



VII/CE-B5-01

OBTENCIÓN DE FÓRMULAS DE CURVAS DE TEMPORIZACIÓN NO PADRONIZADAS DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DEL TIPO TIEMPO DEPENDIENTE.

Elisandro E. Rodríguez B.

Administración Nacional de Electricidad.

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo presenta metodología y resultados encontrados en la obtención de fórmulas que representan el comportamiento de curvas de temporización (TMS) no padronizadas de relés de sobrecorriente del sistema de potencia de la ANDE.

Inicialmente, serán detallados motivos principales que llevaron a la elaboración de esta tarea, para posteriormente introducir conceptos de Algebra Lineal usados para la adquisición de las mencionadas fórmulas.

A continuación, se expondrán resultados y respectivos comentarios de cada tipo de relé estudiado. Finalmente, se presentaran detalles y conclusiones del trabajo.

PALABRAS CLAVES

Curvas temporizadas (TMS), Método de Mínimos Cuadrados Ponderados, Puntos levantados, Puntos Calculados .

INTRODUCCIÓN

Considerando la cantidad existente de relés de sobrecorriente de tiempo dependiente en el Sistema ANDE, que poseen características que no se adecuan a normas como IEC o ANSI por ejemplo, se vio la necesidad de encontrar fórmulas que reflejan el comportamiento tiempo-corriente de los mismos, lo cual conllevará a reducir tiempo de estudios de ajustes de protecciones, cuando estos son utilizados.

En la figura a seguir, se observa la cantidad de dispositivos existentes en la ANDE con las características mencionadas.

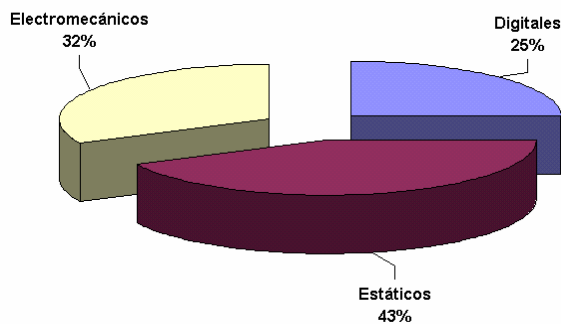


Figura 1. Porcentaje de Relés de Sobrecorriente por tecnología.

FORMULA DE CURVAS ANSI

Para curvas de relés de sobrecorriente de tiempo dependiente, la norma ANSI C37.112 ofrece la siguiente ecuación:

$$T = \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pkp}} \right)^E - 1} + B \right] * \left(\frac{14n-5}{9} \right) \quad (\text{Ec.01})$$

Donde:

T= Tiempo de operación

n= Ajuste de tiempo

I= Corriente de falla o estudio.

I_{pkp}= Corriente de Pickup

A, B, E= Constantes.

Para esta labor, a fin de facilitar los cálculos fue considerado que:

$$\left(\frac{14n-5}{9} \right) = 1 \quad (\text{Ec.02})$$

Por lo anterior:

$$T = \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pkp}} \right)^E - 1} + B \right] \quad (\text{Ec03})$$

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

Datos proporcionados por los fabricantes.

De las curvas de temporización proveídas por los fabricantes pueden ser extraídos varios puntos de tiempo- corriente, dichas curvas en adelante serán designadas con el nombre de curvas levantadas, las cuales proporcionarán las siguientes matrices:

Matriz que relaciona corrientes de falla y p_{kp} y Matriz que corresponde a los tiempos de la curva levantada

$$I = \begin{bmatrix} \left(\frac{I_1}{I_{pkp1}}\right) \\ \left(\frac{I_2}{I_{pkp1}}\right) \\ \cdot \\ \left(\frac{I_{np}}{I_{pkpnp}}\right) \end{bmatrix} \quad (Ec04) \quad t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \cdot \\ t_{np} \end{bmatrix} \quad (Ec05)$$

np es el número de puntos levantados

Método de Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP) [4]

La formulación clásica de este problema, fue inicialmente propuesta por C. F. Gauss, 1795.

La presentación de este método es hecha con ayuda de la figura a seguir, en la cual están indicadas las coordenadas (x_i, y_i) en el espacio R^2 que representan el conjunto F de observaciones (puntos levantados) sobre un dado experimento, es decir:

$$F = [(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)]$$

x_i representa el instante en que la observación y_i fue realizada.

Basados en la observaciones realizadas, el problema de hacer estimativas o previsiones (encontrar puntos calculados) en un dado instante X puede ser contornado a través de una función $y = f(x)$ que se ajuste mejor a los pares ordenados (x_i, y_i) en F, de tal forma que el experimento puede ser estimado en cualquier instante no observado X, cuyo resultado puede ser evaluado por intermedio de la función $Y = f(X)$.

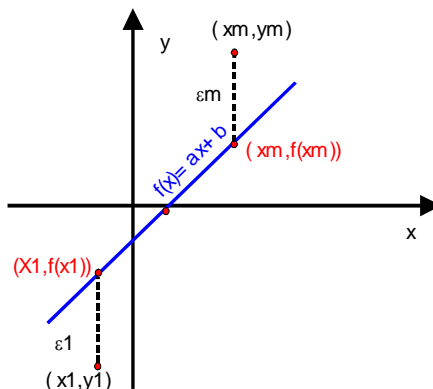


Figura 2: Problema de regresión lineal

La ecuación de la función del ejemplo mostrado en la figura anterior es del tipo $f(x) = ax + b$. Por lo tanto, el problema se resume en encontrar los coeficientes a, b de la recta que mejor refleja los pares ordenados (x_i, y_i) en F, para que la suma de los cuadrados de las distancias verticales, o sea, los errores (residuos) $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m$ sean mínimos. La distancia de (x_i, y_i) a la recta $f(x) = ax + b$ puede ser conocida a través de la expresión:

$$\varepsilon_i = |f(x_i) - y_i| = |ax_i + b - y_i| \quad (Ec06)$$

Siendo así, el problema puede ser resuelto mediante la minimización de funciones cuadráticas del error en el sentido de determinar los valores de los coeficientes a, b de la ecuación de la recta:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \quad (Ec07)$$

Una de las primeras técnicas para el cálculo del valor mínimo de una función consiste en determinar la solución del sistema de ecuaciones descripto a seguir:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\partial b} = 0 \quad (\text{Ec08- Ec09})$$

Agrupando términos semejantes y escribiendo en forma matricial:

$$F = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \cdot & \cdot \\ x_m & 1 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_m \end{bmatrix} \quad (\text{Ec10})$$

Donde las variables de estado serán dadas por la matriz:

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (\text{Ec11})$$

La solución del sistema especificado anteriormente puede ser obtenida a través del Método de la Ecuación Normal de Gauss (ENG).

¿Cómo fue implementado el MCP?

Para adecuar este método a los requisitos de este trabajo, los siguientes procedimientos fueron realizados:

a- Fue estimado un valor para la constante E en la (Ec03):

$$x(k,1) = \frac{1}{I(k,1)^E - 1} \quad (\text{Ec12})$$

donde:

$I(k,1)$ = valores de la Ec04

$k = 1, 2, \dots, np$

Así, las matrices F e y serán:

$$F(k,1) = x(k,1)$$

$$F(k,2) = 1$$

$$F = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \cdot & \cdot \\ x_{np} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec13})$$

Donde:

x_1, x_2, \dots, x_{np} = valores de la Ec12.

$$y(k,1) = t(k,1)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} t1 \\ t2 \\ \vdots \\ tnp \end{bmatrix} \quad (\text{Ec14})$$

Donde:

$t1, t2..tnp =$ valores de la (Ec05).

b- A seguir fue aplicado ENG, a fin de obtener las constantes A y B de la (Ec03):

$$\mathbf{G} = \mathbf{F}^T * \mathbf{F} \quad (\text{Ec15}) \quad \mathbf{b} = \mathbf{F}^T * \mathbf{y} \quad (\text{Ec16})$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{G}^{-1} * \mathbf{b} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{Ec17})$$

c- Usando los valores de (Ec17) en las (Ec12) y (Ec03):

$$\mathbf{T}(k,1) = A * \mathbf{x}(k,1) + B \quad (\text{Ec18})$$

donde:

$$k = 1, 2, \dots, np$$

En forma matricial

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ \vdots \\ Tnp \end{bmatrix}$$

Siendo:

$T1, T2..Tnp$, tiempos de la curva calculada

Con esto, ahora se cuenta con dos curvas de temporización, una levantada con puntos $I \times t$, y la otra calculada $I \times T$, las cuales deben ser contrastadas y aproximadas, mediante el método de errores e intentos para valores estimados de la constante E.

Desvío Padrón Robusto

Si bien, las diferencias entre los tiempos levantados y calculados ($\text{Dif}(T-t)$), deben ser analizados de acuerdo al punto correspondiente de la curva, pues, la escala usada para trazar las mismas es la $\log \times \log$, la cual posee pasos menores para tiempos menores y consecuentemente pasos mayores para tiempos mayores. El procedimiento adoptado para obtener una medida de los mismos fue el de cálculo de la "Median Absolute Deviation from the Median" MAD

$$\text{MAD} = \text{bm} * 1.4826 *$$

mediana $| \text{Dif}(T-t) - \text{mediana Dif}(T-t) |$ (Ec19)

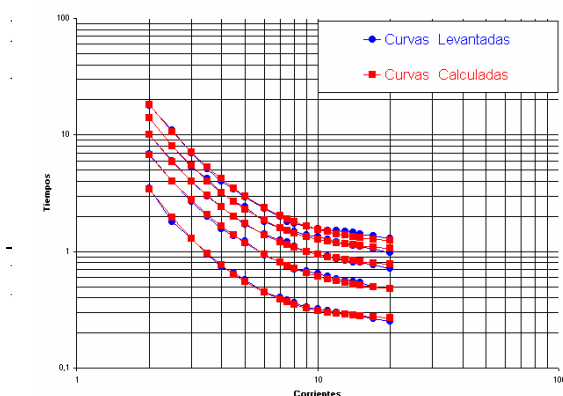
Donde:

$$\text{bm} = np / (np - 0.8) \quad p / np > 9$$

$\text{Dif}(T-t) =$ matriz diferencia entre tiempos levantados y calculados.

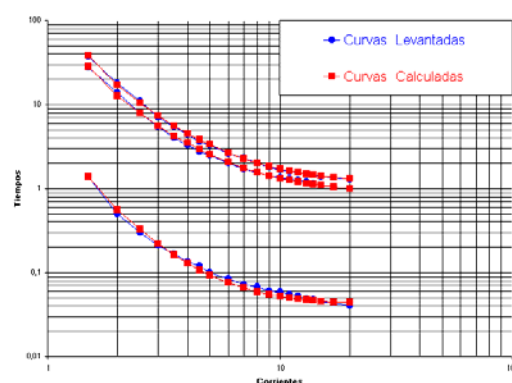
La condición asumida como aceptable fue $\text{MAD} < 0.1$, es decir, para todo desvío padrón robusto menor que 100 ms las formulas de TMS calculadas cumplen los requisitos esperados.

Curvas Relés CDG 13/ 23



entre

Curvas Relés CO 9



YO

Figura 3. Algunas curvas de relés CDG 13/23 y CO9.

HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DE TIEMPOS.

En el software Microsoft Excel®, a fin de facilitar consultas rápidas, fueron aglutinadas curvas encontradas mediante el método descrito anteriormente, así como, la de las protecciones cuyas TMS responden a padrones según normas. Dicha herramienta es mostrada en la figura a seguir.

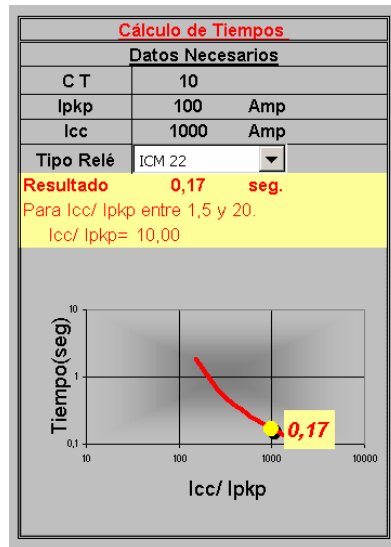


Figura 4. Cálculo de tiempos de TMS para 30 tipos de protecciones de sobre corriente de tiempo dependiente.

CONCLUSIONES

Merced a herramientas informáticas y matemáticas se lograron encontrar las fórmulas de las TMS de los relés del tipo CDG, CDV 22, ICM 22, CO 9, TJM, 7SK88, RXID, ICM, IAC 53, RIT 3EI, M1AM, además de los reconectores ESV 2712 y Mac Graw Edison; con diferencias entre los valores levantados y calculados dentro de los márgenes esperados ($MAD < 0.1$).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Da Silveira P.M., Mohallem C. A., 2004. "Topicos em Protecao de Sistemas Elétricos", Apostila do Curso CESE Transmissao- FUPAI- Itajubá.
- [2] DOPEL2. Carpeta de curvas de relés de sobrecorriente.
- [3] Marques J.J. "Interpolacao da Curva de Tempo Inverso"
- [4] Pires R.C., 2004. "Topicos Especiais de Algebra Linear", Apostila do Curso CESE Transmissao- FUPAI- Itajubá.