



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica
EL6008 Aplicaciones Industriales de la Energía Eléctrica

EL6008 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

DESARROLLO CLASE AUXILIAR CÁLCULO DE CONDUCTORES

Profesor: Ernesto Bianchi S.

Auxiliar: Uriel Troncoso M.

Ayudante: Valentina Marabolí M.

Primavera 2018

Ejercicio Nº 1: Capacidad de transporte y de cortocircuito

Analizar la configuración y calibre más apropiado para la línea de alimentación del tablero general (TG) de una industria de las siguientes características:

Parámetros instalación BT:

Capacidad nominal del transformador de alimentación:	P_n	=	500	<i>kVA</i>
Tensión nominal BT trafo.:	U_{ff0}	=	400	<i>V</i>
Impedancia trafo.:	Z_T	=	4	%
Eficiencia trafo.:	ε_T	=	98	%
Longitud línea BT hasta ITM en TG:	k	=	15	<i>m</i>
Tiempo máximo de despeje corto circuito:	Δt	=	10	<i>ms</i>

Especificaciones y parámetros de operación línea BT: (según pág. 5.2-8 apuntes):

Temperatura crítica de cortocircuito:	T_{CC}	=	180	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura nominal de operación:	T_{no}	=	90	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura ambiente nominal:	T_a	=	20	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura máxima real (según normas de la industria):	T_r	=	75	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura ambiente real (según normas de la industria):	T_e	=	30	$^{\circ}\text{C}$
Caída de tensión máxima admisible en barras TG:	$\Delta U_{m\acute{a}x. adm.}$	=	5,0	%

Características físicas del Cu:

Densidad Cu:	δ_{Cu}	=	8.906	<i>kg/m³</i>
Resistividad eléctrica Cu:	ρ_{Cu}	=	1,700E-08	Ωm
Calor específico Cu:	c_{Cu}	=	358,4	<i>J/(kg $^{\circ}\text{C}$)</i>

En primer lugar, se procede a encontrar la corriente nominal del sistema de alimentación en baja tensión, para lo que se utilizan los datos nominales del transformador:

$$I_T = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{ff}} = \frac{500.000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}} = 722 \text{ A}$$

Esta es la corriente que realmente circulará por los conductores del transformador y de la línea de alimentación hacia el interruptor general del tablero en condiciones normales de operación.

Sin embargo, el fabricante entrega un catálogo de corrientes para unas temperaturas de operación diferentes de las reales, por lo que no se puede escoger directamente del catálogo un conductor que soporte 722 A, sino que hay que realizar una corrección por temperatura:

$$I_{real} = I_{fabricante} \cdot \sqrt{\frac{T_{operación_{real}} - T_{exterior_{real}}}{T_{operación_{fabricante}} - T_{exterior_{fabricante}}}}$$

$$\eta_T = \sqrt{\frac{(75 - 30)^{\circ}\text{C}}{(90 - 20)^{\circ}\text{C}}} = 0,8$$

Luego, de los cables que entrega el fabricante, se debe escoger el que soporte la corriente nominal corregida por temperatura de:

$$I_{fabricante} = \frac{I_{real}}{\eta_T} = \frac{722 \text{ A}}{0,8} = 901 \text{ A}$$

De la tabla que entrega el fabricante, se puede observar que el único cable que soporta esta temperatura es el de 1000 MCM de sección, o de 507 milímetros cuadrados. Un análisis similar podría hacerse corrigiendo todas las corrientes nominales entregadas por el fabricante para las temperaturas reales de operación, de manera de obtener un catálogo adaptado a este problema. Dichas corrientes corregidas se muestran en la última columna de la Tabla 1.

Tabla 1 – Catálogo entregado por el fabricante, corregido para las temperaturas reales de operación.

AWG	S [mm ²]	I _n [A]	I _{real} [A] (η _T = 0,8)
1/0 AWG	53,5	297	238
2/0 AWG	67,4	337	270
3/0 AWG	85	384	308
4/0 AWG	107	434	348
250 MCM	127	472	378
350 MCM	177	569	456
500 MCM	253	690	553
750 MCM	380	847	679
1000 MCM	507	980	786

Cualquiera sea la metodología adoptada, para la corriente real de 722 amperios que circulará por el conductor real, se necesita un cable de 507 milímetros cuadrados de sección. Este cable, a pesar de estar en el catálogo del fabricante, es muy difícil de conseguir, además de ser extremadamente caro y dificultoso de trabajar. Por lo anterior, sería muy deseable poder utilizar otro cable que sea mucho más flexible, más ligero y más barato que el de 1000 MCM.

Esto se puede lograr separando los cables de cada fase en fascículos, de manera de obtener más de un conductor por fase, donde cada uno transporte solo una porción de la corriente por fase. Así, escogiendo 2 cables por fase, se tiene que cada conductor deberá transportar la mitad de la corriente, es decir:

$$I_{T_2} = \frac{722 \text{ A}}{2 \text{ fascículos}} = 361 \frac{\text{A}}{\text{fascículo}} = 450 \frac{A_{\text{fabricante}}}{\text{fascículo}}$$

Del catálogo observamos que esta corriente real (última columna) es soportada por el cable de 378 amperios corregidos (o de 472 amperios nominales), es decir, el de 127 milímetros cuadrados de sección. Con esta configuración se tienen 2 cables por fase, cada uno de 127 mm^2 , por lo que en total cada fase se compone de 254 mm^2 de sección.

Si se compara con la sección equivalente para el cable de 722 A, se observa claramente que utilizando 2 cables por fase se utiliza la mitad de la sección. Es decir, no se usa la misma cantidad de cobre usando un conductor o dos por fase, sino que [se usa la mitad de cobre al usar dos conductores por fase](#).

El mismo resultado se obtendría si en vez de utilizar 2 cables por fase se utilizaran 3, o 4. Con 3 conductores por fase:

$$I_{T_3} = \frac{722 \text{ A}}{3 \text{ fascículos}} = 241 \frac{\text{A}}{\text{fascículo}} = 300 \frac{A_{\text{fabricante}}}{\text{fascículo}}$$

Esta corriente es soportada por el conductor 2/0 AWG, de 67,4 mm^2 de sección. Siendo 3 de estos cables por fase, cada fase tendrá en total 203 mm^2 de sección (menos que si se usan 2 conductores por fase, y mucho menos que si se usa 1 conductor por fase)¹.

¹ ¿Hasta cuándo se puede dividir la corriente en fascículos?

La subestación tendrá 2 interruptores, uno a la salida del transformador y otro al final de la línea. El primer interruptor se ubicará inmediatamente después del transformador (antes de la línea), por lo que la corriente de cortocircuito solo estará limitada por la impedancia interna del transformador:

$$I_{CC} = \frac{I_T}{Z_{Tpu}} = \frac{722 A}{0,04} = 18 kA$$

La corriente de cortocircuito para el segundo interruptor se debe calcular cuando ocurre una falla aguas abajo de las barras del tablero general, por lo que debe incluir la impedancia de la línea, además de la del transformador.

Para obtener la impedancia total se debe encontrar la inductancia y la resistencia del transformador, además de la resistencia de la línea, pues la impedancia total está dada por:

$$Z = \sqrt{(R_T + R_L)^2 + X_T^2}$$

La impedancia del transformador en unidades físicas (ohmios) está dada por:

$$Z_T = Z_{Tpu} \cdot Z_{base} = Z_{Tpu} \cdot \frac{V_{ff}^2}{S_{3\phi}}$$

$$Z_T = 0,04 \times \frac{(400 V)^2}{500.000 VA} = 0,04 \times 0,32 \Omega = 0,0128 \Omega = 12,8 m\Omega$$

La resistencia del transformador se obtiene a partir de las pérdidas en vacío, con un factor de potencia unitario:

$$P_{pT} = (1 - \varepsilon_T) \cdot S_T$$

$$P_{pT} = 2\% \times 500 kVA = 10 kW$$

Esta corresponde a las pérdidas activas trifásicas (por efecto Joule), dada por:

$$P_p = 3 \cdot R_T \cdot I_T^2$$

Luego:

$$R_T = \frac{P_{pT}}{3 \cdot I_T^2} = \frac{10.000 W}{3 \times (722 A)^2} = 0,0064 \Omega = 6,4 m\Omega$$

La relación entre la impedancia del transformador con su resistencia e inductancia es:

$$Z_T^2 = R_T^2 + X_T^2$$

Luego, la inductancia del transformador:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

$$X_T = \sqrt{12,8^2 - 6,4^2} = 11,1 \text{ m}\Omega$$

La línea es muy corta, por lo que los efectos capacitivos e inductivos se desprecian (contrario a lo que sucede en el transformador), por lo que únicamente la resistencia limitará el cortocircuito. Cada fascículo de cada fase presenta una resistencia dada por:

$$R_{\text{fascículo}} = \frac{\rho \cdot l}{S_{\text{fascículo}}}$$

Luego, como cada fase se compone de fascículos en paralelo, cada uno de igual resistencia, la resistencia equivalente por fase será el equivalente en paralelo de tantas resistencias como fascículos tenga cada fase. Si consideramos n fascículos:

$$R_L = \frac{R_{\text{fascículo}}}{n} = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot S_{\text{fascículo}}} = \frac{\rho \cdot l}{S_{\text{Total}}}$$

Por lo tanto, para la resistencia de la línea se considera la sección total equivalente de todos los conductores que componen cada fase.

En el caso de 2 conductores por fase:

$$R_L = \frac{1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{m} \times 15 \text{ m}}{127 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 1 \text{ m}\Omega$$

Luego, la impedancia de la línea junto con el transformador está dada por:

$$Z = \sqrt{(R_T + R_L)^2 + X_T^2}$$

$$Z = 13,3 \text{ m}\Omega$$

Luego, la corriente de cortocircuito está dada por:

$$I_{CC} = \frac{V_{fn}}{Z} = \frac{V_{ff}}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

Para 2 conductores por fase:

$$I_{CC} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 13,3 \text{ m}\Omega} = 17,3 \text{ kA}$$

Realizando el mismo procedimiento para varios conductores por fase, se observa que todos los conductores soportan la corriente de cortocircuito²:

Conductores por fase	1	2	3	4
$S_{Total} [mm^2]$	507	254	203	214
$R_L [m\Omega]$	0,50	1,00	1,26	1,19
$Z_L [m\Omega]$	13,06	13,33	13,47	13,43
$I_{CC} [kA]$	17,68	17,32	17,14	17,19

Así, al principio de la línea (a la salida del transformador) se debe instalar un interruptor capaz de soportar 18 kA, y al final de la línea (el interruptor general del tablero) uno de 17,3 kA. En la práctica, se deberá escoger los interruptores que estén disponibles en el mercado, y ajustarlos a los requerimientos de la instalación.

Para calcular si el largo de la línea soporta el cortocircuito se considera el caso hipotético del cortocircuito más grave que puede suceder, con lo cual el largo crítico es independiente de la sección escogida y está dado por:

$$L_{cc} = \frac{\sqrt{\Delta t}}{\rho_{Cu} \cdot K_{CC}} \cdot V_{fn}$$

La constante de cortocircuito está dada por:

$$K_{CC} = k_{ccCu} \cdot k_{ccAislador}$$

$$k_{ccCu} = \sqrt{\frac{c_T \cdot \delta_{Cu}}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{358,4 \times 8.906 A^2 s}{1,7 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ C m^4}} = 1,7 \times 10^7 \frac{As^{1/2}}{^\circ C^{1/2} m^2}$$

$$k_{ccAislador} = \sqrt{T_{CC} - T_{fabricante}} = \sqrt{(180 - 90) \text{ } ^\circ C} = 9,48 \text{ } ^\circ C^{1/2}$$

$$K_{CC} = 1,3 \times 10^8 As^{\frac{1}{2}} m^{-2} = 130 As^{\frac{1}{2}} mm^{-2}$$

Luego, el largo crítico de la línea es de:

$$L_{cc} = 10,45 m$$

Lo anterior indica que la línea de 15 metros de largo soportará incluso el cortocircuito más severo.

² Se debe notar que el último caso no corresponde al equivalente para 4 conductores por fase, sino al conductor más pequeño disponible en el catálogo.

Problemas propuestos:

¿Cuál es el largo total de cada fase, en cada caso?

¿Cuál es el largo total de la línea en cada caso?

¿Cuántos carretes de cable se deben comprar, si los venden en rollos de 500 metros?

¿Suponiendo que los cables fueran completamente de cobre, cuál es la masa de cobre a utilizar?

¿Cuánto pesa cada fase, en cada caso?

¿Cuánto pesa toda la línea, en cada caso?

¿Cuántos carretes de cable se deben comprar, si los venden en rollos de 500 kilogramos?

¿Cuánto cuesta realmente la línea en cada caso?

Ejercicio Nº 2: Efecto corona, densidad de corriente y distancia económica de transmisión

Analizar el material y la configuración más apropiados para una línea de media tensión rural aérea de las siguientes características:

Parámetros instalación MT:

Tensión nominal trifásica:	U_{ff}	=	23	kV
Altura mínima (flecha) sobre el suelo:	h	=	8	m
Distancia mínima entre conductores:	d	=	0,4	m
Caída de tensión máxima admisible:	$\Delta u_{máx.adm.}$	=	2,5	%
Rigidez dieléctrica del aire húmedo:	RD_{aire}	=	1.5	kV/mm

Parámetros operativos:

Factor de carga anual de la instalación:	fc	=	0,4	$0/1$
Horas anuales de operación:	t_a	=	8.760	h/a
Valor energía eléctrica:	ce	=	50	$\$/kWh$
Interés anual del capital:	ia	=	6	%
Plazo de amortización de la inversión:	n	=	30	a
Coefficiente valor costo bruto materiales vs. instalado:	CI	=	2,2	$0/1$

Características físicas de los materiales:

			Cu	Al	$Fe\ galv.$	
Densidad:	δ	=	8.906	2.643	7.860	kg/m^3
Resistividad:	ρ	=	1,700E-08	2,618E-08	1,200E-07	Ωm
Costo metal en bruto:	c	=	3.269	1.130	800	$\$/kg$

Catálogo de conductores entregado por el fabricante:

TABLA DE CALBRES USA/mm		
AWG	ϕ [mm]	s [mm ²]
8	3,26	8,35
6	4,11	13,27
4	5,19	21,16
3	5,83	26,69
2	6,54	33,59
1	7,35	42,43

La sección del cable escogido debe ser tal que no produzca fenómeno corona en operación normal. Considerando la expresión para el valor punta del campo eléctrico para el conductor del problema:

$$E_{Máx} = \frac{V_{máx}}{\ln\left(\frac{2 \cdot d}{\phi} - 1\right)} \cdot \left(\frac{2 \cdot d}{\phi^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot d}{\phi} - 1\right)}\right)$$

Donde la distancia se considera entre fases, y la sección debe ser tal que el campo máximo sea inferior a la rigidez dieléctrica del aire:

$$E_{Máx} \leq RD_{Aire}$$

Se obtiene que el diámetro mínimo adecuado para que no se produzca fenómeno corona es el del conductor 6 AWG.

La densidad de corriente económica para cada conductor es de:

Densidad de corriente	Cobre	Aluminio	Acero galvanizado
i [A/mm ²]	1,25	0,32	0,22

Aceptando un 2,5% de caída de tensión, las distancias críticas para cada conductor son:

Distancia económica	Cobre	Aluminio	Acero galvanizado
L [m]	15.623	39.308	12.653