TEMA 24

CÁLCULO DE TRANSPORTE DE ENERGÍA.

24.1. ECUACIONES DE PROPAGACIÓN DE TENSIÓN E INTENSIDAD DE LA CORRIENTE EN UNA LÍNEA ELÉCTRICA.

La caída de tensión $\mathbf{d\bar{U}}$ en un elemento de línea $\mathbf{d}\boldsymbol{l}$ es:

$$d\bar{U} = (R_L + j.X_L).\bar{I}.dl = \bar{Z}_L.\bar{I}.dl \qquad (24.1)$$

Siendo R_L, $\bar{X}_L$ y $\bar{Z}_L$ las características longitudinales kilométricas de la línea.

La variación de la corriente $\mathbf{d\bar{I}}$ en el elemento de línea $\mathbf{d}\boldsymbol{l}$ es:

$$d\bar{I} = (G_L + j.B_L).\bar{U}.dl = \bar{Y}_L.\bar{U}.dl \qquad (24.2)$$

Siendo G_L, $\bar{B}_L$ e $\bar{Y}_L$ las características transversales kilométricas de la línea.

De (24.1) y (24.2) se obtiene:

$$\frac{d\bar{U}}{dl} = (R_L + j.X_L).\bar{I} = \bar{Z}_L.\bar{I} \qquad (24.3)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dl} = (G_L + j.B_L).\bar{U} = \bar{Y}_L.\bar{U} \qquad (24.4)$$

Derivando (24.3) con respecto a $\boldsymbol{l}$, y teniendo en cuenta (24.2) resulta:

$$\frac{d^2\bar{U}}{dl^2} = \bar{Z}_L.\frac{d\bar{I}}{dl} = \bar{Z}_L.\bar{Y}_L.\bar{U} \qquad (24.5)$$

De forma análoga, derivando (24.4) y teniendo en cuenta (24.3) resulta:

$$\frac{d^2\bar{I}}{dl^2} = \bar{Y}_L.\frac{d\bar{U}}{dl} = \bar{Y}_L.\bar{Z}_L.\bar{I} \qquad (24.6)$$

Las ecuaciones (24.5) y (24.6) son semejantes, y por tanto será suficiente resolver una cualquiera de ellas. Las soluciones de las ecuaciones permitirán conocer la tensión y la intensidad en cualquier punto de la línea situado a una distancia ***l*** del origen de referencia.

La ecuación (24.6) es una ecuación diferencial homogénea de segundo orden, cuya solución es:

$$\bar{I} = \bar{K}_1.e^{\alpha_1.l} + \bar{K}_2.e^{\alpha_2.l} \qquad (24.7)$$

donde $\bar{K}_1$ y $\bar{K}_2$ son dos constantes arbitrarias complejas y $\boldsymbol{\alpha_1}$, $\boldsymbol{\alpha_2}$ las raíces de la ecuación característica:

$$\alpha^2 - \bar{Y}_L.\bar{Z}_L = 0$$

Por tanto la ecuación (24.7) queda de la forma:

$$\bar{I} = \bar{K}_1.e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} + \bar{K}_2.e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} \qquad (24.8)$$

Derivando (24.8) con respecto a ***l*** y sustituyendo la derivada en (24.4) resulta:

$$\frac{d\bar{I}}{dl} = \bar{K}_1.\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - \bar{K}_2.\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} \qquad (24.9)$$

$$\bar{Y}_L.\bar{U} = \bar{K}_1.\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - \bar{K}_2.\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} \qquad (24.10)$$

Despejando $\bar{U}$ de (24.10) resulta:

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}}.[\bar{K}_1.e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - \bar{K}_2.e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}] \qquad (24.11)$$

La determinación de las constantes complejas $\bar{K}_1$ y $\bar{K}_2$, se puede hacer particularizando las ecuaciones (24.8) y (24.11) para un punto determinado de la línea, por ejemplo para $\boldsymbol{l = 0}$, donde $\mathbf{U = U_2}$ e $\mathbf{I = I_2}$, por tanto:

$$\bar{I}_2 = \bar{K}_1 + \bar{K}_2$$

(24.12)

$$\bar{U}_2 = \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}}.[\bar{K}_1 - \bar{K}_2]$$

Resolviendo el sistema (24.12) resulta:

$$\bar{K}_1 = \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2 + \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2]$$

(24.13)

$$\bar{K}_2 = \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2]$$

Sustituyendo (24.13) en (24.8) y (24.11) resulta:

$$\bar{I} = \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2 + \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2].e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} + \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2].e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}$$

} (24.14)

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}}[\tfrac{1}{2}.(\bar{I}_2 + \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2).e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - \tfrac{1}{2}.(\bar{I}_2 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\bar{U}_2).e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}]$$

Operando la última ecuación de (24.14) se tiene:

$$\bar{U} = \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2.\sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}} + \bar{U}_2].e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - \tfrac{1}{2}.[\bar{I}_2.\sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}} - \bar{U}_2].e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} \qquad (24.15)$$

Las dos ecuaciones que definen $\bar{\mathbf{I}}$ y $\bar{\mathbf{U}}$ en función de ***l*** se pueden expresar como:

$$\bar{I} = \sqrt{\frac{\bar{Y}_L}{\bar{Z}_L}}.\tfrac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}]\bar{U}_2 + \tfrac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} + e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}]\bar{I}_2 \qquad (24.16)$$

$$\bar{U} = \tfrac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} + e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}]\bar{U}_2 + \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}}.\tfrac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l} - e^{-\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L}.l}]\bar{I}_2 \qquad (24.17)$$

Ahora bien, para la longitud ***l*** de línea, se tiene:

$$l.\sqrt{\bar{Y}_L.\bar{Z}_L} = \sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} \quad ; \quad \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}} = \sqrt{\frac{l.\bar{Z}_L}{l.\bar{Y}_L}} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \qquad (24.18)$$

Además:

$$Cosh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} = \frac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}} + e^{-\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}}] \quad y \quad Senh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} = \frac{1}{2}.[e^{\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}} - e^{-\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}}]$$

Por tanto a partir de las ecuaciones (24.16) y (24.17), podemos expresar $\mathbf{I_1}$ y $\mathbf{U_1}$, conocidos $\mathbf{I_2}$ y $\mathbf{U_2}$, teniendo en cuenta la ecuación (24.18).

$$\bar{I}_1 = \sqrt{\frac{\bar{Y}}{\bar{Z}}}.\bar{U}_2.Senh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} + \bar{I}_2.Cosh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}$$

(24.19)

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2.Cosh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} + \bar{I}_2.\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}.Senh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}$$

Si en vez de conocer $\mathbf{U_2}$ e $\mathbf{I_2}$, valores de tensión e intensidad al final de la línea, conociéramos los valores $\mathbf{U_1}$ e $\mathbf{I_1}$ al principio de la misma, podemos obtener los valores al final a partir de las ecuaciones (24.19). En efecto, despejando $\bar{\mathbf{U}}_2$ resulta:

$$\overline{U}_2 = \frac{\begin{vmatrix} \bar{I}_1 & \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} \\ \bar{U}_1 & \sqrt{Z/Y}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sqrt{Y/Z}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} & \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} \\ \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} & \sqrt{Z/Y}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} \end{vmatrix}} = \frac{\bar{I}_1.\sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}}.Senh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - \overline{U}_1.Cosh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}}}{Senh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - Cosh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}}}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} \sqrt{Y/Z}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} & \bar{I}_1 \\ \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} & \bar{U}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sqrt{Y/Z}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} & \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} \\ \text{Cosh } \sqrt{Y.Z} & \sqrt{Z/Y}\ .\text{Senh } \sqrt{Y.Z} \end{vmatrix}} = \frac{\overline{U}_1.\sqrt{\frac{\overline{Y}}{\overline{Z}}}.Senh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - \bar{I}_1.Cosh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}}}{Senh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - Cosh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}}}$$

Teniendo en cuenta que: $Senh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - Cosh^2\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} = -1$ (24.20)

$$\overline{U}_2 = \overline{U}_1.Cosh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} - \bar{I}_1.\sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}}.Senh\sqrt{\overline{Y}.\overline{Z}} \qquad (24.21)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_1.Cosh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}} - \bar{U}_1.\sqrt{\frac{\bar{Y}}{\bar{Z}}}.Senh\sqrt{\bar{Y}.\bar{Z}}$$

Las expresiones (24.21) son la *ecuaciones de propagación* y mediante su uso se realizan los cálculos de las líneas aéreas de transporte de energía eléctrica.

24.2. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE UNA LÍNEA.

En el apartado anterior se observa en las expresiones (24.19) y (24.21) la cantidad compleja $\sqrt{Z/Y}$ a la que se denomina *impedancia característica de la línea*.

La impedancia característica se designa con la letra $\bar{Z}_c$, y es la relación entre la tensión y la intensidad de una línea de longitud infinita, a lo largo de toda ella. Esta relación es constante a lo largo de toda la transmisión. La impedancia característica de una línea de longitud ***l*** es:

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R+jX}{G+jB}} = \sqrt{\frac{l.(R_L+jX_L)}{l.(G_L+jB_L)}} = \sqrt{\frac{R_L+jX_L}{G_L+jB_L}} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_L}} \qquad (24.22)$$

que es independiente de la longitud de la línea.

24.3. ÁNGULO CARACTERÍSTICO DE UNA LÍNEA.

En las ecuaciones (24.19) y (24.21) figura la expresión compleja $\sqrt{\bar{Z}.\bar{Y}}$, a la que se denomina $\bar{\theta}$, siendo:

$$\bar{\theta} = \sqrt{\bar{Z}.\bar{Y}} = \theta' + j.\theta'' \qquad (24.23)$$

Por tanto las ecuaciones (24.19) y (24.21) se reducen a:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2.e^{\bar{\theta}} \;\; ; \;\; \bar{I}_1 = \bar{I}_2.e^{\bar{\theta}} \qquad (24.24)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1.e^{-\bar{\theta}} \;\; ; \;\; \bar{I}_2 = \bar{I}_1.e^{-\bar{\theta}} \qquad (24.25)$$

Las ecuaciones (24.24) y (24.25) nos indican que en una línea cerrada por una impedancia característica $\bar{Z}_c$, la tensión y la intensidad decrecen siguiendo una ley exponencial ligada a la magnitud compleja $\bar{\theta}$, llamada *ángulo característico de la línea.*

24.4. POTENCIA CARACTERÍSTICA DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA.

Se denomina *potencia característica de una línea* $\mathbf{P_C}$ a la potencia que se corresponde con la impedancia característica $\mathbf{Z_C}$. Las condiciones óptimas del transporte de una línea se realiza con la potencia característica.

Si se supone que en el extremo de la línea existe una tensión de valor $\mathbf{U_2}$ **(kV)**, la potencia característica es:

$$P_c = 3.U'_2.I_2 \qquad (24.26)$$

Pero como:

$$I_2 = \frac{U'_2}{Z_c} \qquad (24.27)$$

Sustituyendo (24.27) en (24.26) resulta:

$$P_c = \frac{3.U'^2_2}{Z_c} = 3.\frac{[\frac{U_2}{\sqrt{3}}]^2}{Z_c} = \frac{U_2^2}{Z_c} \qquad (24.28)$$

De la expresión (24.28) se deduce que la potencia característica de una línea eléctrica de transporte es directamente proporcional al cuadrado del valor eficaz de la tensión de línea e inversamente proporcional a la impedancia característica. Como consecuencia es independiente de la longitud de la línea.

Con un valor medio de 500 ohmios para la impedancia característica, se obtienen los valores de las potencias características de acuerdo con la tensión nominal de la línea.

Tabla 24.1. Potencia característica de líneas de transporte aéreas trifásicas

Tensión compuesta de línea U (kV)	*Potencia característica P_C (kW)*	*Comentarios*
20	800	
30	1.800	
45	4.050	En las líneas subterráneas, la impedancia característica de la línea es la décima parte de las aéreas. La potencia natural en este tipo de líneas es diez veces mayor que en las aéreas.
60	7.200	
80	12.800	
110	24.200	
132	34.850	
150	45.000	
220	96.800	
300	180.000	
400	320.000	

24.5. LÍNEA DE ALTA TENSIÓN DE 100 km DE LONGITUD CON CIRCUITO SIMPLE A 220 kV DE TENSIÓN.

Datos de la línea:

Categoría	Primera
Tensión nominal	220 kV
Longitud	100 km
Número de circuitos trifásicos	1 simple
Apoyos	Torres metálicas

Datos de los conductores:

Número y clase		3 cables de aluminio-acero
Designación		Cóndor
Composición del cable	Aluminio	54 x 3,08 mm
	Acero	7 x 3,08 mm
Secciones	Aluminio	402,3 mm^2
	Acero	52,2 mm^2
Sección equivalente de cobre		253,4 mm^2
Diámetro del alma de acero		9,24 mm
Diámetro del cable		27,72 mm
Peso	del aluminio	1.111,6 $kg.km^{-1}$
	del acero	406,2 "
Carga de rotura		12.925 kg
Módulo de elasticidad		6.800 $kg.\ mm^{-2}$
Coeficiente de dilatación por grado de temperatura.		18.10^{-6}
Resistencia eléctrica (a 20ºC)		0,0733 $\Omega.km^{-1}$

Las fases están situadas en un plano horizontal, tal como se indica en la Fig.24.7

La distancia entre fases consecutivas se supone 7,5 m.

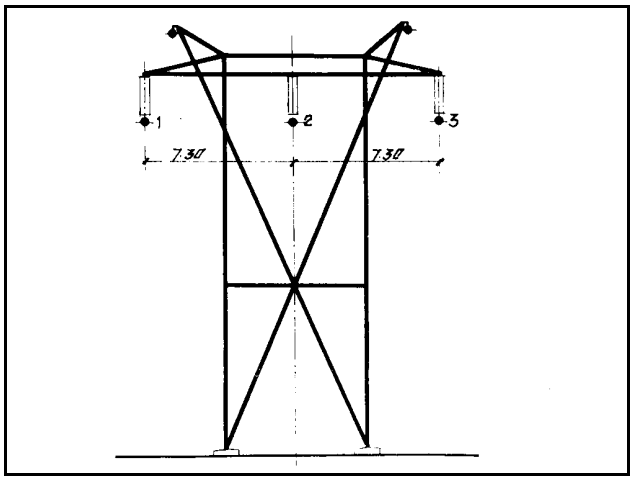


Fig.24.7

De acuerdo con esto la distancia **D** , según (22.24), es:

$$D = \sqrt[3]{D_{1-2}.D_{2-3}.D_{3-1}}$$

Siendo:

$$D_{1-2} = 7{,}5m \;\; ; \;\; D_{2-3} = 7{,}5m \;\; ; \;\; D_{1-3} = 2.7{,}5 = 15m$$

En consecuencia:

$$D = \sqrt[3]{7{,}5.7{,}5.2.7{,}5} = 9{,}45 \; m$$

La densidad de corriente en régimen permanente, de acuerdo con el Reglamento de Líneas[1] para la sección total del cable es:

Sección total = Sección del aluminio + Sección del acero

Sección total = 402,3 + 52,2 = 454,5 mm^2

Tabla 24.2. Densidades de Corriente (Artículo 22 del Reglamento de Líneas)

[1] El artículo 22 del Reglamento de Líneas establece que *Las densidades de corriente máximas en régimen permanente no sobrepasarán los valores señalados en la tabla adjunta.*

Sección nominal mm^2	Densidad de corriente (Amperios.mm^{-2})		
	Cobre	**Aluminio**	**Aleación Aluminio**
10	8,75	--	--
15	7,60	6,00	5,60
25	6,35	5,00	4,65
35	5,75	4,55	4,25
50	5,10	4,00	3,70
70	4,50	3,55	3,30
95	4,05	3,20	3,00
125	3,70	2,90	2,70
160	3,40	2,70	2,50
200	3,20	2,50	2,30
250	2,90	2,30	2,15
300	2,75	2,15	2,00
400	2,50	1,95	1,80
500	2,30	1,80	1,70
600	2,10	1,65	1,55

De acuerdo con los datos que figuran en la Tabla 24.2, resulta:

$$\frac{500-400}{1,95-1,80} = \frac{454,5-400}{1,95-d} \quad ; \quad d = 1,87\ A.mm^2$$

El citado artículo 22, establece que la sección total del conductor se multiplicará por un coeficiente de reducción de acuerdo con la Tabla 24.3.

Tabla 24.3

Composición del cable	Coeficiente de reducción
6 + 1	0,926
26 + 7	0,926
30 + 7	0,902
54 + 7	0,941

En este caso 0,941. Por tanto la densidad admisible será:

$$1,87.0,941 = 1,76 A.mm^{-2}$$

En consecuencia la intensidad de la corriente será:

$$1,76 A.mm^{-2}.454,5 mm^2 = 800 A$$

Con esta intensidad la potencia máxima admisible para diferentes factores de potencia del receptor, será la que se obtenga de acuerdo con la expresión :

$$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi \quad ; \quad P = \sqrt{3}.220.800.\cos\varphi = 304841.\cos\varphi \ kW$$

Los distintos valores de P se obtienen de la Tabla 24.4

Tabla 24.4

Factor de Potencia cos φ	**Potencia kW**
0,80	243.873
0,82	249.970
0,83	253.018
0,84	256.066
0,85	259.115
0,86	262.163
0,87	265.212
0,88	268.260
0,89	271.308
0,90	274.357
0,91	277.405
0,92	280.454

Constantes kilométricas:

Las constantes kilométricas de la línea son:

Resistencia eléctrica (20ºC):

$R_L = 0,0733\ \Omega.km^{-1}$

Coeficiente de autoinducción (de acuerdo con (22.34)):

$$L_L = [\frac{1}{2} + 2.\ln\frac{9450}{13,86}].10^{-4}\ H.km^{-1} = 13,55.10^{-4}\ H.km^{-1}$$

La reactancia inductiva equivalente es:

$$X_L = \omega.L_L \ ; \ X_L = 13,55.10-4.2.\pi.50 = 0,426\ \Omega.km-1$$

La capacidad equivalente es:

$$C_L = \frac{10^{-6}}{18.Cosh^{-1}[\frac{9450}{27,72}]} = 8,514.10^{-9}\ F.km^{-1}$$

Perditancia:

Se supone despreciable, $G_L = 0$ S

Características eléctricas de la línea de 100 km de longitud:

Resistencia eléctrica	$R = 0,0733.100 = 7,33\ \Omega$
Coeficiente de autoinducción	$L = 13,55.10^{-4}.100 = 135,5.10^{-3}$ H
Capacidad	$C = 8,514.10^{-9}.100 = 0,8514.10^{-6}$ F
Perditancia	$G = 0$ S

Reactancia de autoinducción:

$$X = \omega.L \ ; \ X = 2.\pi.50.135,5.10-3 = 42,568\ \Omega$$

Susceptancia:

$$B = \omega.C \ ; \ B = 2.\pi.50.0,8514.10-6 = 267,475.10-6\ S$$

Perditancia:
$G = 0$ S

Magnitudes complejas:

Las magnitudes complejas son:

1ª) Impedancia.
2ª) Admitancia.
3ª) Impedancia característica.
4ª) Ángulo característico.

Impedancia:

$$\overline{Z} = R + j.X = 7{,}33 + j.42{,}568 = 43{,}194\angle 80{,}229^{o}$$

Módulo ..... Z = 43,194 Ω
Argumento .... β_Z = 80,229º

Admitancia:

$$\overline{Y} = G + j.B = 0 + j.267{,}475.10{-}6 = 267{,}475.10{-}6\angle 90^{o}$$

Módulo ..... Y = 267,475.10^{-6} S
Argumento .. β_L = 90º

Impedancia característica:

$$\overline{Z}_c = \sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} = \sqrt{\frac{43{,}194\angle 80{,}229^{o}}{267{,}475.10^{-6}\angle 90^{o}}} = 401{,}856\angle -4{,}885^{o}$$

Módulo ..... Z_C = 401,856 Ω
Argumento ... β_{Zc} = - 4,885 º

Ángulo característico o complejo:

Parte real θ' = 0,00915

Parte imaginaria θ'' = 0,1071

Módulo ..... θ = 107,486.10^{-3}
Argumento ... $\beta_{\theta c}$ = 85,115º

Potencia característica:

$$P_c = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{220000^2}{401{,}856} = 120{,}44\ MW$$