



Propuesta para detección de fallas a tierra en sistemas fotovoltaicos para cumplimiento de la NOM-001-SEDE-2018

Melitón Ángeles Martínez

Prexaid S. de R. L. de C. V.

RESUMEN

Al incrementarse el aprovechamiento de la energía solar mediante los sistemas fotovoltaicos de las cuales se requiere cada vez mayor potencia de generación con lo cual también se hace necesario incrementar los niveles de tensión de estas centrales, al incrementarse los niveles de tensión también se incrementan las posibilidades de fallas, tanto entre positivo y negativo como fallas a tierra en estos sistemas. De acuerdo con el artículo 690-41 de la NOM-001-SEDE-2018 (proyecto), un arreglo FV de cd debe contar con un dispositivo contra fallas a tierra. La detección de fallas a tierra en sistemas de corriente alterna es muy común, no así en sistemas de corriente directa, por lo que en este trabajo se presenta un procedimiento para detectar este tipo de fallas. El arreglo propuesto permite controlar la magnitud de corriente de falla a tierra de forma tal que solo se requiera una señal de alarma para reportar estas fallas.

© 2024 Universidad Autónoma de Nuevo León. Todos los derechos reservados

Abreviaturas

A_{CD}	Amperes de corriente directa
ASA	American Standard Asociation
ca	Corriente alterna
cd	Corriente directa
SFV	Sistema fotovoltaico
NOM	Norma Oficial Mexicana
SEDE	Secretaría de Energía
51N	Protección de corriente de tiempo inverso de neutro
51NT	Protección de corriente de tiempo inverso de neutro de transformador
52	Interruptor
64FV	Detector de falla a tierra en sistema fotovoltaico
FV	Fotovoltaico
UV	Ultravioleta
ITM	Interruptor termomagnético
V_{CD}	Voltaje de corriente directa

1. Introducción

1.1. Detección de fallas a tierra en sistemas trifásicos de corriente alterna

En los sistemas de corriente alterna la detección de fallas a tierra se hace mediante relevadores de protección (51N) conectados a los devanados secundarios de transformadores de corriente que por su devanado primario circula la corriente de falla a tierra del sistema de potencia.

Para la detección de fallas a tierra en sistemas trifásicos de ca es muy importante que la fuente tenga una conexión estrella y además esté conectado a tierra sólidamente o a través de una impedancia cuando los valores de la corriente de falla sean muy elevados. La Fig. 1 muestra un diagrama con tres arreglos para la detección de estas fallas a tierra en ca para un sistema simple con una fuente y una sola carga. La Fig. 2 muestra la forma de detección de fallas a tierra cuando existen varios circuitos alimentados de una misma fuente.

Cuando la fuente trifásica no contiene una conexión con referencia a tierra se hace necesario agregar a la fuente trifásica un elemento que facilite la circulación y proporcione una ruta para la circulación de las corrientes de fallas a tierra como se muestra en la Fig. 3 y que consiste en un transformador con una conexión en zig-zag.

Aunque los sistemas de cd son menos complejos que los sistemas de ca, al requerir mayor potencia de generación en los SFV, se requiere incrementar el número de celdas conectadas en serie con lo cual se incrementa el nivel de tensión de generación en cd. Al incrementarse la tensión también se incrementan las posibilidades de fallas del sistema de cd, en este punto toma una gran relevancia la protección

Correo electrónico: mangeles@prexaid.com (Melitón Ángeles Martínez)

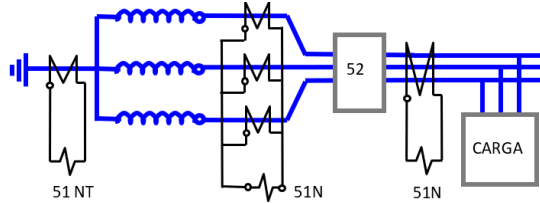


Fig. 1. En sistemas trifásicos de ca se pueden aplicar estos tres arreglos para la detección de fallas a tierra.

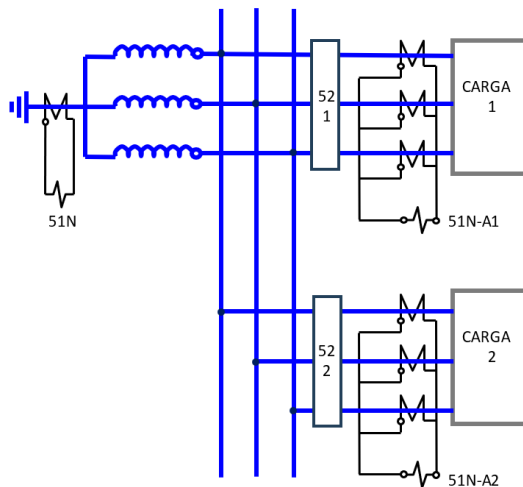


Fig. 2. Arreglo que permite detectar fallas en cada circuito de forma independiente en sistemas trifásicos de ca.

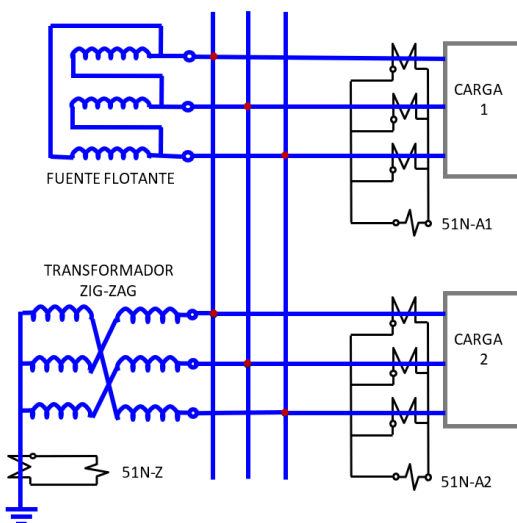


Fig. 3. Cuando la fuente trifásica es flotante se requiere de un transformador con una conexión en zig-zag para obtener la ruta para las corrientes de fallas a tierra.

contra las fallas de cortocircuito (de positivo a negativo), pero también las fallas a tierra que involucrarían las fallas del aislamiento.

Las fallas entre positivo y negativo se deberán detectar y librar mediante protecciones de sobre-corriente para lo cual se cuenta con elementos fusibles y termomagnéticos, pero para fallas a tierra cuyos valores de corriente pueden ser menores que las corrientes de carga, no se cuenta con elementos que las detecten motivo por el cual presentamos esta propuesta.

1.2. Causas de las fallas

Las fallas en los sistemas eléctricos pueden ocurrir por diversas causas, entre las cuales se encuentran las condiciones ambientales que influyen directamente en el deterioro del aislamiento de los cables forrados que interconectan cualquier sistema eléctrico incluyendo los módulos FV. Las causas directas son: las altas temperaturas, los rayos UV, ambientes muy secos, o demasiado húmedos al grado de que los conductores pueden quedar sumergidos en el agua; pero también de manera indirecta mediante sobretensiones inducidas por las corrientes de las descargas atmosféricas. Otras causas pueden ser, el envejecimiento del aislamiento, malas conexiones, daño mecánico durante la instalación, fauna nociva entre otros.

1.3. Mecanismos para la detección de las fallas a tierra en sistemas de ca

Para que existan las fallas a tierra es necesario que haya un flujo de una corriente circulando por tierra, para lo cual es necesario que existan 2 condiciones.

Primero, que haya un camino para que circule la corriente; y segundo, que haya una diferencia de potencial que haga circular dicha corriente.

Para la primera condición es necesario que el sistema tenga solo un punto de conexión a tierra como se muestra en la Fig. 1, Fig. 2 y Fig. 3. Establecido este punto de referencia a tierra, obtenemos la ruta para la circulación de esta corriente de falla que mediante transformadores de corriente se conectan a los relevadores de protección 51N, 51NT o 51G.

La segunda condición se cumple siempre que se tenga energizado el circuito.

Este mecanismo es ampliamente utilizado para proteger los sistemas eléctricos trifásicos de corriente alterna contra fallas a tierra, pero la corriente directa no se presta para aplicar esta metodología.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Descripción de un sistema fotovoltaico (SFV)

El módulo FV transforma la energía luminosa en energía eléctrica en formato de cd. Un interruptor termomagnético (ITM) enlaza el módulo FV con el inversor.

El inversor convierte la cd en ca generalmente trifásica. Mediante un interruptor, la salida del inversor se conecta a un transformador trifásico con la relación adecuada para conectarse a la red eléctrica existente, esto se muestra en la Fig. 4.

La tensión de operación de un SFV depende de la cantidad de módulos FV que se conecten en serie como se muestra en la Fig. 5, pudiendo alcanzar tensiones entre 600 y 1500 V_{cd} . Estos sistemas FV pueden operar aterrizados o flotantes, ambas modalidades presentan ventajas y desventajas, pero en cualquier caso es muy importante detectar las corrientes de fallas a tierra.

2.2. Formas de operación de los sistemas de cd

Los sistemas de cd pueden operar en tres formas:

- 1) Flotante (ver Fig. 6). En este arreglo no es posible detectar fallas a tierra ya que no hay una vía para la circulación de la corriente a través de tierra.
- 2) Aterrizando uno de los polos (ver Fig. 7). En este arreglo, aunque hay una conexión a tierra solo permite detectar fallas a tierra en el polo no aterrizado.
- 3) Referenciando el sistema a tierra por medio de un divisor de tensión (ver Fig. 8). En este arreglo tenemos las siguientes condiciones:
 - a) Existe una referencia del sistema a tierra, que deberá ser única para este sistema.
 - b) Las diferencias de potencial de (+) a tierra y de (-) a tierra son de la misma magnitud si las resistencias tienen los mismos valores en ohms.
 - c) La magnitud de la corriente de falla a tierra puede ser limitada a valores predeterminados por medio de las resistencias de aterrizamiento.
 - d) Existe un punto de conexión a tierra que permitirá la circulación de una corriente de falla a tierra.
 - e) Permite discriminar cual circuito tiene la falla cuando hay varios circuitos a supervisar.

Por las condiciones mencionadas en el inciso 3), este es el mejor arreglo para detectar las fallas a tierra en un sistema multicircuitos como el de la Fig. 5 discriminando cual circuito tiene una falla a tierra.

3. Desarrollo

Un SFV contiene elementos como los mostrados en la Fig. 5, en donde se observan varias ramas conectadas a una sola barra de cd, cada rama se conecta a la barra mediante un ITM, de esta barra se

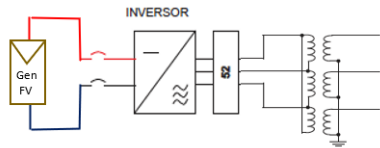


Fig. 4. Elementos básicos de un sistema fotovoltaico.

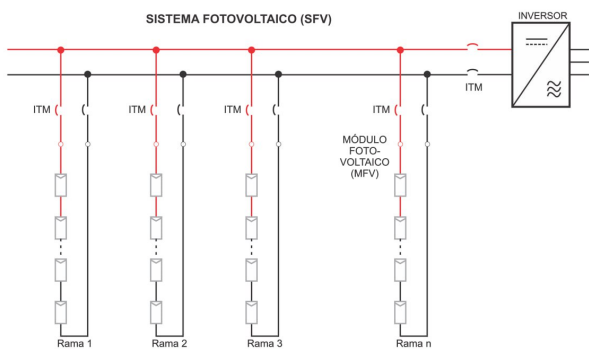


Fig. 5. SFV constituido por varias ramas, cada rama puede contener n módulos fotovoltaicos conectados en serie, cada rama cuenta con protección por ITM.

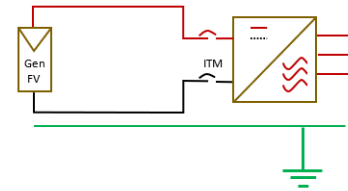


Fig. 6. Sistema cd flotante.

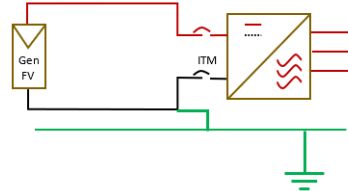


Fig. 7. Sistema cd con negativo aterrizado.

alimenta el inversor que convierte la cd en ca para conectarse a la red existente de 60 Hz.

Las corrientes de fallas de corto-circuito entre (+) y (-) son detectadas y liberadas por la actuación de los ITM ya que generalmente serán superiores a las corrientes de la carga mientras que las fallas a tierra se pueden condicionar para que sean del orden de miliamperes, la forma de condicionar o limitar la corriente de falla a tierra es mediante el aterrizamiento del sistema como se muestra en la Fig. 8, las resistencias del divisor de tensión funcionan como limitadores de la corriente de falla.

Resulta muy conveniente aterrizado el SFV para reducir la corriente de falla reduciendo con ello la potencia disipada y la posibilidad de sobrecalentamiento de conductores y otros componentes del SFV por donde circularía dicha corriente, logrando con ello que el sistema siga funcionando sin la necesidad de una apertura del ITM.

3.1. Determinación del valor de las resistencias de aterrizamiento para un sistema de 250 V_{cd} para limitar la corriente de falla a tierra a 100 mA

Una simplificación de la Fig. 5, y referenciado a tierra, nos permite visualizar la trayectoria de la corriente de falla como se muestra en la Fig. 9.

Si establecemos un límite máximo de 0.1 A para la corriente de falla (I_f) a continuación vamos a encontrar el valor de R_2 .

La Fig. 10 nos permite visualizar que si se tiene una falla de (+) directo a tierra, asumiendo que el valor de $R_F = 0$, la resistencia R_2 es la única que limita la corriente de falla.

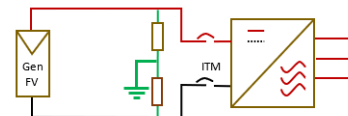


Fig. 8. Sistema aterrizado mediante un divisor de tensión.

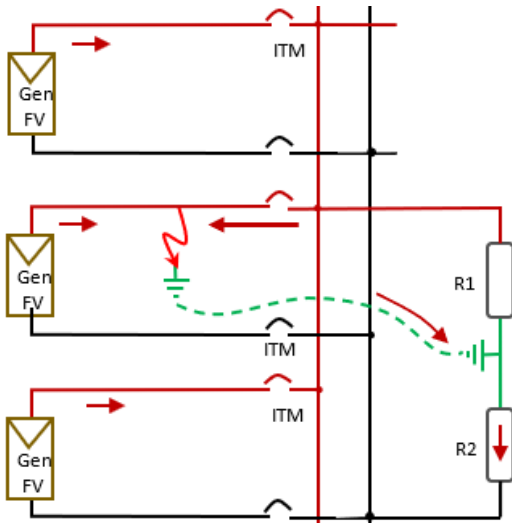


Fig. 9. Trayectoria de Corriente de falla a tierra.

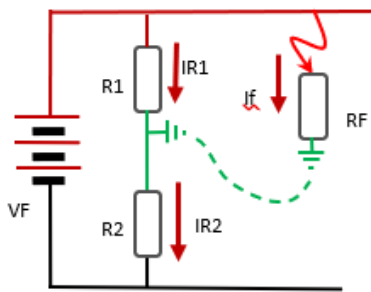


Fig. 10. Distribución de la corriente de falla.

Datos.: tensión del sistema: $V_F = 250 V_{CD}$; corriente máxima de falla a tierra: $I_{R2} = I_f = 0.1 A$; resistencias de aterrizamiento: $R_1 = R_2$,

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{V_F}{I_f} \\ &= 250/0.1 \\ &= 2500 \Omega \end{aligned}$$

La potencia disipada en R_2 es

$$\begin{aligned} P_2 &= I_f^2 R_2 \\ &= 0.1^2 \times 2500 \\ &= 25.0 W \end{aligned}$$

Para que la tensión del sistema se mantenga balanceado con respecto a tierra es recomendable que los valores de R_1 y R_2 sean iguales.

La corriente mínima se tendría cuando $R_f \rightarrow \infty$, entonces $I_f = 0$, $I_{R1} = I_{R2}$.

$$\begin{aligned} I_{R1} = I_{R2} &= \frac{V_F}{R_1 + R_2} \\ &= \frac{250}{2500 + 2500} = 0.05 A \end{aligned}$$

Repetiendo estos cálculos para diferentes niveles de tensión V_{CD} para obtener la misma corriente máxima de falla a tierra tenemos los resultados mostrados en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Parámetros de operación para SFV.

V_{CD} (V)	$R_1 = R_2$ (Ω)	Potencia (W)	I_f máxima (mA)
120	1 200	12	100
250	2 500	25	100
600	6 000	60	100
1500	15 000	150	100

3.2. Determinación del valor de la corriente de falla a tierra para diferentes valores de R_f .

Como en la sección anterior se estableció el límite máximo para la corriente de falla de 100 mA, faltaría conocer el valor de la corriente de falla para diferentes valores de R_f , teóricamente si el aislamiento de los conductores se encuentra en buenas condiciones el valor de R_f sería infinito y cuando el positivo se pone en contacto directo con la tierra el valor de R_f sería nulo. Resolviendo el circuito de la [Fig. 10](#) para diferentes valores de R_f tenemos los diferentes valores de I_f mostrados en la [Tabla 2](#).

Calculando valores de corriente de falla (I_f) para diferentes valores de R_f y para diferentes niveles de tensión obtenemos los resultados que se muestran en la gráfica de la [Fig. 11](#).

Con el propósito de limitar la corriente de falla para que no provoque daños al sistema eléctrico hemos propuesto el valor de 100 mA como corriente máxima, con la cual hemos determinado los valores de la [Tabla 1](#) para obtener la gráfica de la [Fig. 11](#).

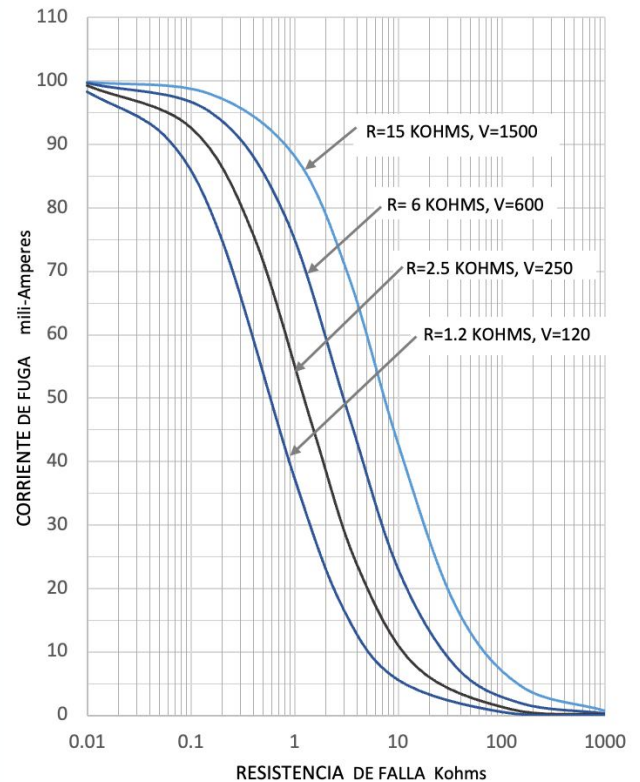


Fig. 11. Corriente de falla a tierra en función de la resistencia de falla para diferentes niveles de tensión.

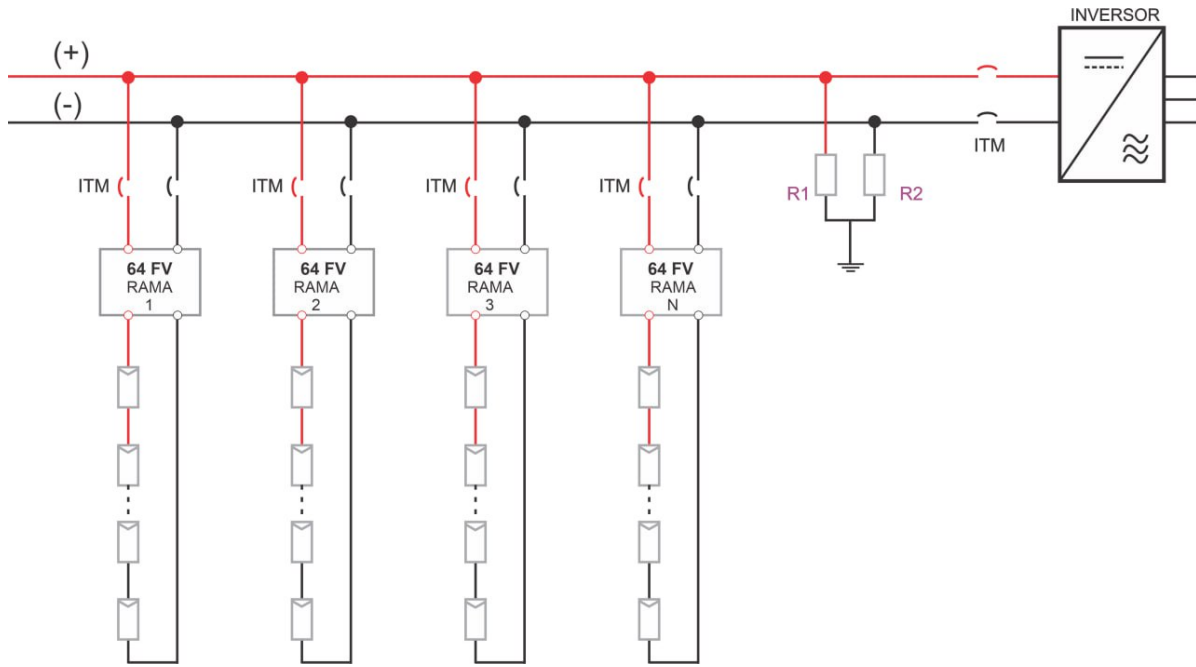


Fig. 12. Diagrama propuesto del SFV con el esquema de aterrizamiento y los elementos detectores de fallas a tierra 64FV.

Tabla 2. Valores de I_f para diferentes valores de R_F .

R_F (Ω)	I_f (mA)
∞	0
0	100
10 000	11.12

4. Aplicación

Al ser tan extensas las áreas de instalación de los módulos FV en una central, es muy importante que estos sean separados en varios circuitos, por lo tanto, se requiere supervisar y detectar las fallas a tierra en cada circuito de forma independiente.

De acuerdo con el proyecto de la norma NOM-001-SEDE-2018 cada circuito de una central FV debe ser equipado con un dispositivo detector de fallas a tierra, a este detector lo hemos identificado con la clave 64FV

Llevado a cabo el procedimiento de aterrizamiento del SFV en un solo punto del sistema, el cual deberá estar en las barras colectoras de la central, el diagrama del SFV quedaría como se muestra en la Fig. 12. En este diagrama se observan varios circuitos y cada circuito deberá contar con un dispositivo detector de fallas a tierra 64FV siguiendo la nomenclatura definida por la ASA.

La ubicación de los 64FV en cada circuito permitirá conocer cual circuito esta fallado y proporcionar atención exclusivamente a ese circuito.

Aunque el proyecto de la norma NOM-001-SEDE-2018 establece que los circuitos con falla deben desconectarse automáticamente debido a los riesgos de incendios, consideramos que debido a la forma de referenciar a tierra el sistema limitando la corriente máxima de falla a 100 mA no se hace necesaria esta desconexión. Sin embargo, si se deberá contar con una señal de alarma cuando opere el 64FV el cual deberá contar con una sensibilidad de 10–20 mA.

El diagrama de aplicación de esta propuesta se muestra en la Fig. 12.

5. Conclusiones

En este documento se propone un esquema para facilitar la protección contra fallas a tierra de los sistemas de corriente directa, dentro de los cuales se encuentran los SFV.

- 1) Las fallas a tierra en sistemas de cd pueden detectarse usando detectores 64FV.
- 2) En los SFV se puede controlar la magnitud de la corriente de fallas a tierra a valores menores de 100 mA, aplicando un esquema de aterrizamiento mediante un divisor de potencial con Resistencias de valores predeterminados.
- 3) Los detectores 64FV deben ser selectivos indicando que ramas o circuitos de un SFV tienen corrientes de falla a tierra.
- 4) La sensibilidad de los detectores 64FV podría ajustarse en un rango de entre 10 y 20 mA.
- 5) Con esta propuesta se puede dar cumplimiento a lo requerido por la NOM-001-SEDE-2018.

Referencias

- [1] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, instalaciones eléctricas (utilización), Secretaría de Energía, 2012.
- [2] J. Ángeles, Francisco J, “Detección de corriente diferencial en circuitos de corriente continua”, 31 Reunión de Verano de Potencia, 2018.
- [3] “Interconexión a la Red Eléctrica de sistemas Fotovoltaicos hasta 30 KV”, Especificación CFE G0100-04, Agosto 2008.
- [4] M. Ángeles, “Disparos no identificados de interruptores de potencia causas y medidas preventivas”, Simposio Iberoamericano Sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2019.

Biografía

Melitón Ángeles Martínez Nació en San Pedro Quiatoni, Oaxaca, México en 1953. Egresado del Instituto Tecnológico de Oaxaca en 1980, graduado como Ingeniero Industrial Electricista.

Trabajó en la Comisión Federal de Electricidad de noviembre de 1974 a mayo de 1992, desempeñando diferentes cargos en la Región de Transmisión Sureste. Miembro del Comité Nacional de Protecciones. Instructor de diversos cursos sobre su especialidad. Autor de varios artículos técnicos y ponente en diversos eventos. En 1991 merecedor de la Medalla Adolfo López Mateos al mérito electricista por su destacado desempeño dentro de la CFE.

Consultor e instructor en la especialidad de protección y medición de sistemas eléctricos de potencia para México y Centroamérica a través de la empresa SEIPE, Actualmente se desempeña como director de la empresa PRELXAIID en Oaxaca, México.