



TRANSMISIÓN



Consideraciones para el ajuste del alcance resistivo de la protección de distancia

Rubén Guamán Medina.
Gerente de Operaciones y Mantenimiento de
ENDE Transmisión S. A.,



Resumen – El artículo presenta los criterios y los cuidados que se deben tener en el ajuste del alcance resistivo de la protección de distancia para líneas de transmisión. Una falla externa a una línea puede provocar la operación de la protección de distancia de la propia línea por zona 1 debido al efecto del propio sistema. Se re-evalúa los criterios utilizados para el ajuste del alcance resistivo de las zonas de operación.

Índice de Términos – Ajustes, criterios, distancia, homogeneidad, relé.

I. INTRODUCCION

La protección de distancia es la más ampliamente utilizada para la protección de líneas de transmisión en todo el mundo. Es una protección que con apoyo de canal de comunicaciones simple (ON/OFF) para complementar esquemas de teleprotección, brinda protección selectiva y despeje instantáneo a lo largo de toda la línea protegida. Se puede considerar que es una protección autónoma en esquemas escalonados sin teleprotección. Así mismo, también es considerada por muchos ingenieros como la protección más compleja en su diseño y ajuste, porque se debe ajustar para operar en todas las condiciones de despacho de una red, lo cual no siempre es sencillo.

Antes de la aparición de los relés de distancia con característica de operación cuadrilateral, los relés en su mayoría electromecánicos (EM) tenían una característica de operación tipo mho. En estos relés no era posible ajustar de forma independiente su alcance resistivo, quedando la misma definida por la forma circular de la característica mho Fig. 1(a). Con la aparición de los relés electrónicos estáticos y numéricos digitales se hizo posible la creación de la característica cuadrilateral Fig. 1(b), donde ya fue posible ajustar de forma independiente el alcance resistivo de la característica. En la literatura técnica es usual encontrar las ventajas de la característica cuadrilateral [1] tales como:

1. Proporciona mayor cobertura de resistencia a fallas que el elemento mho cuando está ajustado correctamente.
2. Proporciona disparo de alta velocidad de fallas resistivas cuando no hay un canal piloto presente
3. Son bastante inmunes a la conmutación de carga en línea
4. Son buenos para la protección de cables

Así mismo también pueden presentar las siguientes desventajas:

1. Se ven afectados por errores en las mediciones de corriente y voltaje cuando el alcance resistivo es mucho mayor que el alcance reactivo
2. Se ven afectados por la falta de homogeneidad del sistema.
3. Se ven afectados por el acoplamiento mutuo de secuencia cero en líneas paralelas.

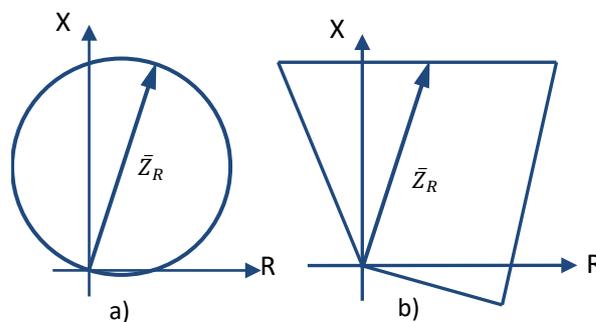


Fig. 1. Características relé de distancia, a) Mho, b) Cuadrilateral.

En líneas aéreas, la ventaja más aprovechada suele ser ajustar el alcance resistivo de tal forma de ver la mayor falla resistiva posible. Para este propósito cada empresa de acuerdo a su experiencia aplica sus criterios de ajuste. Para tener unos criterios de ajuste apropiados tanto para líneas largas y líneas cortas, es necesario conocer las condiciones que afectan la detección de fallas de alta impedancia.

II. EFECTO DE LA RESISTENCIA DE FALLA – MARCO TEÓRICO

La Fig. 2 muestra un sistema de doble fuente con una falla en el extremo de la línea (solo por simplicidad). Para este sistema veremos cómo resultan las ecuaciones de la medición de la impedancia aparente por el relé de distancia (21) tomando en cuenta la resistencia de falla.

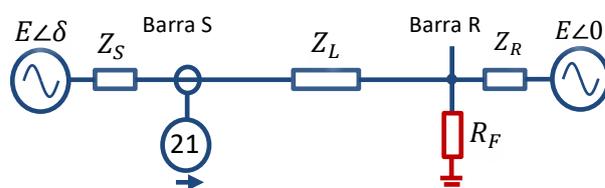


Fig. 2. Sistema con doble fuente.

La Fig. 3 muestra la interconexión de las redes de secuencia para red de la Fig. 1 para una falla monofásica a tierra. Aplicando la teoría del cálculo de corrientes de cortocircuito por el método de las componentes simétricas se llega a establecer que la impedancia aparente medida por el relé son dadas por las ecuaciones de la Tabla 1 para una falla monofásica a tierra [2].

Donde

R_F = Resistencia de falla

Z_1^{\wedge} = Impedancia de secuencia positiva de la línea

Z_0^{\wedge} = Impedancia de secuencia cero de la línea

C_1 = Factor divisor de corriente de secuencia positiva

C_2 = Factor divisor de corriente de secuencia negativa

C_0 = Factor divisor de corriente de secuencia cero

I_R = Corriente residual $a+b+c$

k_0 = Factor de compensación homopolar dado por

$$k_0 = \frac{Z_0' - Z_1'}{3Z_1'}$$

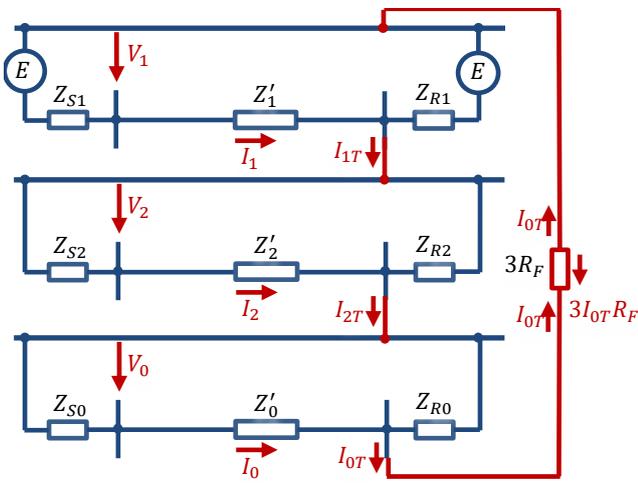


Fig. 3. Diagrama de redes de secuencia para una falla monofásica a tierra.

Las ecuaciones de la Tabla 1 han sido desarrolladas para mostrar el efecto de la resistencia de falla cuando se realiza la medición de la impedancia aparente por el enfoque \bar{V}/\bar{I} para los bucles de falla a tierra. Se evidencia que en los diferentes casos analizados la impedancia medida incluye la resistencia de falla afectada por un factor que es función de los factores de distribución de corriente de las redes de secuencia C_1, C_2 y C_0 . Donde en general C_1, C_2 y C_0 tienen la forma

$$C = \frac{Z_R}{Z_S + Z' + Z_R}$$

Donde

- Z_R = Impedancia fuente en la barra R
- Z_S = Impedancia fuente en la barra S
- Z' = Impedancia de la línea

Las ecuaciones de la Tabla 1 muestran que el punto de medición puede variar tanto por el valor de la resistencia de falla misma y las condiciones del sistema de potencia de doble fuente, es decir, el flujo de carga. Incluso en el caso de líneas radiales la medición no será perfecta, ya que para sistemas radiales tomando $C_1 = C_2 = C_0 = 1$, la ecuación del bucle AG de la Tabla 1 se transforma en

$$Z_{MEDIDO} = \frac{V_A}{I_{Acomp}} = Z'_1 + \frac{R_F}{1 + k_0} \quad (3)$$

Es importante notar que el desempeño del relé de distancia estará influenciado por esta medición si no se toman medidas para mejorar esta medición.

TABLA 1
IMPEDANCIA APARENTE MEDIDA CON RESISTENCIA DE FALLA

Bucle en Falla	\bar{V}	\bar{I}	\bar{Z}_{medido}
AG	\bar{V}_a	$\bar{I}_a + \bar{k}_0 \bar{I}_r$	$\frac{\bar{V}_a}{\bar{I}_a + \bar{k}_0 \bar{I}_r} = Z'_1 + \frac{3R_F}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0}$
BG	\bar{V}_b	$\bar{I}_b + \bar{k}_0 \bar{I}_r$	$\frac{\bar{V}_b}{\bar{I}_b + \bar{k}_0 \bar{I}_r} = Z'_1 + \frac{3R_F}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0}$
CG	\bar{V}_c	$\bar{I}_c + \bar{k}_0 \bar{I}_r$	$\frac{\bar{V}_c}{\bar{I}_c + \bar{k}_0 \bar{I}_r} = Z'_1 + \frac{3R_F}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0}$

A. El flujo de la pre-falla

El efecto del flujo de carga entre los sistemas de la Fig. 2 se manifiesta en los valores que pueden adoptar las impedancias fuente, que modifican los factores de distribución de corriente C_1, C_2 y C_0 . Estos factores modifican el valor de la impedancia aparente calculada por el relé. El parámetro práctico para establecer las condiciones del efecto del flujo de carga es el ángulo δ entre las tensiones de las fuentes. La Fig. 4 muestra la impedancia medida cuando se tiene un flujo de exportación e importación de la barra S de la Fig. 2. Se puede observar que la impedancia medida es alterada por el ángulo que toma la impedancia de falla $R_F \cdot C$. Este efecto hará que el relé sobrealcance o subalcance como veremos más adelante.

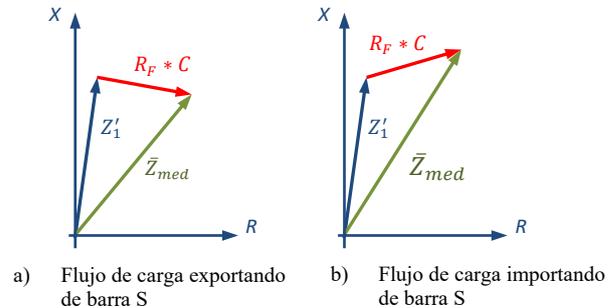


Fig. 4. Sobre-alcance y sub-alcance de la impedancia medida por flujo de carga.

El efecto del ángulo de la resistencia de falla y el ángulo δ ha sido estudiado en [3]. La Fig. 5 muestra el resultado de un ejemplo numérico aplicando la medición de la impedancia en función de R_F y δ [4].

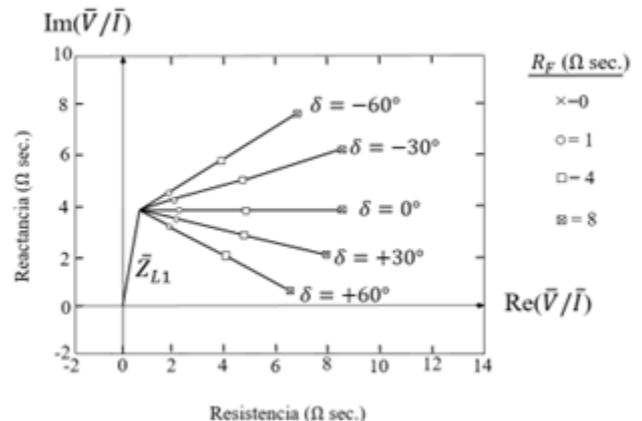


Fig. 5. Efecto de R_F y δ en la medición de la impedancia

A. La no homogeneidad del sistema

Un sistema es homogéneo cuando los ángulos de la impedancia de la línea y la impedancia de la fuente son iguales en las tres redes de secuencia. Un sistema no es homogéneo cuando los ángulos de la impedancia de línea y de fuente no son los mismos. En un sistema no homogéneo, el ángulo de la corriente total en la falla es diferente al ángulo de la corriente medida en el relé. Esto también conduce a errores en la medición de la impedancia.

CRITERIOS DE AJUSTE TÍPICOS DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Los criterios de ajuste de los alcances de zona de la protección de distancia se encuentran bastante difundidos en la literatura técnica, y así mismo, son relativamente variados. En los relés con característica mho solo es necesario ajustar el alcance de la unidad mho, careciendo de un ajuste independiente de alcance resistivo. En cambio, para las unidades con característica cuadrilateral, adicionalmente al ajuste de alcance reactivo es necesario ajustar de forma independiente el alcance resistivo. Para el ajuste del alcance resistivo se debe observar los siguientes criterios.

A. Criterio de carga máxima

El criterio de carga máxima establece que el ajuste del alcance resistivo debe ser menor a la mínima impedancia de carga. La mínima impedancia de carga es calculada con la ecuación (4). La selección de la corriente máxima normalmente, es seleccionada entre la máxima corriente que puede soportar el componente, incluso en condiciones de emergencia, como es el caso de una sobrecarga temporaria; o la corriente nominal del transformador de corriente (CT). El criterio de seleccionar la corriente nominal del CT que protege la línea es un criterio más conservador pero impreciso. ENDE Transmisión (ETR) ha adoptado el criterio de la máxima corriente que puede soportar la línea, esto se lo conoce también como la potencia declarada al mercado para la línea en cuestión. A esta corriente máxima, ETR le afecta por un factor de 1.2 para tomar en cuenta posibles sobrecargas temporarias de la línea. Obedeciendo al criterio de que el ajuste debe ser menor a la mínima impedancia, ETR ha adoptado un factor de 0.45 de la impedancia mínima, Es decir, se calcula un alcance resistivo igual al 45% de la impedancia mínima Z_{Lmin} .

Con este criterio se pretende que en condiciones normales de la impedancia de carga no entre en zona de operación. Se debe tener cuidado en la forma en que cada relé trata este ajuste. Algunos relés especifican este ajuste como ohmios por loop y otros como ohmios por fase. El ajuste calculado por (4) es ohmios por fase. Si se utiliza ohmios por loop, entonces, el ajuste será el doble para los loop fase-fase. La última práctica de ETR es ajustar los loops fase-tierra de acuerdo con el criterio de la mínima impedancia y para los loops fase-fase ajustar al 50% de este valor.

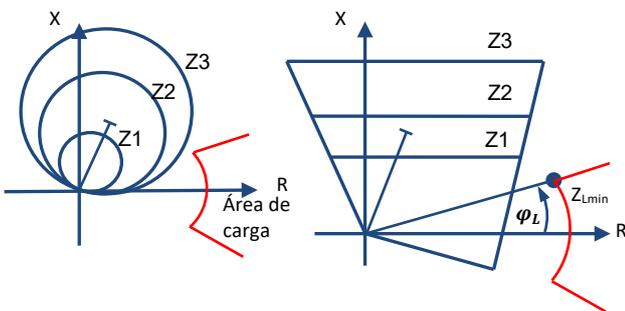


Fig. 6. Características mho y cuadrilateral con área de carga

$$Z_{Lmin} = \left(\frac{V_L / \sqrt{3}}{I_{Lmax}} \right) \quad (4)$$

Donde

V_L = Tensión nominal mínima línea - línea

I_{Lmax} = Máxima Corriente de Carga

Z_{Lmin} = Impedancia mínima de carga

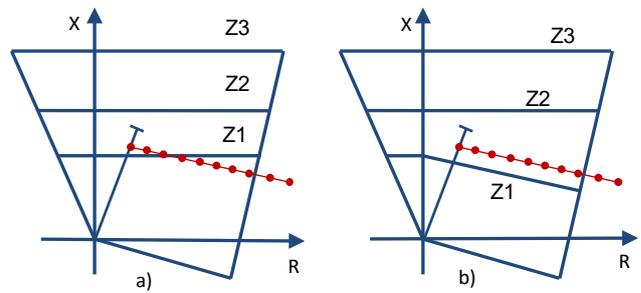


Fig. 7. Puntos de falla por efecto de R_F y δ sobre característica cuadrilateral

B. Criterio para ajuste del alcance resistivo de diferentes zonas

El criterio de la mínima impedancia, no hace diferencia en el ajuste para las 3 zonas típicas hacia delante que tiene una protección de distancia, ver Fig. 6. De hecho, ETR en sus criterios de ajuste establece que todas las zonas tendrán el mismo ajuste de alcance resistivo [5].

Ajustar todas las zonas con un mismo alcance resistivo no siempre conduce a mejores resultados. El caso de mayor cuidado son las líneas cortas, donde el ajuste reactivo de Z1 es pequeño. En estos casos si se aplica el criterio de impedancia mínima, puede conducir a alcances resistivos bastante grandes. Esto puede conducir a problemas de incursión de fallas de alta impedancia que están en Z2 hacia Z1, debido al efecto del ángulo δ y la no homogeneidad del sistema, provocando disparo instantáneo. En la Fig. 7(a) se muestra este efecto sobre la característica cuadrilateral, los puntos representan fallas con diferentes valores de resistencia de falla.

En la unidades con característica mho el efecto del ángulo δ y la no homogeneidad del sistema no es tan acentuado como en la característica cuadrilateral. Esto debido a la forma de la característica mho, que hace que el alcance resistivo no vaya más allá del mho. Así mismo, el alcance resistivo de la unidad mho es diferente para cada zona, ver Fig. 6(a).

En el ajuste del alcance resistivo especialmente de líneas cortas, se debe tener cuidado en evitar alcances resistivos desproporcionados, resultado del cálculo de la impedancia mínima. Para evitar estos alcances resistivos desproporcionados, algunos operadores aplican un criterio que limita el alcance resistivo máximo a 5 veces al alcance reactivo de la zona en cuestión.

Otro criterio que ayuda para definir el alcance resistivo especialmente en líneas cortas es comparar el alcance resistivo que se está deseando aplicar con un hipotético alcance resistivo de una característica mho de similar alcance reactivo. Esto nos dará una idea de cuan extenso es el alcance resistivo que estamos deseando aplicar.

C. Ajuste del ángulo de no homogeneidad del sistema

Muchos relés numéricos modernos disponen de la posibilidad de acomodar el ángulo del segmento reactivo de su característica cuadrilateral. Esto posibilita acomodar este ángulo al ángulo de falla que se puede esperar, como se muestra en Fig. 7(b). El cálculo de este ángulo naturalmente

te solo es viable con el uso de programas de simulación. Para este caso se deben simular fallas con diferentes impedancias de fallas y en diferentes escenarios, con cuyos resultados se debe seleccionar el mejor valor del ángulo de corrección de la no homogeneidad del sistema.

Este es un criterio muy recomendable si se desea evitar incursiones del punto de falla en zonas de operación por efecto del ángulo δ y la no homogeneidad del sistema.

D. Criterio de validación de ajustes

El proceso de ajuste de una protección de distancia comienza con el cálculo manual de los ajustes de cada zona siguiendo los criterios de cada empresa. Estos ajustes en su mayoría pueden ser realizados de forma manual o con ayuda de hojas de cálculo u otra herramienta. ETR usa MathCad para iniciar con estos cálculos. A estos ajustes se los denomina comúnmente ajustes preliminares y no toman en cuenta efectos del sistema como: alimentaciones intermedias (infeed), resistencias de falla, escenarios de generación, etc. Por este motivo, es estrictamente necesario cargar estos ajustes preliminares en un software de simulación y validar los mismos, simulando diferentes tipos de falla.

Si bien en la actualidad es práctica común realizar estudios de coordinación de protecciones con ayuda de un software, el abanico de casos de fallas es bastante grande, por lo tanto, existe la posibilidad de que algún caso en particular no se haya simulado. Por ejemplo, en el caso de ETR pese a que tiene procedimientos para realizar sus estudios de coordinación de protecciones, se han presentado caso de fallas que no habían sido abordados ni previstos en las simulaciones del estudio.

Bajo el criterio de validación es necesario realizar la mayor cantidad de simulaciones posible, al margen de los clásicos barridos de cortocircuitos a lo largo de un camino de falla para generar los diagramas tiempo-distancia. Es necesario tomarse el tiempo necesario para simular fallas aisladas en diferentes puntos del sistema y ver la respuesta de las protecciones de distancia en tiempo y en el diagrama R-X.

En la experiencia de ETR, fallas de alta impedancia en barras de MT de un transformador de rebaje al final de la línea, han provocado la operación de Z2, pese a que de acuerdo al criterio aplicado la Z2 está ajustada solo para ver fallas hasta el 50% de la impedancia del transformador. Un par de casos serán presentados en la segunda parte de este artículo como continuación de este tema.

IX. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha analizado los efectos que se deben tomar en cuenta al momento de realizar los ajustes de alcance resistivo de las zonas de la protección de distancia. Se ha expuesto los fundamentos teóricos sobre los que se basan los criterios analizados. El tema abordado se puede resumir en los siguientes aspectos:

La medición de la impedancia de falla es afectada por la resistencia de falla R_f y el ángulo δ entre las tensiones de

las barras de los extremos de la línea. El ángulo δ a su vez esta determinado por las condiciones de exportación o importación de potencia en el punto donde está instalado el relé.

La no homogeneidad del sistema también afecta en el ángulo que toma la impedancia de falla. Calcular este ángulo solo es viable con el uso de software de simulación.

Se han expuesto los criterios de ajuste del alcance resistivo más utilizado y relevantes en la experiencia de ETR. Sin embargo, la determinación de un ajuste en particular debe atender a todos estos criterios y buscar un balance si hubiera contraposición de los mismos, y, sobre todo, realizar las validaciones con simulaciones para generar los ajustes finales.

Así mismo, no se debe olvidar que la protección de distancia esta complementada con la protección de sobrecorriente a tierra para fallas de alta impedancia que no puedan ser detectadas por la protección de distancia.

Referencias

- [1] J. Mooney y J. Peer, Application guidelines for ground fault protection, 24th Annual Western Protective Relay Conference, 1997.
- [2] J. M. Ordacgi Filho, Curso Filosofía de Protección de Líneas de Transmisión, Río de Janeiro: SEL University, Mayo 2004.
- [3] J. Roberts, A. Guzman y E. O. Schweitzer, III, Z=V/I Does Not Make a Distance Relay, Spokane, WA: 20th Annual Western Protective Relay Conference, 1993.
- [4] S. University, PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION.