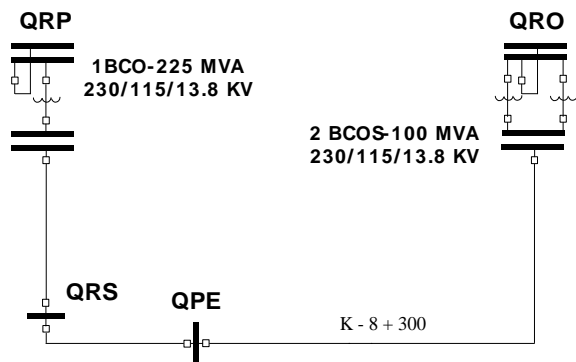


Fig. 1. Diagrama unifilar parcial antes de la conexión de la subestación Satélite.

Inicialmente, la longitud de la línea entre las subestaciones QRO y QPE era de 8.3 km, por lo que, según lo especificado por CFE, sería necesario tener una protección diferencial; en la práctica se ha observado que para esta longitud de línea se tiene una coordinación confiable con relevadores de distancia y de sobrecorriente direccional, aún cuando ocurran fallas con resistencia de arco. Las protecciones que estaban habilitadas en ambos extremos de la línea QRO-QPE, eran las siguientes:

- Protección primaria: Relevadores de distancia (21).
- Protección de respaldo: Relevadores direccionales de sobrecorriente (67).

Debido a que el crecimiento de la demanda fue mayor que lo esperado, se decidió construir la subestación Satélite (SAT), que se conectó entre las subestaciones QRO y QPE, con un banco de transformación de 30 MVA, 115/13.8 kV. En la Fig. 2 se muestra la ubicación de la subestación SAT dentro del enlace de QPE-QRO.

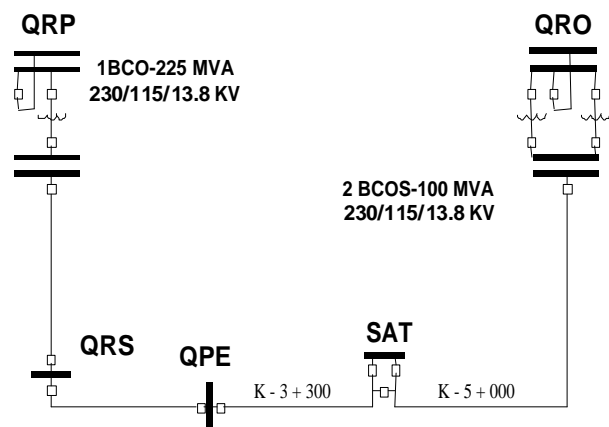


Fig. 2. Diagrama unifilar parcial mostrando la inserción de la subestación Satélite (SAT).

Al entrar en servicio la subestación Satélite, la línea entre las subestaciones Querétaro Poniente (QPE) y Satélite (SAT) quedó con una longitud de 3.3 km, dificultando el ajuste y coordinación de las protecciones existentes, principalmente para fallas a tierra con alta resistencia de arco.

III. SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución contemplada inicialmente fue la instalación de fibra óptica y relevadores de protección diferencial, pero esto implicaba un costo elevado y el reemplazo de los esquemas existentes de protección de línea (21 y 67). Se observó que los relevadores 67 instalados en esta línea tienen una función programable que permite transmitir y recibir estados de elementos internos del relevador para aplicar funciones de protección y control a través de un enlace de comunicación por radio, fibra óptica u otros medios.

La solución propuesta contempló:

- Utilizar los relevadores de protección de línea existentes y activar varios elementos direccionales de sobrecorriente de fase, de secuencia negativa y de secuencia cero en los relevadores 67 como detectores para las funciones de disparo permisivo.
- Habilitar la lógica de teleprotección POTT integrada en los relevadores 67.
- Agregar radios para proporcionar el enlace de comunicación.
- Ajustar los puertos de los relevadores al protocolo de comunicación de elementos internos para poder utilizar los radios conectados directamente al puerto RS-232 de cada relevador.

Al aplicar estos cambios, la protección primaria de la línea es brindada por los relevadores direccionales de sobrecorriente en esquema POTT con radios, y la protección de respaldo queda a cargo de los relevadores de distancia.

En lo relativo a componentes, para implementar esta solución solamente fue necesario añadir dos radios, cable coaxial y antenas.

Los criterios de ajuste de los elementos direccionales de sobrecorriente para utilizar la lógica de teleprotección POTT disponible en los relevadores 67 son los siguientes:

- Nivel 1: Bloqueo, por ser una línea muy corta.
- Nivel 2: Detección de fallas hacia adelante entre fases y de fase a tierra (sensibilidad para sobrealcantar el bus remoto). Función de disparo permisivo y generación de un disparo local si no es recibida o no está activada la señal de bloqueo.
- Nivel 3: Detección de fallas hacia atrás entre fases y de fase a tierra (sensibilidad mayor que la del Nivel 2 del otro extremo). Transmite la señal de bloqueo al otro extremo de la línea.

- Nivel 4: Detección de fallas hacia adelante entre fases y de fase a tierra (igual alcance que el Nivel 2). Función de disparo temporizado a 18 ciclos, usada como respaldo remoto y/o cuando el canal está fuera de servicio.

Una de las ventajas de esta protección es que no se bloquea por pérdida del canal; solo queda fuera el disparo por comparación direccional, quedando habilitados el Nivel 4 temporizado a 18 ciclos y las funciones de sobrecorriente de tiempo inverso; se conserva la direccionalidad de las funciones de protección.

En la Fig. 3 se muestran de manera gráfica los alcances de los elementos direccionales de sobrecorriente.

Para utilizar la lógica de teleprotección [1,2] se utilizaron los elementos internos 1 y 2 (MB1A y MB2A) de los relevadores 67, de la forma siguiente:

- MB1A: Envío (TX) / recepción (RX) de disparo permisivo.
 - TMB1A: Envío de disparo permisivo.
 - RMB1A: Recepción de disparo permisivo.
- MB2A: Envío (TX) / recepción (RX) de bloqueo de disparo.
 - TMB2A: Envío de bloqueo de disparo.
 - RMB2A: Recepción de bloqueo de disparo.

Los elementos internos MB4A no intervienen en la lógica de teleprotección; solamente se utilizan para fines de información en los registros:

- MB4A: Envío (TX) / recepción (RX) de estados de interruptores local y remoto.
 - TMB4A: Envío de estado de interruptor local.
 - RMB4A: Recepción de estado de interruptor remoto.

Otros elementos que intervienen en los registros de falla:

- ROKA: Elemento que indica que el enlace de comunicación está trabajando en forma correcta.
- TRIP: Salida de disparo local.
- 67G2: Elemento direccional de sobrecorriente de secuencia cero para fallas hacia adelante (activa la transmisión del MB1A).

- 67G3: Elemento direccional de sobrecorriente de secuencia cero para fallas hacia atrás (activa la transmisión del MB2A).
- 67Q2: Elemento direccional de sobrecorriente de secuencia negativa para fallas hacia adelante (activa la transmisión del MB1A).
- 67Q3: Elemento direccional de sobrecorriente de secuencia negativa para fallas hacia atrás (activa la transmisión del MB2A).

IV. PRUEBAS AL SISTEMA DE PROTECCIÓN

A. Medición del Tiempo del Canal

La medición del tiempo del canal se realizó activando la transmisión del elemento interno MB1A en la subestación Satélite (SAT) y haciendo un puente entre la recepción y la transmisión del mismo elemento en la subestación Querétaro Poniente (QPE). El tiempo medido entre la transmisión y la recepción del elemento MB1A en la subestación Satélite es igual a dos veces el tiempo del canal en un solo sentido de comunicación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

=>>SER 4

SAT-73110-QPE

Date: 09/29/00

Time: 01:46:38.630

351-MB-RADIO-POTT-GPO1

FID=SEL-351-1-R205-V0-Z001001-D19990827

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
4	09/29/00	01:46:29.475	TMB1A	Asserted
3	09/29/00	01:46:29.479	TMB1A	Deasserted
2	09/29/00	01:46:29.504	RMB1A	Asserted
1	09/29/00	01:46:29.512	RMB1A	Deasserted

Con los registros de transmisión y recepción del elemento MB1A del esquema de la subestación Satélite, se determina el tiempo total del lazo, que fue de 29 ms. Este tiempo se divide entre dos, para obtener el tiempo de canal de comunicaciones en una sola dirección (igual a 14.5 ms).

B. Operación para una Falla Interna

Para evaluar el comportamiento de los relevadores en esta aplicación, a continuación se analizan oscilogramas de dos fallas reales, una interna y otra externa. Se muestran los registros de los relevadores en ambos extremos de la línea.

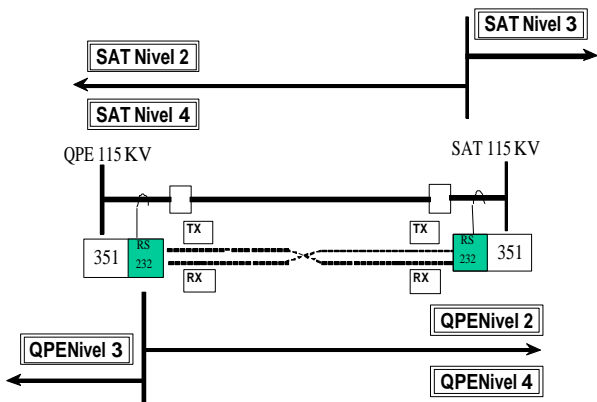


Fig. 3. Alcances de los elementos direccionales de sobrecorriente.

La falla interna ocurrió el 31 de octubre de 2001 en la línea SAT-73110-QPE (apartarrayo dañado en la fase B, a la salida de la subestación QPE), con una aportación de 3,950 A por el lado de QPE y de 5,517 A por el lado de SAT (ver Fig. 4).

En la Fig. 5 se muestra el oscilograma obtenido por el relevador de la Subestación QPE. Su análisis permite concluir lo siguiente:

- El inicio de la falla es en el ciclo 4.0 del registro.
- A los 4.0 ciclos se activan los elementos 67G2 (falla delante, secuencia cero) y TMB1A (transmisión de disparo permisivo).
- A los 4.5 ciclos se activa el elemento 67Q2 (falla delante, secuencia negativa).
- A los 5.5 ciclos se activa el elemento de recepción de disparo permisivo RMB1A y se completa la condición de disparo local TRIP, el cual se activa también a los 5.5 ciclos del registro.

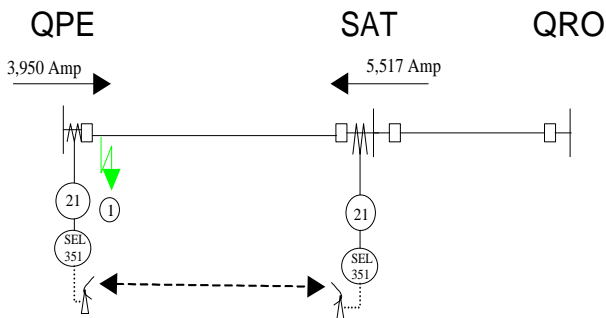


Fig. 4. Aportaciones para falla en la línea SAT-73110-QPE.

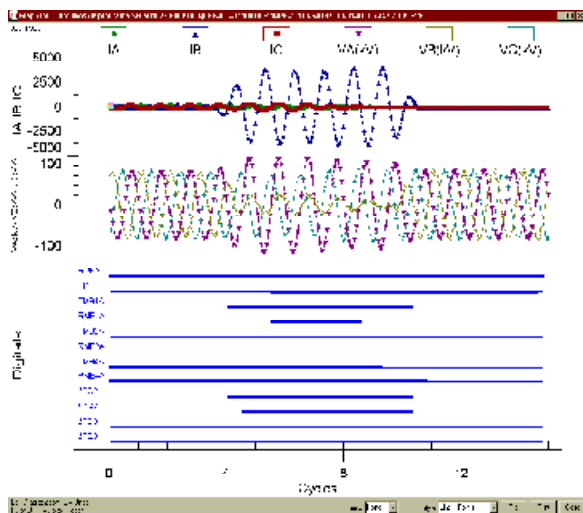


Fig. 5. Oscilograma del registro del relevador ubicado en la subestación QPE (falla interna).

- A los 9.25 ciclos el interruptor local señala “abierto”.
- A los 11.0 ciclos el estado del interruptor remoto señala “abierto”.
- Desde el inicio de la falla (4.0 ciclos) hasta la salida de disparo local (5.5 ciclos) transcurren 1.5 ciclos.

En la Fig. 6 se muestra el oscilograma del relevador ubicado en la subestación SAT para esta falla interna. Puede concluirse lo siguiente:

- El inicio de la falla es en el ciclo 4.0 del registro.
- A los 4.25 ciclos se activa el elemento 67Q2 (falla delante, secuencia negativa).
- A los 4.5 ciclos se activan los elementos 67G2 (falla delante, secuencia cero) y TMB1A (transmisión de disparo permisivo).
- A los 5.0 ciclos se activa el elemento de recepción de disparo permisivo RMB1A y se completa la condición de disparo local TRIP, el cual se activa también a los 5.0 ciclos del registro.
- A los 9.75 ciclos el interruptor local señala abierto.
- A los 10.25 ciclos el estado del interruptor remoto señala abierto.
- Desde el inicio de la falla (4.0 ciclos) hasta la salida de disparo local (5.0 ciclos) transcurre 1.0 ciclo.

En resumen, el esquema de protección operó correctamente para esta falla monofásica a tierra interna. El tiempo total de operación del esquema de protección de la línea para esta falla es de 1.5 ciclos (25 ms).

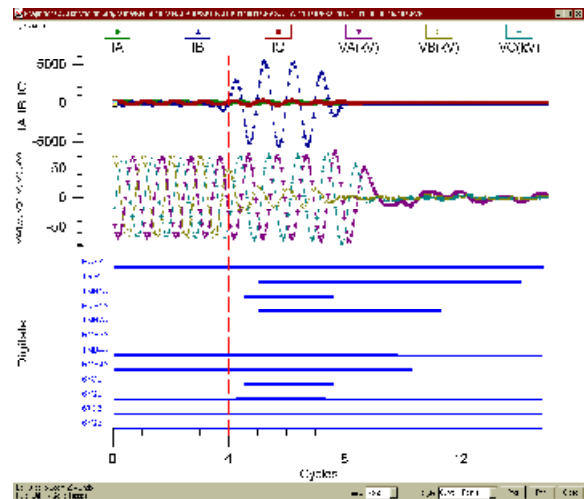


Fig. 6. Oscilograma del registro del relevador ubicado en la subestación SAT (falla interna).

C. Operación para una Falla Externa

La falla externa ocurrió el 2 de febrero de 2002 en la línea SAT-73540-QRO (daño en estructura por choque de vehículo), con una corriente de aportación de 2,419 A desde las subestaciones QPE y SAT (ver Fig. 7).

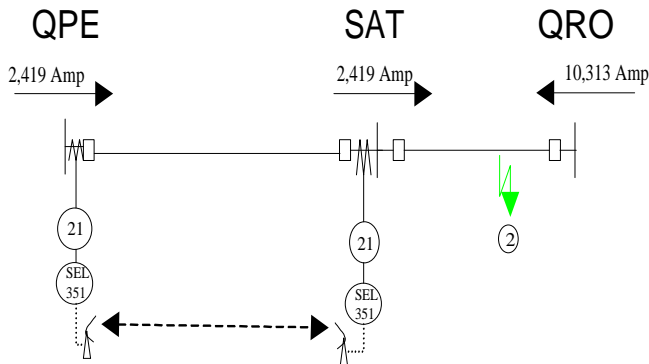


Fig. 7. Aportaciones para falla en la línea SAT-73540-QRO.

La Fig. 8 muestra el oscilograma registrado por el relevador de la Subestación QPE. Puede concluirse que:

- El inicio de la falla es en el ciclo 4.0 del registro.
- A los 4.25 ciclos se activan los elementos 67G2 (falla delante, secuencia cero) y TMB1A (transmisión de disparo permisivo).
- A los 4.75 ciclos se activa el elemento 67Q2 (falla delante, secuencia negativa).
- A los 5.0 ciclos se activa el elemento de recepción de bloqueo de disparo permisivo RMB2A y debido a esto no se completa la condición de disparo local TRIP, el cual no se activa durante el registro.
- El estado de ambos interruptores de línea indica “cerrado” durante todo el registro.

En la Fig. 9 se presenta el oscilograma del relevador de la subestación SAT. Puede concluirse que:

- El inicio de falla es en el ciclo 4.0 del registro.

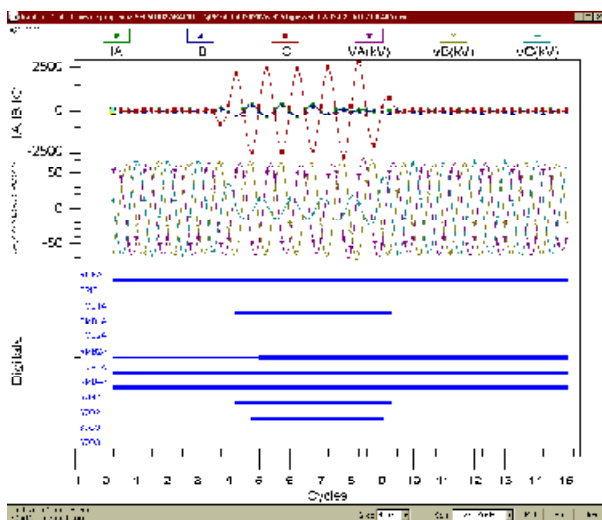


Fig. 8. Oscilograma del registro del relevador ubicado en la subestación QPE (falla externa).

- A los 4.0 ciclos se activan los elementos 67G3 (falla atrás, secuencia cero), 67Q3 (falla atrás, secuencia negativa) y TMB2A (transmisión de bloqueo de disparo permisivo).
- A los 5.25 ciclos se activa el elemento de recepción de disparo permisivo RMB1A, pero, dado que están activados los elementos direccionales de sobrecorriente locales orientados hacia atrás (67G3 y 67Q3), no se completa la condición de disparo local TRIP, el cual no se activa durante el registro.
- El estado de ambos interruptores de línea indica “cerrado” durante todo el registro.
- A los 9.75 ciclos se desactivan los elementos 67G3 (falla atrás, secuencia cero), 67Q3 (falla atrás, secuencia negativa); esto ocurre cuando desaparece la corriente de falla.

Nuevamente el esquema de protección funcionó correctamente, al no operar para esta falla externa.

V. COMPARACIÓN DE ESQUEMAS DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS

Como se indicó en la Sección III, para la protección de líneas cortas de 115 kV existen dos soluciones que garantizan alta velocidad de operación: protección diferencial de línea (87L) y protección piloto por comparación direccional. La protección diferencial de línea requiere un canal digital, preferentemente de fibra óptica. La protección por comparación direccional puede utilizarse con distintos tipos de canales de comunicación. La solución utilizada en este trabajo para la protección de líneas cortas de 115 kV es un esquema de comparación como canal de comunicación.

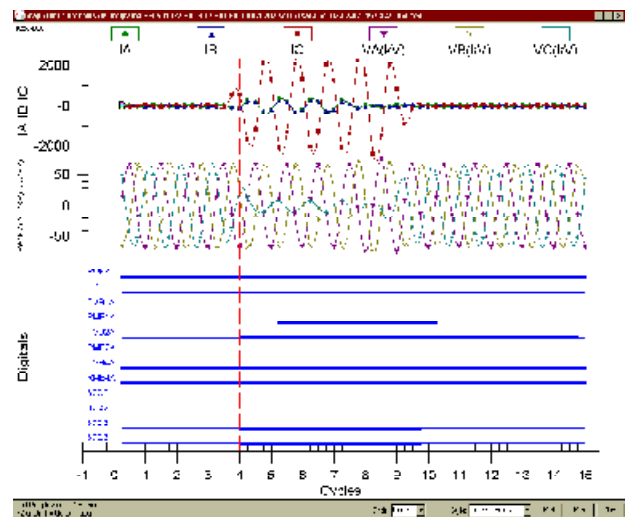


Fig. 9. Oscilograma del registro del relevador ubicado en la subestación SAT (falla externa).

La Tabla I presenta una comparación entre los canales de fibra óptica y de radio. La principal ventaja del enlace por radio es su economía, que permite aplicar esta solución a líneas de niveles bajos de voltaje. Es necesario garantizar la existencia de una línea de vista entre los extremos de la línea para la aplicación del enlace por radio.

En la Tabla II se presenta una comparación entre los esquemas de protección diferencial de línea con fibra óptica y de comparación direccional (POTT) con enlace por radio. Esta comparación ha sido restringida a aquellos aspectos que se consideran de interés para esta aplicación a líneas de 115 kV.

Puede observarse en la Tabla II que la principal ventaja de la protección diferencial de línea para esta aplicación es una mayor cobertura de resistencia de falla. La cuantificación de esta cobertura está fuera del alcance de este artículo.

El esquema de comparación direccional con enlace por radio representa una solución económica y confiable, que garantiza una alta velocidad de operación y un respaldo inherente para pérdidas del canal.

En la actualidad existe un relevador digital multifuncional que incluye funciones de protección diferencial de línea, protección piloto por comparación direccional y elementos de distancia y direccionales para funciones de respaldo. Un relevador de este tipo permite aplicar una solución escalable a la protección de líneas de 115 kV; los pasos pueden ser:

- Comenzar con un esquema de protección de distancia/direccional (21/67N) sin canal de comunicación.
- Añadir un enlace por radio cuando la línea lo requiera, y conformar un esquema piloto por comparación direccional, que incluye funciones de respaldo.
- Añadir un canal de fibra óptica e implementar la función de protección diferencial de línea. El enlace por radio puede quedar como un segundo canal de comunicación en el esquema, o puede ser trasladado a otra línea.

TABLA I
COMPARACIÓN DE CANALES DE COMUNICACIÓN

CONCEPTO	FIBRA ÓPTICA	RADIO
COSTO	\$ 350,000 USD (FIBRA ÓPTICA PARA 3.3 KM)	\$ 5,000 USD
RESTRICCIONES	SOLAMENTE COSTO	SE REQUIERE LÍNEA DE VISTA ENTRE EXTREMOS DE LA LÍNEA
ACCESORIOS	DISTRIBUIDOR ÓPTICO, MULTIPLEXOR	ANTENAS, CABLE COAXIAL, FUENTES DE ALIMENTACIÓN PARA RADIOS

TABLA II
COMPARACIÓN DE ESQUEMAS DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS

CONCEPTO	87L CON FIBRA ÓPTICA	POTT CON RADIO
TIEMPO TOTAL DE OPERACIÓN DEL ESQUEMA	25-29 mseg.	25-32 mseg.
ZONA DE PROTECCIÓN	PROTEGE SOLO LA LÍNEA	PROTEGE LA LÍNEA Y RESPALDA LÍNEAS ADYACENTES
COMPORTAMIENTO ANTE PÉRDIDA DEL CANAL DE COMUNICACIONES	SE BLOQUEA LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL (87L) Y OPCIONALMENTE SE HABILITA LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE	SE BLOQUEA LA FUNCIÓN DE TELEPROTECCIÓN, PERO QUEDA HABILITADA LA PROTECCIÓN DIRECCIONAL DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA
REQUIERE CAMBIOS MAYORES EN TABLERO	GENERALMENTE SÍ	NO
COBERTURA DE RESISTENCIA DE FALLA	MAYOR	MENOR

VI. CONCLUSIONES

- El esquema de protección a base de elementos direccionales de sobrecorriente utilizando un canal de comunicación por radio es una opción viable para aplicación en líneas cortas de 115 kV entre subestaciones con línea de vista, donde no se disponga de fibra óptica y/o esquemas de protección diferencial de línea.
- El tiempo total de operación de este esquema es solo ligeramente mayor que el que se obtiene con esquemas de protección diferencial de línea.
- Esta solución es fácil de implementar, ya que es posible utilizar relevadores de protección de distancia y direccionales de sobrecorriente existentes en la línea. Es necesario añadir solamente los radios y sus accesorios.
- Es recomendable utilizar elementos direccionales de sobrecorriente de secuencia negativa en el esquema de disparo permisivo para detección de fallas desbalanceadas con resistencia de arco.
- Un relevador multifuncional de protección de líneas que incluye protección diferencial, de comparación direccional y elementos de respaldo, permite aplicar una solución escalable. Esta protección puede comenzar a funcionar sin canal de comunicación, y ser completada posteriormente con canales de radio y, finalmente, de fibra óptica.

VII. REFERENCIAS

- [1] K. Behrendt, "Relay-To-Relay Digital Logic Communication For Line Protection, Monitoring and Control", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 1996.
- [2] K. Behrendt, "Applying the New SEL-321-1 Relay-To-Relay Logic Communication To a Permissive Overreaching Transfer Trip (POTT) Scheme", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. AG-9613, 1996.

VIII. BIOGRAFÍAS



Martín R. Monjarás Méndez se graduó de Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato en 1990. Ingresó a la División de Distribución Bajío de la CFE en el año 1991, donde ha desempeñado los siguientes cargos: Superintendente de Área de Distribución de 1991 a 1994 en la Zona San Juan del Río, QRO; Jefe de Oficina de Subestaciones, Líneas y Protecciones de 1994 a 1997 en la Zona San Juan del Río, QRO; desde 1997 ocupa el puesto de Jefe Ofna. Protecciones Divisional en Guanajuato, GTO.



Alfredo Dioncio Barrón se graduó de Ingeniero Industrial Eléctrico en el Tecnológico Regional de Querétaro en 1991; recibió un Diplomado en Sistemas de Potencia en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato en 1994. Ingresó a la División de Distribución Bajío de la CFE en el año 1991, donde ha desempeñado los siguientes cargos: Supervisor de Electrificación Rural de 1991 a 1992 en Guanajuato, GTO; Superintendente de Área de Distribución de 1992 a 1994 en la Zona Celaya, Regional San Miguel de Allende, GTO; desde 1994 ocupa el puesto de Jefe de Oficina de Protecciones en la Zona Querétaro, QRO.



Juan Ignacio Muñoz González se graduó de Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato en 1978. De 1981 a 1997 trabajó en CFE en Protección de Sistemas de Distribución y Transmisión. De 1997 a 2000 trabajó en INELAP-PQE como Ingeniero de Soporte Técnico. Desde el 2000 trabaja en Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V., donde actualmente ocupa el puesto de Director de Servicios Técnicos. De 1988 a 1997 trabajó también como profesor de asignatura en la Universidad Iberoamericana, Plantel León, Departamento de Ciencias de Ingeniería. Es miembro del IEEE.

Héctor Jorge Altuve Ferrer se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Central de Las Villas, Cuba, en 1969. Recibió el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Politécnico de Kiev, URSS, en 1981. De 1969 a 1993 trabajó como Profesor Titular en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Las Villas. De 1993 a 2001 fue Profesor Titular del Programa Doctoral de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Fue Profesor Visitante de Washington State University en el curso 1999-2000. Desde 2001 trabaja en Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V., donde actualmente ocupa el puesto de Director General. Su área de investigación es la protección, control y supervisión de sistemas eléctricos de potencia. Es Senior Member del IEEE.