





Analysis of Ferroresonance in Photovoltaic Park Distribution Systems

Mario López Albiter , *Student Member, IEEE*, V. Torres-García , *Senior Member, IEEE E*,
Hernández-Mayoral , *Member, IEEE*, and N. González-Cabrera , *Member, IEEE*

Abstract—Ferroresonance is a phenomenon of particular interest, characterized by the occurrence of temporary overvoltages in electrical systems. These overvoltages cause deterioration in power quality and can damage equipment. Currently, the increasing integration of renewable energy sources, such as wind and photovoltaic energy, generally involves distribution systems with underground cables interconnected through transformers with different configurations, which increases the possibility of scenarios susceptible to the ferroresonance phenomenon. In this regard, this paper presents the modeling of the photovoltaic park distribution system, which connects the photovoltaic system through three-winding transformers (Dy1y1) collecting the energy and transmitting it through a power transformer connected to the 115 kV system, cable lengths are analyzed to determine the potential occurrence of the ferroresonance phenomenon under phase closing and opening conditions, in addition to evaluating the impact of maximum and minimum photovoltaic generation under phase open conditions.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/10349>

Index Terms—Ferroresonance, photovoltaic park, underground cables.

I. INTRODUCCIÓN

LA ferroresonancia es un fenómeno que aparece debido a la interacción de una capacitancia en serie o paralelo con una inductancia con comportamiento no lineal. Este puede presentarse en un sistema de distribución aéreo o subterráneo, generalmente cuando un transformador en condiciones de maniobra se encuentra alimentado con una o dos fases abiertas mediante cables que, debido a su naturaleza de capacitancia distribuida, alcanzan un valor suficiente para provocar dicho fenómeno. Esta interacción establece un circuito RLC con comportamiento no lineal, que en ciertas condiciones de operación podría provocar sobrevoltajes con magnitudes que pueden sobrepasar los niveles normales de operación de los equipos eléctricos, comprometiendo la continuidad del sistema.

En el contexto de las energías renovables, como las eólicas y fotovoltaicas, para la extracción de la energía de los elementos

de generación se utilizan sistemas subterráneos diseñados con cables y transformadores comúnmente conectados en delta-estrella. Esta configuración es una de las más comunes en Norteamérica y Europa, que por su naturaleza, al presentarse una maniobra en el sistema, puede ser una condición susceptible al fenómeno de ferroresonancia [1]. En investigaciones como [2], mediante simulaciones se analizan distintos diseños y configuraciones de transformadores de sistemas de distribución subterráneos, observando que la configuración Dy es mas propensa a la ocurrencia de la ferroresonancia, registrando el mayor sobrevoltaje y la mayor distorsión armónica de corriente.

En este sentido, algunos trabajos han desarrollado análisis y propuestas de detección de este fenómeno, como en [3], donde se lleva a cabo un análisis de ferroresonancias en un parque eólico, el cual consiste en alimentadores radiales conectados a un colector a través de un transformador de 120 kV con conexión Yd1, donde se utilizan cables subterráneos; cada alimentador enlaza turbinas tipo DFIG y están conectadas al colector mediante transformadores con conexión Dy1. Los resultados demuestran que, bajo ciertas condiciones de operación, se podría presentar ferroresonancia entre varios transformadores del DFIG y los cables del colector, principalmente cuando se realiza una maniobra de energización en una o dos fases.

En [4] se evalúan escenarios de energización y de falla para un sistema que contiene turbinas eólicas con transformadores con conexión Dy1 alimentando al colector mediante cables subterráneos, donde se observa ferroresonancia en escenarios de falla trifásica a tierra. Además, los análisis realizados en los sistemas eólicos presentados en [5]–[7] muestran que, debido a la configuración del sistema compuesto por cable, interruptor y transformador, durante las maniobras de apertura del interruptor se generan las condiciones necesarias para el inicio del fenómeno de ferroresonancia.

En el contexto de la generación fotovoltaica, que representa una de las principales fuentes de energía renovable que, a lo largo de los años, ha ido incrementando considerablemente. También se han llevado análisis del fenómeno como en [8] donde se realiza el estudio de un parque fotovoltaico con la finalidad de determinar si el sistema puede presentar problemas de ferroresonancias bajo diferentes condiciones operativas; se mostró que, bajo una configuración del sistema de una o dos fases abiertas, principalmente durante la energización y en la noche, el sistema es propenso a la ferroresonancia. Sin embargo, el estudio no cuenta con información detallada por temas de confidencialidad, lo que dificulta la replicación de los

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Diego Rivelino Espinoza Trejo (*Corresponding author: Mario Lopez-Albiter*).

Mario Lopez-Albiter and V. Torres García are with the Instituto Tecnológico de Morelia, México (e-mails: m24120696@morelia.tecnm.mx and vicente.tg@morelia.tecnm.mx).

E. Hernández and N. González are with the Universidad Nacional Autónoma de México (e-mails: emhema@ier.unam.mx and nestorgc@fi-b.unam.mx).

resultados, además de que se observa que la ferresonancia se limita transformadores de potencial excluyendo su aparición en el sistema de distribución.

En el sistema fotovoltaico analizado en [9], se detectó la presencia de sobrevoltajes en el colector al energizar un transformador. Se observó que estos sobrevoltajes son lo suficientemente altos como para causar fallas en los apartarrayos y las formas de onda son similares a los modos de ferresonancia presentados en la literatura; sin embargo, estos ocurrieron sin presentar una condición de energización monofásica, lo que el trabajo clasifica como un nuevo tipo de ferresonancia, el cual se encuentra limitado en su profundización teórica y matemática. Por otra parte, como se muestra en [10], los armónicos generados por la operación de los sistemas fotovoltaicos, bajo ciertos parámetros del sistema de distribución, pueden causar la presencia de ferresonancia, originando sobrevoltajes en la red. Finalmente, el estudio realizado en [11] destaca que los sistemas fotovoltaicos a gran escala tienen una gran vulnerabilidad a la ocurrencia de la ferresonancia, en maniobras de switcheo monofásico se pueden presentar voltajes hasta de 3.5 p.u. y picos de corriente masivos.

Como se observa en la literatura, el fenómeno de ferresonancia también es un tema de interés en las redes eléctricas con alta penetración de energía renovable, como la eólica y la fotovoltaica, debido a que en estas redes se utilizan sistemas subterráneos para la extracción de dicha energía; no obstante, estos trabajos se encuentran limitados a la falta de información de la procedencia de los datos para la validación del estudio; además que el análisis en sistemas fotovoltaicos no se ha profundizado, resultando en pocas publicaciones.

En este sentido, en este trabajo se presenta el análisis y modelado del sistema de distribución de un parque fotovoltaico para mostrar que, bajo las condiciones de apertura y cierre de una fase o dos fases en el colector, el sistema es susceptible a la ferresonancia.

Las principales contribuciones de este trabajo se resumen a continuación:

- Modelado del sistema subterráneo de distribución de un parque fotovoltaico real.
- Evaluación de la ferresonancia que se produce en un transformador de distribución de tres devanados con conexión Dy1y1 bajo las condiciones de apertura y cierre de una fase o dos fases.
- Evaluación del impacto de la potencia máxima y mínima de generación fotovoltaica en las condiciones de apertura del interruptor.

II. FUNDAMENTOS DE FERRORESONANCIA

La ferresonancia se define como la interacción entre un elemento capacitivo y una inductancia no lineal, lo que resulta en sobrevoltajes y formas de onda irregulares. Es un fenómeno transitorio de baja frecuencia que es iniciado por los cambios en la topología de la red, causados principalmente por maniobras o switcheo. Para que el fenómeno de ferresonancia se presente, el sistema debe contar, por lo menos, con los siguientes elementos [12]:

- Inductancia no lineal saturable (transformador).

- Capacitancia (cables subterráneos).
- Fuente de voltaje senoidal.

La ferresonancia en los sistemas eléctricos de potencia modernos involucra transformadores de potencia, de distribución o de instrumentos. La capacitancia se presenta por los cables subterráneos o líneas de transmisión, bancos de capacitores y acoplamiento entre líneas de doble circuito [13]. Además, se ha documentado mas frecuentemente la presencia de ferresonancia en sistemas de distribución subterráneos con transformadores Dy1. Existen situaciones favorables para la aparición de la ferresonancia, como son [14]:

- Energización de transformadores en una o dos fases.
- Transformador energizado a través del gradiente capacitivo en uno o dos interruptores abiertos.
- Transformador conectado a una línea de transmisión desenergizada en paralelo con una línea energizada.
- Transformador alimentado a través de una línea de transmisión larga o un cable con baja potencia de cortocircuito.

En la literatura, el fenómeno se clasifica en cuatro modos diferentes de acuerdo con la forma de onda de las señales [15]–[18], como se muestra en la Fig. 1:

- **Modo fundamental:** La forma de onda es periódica con la misma frecuencia que la red, pero con contenido armónico.
- **Modo subarmónico:** La forma de onda es periódica con frecuencias que son submúltiplos impares enteros de la frecuencia fundamental.
- **Modo cuasi-periódico:** La forma de onda no es periódica y cuenta con dos frecuencias: la fundamental y una frecuencia subarmónica.
- **Régimen caótico:** La forma de onda muestra un comportamiento errático e impredecible, presentando frecuencias muy altas en relación con la red.

La presencia de ferresonancia puede ocasionar daños a los equipos del sistema eléctrico, teniendo los siguientes efectos principales [13], [19], [20]:

- Sobrevoltajes y sobrecorrientes sostenidas.
- Alta distorsión de las formas de onda de la señal.
- Sobre calentamiento de transformadores con operación sin carga.
- Exceso de ruido en el transformador.
- Fallas de los apartarrayos y las protecciones de voltaje.
- Flicker.
- Desconexión de cables.

III. MODELADO DE LA FERRORESONANCIA

En el modelado matemático de la ferresonancia, un aspecto importante a considerar es la curva de saturación del transformador, debido a los puntos de operación en los cuales puede causar resonancia con la capacitancia del sistema. La Fig. 2 muestra un equivalente monofásico para el análisis de la ferresonancia en serie. Además, si se considera que la curva de saturación no lineal y aplicando la Ley de Voltaje de Kirchhoff (LVK), se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden no lineal:

$$\omega V_{max} \cos(\omega t) = \frac{d^2 i(\lambda)}{dt^2} + R \frac{di(\lambda)}{dt} + \frac{i(\lambda)}{C} \quad (1)$$

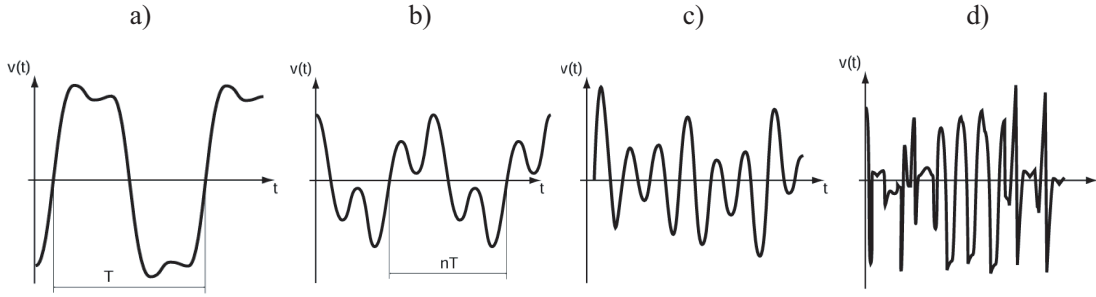


Fig. 1. Formas de onda de los modos de ferresonancia a) Fundamental, b) Subarmónico, c) Casi-periódico, d) Caótico [15].

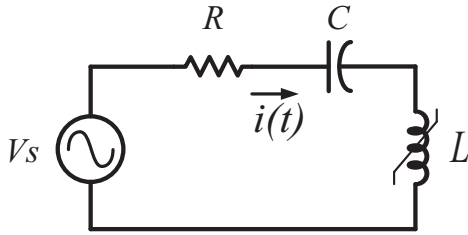


Fig. 2. Circuito RCL con inductancia no lineal.

Para la solución de la ecuación diferencial (1), en la literatura se han propuesto algunas funciones para considerar la no linealidad, como en [14], donde se utiliza un polinomio de grado 3 de la forma $i(\lambda) = a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d$; se obtiene una ecuación representada en términos de λ como:

$$\omega V_{max} \cos(\omega t + \theta) = \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + R(3a\lambda^2 + 2b\lambda + c) \frac{d\lambda}{dt} + \dots + \frac{a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d}{C} \quad (2)$$

En [21] al considerar una función cúbica $i(\lambda) = a\lambda^3$, se obtiene una ecuación de la forma:

$$\omega V_{max} \cos(\omega t + \theta) = \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + 3aR\lambda^2 \frac{d\lambda}{dt} + \lambda^3 \quad (3)$$

En el circuito de la Fig. 2, tomando en cuenta las pérdidas del transformador Rm y usando un polinomio de grado 11 $i(\lambda) = a\lambda + b\lambda^{11}$ como en [22], resulta una ecuación de la forma:

$$\omega V_{max} \cos(\omega t + \theta) = \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + \dots + \left[\frac{1}{RmC} + R(a + 11b\lambda^{10}) \right] \frac{d\lambda}{dt} + \frac{a\lambda + b\lambda^{11}}{C} \quad (4)$$

En [23] se proponen y analizan cinco funciones (polinomial, hiperbólica, exponencial, Frolich inversa extendida e irracional) para el cálculo de la curva de saturación, de tal manera que, para diferentes escenarios de ferresonancia, la función Frolich inversa extendida es la que mejores resultados obtiene.

En este trabajo se analizan algunas curvas típicas para representar la no linealidad del núcleo ferromagnético del transformador y se ajustan para una curva típica de acero al silicio del núcleo de un transformador típico. La Tabla I

muestra las funciones de estas curvas no lineales, que incluyen una función polinomial, el seno hiperbólico y una función exponencial.

TABLA I
MODELOS DE LA FUNCIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN

Modelo	Función
Polinomial	$i(\lambda) = a\lambda^{n_1} + b\lambda^{n_2} + c\lambda^{n_3}$
Seno hiperbólico	$i(\lambda) = a \sinh(b\lambda)$
Exponencial	$i(\lambda) = \lambda(a + b e^{c \lambda })$

La Fig. 3 muestra que las ecuaciones de la Tabla I pueden ser utilizadas para representar la curva de saturación. Adicionalmente, se puede observar que el comportamiento no lineal de cada función es muy similar a la curva típica utilizada para transformadores.

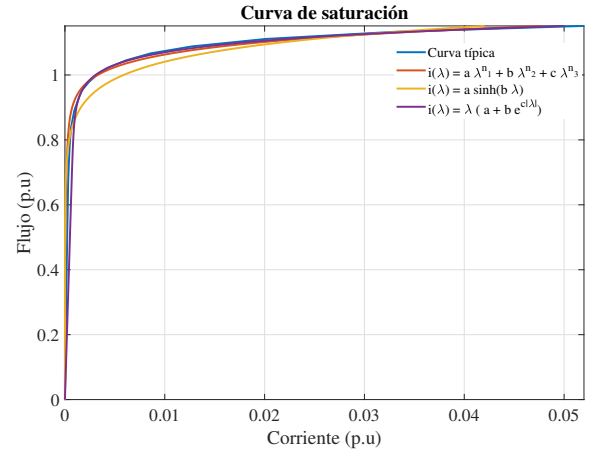


Fig. 3. Curvas de saturación de diferentes modelos.

Estos modelos permiten establecer las ecuaciones de la característica no lineal del transformador, las cuales se incluyen en la ec. (1). Sin embargo, las ecuaciones diferenciales no lineales requieren un tratamiento matemático complejo, por lo cual se opta por el análisis numérico y el uso de software como ATPDraw [24].

IV. EVALUACIÓN DE LA FERRORESONANCIA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UN PARQUE FOTOVOLTAICO

A. Parámetros del sistema

En esta sección se analiza un parque fotovoltaico ubicado en una zona del bajío mexicano, con un promedio de entre 5.6 y

7.2 horas solares pico. Cuenta con una capacidad instalada de generación de 126 MW nominales, con 29 centros de transformación (CT) divididos en 8 circuitos colectores de distribución subterránea. El parque fotovoltaico bajo análisis se muestra en la Fig. 4, el cual se modela en el software ATPDraw.

Además, el sistema de la Fig. 4 muestra una red equivalente representada por un sistema de 115 kV, un equivalente de Thevenin de $Z_1 = 0.412 + j2.74 \Omega$ y $Z_0 = 0.208 + j2.773 \Omega$, un transformador de 126 MVA, 115/34.5 kV, $Z_n = 9.5\%$ y una conexión $Dyn1$. Los parámetros de los CT's son 4870 kVA, 34.5/0.585/0.585 kV, 60 Hz, conexión $Dy1y1$ con una impedancia de $Z_p = 0.938513 + j58.65708 \Omega$ y $Z_{S,T} = 0.00026984 + j0.0035136 \Omega$. La Tabla II muestra la curva de saturación utilizada para este transformador.

TABLA II
CURVA DE SATURACIÓN DEL CT DY1Y1

Corriente (A)	Flujo(Wb)
0.11063	66.9949
0.22126	95.8306
0.44252	122.1095
1.1063	146.1573
2.2126	156.426
4.4252	162.1211
11.063	165.7417

Por otra parte, los parámetros de los cables corresponden a un cable XLPE 133% de aluminio con una sección de 1000 kCM, enterrados en ductos a 1 m de profundidad, con una configuración en trébol. En la Tabla III se muestran las características eléctricas del conductor y en la Tabla IV se presenta el arreglo geométrico.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ELÉCTRICAS DEL CABLE

Calibre	1000 kCM	
Dato	Core	Sheath
Rin	0.0000	0.02607
Rout	0.01315	0.02671
Rho	3.107×10^{-8}	2.41×10^{-7}
Mu	1	1
Mu (ins)	1	1
Eps (ins)	2.8728	5
Radio total	0.03038	

TABLA IV
COORDENADAS DEL CONDUCTOR

Fase	Eje X	Eje Y
A	0.0000	0.9616
B	0.1176	0.9616
C	0.0588	0.8597

La Fig. 5 muestra la configuración física de un sistema trifásico de distribución subterráneo sin neutro con configuración en trébol; una vez obtenidos los datos esenciales del sistema de distribución, se utiliza el módulo LCC de ATPDraw [24] y con las características de la Tabla III y las coordenadas especificadas en la Tabla IV, se obtienen los parámetros que se muestran en la Tabla V.

TABLA V
PARÁMETROS DEL CABLE EN CONFIGURACIÓN EN TRÉBOL

Secuencia	Z(Ω /km)	C(μ F/km)
Positiva	0.0648+j0.1825	0.2336
Cero	1.1282+j1.1122	0.2336

Dentro de un sistema eléctrico, se utilizan diferentes configuraciones de cable, considerando el tipo de instalación y las aplicaciones. En sistemas subterráneos, la configuración en trébol es muy común debido a las diversas ventajas que ofrece respecto a la configuración horizontal, tales como el balanceo de impedancias, la reducción de acoplamientos magnéticos, la disminución de picos de voltaje y una mejor respuesta ante transitorios.

Por otra parte, el inversor utilizado para los CT's se modela como una fuente de voltaje con una impedancia en serie, conectada a un filtro LCL, como se muestra en la Fig. 6, debido a las ventajas en la caída de voltaje y la atenuación de armónicos, mejorando significativamente la forma de onda, como se muestra en [25], de tal manera que la magnitud del voltaje y el ángulo se ajustan para un correcto flujo de potencia; los parámetros correspondientes se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI
PARÁMETROS DEL INVERSOR

Parámetro	Magnitud	Unidad
V_{LL}	585	V
P	2.34	MW
Z_g	0.1131	Ω
L_1	0.0098	Ω
L_2	0.0049	Ω
C_f	300.49	μ F

Cada centro de inversores cuenta con 388 cadenas de 24 paneles fotovoltaicos en serie, las características eléctricas del panel en condiciones estándar de $1000 W/m^2$ a una temperatura de $25^\circ C$ se encuentran en la Tabla VII.

TABLA VII
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Parámetro	Magnitud	Unidad
P_{max}	250	W
V_{max}	30.5	V
I_{max}	8.19	A
V_{oc}	37.7	V
I_{oc}	8.79	A

Finalmente, se considera un apartarrayos equipado en el CT, con las siguientes características: $U_r = 36$ kV, $U_c = 29$ kV y $f=60$ Hz. La característica no lineal se muestra en la Tabla VIII.

V. EVALUACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

En esta sección se analizan los diferentes casos posibles en los cuales puede presentarse el fenómeno de ferresonancia. Como generalidades en la Fig. 4, $S1$, $S2$, $S3$ y $S4$ se encuentran cerrados; para C1 las maniobras se realizan sobre el interruptor

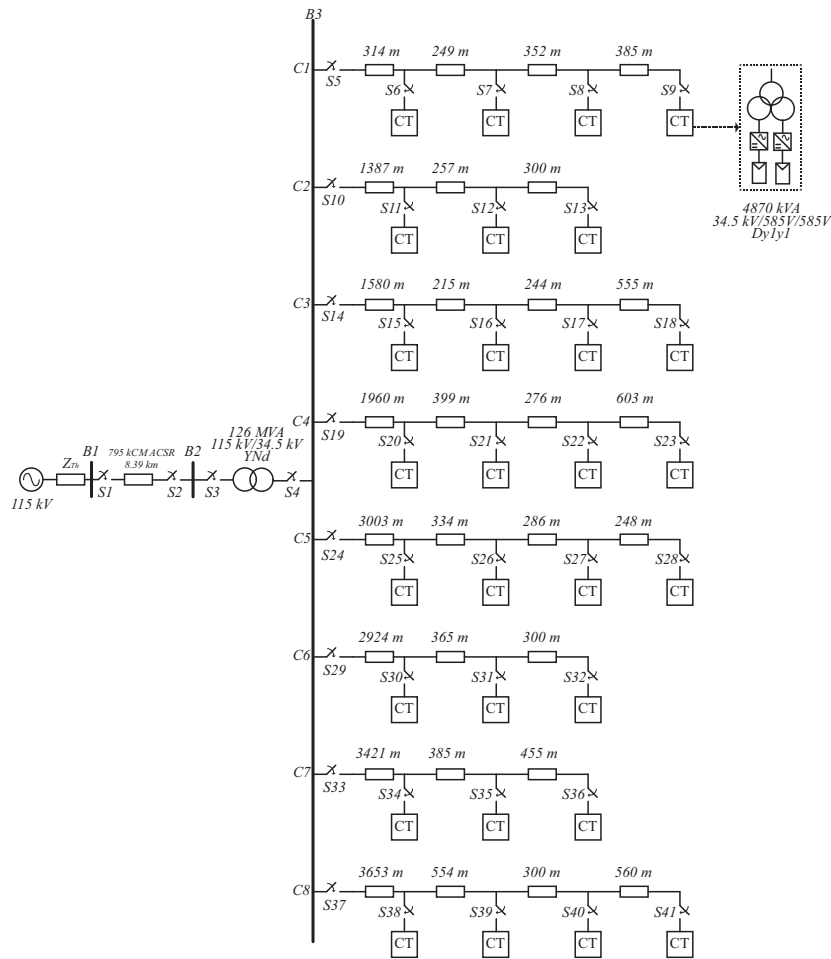


Fig. 4. Diagrama unifilar del parque fotovoltaico.

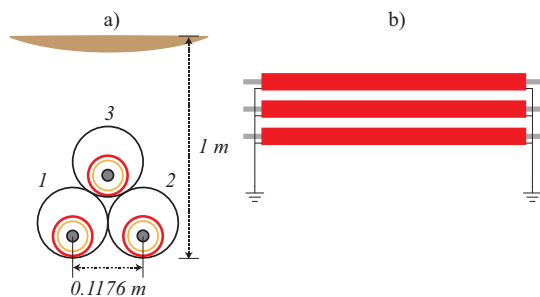


Fig. 5. a) Configuración física del cable en trébol en ductos subterranos. b) Configuración del cable de media tensión.

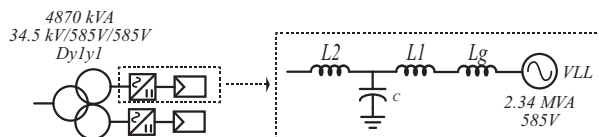


Fig. 6. Equivalente de la generación fotovoltaica.

TABLA VIII
CARACTERÍSTICA NO LINEAL DEL APARTARRAYOS

Corriente (kA)	Voltaje (kV)
1.5	90.9
3.0	97.0
5.0	102.7
10	112.9
20	127.0
40	151.1

permitiendo identificar los escenarios susceptibles a la ferresonancia en cada sección del sistema, de tal manera, este procedimiento se realiza para los demás circuitos del colector. Es importante destacar que, en el análisis, no se considera un modelo detallado de inversor, debido a que el fenómeno evaluado no considera la operación de los dispositivos electrónicos, además de considerar maniobras o interrupciones en media tensión del transformador y condiciones operativas de máxima y mínima potencia de generación.

A. Caso 1: Energización en Vacío, Retardo en una Fase

del colector (S5) mientras que el interruptor correspondiente a cada CT se mantiene cerrado únicamente al analizar el escenario correspondiente a la distancia y sección de dicho CT. De esta manera, cada sección se evalúa de forma independiente,

para este caso, se analiza la energización de cada CT por separado, se considera que el interruptor cierra cuando el voltaje de la fase A se encuentra en el cruce por cero con un $\theta = 360^\circ$. Considerando el funcionamiento típico

de un interruptor de potencia, como en [14], los tiempos de energización son los siguientes: $t_a = 18.059$ ms, $t_b = 18.061$ ms y la fase C, bajo el supuesto de un retardo en la conexión, se mantiene abierta.

Cuando se analiza el parque fotovoltaico, una de las distintas condiciones susceptibles más severas a la ferresonancia es cuando *S11* y *S13* se encuentran abiertos, *S12* está cerrado y se energiza *S10* con las condiciones especificadas anteriormente, contando con una longitud de cable de 1644 m como se observó en la Fig. 4.

Bajo las condiciones de operación descritas anteriormente, la Fig. 7 muestra los voltajes vistos en el primario del CT, en el cual en la fase C se puede observar un sobrevoltaje; inicialmente, en $t = 43$ ms el voltaje alcanza un valor pico de 2.27 p.u. con una forma de onda distorsionada y de baja frecuencia. Posteriormente, en $t = 90$ ms el pico de voltaje incrementa a una magnitud de 4.12 p.u., para luego presentar ferresonancia sostenida en un modo cuasi periódico debido a la presencia de componentes de frecuencia como 30 Hz y 90 Hz, [18], observando voltajes pico de hasta 6.25 p.u.

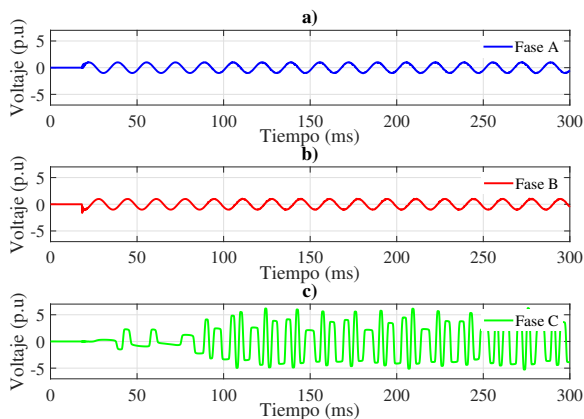


Fig. 7. Voltajes del CT con una distancia de 1644 m durante la energización. a) Voltaje fase A. b) Voltaje fase B. c) Voltaje fase C.

Después de llevar a cabo simulaciones de diferentes distancias y la operación de diferentes interruptores, se analizaron algunos casos representativos, los cuales se muestran en la Tabla IX, donde se identifican las condiciones más susceptibles a la ferresonancia (F), mostrando el tiempo (t) en el que ocurre el máximo voltaje pico (VP) de la fase C. Adicionalmente, se incluyen los voltajes de la evaluación del sistema considerando el funcionamiento del apartarrayos (A).

TABLA IX
ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA DURANTE LA
ENERGIZACIÓN DE LOS CT'S

Sección	Distancia (m)	VP (p.u.)	t (ms)	F	A (p.u.)
S5-S6	314	3.09	41.05	Si	1.86
S5-S9	1300	6.46	258.75	Si	2.13
S10-S12	1644	6.25	275.75	Si	2.16
S19-S22	2635	4.79	91.3	Si	2.16
S24-S28	3871	0.18	66	No	0.18
S37-S39	4207	0.15	18.45	No	0.15

Como se puede observar en la Tabla IX, la menor distancia de cable dentro del colector resulta ser una condición susceptible a la ferresonancia, mostrando picos de voltaje de hasta 3.09 p.u. Las distancias, 1300 m y 1644 m, donde se presentan los mayores picos de voltaje, evidencian una condición de mayor severidad. Para las distancias de 3871 m y 4207 m, no se presenta el fenómeno, se observa que no existe la presencia de sobrevoltajes. Considerando el funcionamiento del apartarrayos, los niveles de voltaje se ven disminuidos, mitigando el fenómeno de ferresonancia hasta valores cercanos a 2.16 p.u.

B. Caso 2: Desconexión en Vacío, Retardo en Dos Fases

Inicialmente, para C1 el CT a analizar, el interruptor *S6* se encuentra energizado previamente; se realiza la desconexión del interruptor del circuito colector *S5*, evaluando de manera individual cada sección, tomando en cuenta un interruptor de potencia y suponiendo la apertura únicamente de la fase A en un $t_a = 59.71$ ms. En esta condición, donde las fases B y C se mantienen cerradas, se presentan varios escenarios en los cuales se manifiesta el fenómeno de la ferresonancia. Uno de los más severos es cuando *S38*, *S39* y *S40* se encuentran abiertos, *S41* está cerrado y se desconecta *S37*.

Con las condiciones de operación especificadas anteriormente, la Fig. 8, muestra los voltajes del CT con una longitud de cable de 2635 m, en la cual el fenómeno de ferresonancia se presenta en la fase A; en $t = 71$ ms se alcanza un voltaje pico de 1.84 p.u., en $t = 146$ ms se tiene una magnitud de 4.24 p.u. y en $t = 237.2$ ms se tiene el valor máximo de 5.63 p.u. La forma de onda analizada cuenta principalmente con las frecuencias 30 Hz, 90 Hz y 210 Hz, observando que los picos de voltaje son distintos en los demás ciclos por lo que las ondas no son periódicas, clasificándose como un modo cuasi-periódico [18].

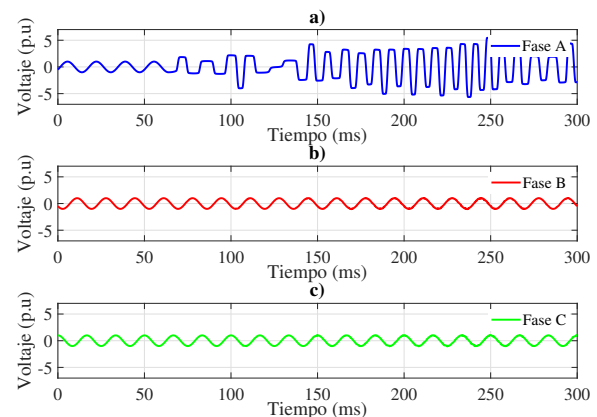


Fig. 8. Voltajes del CT con una distancia de 2635 m durante la desconexión. a) Voltaje fase A. b) Voltaje fase B. c) Voltaje fase C.

Al igual que en el caso anterior, se realizaron diferentes simulaciones y al analizar las diferentes longitudes de cable, como se muestra en la Tabla X, en los CT con longitudes pequeñas, como en 314 m no se manifiesta un sobrevoltaje en la fase A; por lo tanto, no existe ferresonancia. Con

una distancia de 563 m se observan voltajes de 1.53 p.u.; sin embargo, este sobrevoltaje no se sostiene en el tiempo y la forma de onda comienza a decrecer, por lo que el fenómeno no se presenta.

TABLA X
ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA DURANTE LA
DESCONEXIÓN DE LOS CT'S

Sección	Distancia (m)	VP (p.u.)	t (ms)	F	A (p.u.)
S5-S6	314	1.00	—	No	1.00
S5-S7	563	1.53	88.3	No	1.33
S5-S9	1300	4.57	248.2	Si	2.13
S19-S22	2635	5.63	237.2	Si	2.23
S24-S26	3337	4.34	113.4	Si	2.25
S33-S36	4261	3.85	146.5	Si	2.29
S37-S41	5067	4.42	221.5	Si	2.31

Las diferentes longitudes de cable muestran diversos comportamientos; el fenómeno se presenta a partir de los 1300 m, alcanzando un voltaje de 4.57 p.u. A una mayor distancia, el fenómeno se intensifica, presentando la condición con mayor magnitud de voltaje, siendo de 5.63 p.u. en 2635 m. Para las distancias mayores, se observan diferentes valores de voltaje, confirmando la presencia del fenómeno e indicando que la longitud del cable impacta en la ocurrencia y severidad del mismo. Incluyendo los apartarrays, los voltajes se ven disminuidos a magnitudes alrededor de 2.31 p.u., mitigando el fenómeno en los casos correspondientes.

C. Caso 3: Desconexión con Potencia Máxima de Generación, Retardo en Dos Fases

En este caso, se analizan los escenarios del caso 2 bajo las mismas condiciones de operación especificadas; sin embargo, se considera que los inversores están conectados, suministrando la máxima potencia a la red en el momento de la maniobra de desconexión.

La Tabla XI muestra el análisis de las longitudes evaluadas con anterioridad, en el cual se presenta el impacto de inyectar la potencia máxima de generación, en casos como las secciones de 314 m y 563 m, se presenta el fenómeno de ferresonancia que no se había observado anteriormente. Para las demás secciones, no existe una relación clara debido a la no linealidad del núcleo del transformador, lo que causa que, en los casos evaluados, en algunos la magnitud del voltaje aumente y en otros disminuya. Agregando el apartarrayos al CT, el fenómeno se mitiga hasta valores cercanos a 2.3 p.u.

TABLA XI
ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA DURANTE LA
DESCONEXIÓN DE LOS CT'S CON INVERSOR CONECTADO
A SU MÁXIMA GENERACIÓN

Sección	Distancia (m)	VP (p.u.)	t (ms)	F	A (p.u.)
S5-S6	314	3.97	144.7	Si	2.02
S5-S7	563	5.07	205.7	Si	2.07
S5-S9	1300	4.72	223.2	Si	2.13
S19-S22	2635	4.2	262.5	Si	2.23
S24-S26	3337	5.59	93.75	Si	2.25
S33-S36	4261	6.46	106.7	Si	2.28
S37-S41	5067	4.22	255.5	Si	2.30

La Fig. 9 muestra los voltajes de las fases A, B y C durante la desconexión con potencia máxima de generación de los inversores, en este caso, existe un retardo de desconexión en las fases B y C, en el cual se observa que en la fase A se presenta el fenómeno de ferresonancia, con un pico de voltaje de hasta 6.46 p.u., siendo este el caso mas severo. La forma de onda presenta frecuencias de 30 Hz, 90 Hz y 180 Hz, observándose que los picos de voltaje son distintos en cada ciclo, por lo que la onda no es periódica, clasificándose como un modo cuasi-periódico [18].

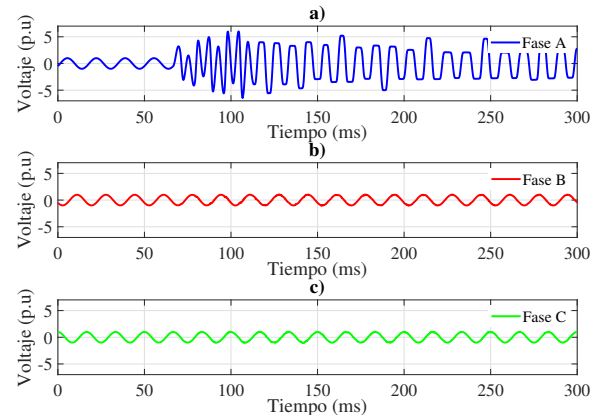


Fig. 9. Voltajes del CT con una distancia de 4261 m durante la desconexión con potencia máxima de generación. a) Voltaje fase A. b) Voltaje fase B. c) Voltaje fase C.

D. Caso 4: Desconexión con Potencia de Generación Mínima, Retardo en Dos Fases

Tomando en cuenta los escenarios del caso 2, se realiza la desconexión con retardo en las fases B y C, se considera que el inversor inyecta la potencia mínima de generación. La Tabla XII muestra los voltajes obtenidos de la evaluación de las secciones del caso 2. Al realizar una comparativa con la Tabla X se observa una disminución en las magnitudes de voltaje, sugiriendo que, al tener los inversores a su mínima potencia de generación se reduce la magnitud del pico de voltaje presente en el CT. Adicionalmente incluyendo el funcionamiento del apartarrayos, en los casos analizados se mitiga el fenómeno de ferresonancia teniendo valores cercanos a los 2.29 p.u.

TABLA XII
ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA DURANTE LA
DESCONEXIÓN DE LOS CT'S CON INVERSOR CONECTADO
A SU GENERACIÓN MÍNIMA

Sección	Distancia (m)	VP (p.u.)	t (ms)	F	A (p.u.)
S5-S6	314	1.00	—	No	1.00
S5-S7	563	1.52	88.2	No	1.34
S5-S9	1300	4.43	113	Si	2.13
S19-S22	2635	3.9	105.2	Si	2.23
S24-S26	3337	4.34	113.5	Si	2.00
S33-S36	4261	3.84	146.7	Si	2.29
S37-S41	5067	3.72	290	Si	1.98

La Fig. 10 muestra el escenario mas severo en el cual se hace presente la ferresonancia, considerando una longitud de 1300 m, donde se observa un voltaje pico de hasta 4.43 p.u.

en la fase A. En la forma de onda analizada, principalmente se encuentran las frecuencias de 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz y 180 Hz, la cual cuenta con diferentes picos de voltaje en cada ciclo; por lo tanto, se le asigna un modo cuasi-periódico [18].

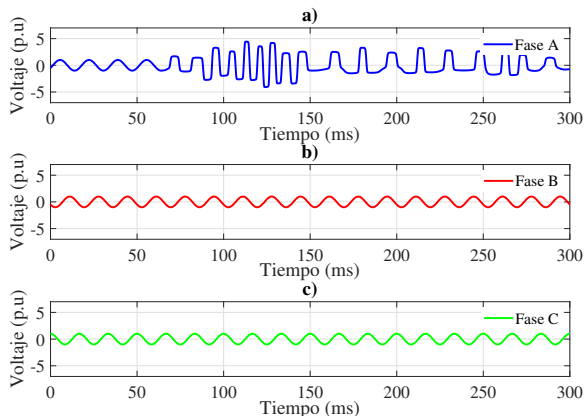


Fig. 10. Voltajes del CT con una distancia de 1300 m durante la desconexión con potencia mínima de generación. a) Voltaje fase A. b) Voltaje fase B. c) Voltaje fase C.

VI. CONCLUSIÓN

El fenómeno de ferroresonancia es una condición en la cual el sistema puede presentar formas de onda irregulares y sobrevoltajes, lo que causa daños en los equipos del sistema eléctrico. En el caso de los parques fotovoltaicos, su diseño de construcción integra los elementos necesarios que, bajo ciertas condiciones, incrementan la susceptibilidad del sistema a este fenómeno. Como resultado de la evaluación de las maniobras de energización y desconexión del transformador de tres devanados con conexión Dy1y1 de un parque fotovoltaico, se identificaron diferentes condiciones críticas que propician la ocurrencia de la ferroresonancia, en un modo cuasi-periódico.

En condiciones de energización en vacío con retardo en una fase, se observa la ocurrencia del fenómeno de ferroresonancia a distintas distancias, con sobrevoltajes de alrededor de 3 a 6 p.u. Se observó que, con una longitud de 1644 m el fenómeno se manifiesta con mayor intensidad, mostrando picos de voltaje de 6.25 p.u.

En el análisis de la desconexión en vacío con retardo en dos fases, se observa la ocurrencia del fenómeno con sobrevoltajes de magnitud entre 3.85 y 5.6 p.u. a distintas distancias. Sin embargo, para las distancias de 314 m y 563 m, se muestra que no son condiciones susceptibles a la ferroresonancia.

Las condiciones anteriores corresponden al comportamiento del sistema de distribución en vacío, es decir, sin considerar la generación de los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, para evaluar el efecto de estos mismos, se modeló un sistema equivalente en condiciones de generación máxima y mínima, en donde, al realizar la desconexión con potencia máxima de generación, con retardo en dos fases, el fenómeno de la ferroresonancia se presenta en escenarios en los cuales no se manifestaban sobrevoltajes. Sin embargo, debido a la característica no lineal del núcleo del transformador, no se permite observar una tendencia. No obstante, el fenómeno es dependiente de la longitud del cable.

Por otro lado, al analizar la desconexión con potencia mínima de generación, retardo en dos fases, con respecto a la desconexión en vacío, los niveles de voltaje se reducen, lo que infiere una ligera atenuación en la posibilidad de ocurrencia del fenómeno de ferroresonancia.

Adicionalmente, en todos los escenarios analizados se incluyó el apartarrayos como un método de mitigación, observando reducciones significativas de las magnitudes de sobrevoltajes, evitando que el sistema alcance niveles críticos que puedan comprometer la integridad de los equipos.

Finalmente, los casos mostrados en este artículo demuestran que el fenómeno de ferroresonancia se puede presentar en sistemas de distribución subterráneos de nuevas centrales de energía renovable, como es el caso de la fotovoltaica y que bajo ciertas condiciones de operación, puede ser un riesgo latente. En este sentido, en este trabajo se analizaron escenarios propensos a la aparición del fenómeno de ferroresonancia.

REFERENCES

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. McGraw-Hill, 2012.
- [2] G. Eduful, Y. Fan, and A. Abu-Siada, "Investigating ferroresonance susceptibility in various transformer configurations: A simulation-based study," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1155/etep/2736382>.
- [3] U. Karaagac, J. Mahseredjian, and L. Cai, "Ferroresonance conditions in wind parks," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 41–49, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.04.007>.
- [4] M. K. Siahpoosh, D. Dorrell, and L. Li, "Ferroresonance assessment in a case study wind farm with 8 units of 2 mva dfig wind turbines," *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1–5, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056530>.
- [5] S. Rezaei, S. Aref, and A. S. Anaraki, "A review on oscillations in wind park due to ferroresonance and subsynchronous resonance," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, pp. 3777–3792, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12287>.
- [6] M. I. Mosaad and N. A. Sabiha, "Ferroresonance overvoltage mitigation using statcom for grid-connected wind energy conversion systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 407–415, 2022, DOI: <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000286>.
- [7] M. Hesami, M. Bigdeli, M. A. Fatemi, and N. Shafaghatian, "Wind generators ferroresonance overvoltage protection methods: A review," *8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)*, pp. 1–7, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTEM56862.2023.10083847>.
- [8] A. Abdullah, "A ferroresonance study of a 240 mw solar pv project," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, pp. 1–4, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544479>.
- [9] C. Pallem, D. Mueller, and M. McVey, "Case study of a new type of ferroresonance in solar power plants," *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8973969>.
- [10] N. Jiang, Y. You, S. Chang, L. Shi, Z. Yi, Y. Zhou, M. Li, W. Jiang, and J. Wang, "Research on ferromagnetic resonance of photovoltaic intervention power system," *3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*, pp. 86–92, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1109/IC2ECS60824.2023.10493776>.
- [11] R. M. Arias Velásquez, "Transient analysis of temporary overvoltage and cable faults in underground medium voltage systems," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103875, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103875>.
- [12] Z. Ali, "Development of numerical algorithms for ferroresonance monitoring," Ph.D. dissertation, THE UNIVERSITY OF MANCHESTER, 2015.
- [13] J. A. Corea, "Modeling and analysis of power transformers under ferroresonance phenomenon," Ph.D. dissertation, UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI, 2015.

- [14] V. Torres-García, N. Solís-Ramos, N. González-Cabrera, E. Hernández-Mayoral, and D. Guillen, "Ferroresonance modeling and analysis in underground distribution feeders," *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 10, pp. 583–592, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2023.3312640>.
- [15] P. Ferracci, "Cahier technique no 190: Ferroresonance," Group Schneider, Tech. Rep., 1998.
- [16] E. S. Thomas and B. Dorsett, "Underground distribution system design guide," National Rural Electric Cooperative Association, Tech. Rep., 2008.
- [17] C. W. Group, *Resonance and Ferroresonance in Power Networks*. Working Group C4.307, CIGRE, Technical Brochure 544, 2014.
- [18] A. B. Rasheed, J. de Jesus Chavez, S. Das, O. Probst, J. C. C. Ortega, and M. Popov, "Ferroresonance identification by pattern recognition of its characteristic wavelets," *Electric Power Systems Research*, vol. 251, p. 112220, 2026, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2025.112220>.
- [19] S. Santoso, R. C. Dugan, T. E. Grebe, and P. Nedwick, "Modeling ferroresonance phenomena in an underground distribution system," *International Conference on Power System Transients (IPST)*, 2001, Available: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2001/01IPST042.pdf.
- [20] S. Kulkarni and S. Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics Second Edition*. CRC Press, 2013.
- [21] M. A. Masoum and E. F. Fuchs, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines Second Edition*. Academic Press, 2015.
- [22] H. Radmanesh and G. Gharehpetian, "Ferroresonance suppression in power transformers using chaos theory," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 1–9, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.028>.
- [23] V. Milardić, A. Tokić, I. Uglešić, and A. Xemard, "Extraction of transformer saturation curve from ferroresonance measurements based on nelder-mead optimization method," *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109604, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109604>.
- [24] H. K. Høidalen, L. Prikler, and F. Peñaloza, *ATPDraw Users' Manual*, ATPDraw, 2024.
- [25] S. Jayalath and M. Hanif, "Generalized lcl-filter design algorithm for grid-connected voltage-source inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 1905–1915, 2017, DOI: [10.1109/TIE.2016.2619660](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2619660).



E. Hernández-Mayoral received the degree of Master and Doctor of Science in Electrical Engineering from the Technological Institute of Morelia in 2010 and 2015, respectively. He worked as a professor-researcher at the Universidad del Istmo in Oaxaca, Mexico. He is currently a Cathedra-CONACyT attached to the Institute of Renewable Energies of the UNAM. His main lines of research are the analysis of Energy Quality in the Interconnection of Wind Farms to the Electric Grid and Smart Electric Microgrids.



N. González-Cabrera received a degree in Electrical Engineering from the University of Guanajuato and the degree of Master and Doctor of Science in Electrical Engineering from the Graduate and Research Program in Electrical Engineering (PGIIE) of the ITM. He is currently an Associate Professor in the Department of Electrical Energy at Universidad Nacional Autónoma de México. His areas of interest are operation and control of electrical power systems.



Mario López Albiter (Student Member, IEEE) received his B.S. degree in Electrical Engineering from Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo in 2020, he is currently pursuing a M.Sc degree in Electrical Engineering in Instituto Tecnológico de Morelia. His current research interests include ferroresonance.



Vicente Torres García (Senior Member, IEEE) received the M.Sc. and D.Sc. degrees in Electrical Engineering from Instituto Tecnológico de Morelia in 2009 and 2015, respectively. He is currently with PGIIE, TecNM Campus, Morelia. His current research interests include electric power systems, distribution networks, harmonics, electromagnetic transients, and power systems protections.