

Medición de la impedancia en líneas de doble circuito con el circuito paralelo en funcionamiento

Dr. Simon Konzelmann, TenneT TSO
Moritz Pikisch, OMICRON electronics

Resumen

La medición de la impedancia de las líneas de doble circuito necesitaba siempre en el pasado la desconexión de ambos circuitos. Este estado rara vez es posible por motivos operativos, por lo que en la última reunión de usuarios se propuso un procedimiento que teóricamente permite la medición apagando un solo sistema. El procedimiento de medición se ha verificado desde entonces con una medición en el campo. En este artículo se tratan los resultados de esta medición.

Palabras clave

Línea de doble circuito, acoplamiento mutuo, protección de distancia, medición de la impedancia de línea, modelo de línea

1 Introducción

Ya se había propuesto un procedimiento en la reunión de usuarios de OMICRON de 2017 en Friedrichshafen que permitía determinar mediante medición la impedancia homopolar Z_0 y la impedancia de acoplamiento en el dominio de la secuencia homopolar Z_{0M} de una línea de doble circuito poniendo una sola línea fuera de servicio, consulte [1]. La verificación de este método mediante una medición real no pudo llevarse a cabo hasta la reunión de usuarios de 2017 y ahora se describe en este artículo. Se recomienda conocer [1] al leer este artículo para su mejor comprensión ya que no se repiten aquí en detalle los principios teóricos del nuevo método.

La verificación del método requiere una medición de la línea de doble circuito según el método que se ha utilizado hasta ahora, en el que ambos sistemas se ponen fuera de servicio a la vez. Esto normalmente sólo es posible antes de la puesta en servicio de una línea de doble circuito. Esta posibilidad se presentó antes de la puesta en servicio de una línea de doble circuito de 380 kV entre Altenfeld (Thuringia) y Redwitz de Rudolf (Baviera). Fue posible entonces realizar la medición primero con los dos circuitos desconectados a la vez con objeto de disponer de una base de comparación con la medición realizada con el procedimiento propuesto en [1] (capítulo 2). Después de eso, se energizó uno de los dos circuitos con el fin de obtener la

influencia típica de una línea paralela en funcionamiento (como en el capítulo 3).

Datos de la línea de doble circuito:

- Nivel de tensión: 380 kV
- Longitud:
 - 56,7 km en total
 - 25,7 km en la zona de TSO de 50 Hz
 - 31,0 km en la zona de TSO de TenneT
- Entre la subestación de Altenfeld (TSO de 50 Hz) y la subestación de Redwitz (TSO de TenneT)
- Designaciones de los dos circuitos: Línea 459 y línea 460

2 Medición con ambos sistemas desenergizados a la vez

Las siguientes mediciones se realizaron con ambos sistemas fuera de servicio a la vez:

- Total de la línea 459
- Total de la línea 460
- Línea 459 en la zona TSO de 50 Hz. Ambos sistemas de circuitos estaban conectados a tierra en el último polo en la zona TSO de 50 Hz.

Los valores correspondientes de la sección de la línea 459 en la zona de TenneT se calcularon mediante susstracción. La tabla a continuación resume los resultados de estas mediciones.

Tabella 1: Impedancias basadas en el método de medición convencional

Línea	Z_1 (R/X)	Z_0 (R/X)	Z_{0M} (R / X)
459 total	0,858 14,1	4,98 38,8	3,94 15,4
460 total	0,866 14,2	5,00 39,1	3,98 15,6
Zona 459 de 50 Hz	0,494 6,54	2,64 16,8	1,98 5,55
Zona 459 de TenneT (calculado)	0,364 7,56	2,34 22,0	2,00 9,76

3 Verificación del método alternativo

El método que se verifica en este artículo exige las siguientes mediciones para determinar Z_0 y Z_{0M} :

- Medición de la impedancia $Z_{ABC-G,Operación}$ del lazo ABC-G con el circuito paralelo activo.
- Determinación del factor entre la corriente aplicada en el lazo ABC-G y la corriente resultante en el circuito paralelo. Este factor se llama k en [1], ecuación 5, pero por razones prácticas se designa como f_{cp} (factor de la corriente en el sistema paralelo) de aquí en adelante.

La unidad CPC 100 con el equipo de prueba CP CU1 se conectó a la línea 460 para esto. En el momento de la medición, la línea 459 estaba en funcionamiento y bajo carga con una corriente operativa entre 1000 A y 1100 A. Debido a la alta carga y la longitud de la línea, una tensión inducida con valores superiores a 500 V habría surgido en el extremo abierto de la línea que habría superado la tensión admisible de la unidad de acoplamiento CP CU1. Se utilizaron limitadores de tensión especiales para reducir la tensión por debajo de 500 V y habilitar la medición a pesar de estas circunstancias.

Además, tuvo que calcularse la impedancia auxiliar $Z_{ABC[I-II]}$.

Los siguientes capítulos explican cómo se midió el factor f_{sp} y se calculó $Z_{ABC[I-II]}$, utilizando la medición de campo como base y comparándola con los resultados del capítulo 2.

4 Determinación del factor de corriente

Se aplicó una corriente I_m al lazo ABC-G del circuito 460 para determinar el factor f_{sp} . El sistema 459 estaba en funcionamiento en ese momento. La corriente I_p en el sistema 459 se midió al mismo tiempo. La medición se realizó en el conductor N del núcleo de medición del TC con el fin de determinar el total de las corrientes en los conductores trifásicos generados por el acoplamiento con el circuito paralelo. La corriente en el conductor N se midió con una pinza de corriente modelo K2 de Chauvin Arnoux, consulte [1].

El factor tiene el índice *dir* aquí, ya que es un factor *determinado directamente* a partir de una medición de corriente.

$$f_{cp_{dir}} = \frac{I_p}{I_m} \quad \text{Ec.1}$$

Con objeto de obtener un valor basándose en la medición de la impedancia del capítulo 2 para la comparación, el factor indirecto $f_{cp_{ind}}$ se calcula utilizando la siguiente ecuación (consulte [1], ecuaciones 8 y 9):

$$f_{cp_{ind}} = \frac{Z_0 - 3 * Z_{ABC-G,Operación}}{Z_{0M}} \quad \text{Ec.2}$$

Las dos factores $f_{cp_{dir}}$ y $f_{cp_{ind}}$ se determinaron a continuación tres veces, con los resultados que se muestran en la tabla 2:

Tabla 2: Resultados de las mediciones del factor de corriente

	$f_{cp_{dir}}$	$f_{cp_{ind}}$	$\varepsilon = \frac{f_{cp_{dir}}}{f_{cp_{ind}}}$
Medición 1	0,243 (-7,10°)	0,214 (-10,93°)	+13% (3,38°)
Medición 2	0,235 (-8,01°)	0,240 (-10,37°)	-2% (2,36°)
Medición 3	0,237 (-9,22°)	0,24 (-9,82°)	-1% (0,6°)

Explicación de las tres mediciones:

- **Medición 1:** $Z_{ABC-G,Operación}$ (la base para $f_{cp_{ind}}$) se midió aproximadamente media hora antes de que se midió $f_{cp_{dir}}$. Está claro que no se puede suponer que las impedancias de cierre Z_{T1} y Z_{T2} de la línea 459 en funcionamiento sean constantes en función del tiempo. Esto se indica mediante las diferencias entre los respectivos valores de $f_{cp_{dir}}$ y $f_{cp_{ind}}$, consulte [1], figura 2.
- **Medición 2:** Esto era un intento de realizar las dos mediciones tan rápidamente como fuera posible en sucesión, que da como resultado una discrepancia considerablemente menor.
- **Medición 3:** El sistema CPC 100 en la actualidad no cuenta con la determinación simultánea de $Z_{ABC-G,Operación}$ y $f_{cp_{dir}}$. Esto requeriría capacidad para realizar mediciones que utilizan los tres canales IAC, V1AC y V2AC al mismo tiempo. Se utilizó para esto, por lo tanto, el equipo DANEO 400, con el que era posible registrar simultáneamente I_m , V_m y I_p . Con una discrepancia en magnitud de sólo el 1% y un desplazamiento de fase de 0,6°, este es un alto grado

de exactitud de medición. Debe señalarse en este aspecto que el transformador de corriente de la línea 459 y la pinza de corriente presentan un error que, sin embargo, resulta ser claramente insignificante.

5 Cálculo de la impedancia auxiliar

Al igual que la impedancia $Z_{ABC-G,Operación}$ y el factor de corriente f_{cp} , también hay que determinar la impedancia auxiliar $Z_{ABC[I-II]}$ (consulte [1]). Esta impedancia no se puede medir en absoluto, ya que implicaría poner fuera de servicio a la vez ambos circuitos de la línea de doble circuito. Puesto que esta impedancia hace referencia a los conductores de 6 fases de los dos circuitos eléctricos y es independiente de la ruta a tierra, se puede determinar con gran precisión a partir de la geometría de los conductores.

Hay un total de tres posibilidades para el cálculo de la impedancia auxiliar:

- **Opción 1:** Calcular la impedancia de lazo de los 15 pares de conductores y luego resolver la matriz en consonancia. La resolución de la matriz no se describe con más detalle aquí por razones de complejidad. De todos modos, OMICRON ya ha preparado una plantilla no oficial de esto.
- **Opción 2:** Medición de las tres impedancias de lazo correspondientes en el circuito I y II. La medición de los lazos de L-L no se ve afectada por los circuitos paralelos todavía en funcionamiento. En función de las seis impedancias de bucle medidas, se pueden calcular las otras nueve impedancias. Este método se recomienda especialmente si existen discrepancias significativas entre la impedancia de secuencia positiva medida y la calculada Z_1 .
- **Opción 3:** Uso de Z_0 y Z_{0M} del software de análisis de sistemas eléctricos. La impedancia auxiliar se puede calcular luego a partir de Z_0 y Z_{0M} como se indica a continuación. La exactitud de la impedancia auxiliar es comparable a la de la impedancia de secuencia positiva, ya que solo la geometría del conductor de fase importa para esto.

$$\underline{Z}_{L1L2L3[I-II]} = \frac{2}{3} * Z_0 - Z_{0M} \quad \text{Ec.3}$$

La sección de la línea en la zona de TenneT se utilizó para la evaluación de la impedancia auxiliar. Esta sección de la línea tiene las siguientes características:

- Longitud: 31 km
- Diámetro de los conductores: 3,285 cm
- Distancia entre los conductores en el haz: 40 cm
- Número de conductores en el haz: 4

En función de estos datos y la disposición de los conductores de la línea de doble circuito, se obtienen los siguientes valores:

$$X_1 = 7,8\Omega \quad \text{Ec.4}$$

$$X_{ABC[I-II]} = 8,1\Omega \quad \text{Ec.5}$$

La medición de los bucles L-L proporciona la siguiente impedancia de secuencia positiva:

$$\underline{Z}_1 = 0,364 + j7,563 \quad \text{Ec.6}$$

Ahora se puede calcular el valor corregido de la reactancia auxiliar a partir de los valores medido y calculado de la reactancia de secuencia positiva:

$$X_{ABC[I-II],corr} = 7,85\Omega \quad \text{Ec.7}$$

El valor R de la impedancia auxiliar se calcula multiplicando el valor R de la impedancia de secuencia positiva por $\frac{2}{3}$. Este cálculo tan simple es posible porque el valor de R no depende de la distancia entre los conductores de fase.

$$R_{ABC[I-II]} = 0,243\Omega \quad \text{Ec.8}$$

El valor comparativo de la impedancia auxiliar ahora se puede calcular utilizando la ecuación 3 utilizando la medición del capítulo 2. Esto tiene como resultado:

$$R_{ABC[I-II]} = 0,226\Omega \quad \text{Ec.9}$$

$$X_{ABC[I-II]} = 8,16\Omega \quad \text{Ec.10}$$

Los valores R de la impedancia auxiliar de las ecuaciones 8 y 9 sólo difieren ligeramente entre sí. El valor X de la ecuación 7 solamente difiere un 4% del valor de referencia en la ecuación 10. Esto demuestra que la impedancia auxiliar puede determinarse con gran precisión en función de la geometría y la medición de la impedancia de secuencia positiva, por lo que Z_0 y Z_{0M} también se pueden determinar con gran precisión.

6 Comentarios sobre la aplicación práctica del método

6.1 Medición de la impedancia

Se ha utilizado aquí la plantilla para una línea de un solo circuito. Sin embargo, las mediciones de lazo para A-G, B-G y C-G pueden omitirse. Las cuatro mediciones A-B, B-C, A-C y ABC-G serán suficientes y se pueden calcular las impedancias de lazo a la frecuencia nominal. La impedancia de secuencia positiva calculada en la plantilla es correcta, ya que los sistemas paralelos no tienen ningún efecto significativo en la impedancia de secuencia positiva. El valor de la impedancia homopolar es (probablemente) demasiado pequeño, dependiendo de la influencia de la línea paralela activa.

6.2 Estimación de la influencia de la línea paralela activa

Mientras se aplicaba una corriente al lazo ABC-G, se midió la corriente con una pinza de corriente modelo K2 de Chauvin Arnoux en el conductor N del transformador de corriente de la línea paralela que estaba en funcionamiento. Esto puede hacerse con un cable de par trenzado para detectar el ángulo de fase. Sin embargo, para una estimación inicial, se puede medir la magnitud de la corriente sin un cable de par trenzado usando el medidor de tierra de mano HGT1 y la pinza de corriente. La experiencia indica que no hay disponibles por lo general cables de par trenzado. Además, según la ubicación de la medición de la corriente, la longitud necesaria del cable de prueba puede superar la longitud de todo cable disponible.

La magnitud del factor de corriente $|f_{cp}|$ se determina entonces como se describe a continuación:

$$|f_{cp}| = CTRatio * \frac{|I_{p,sec}|}{|I_m|} \quad \text{Ec.11}$$

- Relación de TC: relación del transformador de corriente
- $I_{p,sec}$: corriente medida con la pinza de corriente
- I_m : corriente aplicada

Además, debe calcularse la impedancia auxiliar. Sin embargo, esto se puede simplificar para una estimación aproximada inicial asumiendo que la impedancia auxiliar es $\frac{2}{3}$ de la impedancia de secuencia positiva.

Los cálculos necesarios se pueden realizar en EXCEL, por ejemplo. La figura siguiente muestra la plantilla no oficial preparada por OMICRON:

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G,Operation in Ω	1.128	11.776	11.83	84.53
Current Factor fcp	0.235	0.000	0.235	0.00
Auxiliary Impedance in Ω	0.57733	9.4	9.42	86.49
Z_0,apparent in Ω	3.38	35.33	35.49	84.53
Z_0,corrected in Ω	4.16	41.85	42.06	84.33
Error Z_0,apparent	-18.61%	-15.58%	-15.61%	0.20
Z_0M in Ω :	3.29	27.75	27.94	83.24

Figura 1: Ejemplo de una herramienta de cálculo basada en EXCEL

Notas de la figura 1:

- Los campos de entrada se muestran en color azul
- La impedancia homopolar aparente es 3 veces la impedancia $Z_{ABC-G,Operación}$, comparable a una medición de línea de un solo circuito
- La impedancia homopolar corregida se calcula según [1], ecuación 8
- El error de la impedancia homopolar aparente se refiere a la impedancia homopolar corregida
- La impedancia de acoplamiento se calcula según [1], ecuación 9

La figura 1 muestra una estimación aproximada inicial de la medición 2 de la tabla 2. $Z_{ABC-G,Operación}$ se toma directamente de la plantilla de EXCEL para las mediciones en líneas de circuito único. Se ha introducido un ángulo de 0° para el factor de corriente, ya que el ángulo está comprendido generalmente entre -20° y $+20^\circ$. Al intentar con diferentes ángulos en este rango se reveló que el error no cambiaba significativamente. Se supuso que la impedancia auxiliar es $\frac{2}{3}$ de la impedancia de secuencia positiva de la línea 460.

Se calcularon errores en el rango bajo de dos dígitos de R y X de la impedancia homopolar. El error real será algo menor, ya que la impedancia auxiliar se calculó de manera simplificada (específicamente: menor), por lo que el error fue un cálculo conservador. Es razonable en el caso de un error previsto tan alto llevar a cabo una corrección de la impedancia homopolar por medio de la determinación exacta del factor de corriente y de la impedancia auxiliar.

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G,Operation in Ω	1.128	11.776	11.83	84.53
Current Factor fcp	0.233	-0.033	0.235	-8.01
Auxiliary Impedance in Ω	0.57733	15.6	15.61	87.88
Z_0,apparent in Ω	3.38	35.33	35.49	84.53
Z_0,corrected in Ω	4.80	38.78	39.07	82.94
Error Z_0,apparent	-29.56%	-8.90%	-9.17%	1.59
Z_0M in Ω :	3.94	15.38	15.87	75.64

Figura 2: Determinación de las impedancias finales con la herramienta de cálculo

Notas de la figura 2: La determinación del factor de corriente por medición da un ángulo de $-8,01^\circ$. El valor R de la impedancia auxiliar corresponde a $\frac{2}{3}$ de la impedancia de secuencia positiva. El valor X de la impedancia auxiliar debe calcularse en función de la geometría de la línea. El valor X de la impedancia auxiliar se determina aquí a partir de Z_0 y Z_{0M} de la medición en el capítulo 2. Los resultados de Z_0 y Z_{0M} de la figura 2 coinciden bastante con los resultados del capítulo 2. Otra vez esto pone de manifiesto la capacidad de este método para eliminar la influencia de las líneas paralelas en funcionamiento.

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G, Operation in Ω	0.3	2.64	2.66	83.52
Current Factor fcp	0.007	0.000	0.007	0.00
Auxiliary Impedance in Ω	0.139	2.304	2.31	86.55
Z_0, apparent in Ω	0.90	7.92	7.97	83.52
Z_0, corrected in Ω	0.90	7.95	8.00	83.51
Error Z_0, apparent	-0.54%	-0.40%	-0.40%	0.01
Z_0M in Ω :	0.70	4.50	4.55	81.19

Figura 3: Ejemplo de la influencia despreciable de una línea paralela

La figura 3 muestra un ejemplo de una medición con la influencia despreciable de una línea paralela. La estimación se basa otra vez en la magnitud del factor de corriente y la suposición de que la impedancia auxiliar es $\frac{2}{3}$ de la impedancia de secuencia positiva. El error de la impedancia homopolar se ha calculado en este caso como inferior al 0,5%. Esto significa que no es necesaria una determinación exacta del factor de corriente. Sin embargo, tiene que calcularse la impedancia auxiliar con la mayor precisión posible con el fin de obtener la determinación más precisa posible de la impedancia de acoplamiento. El valor de Z_{0M} en la figura 3 no es correcto, por lo tanto.

7 Resumen

La medición descrita en este artículo ha demostrado la validez del método descrito en [1]. Se realizó mediante la comparación de la medición convencional de una línea de doble circuito, en la que ambos circuitos eléctricos tenían que apagarse a la vez, con la medición propuesta en [1]. Como resultado, las líneas de doble circuito se pueden medir correctamente ahora después de la puesta en servicio, cuando la desconexión de ambos circuitos es considerablemente más difícil que antes.

Referencias

- [1] Pikisch, M.: El significado del acoplamiento mutuo en el modelo de línea. OMICRON User Meeting 2017; Friedrichshafen

Sobre los autores



El Dr. Simon Konzelmann estudió ingeniería eléctrica en la Universidad de Ruhr Bochum de 1999 a 2004. De 2005 a 2009 fue miembro de la plantilla científica del Instituto de tecnología de alta tensión y EMC en la Universidad Técnica de Dortmund. De 2009 a 2011 trabajó en EnBW Regional AG (ahora Netze BW) como ingeniero de equipos eléctricos responsable de los transformadores de potencia y equipos de 110 kV de diseño estándar. En 2011 se trasladó a TenneT TSO GmbH en Bayreuth, donde ocupó distintos puestos antes de convertirse en el jefe del equipo de pruebas de los grupos de mantenimiento y servicio técnico de TenneT en 2017, responsable del funcionamiento de las subestaciones de TenneT en Baviera y Hesse.



Moritz Pikisch estudió ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Después de trabajar como instructor en OMICRON entre 2010 y 2013, pasó a un puesto de jefe de producto en 2014. En esta función, fue responsable de los equipos CPC 100 y CP CU1, con especial hincapié en la medición

de la impedancia de línea y las pruebas de los sistemas de tierra. Desde marzo de 2018 trabaja como ingeniero de aplicaciones para OMICRON Estados Unidos. En esta función, sigue siendo el contacto principal dentro de la empresa para mediciones de impedancia de línea y de tierra.

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 160 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.