

[ANEXO D]

COORDINACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN

La coordinación de protección de los dispositivos dependerá en gran medida, del sitio destino donde se necesite que entre en operación la S/E móvil IEM 26-1737, sin embargo se expondrá una programación base con la cual estarán configurados los equipos de protección de esta unidad, para calcular los valores de operación de los equipos de protección presentes en la móvil, se consideraran las siguientes configuraciones:

- Subestación Radial tipo I.
- Subestación Radial con funcionamiento en paralelo de otros transformadores.

Se tomaran en cuenta primeramente los niveles de corrientes que manejan estos equipos, tanto para el lado de alta tensión donde se encuentra el módulo híbrido marca ABB, serie PASS MO SBB (Interruptor y seccionador, con llave de aterramiento), controlado a través del relé multifunción modelo MULTILIN 745 ubicado en la Celda de Protección Medición y Control y para el lado de baja tensión donde se implementara el reconectador marca Hawker Siddeley Switchgear (HSS) modelo HORIZON 38kV Outdoor Circuit Breaker, el cual estará accionado por su tablero de control y el relé de supervisión PANACEA. Para el caso del reconectador, a fin de visualizar el conjunto de funciones asociadas directas o indirectamente con este equipo conectado a la salida de la S/E móvil IEM con una tensión de operación de 13,8 kV, se tomaran en cuenta los requerimientos de coordinación impuestos por la protecciones típicas de los circuitos de distribución mediante el uso de relés con características extremadamente inversas, basándonos en la norma CADAFE DNS-03 [29].

D.1 Cálculo de la curva de daño del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737

Mediante la curva ANSI para daños en los transformadores, la cual representa la máxima capacidad que puede soportar el transformador sin sufrir daños cuando es sometido a esfuerzos dinámicos y térmicos ocasionados por un cortocircuito. Para calcular esta curva ANSI es necesario clasificar a los transformadores como se indica en la Tabla D1.

Tabla D1. Categorías de los transformadores

CATEGORÍA DEL TRANSFORMADOR		
kVA Nominales del transformador		
Categoría	Monofásico	Trifásico
I	5 – 500	15 – 500
II	501 – 1667	501 – 5000
III	1668 – 10000	5001 – 30000
IV	Arriba de 10000	Arriba de 30000

De acuerdo a la Tabla D1 la categoría del transformador de potencia de la móvil bajo estudio es III, ya que su potencia en kVA es de 30000 kVA o 30 MVA, las curvas para cada categoría se exponen en la Figura D1.

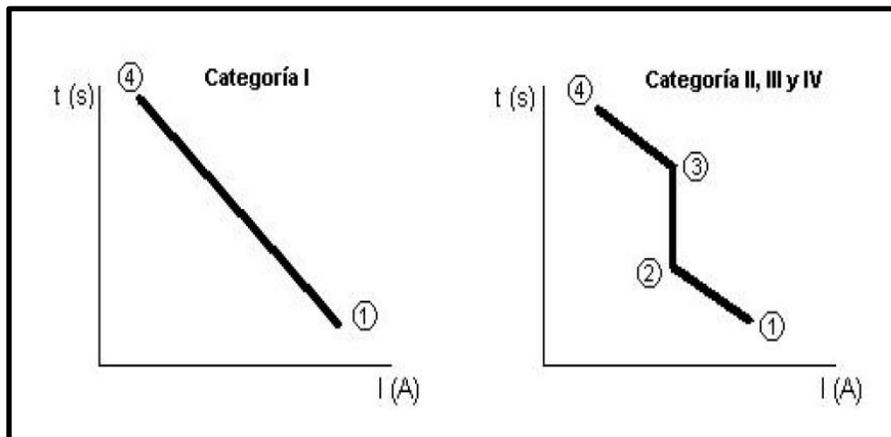


Figura D1. Curva ANSI para transformadores.

Cada uno de los puntos que se aprecian en la Figura D1, se deben calcular en base a la Tabla D2, esta nos indica las características de tiempo y corriente a los cuales se deben calcular los puntos de la curva ANSI, tomando en cuenta la categoría del transformador.

Tabla D2. Valores de tiempo y corriente por categoría de transformador

Punto	Categoría del Transformador	Tiempo [s]	Corriente [A]
1	I	$1250*(Z_T)^2$	I_{PC}/Z_T
	II	2	I_{PC}/Z_T
	III, IV	2	$I_{PC}/(Z_T + Z_S)$
2	II	4,08	$0,7*I_{PC}/Z_T$
	III, IV	8,0	$0,5*I_{PC}/(Z_T + Z_S)$
3	II	$2551*(Z_T)^2$	$0,7*I_{PC}/Z_T$
	III, IV	$5000*(Z_S + Z_T)^2$	$0,5*I_{PC}/(Z_T + Z_S)$
4	I, II, III, IV	50	$5*I_{PC}$

Dónde: I_{PC} : Corriente a plena carga del transformador en base a su capacidad en kVA.

Z_T : Impedancia del transformador en por unidad (p.u.) en base a los kVA.

Z_S : Impedancia de la fuente en por unidad (p.u.) en base a los kVA.

Dependiendo de la conexión del transformador, los valores de la curva deben multiplicarse por el factor ANSI de la Tabla D3, en la que se aprecian los diferentes tipos de conexiones.

Tabla D3. Factor de multiplicación ANSI para impedancias.

Conexión del Transformador	Factor ANSI
Delta – Delta	0,87
Delta – Estrella	0,58
Delta - Estrella (Con Neutro)	1,00
Estrella – Estrella	1,00
Estrella – Estrella (Con Neutro)	1,00
Estrella (Con Neutro) – Estrella	1,00
Estrella (Con Neutro) – Estrella (Con Neutro)	1,00
Estrella (Con Neutro) – Delta	1,00
Estrella – Delta	1,00

Para poder realizar los cálculos de los puntos ANSI normativos de la curva de daño, la corriente nominal (I_N) es igual a la corriente a plena carga (I_{PC}), y se calcula mediante la ecuación (D.1).

$$I_N = I_{PC} = \frac{\text{Potencia (kVA)}}{\sqrt{3} * \text{Tensión}_{\text{nominal}}(\text{kV})} \quad (\text{D.1})$$

Alta tensión: $I_{PCA} = \frac{30000}{\sqrt{3} * 66,395} = 150,613 \text{ A} \quad (\text{D.2})$

Baja Tensión: $I_{PCB} = \frac{30000}{\sqrt{3} * 7,967} = 1255,109 \text{ A} \quad (\text{D.3})$

El porcentaje de las impedancias del transformador y de la fuente, se obtienen de datos obtenidos en el ANEXO C para el caso del transformador y la impedancia de la fuente es suministrada por la empresa, los cuales se expresan a continuación:

$$Z_{\text{Transf}} (\%) = Z_T = 11,095/100 = 0,11095 \text{ p.u.}$$

$$Z_{\text{Fuente}} (\%) = Z_S = 2,5/100 = 0,025 \text{ p.u.}$$

Para el lado de alta tensión (115 kV), de acuerdo a la conexión del transformador Estrella (Con neutro) - Estrella (Con neutro) (YNyn0) y los datos nominales podemos calcular los valores de tiempo y corriente para los puntos, en el lado de alta tensión son:

Punto 1: **Tiempo:** 2 seg

$$\text{Corriente: } C_A = \frac{I_{PCA}}{Z_T + Z_S} = 1107,856 \text{ A} \quad (\text{D.4})$$

Punto 2: **Tiempo:** 8 seg

$$\text{Corriente: } C_B = \frac{0,5 * I_{PCA}}{Z_T + Z_S} = 553,928 \text{ A} \quad (\text{D.5})$$

Punto 3: **Tiempo:** $t_A = 5000 * (Z_T + Z_S)^2 = 92,412 \text{ seg}$ (D.6)

Corriente: $C_C = \frac{0,5 * I_{PCA}}{Z_T + Z_S} = 553,928 \text{ A}$ (D.7)

Punto 4: **Tiempo:** 50 seg

Corriente: $C_D = 5 * I_{PCA} = 753.065 \text{ A}$ (D.8)

De acuerdo a los datos obtenidos, tomaremos el valor de corriente del punto 3 (553,928 [A]) y el valor de tiempo del punto 4 (50 [seg]), como fronteras o límites para nuestro caso ya que los valores de estos puntos se excede el valor de tiempo del punto 3 respecto al 4, y la corriente de 4 supera la de 3. El valor límite lo tomaremos para un tiempo de 1000 [seg] y será 1,2 veces la corriente nominal.

Para el lado de baja tensión (13,8 kV), de acuerdo a la conexión del transformador Estrella (Con neutro) - Estrella (Con neutro) (YNyn0) y los datos nominales podemos calcular los valores de tiempo y corriente para los puntos, en el lado de baja tensión son:

Punto 1: **Tiempo:** 2 seg

Corriente: $C_A = \frac{I_{PCB}}{Z_T + Z_S} = 9232,137 \text{ A}$

Punto 2: **Tiempo:** 8 seg

Corriente: $C_B = \frac{0,5 * I_{PCB}}{Z_T + Z_S} = 4616,068 \text{ A}$

Punto 3: **Tiempo:** $t_B = 5000 * (Z_T + Z_S)^2 = 92,412 \text{ seg}$

Corriente: $C_B = \frac{0,5 * I_{PCB}}{Z_T + Z_S} = 4616,068 \text{ A}$

Punto 4: **Tiempo:** 50 seg

Corriente: $C_B = 5 * I_{PCB} = 6275,545 \text{ A}$

De acuerdo a los datos obtenidos, tomaremos el valor de corriente del punto 3 (4616,068 [A]) y el valor de tiempo del punto 4 (50 [seg]), como fronteras o límites para nuestro caso ya que los valores de estos puntos se excede el valor de tiempo del punto 3 respecto al 4, y la corriente de 4 supera la calculada en el punto 3. El valor límite lo tomaremos para un tiempo de 1000 [seg] y será 1,2 veces la corriente nominal.

D.2 Curvas de actuación de los equipos de protección en alta y baja tensión para una S/E tipo Radial I

Estos cálculos están basados en una coordinación para relés de sobrecorriente no direccional para el transformador de potencia con capacidad de 30 MVA. Para la elaboración de estos cálculos de coordinación se tomaron en consideración estándares de llegada de línea 115 kV y salida de una línea 13,8 kV, modelo de CORPOELEC, según la norma CADAPE DNS-03 [29], con las siguientes características:

D.2.1 Lado de alta tensión 115 kV

Se aplicara para los cálculos de la curva tiempo-corriente, un modelo inverso, debido que esta protección debe actuar inmediatamente al existir una condición de falla en el sistema o en el transformador referenciado al lado de alta tensión.

Corriente de Carga: $I_{NomA} = 150,613$ [A].

Relación de los TC's: $RTC = 250/5$.

Corriente de Falla: $I_{Falla} = 20 * I_{NomA} = 3012,26$ [A]

Modo de operación de la curva: Inversa (IEC_C1)

Haciendo uso de la ecuación para el cálculo de las curvas de tiempo-corriente, con la ecuación (D.9) que se muestra a continuación:

$$t = Dial * \left[\frac{\beta}{M^{\alpha-1}} \right] \quad (D.9)$$

Dónde: t: Tiempo de operación de relé del equipo de protección.

Dial: Ajuste del multiplicador.

M: Relación entre corrientes.

β y α : Constantes de las curvas IEC. (Tabla D4).

Tabla D4. Valores de las constantes para las curvas IEC.

Curvas IEC	β	α
Inversa (C1)	0,14	0,02
Muy Inversa (C2)	13,5	1,0
Extremadamente Inversa (C3)	80,0	2,0
Inversa Tiempo Corto (C4)	0,05	0,04

Corriente de arranque: $I_{Arranque} = 1,2 * I_{NomA} = 180,736 A \quad (D.10)$

TAP: $TAP = I_{Arranque} * \frac{1}{RTC} = 180,736 * \frac{5}{250} = 3,615 \quad (D.11)$

M: $M = \frac{I_{Falla}}{I_{Arranque}} = \frac{3012,26}{180,736} = 16,667 \quad (D.12)$

Tiempo de operación: $t_{Oper} = t_{Oper(Equipo)} + t_{Margen} = 0,1 + 0,3 = 0,4 \text{ seg} \quad (D.13)$

Dial: $Dial(k) = t_{Oper} * \frac{(M^{\alpha-1})}{\beta} = 0,1654 \quad (D.14)$

El Dial a utilizar para este tipo de curva inversa, es 0,2 (Dial = 0,2), ya que el valor obtenido 0,1654 supera el anterior múltiplo del dial que es 0,15. La curva de protección para el lado de alta tensión se representa en la Figura 2D.

D.2.1 Lado de baja tensión 13,8 kV

Se aplicara para los cálculos de la curva tiempo-corriente, un modelo extremadamente inverso, debido que esta protección debe actuar como respaldo de las demás protecciones de los circuitos aguas abajo de la salida de la móvil en caso de existir una condición de falla en el sistema o en caso de ser en el transformador referenciado al lado de baja tensión, actuar primero que los demás equipos de protección asociados.

Corriente de Carga: $I_{NomB} = 1255,109$ A.

Relación de los TC's: $RTC = 2000/5$.

Corriente de Falla: $I_{Falla} = I_{NomB} * 10 = 12551,109$ A

Modo de operación de la curva: Extremadamente Inversa (IEC_C3)

Haciendo uso de la ecuación para el cálculo de las curvas de tiempo-corriente, con la ecuación (D.1) y Tabla D4, al igual que en el lado de alta tensión, procedemos a realizar los cálculos como se muestra a continuación:

Corriente de arranque: $I_{Arranque} = 1,2 * I_{NomA} = 1506,131$ A (4.15)

TAP: $TAP = I_{Arranque} * \frac{1}{RTC} = 1506,131 * \frac{5}{2000} = 3,765$ (4.16)

M: $M = \frac{I_{Falla}}{I_{Arranque}} = \frac{12551,09}{1506,131} = 8,333$ (4.17)

Tiempo de operación: $t_{Oper} = t_{Oper(Equipo)} + t_{Margen} = 0,1 + 0,3 = 0,4$ seg (4.18)

Dial: $Dial(k) = t_{Oper} * \frac{(M^{\alpha}-1)}{\beta} = 0,34219$ (4.19)

El Dial a utilizar para este tipo de curva extremadamente inversa, es 0,5 (Dial = 0,5), ya que el valor obtenido 0,34219. La curva de protección para el lado de baja tensión se representa en la Figura 2D.

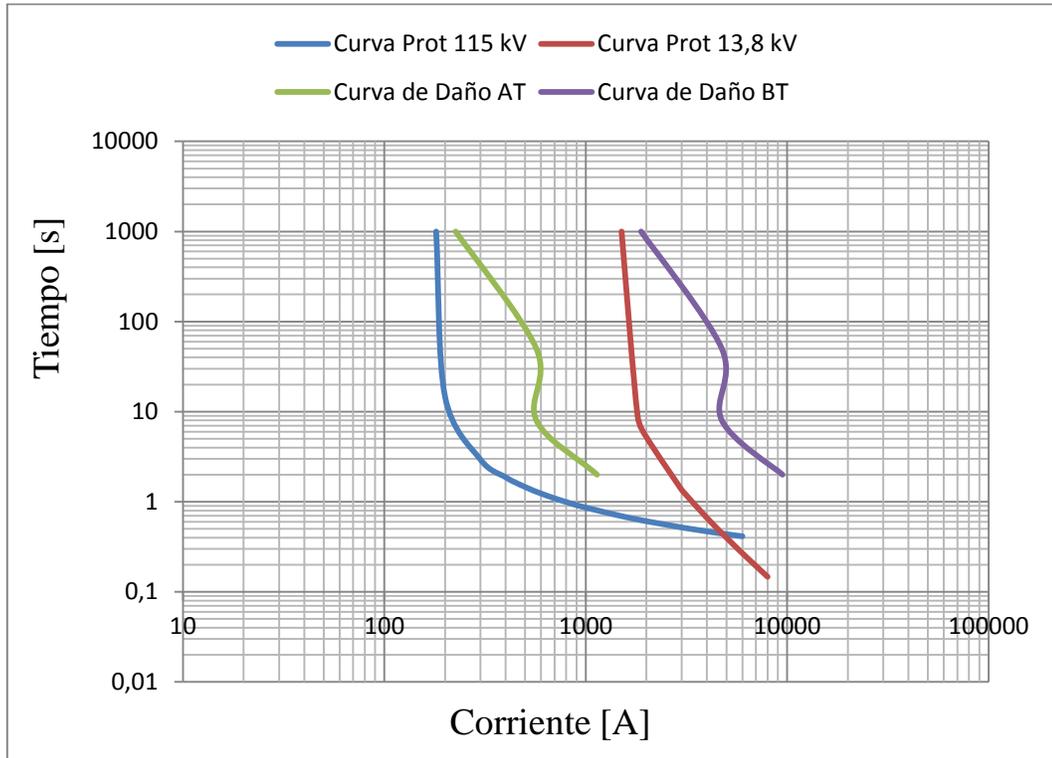


Figura 2D. Curvas de protección para el lado de alta y baja tensión del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737, según curvas IEC.

Fuente: Autor.