Ejercicios resueltos

Tecnología Eléctrica y Redes

Temas 3 a 7

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

Problema 1. Carga en triángulo alimentada por una línea (T3) 2
Problema 2. Sistema con tres zonas de tensión en por unidad (T4) 3
Problema 3. Transformador de distribución: caída de tensión y rendimiento (T5) 4
Problema 4. Dos transformadores en paralelo (T5) 5
Problema 5. Generador síncrono contra red de potencia infinita (T6) 5
Problema 6. Compensación de reactiva en una línea de media tensión (T6) 6
Problema 7. Línea larga de 400 kV: Ferranti y potencia natural (T7) 6

Tabla de resultados **7**

Resumen

Siete problemas originales de cálculo de redes con datos inventados. Se resuelven con fasores en valor eficaz y secuencia directa; las tensiones U son de línea. Todas las cifras están calculadas con un script de Python.

Problema 1. Carga en triángulo alimentada por una línea (T3)

Enunciado

Una red de 400 V alimenta, a través de una línea de impedancia $0{,}1 + j0{,}2\ \Omega$ por fase, una carga equilibrada en triángulo de $30 + j15\ \Omega$ por fase. Calcula la corriente de línea, la tensión en la carga, las potencias y el factor de potencia visto desde la red.

Carga a estrella y monofásico equivalente:

$$Z_Y = \frac{30 + j15}{3} = 10 + j5\ \Omega, \qquad E = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230{,}9\angle 0^\circ\ \text{V}$$

$$\underline{I} = \frac{230{,}9}{(0{,}1 + j0{,}2) + (10 + j5)} = \boxed{20{,}33\angle -27{,}24^\circ\ \text{A}}$$

Tensión en la carga y corriente dentro del triángulo:

$$\underline{U}_{fase} = \underline{I}\, Z_Y = 227{,}3\angle -0{,}68^\circ\ \text{V} \ \Rightarrow\ U = \boxed{393{,}7\ \text{V}} \qquad I_\Delta = \frac{20{,}33}{\sqrt{3}} = 11{,}74\ \text{A}$$

Potencias:

$$\underline{S}_{carga} = 3\,\underline{U}_{fase}\underline{I}^{\,*} = 12{,}40 + j6{,}20\ \text{kVA} \qquad \underline{S}_{\text{línea}} = 3(0{,}1 + j0{,}2)\,20{,}33^2 = 0{,}124 + j0{,}248\ \text{kVA}$$

$$\underline{S}_{red} = 12{,}52 + j6{,}45\ \text{kVA}, \qquad \cos\varphi = \boxed{0{,}889}$$

Las pérdidas en la línea son el 1 % de la potencia activa y la tensión cae 6,3 V (1,6 %).

Problema 2. Sistema con tres zonas de tensión en por unidad (T4)

Enunciado

Un generador (100 MVA, 13,8 kV, $X = 0{,}2$ pu) alimenta, a través de un transformador elevador (120 MVA, 13,8/132 kV, $\varepsilon_{cc} = 10\,\%$), una línea de $8 + j40\ \Omega$ y un transformador reductor (80 MVA, 132/20 kV, $\varepsilon_{cc} = 8\,\%$), una carga de 50 MW con $\cos\varphi = 0{,}9$ inductivo a 20 kV. Calcula la tensión en bornes del generador, su fuerza electromotriz y las corrientes reales. Desprecia resistencias y ramas de vacío de los transformadores.

Bases: $S_b = 100$ MVA y U_b igual a la nominal de cada zona (13,8, 132 y 20 kV).

$$X_g = 0{,}2 \qquad X_{T1} = 0{,}10 \cdot \tfrac{100}{120} = 0{,}0833 \qquad X_{T2} = 0{,}08 \cdot \tfrac{100}{80} = 0{,}10$$

$$Z_{b,132} = \frac{132^2}{100} = 174{,}24\ \Omega \qquad Z_L = \frac{8 + j40}{174{,}24} = 0{,}0459 + j0{,}2296\ \text{pu}$$

Carga ($U = 1$ pu):

$$\underline{S} = 0{,}5 + j0{,}2422\ \text{pu}, \qquad \underline{I} = \underline{S}^*/1 = 0{,}5556\angle -25{,}84^\circ\ \text{pu}$$

Se suben las caídas desde la carga hacia el generador:

$$\underline{U}_{132,\,carga} = 1 + jX_{T2}\underline{I} = 1{,}025\angle 2{,}80^\circ \qquad \underline{U}_{132,\,gen} = \underline{U}_{132,\,carga} + Z_L\underline{I} = 1{,}113\angle 7{,}93^\circ$$

$$\underline{U}_g = \underline{U}_{132,\,gen} + jX_{T1}\underline{I} = \boxed{1{,}140\angle 9{,}87^\circ\ \text{pu}} \ \Rightarrow\ U_g = 15{,}73\ \text{kV}$$

$$\underline{E} = \underline{U}_g + jX_g\underline{I} = \boxed{1{,}208\angle 14{,}15^\circ\ \text{pu}}$$

Corrientes reales ($I_b = S_b/\sqrt{3}U_b$):

$$I_{20} = 0{,}5556 \cdot 2887 = 1604\ \text{A} \qquad I_{132} = 0{,}5556 \cdot 437{,}4 = 243\ \text{A}$$

$$I_{13{,}8} = 0{,}5556 \cdot 4184 = 2324\ \text{A}$$

Pérdidas en la línea: $0{,}5556^2 \cdot 0{,}0459 \cdot 100 = 1{,}42$ MW. El generador tendría que trabajar al 114 % de su tensión nominal: en la práctica se usarían las tomas de los transformadores o compensación de reactiva junto a la carga.

Problema 3. Transformador de distribución: caída de tensión y rendimiento (T5)

Enunciado

Transformador de 1000 kVA, 20/0,4 kV, $\varepsilon_{cc} = 6\,\%$, $P_{cc} = 10{,}5$ kW y $P_0 = 1{,}7$ kW. Alimenta 800 kW con $\cos\varphi = 0{,}85$ inductivo a la tensión nominal de baja. Calcula la tensión necesaria en alta (aproximada y exacta), el rendimiento y el índice de carga de rendimiento máximo.

Componentes de la tensión de cortocircuito:

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{10{,}5}{1000} = 1{,}05\,\% \qquad \varepsilon_{Xcc} = \sqrt{6^2 - 1{,}05^2} = 5{,}91\,\%$$

Índice de carga y caída aproximada:

$$c = \frac{800/0{,}85}{1000} = 0{,}941 \qquad \varepsilon_c \approx 0{,}941\,(1{,}05 \cdot 0{,}85 + 5{,}91 \cdot 0{,}527) = \boxed{3{,}77\,\%}$$

Cálculo exacto en por unidad:

$$\underline{U}_1 = 1 + (0{,}0105 + j0{,}0591) \cdot 0{,}941\angle -31{,}79^\circ = 1{,}0385\angle 2{,}32^\circ \;\Rightarrow\; U_1 = \boxed{20{,}77\,\text{kV}}$$

La aproximación (3,77 %) y el valor exacto (3,85 %) difieren poco: para examen basta la fórmula aproximada salvo que se pida el exacto.

Rendimiento:

$$P_{Cu} = 0{,}941^2 \cdot 10{,}5 = 9{,}30\,\text{kW} \qquad \eta = \frac{800}{800 + 1{,}7 + 9{,}30} = \boxed{98{,}64\,\%}$$

$$c_{\eta,\text{máx}} = \sqrt{1{,}7/10{,}5} = 0{,}402$$

Problema 4. Dos transformadores en paralelo (T5)

Enunciado

Dos transformadores con la misma relación e índice horario, $S_{n1} = 630\,\text{kVA}$ con $\varepsilon_{cc1} = 4\,\%$ y $S_{n2} = 400\,\text{kVA}$ con $\varepsilon_{cc2} = 4{,}5\,\%$, alimentan juntos $1000\,\text{kVA}$. ¿Cómo se reparte la carga? ¿Cuál es la máxima potencia sin sobrecargar ninguno?

El reparto es proporcional a S_n/ε_{cc}:

$$\frac{S_{n1}}{\varepsilon_1} = 157{,}5 \qquad \frac{S_{n2}}{\varepsilon_2} = 88{,}9 \qquad k = \frac{1000}{157{,}5 + 88{,}9} = 4{,}058$$

$$S_1 = \underline{639{,}2\,\text{kVA}}\ (c_1 = 1{,}015) \qquad S_2 = \underline{360{,}8\,\text{kVA}}\ (c_2 = 0{,}902)$$

El primero, de menor ε_{cc}, llega antes a plena carga:

$$S_{\max} = 630 \cdot \frac{157{,}5 + 88{,}9}{157{,}5} = \underline{985{,}6\,\text{kVA}}$$

Aunque la suma de nominales es $1030\,\text{kVA}$, no se puede pasar de $986\,\text{kVA}$ sin sobrecargar el de $630\,\text{kVA}$.

Problema 5. Generador síncrono contra red de potencia infinita (T6)

Enunciado

Un generador de $50\,\text{MVA}$ y $11\,\text{kV}$, con $X_s = 1{,}2\,\text{pu}$, está conectado a una red de $11\,\text{kV}$ ($1\,\text{pu}$). Entrega $P = 0{,}8\,\text{pu}$ con $\cos\varphi = 0{,}9$ inductivo. Calcula E, δ y la potencia máxima. ¿Qué excitación haría falta para dar la misma potencia activa sin reactiva?

$$Q = 0{,}8\tan(\arccos 0{,}9) = 0{,}3875\ \text{pu} \qquad \underline{I} = \frac{(0{,}8 + j0{,}3875)^*}{1} = 0{,}8889\angle -25{,}84^\circ\ \text{pu}$$

$$\underline{E} = 1 + j1{,}2 \cdot 0{,}8889\angle -25{,}84^\circ = \underline{1{,}752\angle 33{,}24^\circ\ \text{pu}} \ \Rightarrow\ E = 19{,}27\,\text{kV}$$

$$P_{\max} = \frac{1{,}752 \cdot 1}{1{,}2} = \underline{1{,}46\ \text{pu}}\ (73\,\text{MW})$$

Corriente: $0{,}8889 \cdot \frac{50}{\sqrt{3}\cdot 11} = 2333\,\text{A}$.

Con $Q = 0$ e igual P:

$$\underline{E} = 1 + j1{,}2 \cdot 0{,}8 = 1{,}386\angle 43{,}83^\circ\ \text{pu}$$

Para dejar de entregar reactiva hay que bajar la excitación de 1,75 a 1,39 pu; el ángulo sube a casi 44° y el margen de estabilidad se reduce.

Problema 6. Compensación de reactiva en una línea de media tensión (T6)

Enunciado

Una industria consume 2 MW con $\cos\varphi = 0{,}75$ al final de una línea de 20 kV con $R = 1{,}2\,\Omega$ y $X = 3\,\Omega$ por fase. Se quiere subir el factor de potencia a 0,95. Calcula la batería, su capacidad por fase y la mejora en caída de tensión y pérdidas.

$$Q_c = 2\,(\tan 41{,}41^\circ - \tan 18{,}19^\circ) = \boxed{1106\,\text{kvar}}$$

$$C_Y = \frac{1{,}106\cdot 10^6}{2\pi 50\cdot (20\cdot 10^3)^2} = 8{,}81\,\mu\text{F} \qquad C_\Delta = 2{,}94\,\mu\text{F}$$

Caída de tensión aproximada $\Delta U = (RP + XQ)/U$:

$$\text{antes: } 385\,\text{V}\ (1{,}9\,\%) \qquad \text{después: } 219\,\text{V}\ (1{,}1\,\%)$$

Corriente y pérdidas $3RI^2$:

$$I: 76{,}98 \to 60{,}77\ \text{A} \qquad P_p: 21{,}3 \to \boxed{13{,}3\,\text{kW}}$$

Las pérdidas caen un 38 %: la compensación se paga sola con la energía ahorrada y con la penalización por reactiva que deja de cobrar la distribuidora.

Problema 7. Línea larga de 400 kV: Ferranti y potencia natural (T7)

Enunciado

Línea de 400 kV y 300 km con $r = 0{,}03\,\Omega/\text{km}$, $x = 0{,}33\,\Omega/\text{km}$ y $b = 3{,}5\,\mu\text{S/km}$. Calcula Z_c, γ, las constantes A, B y C, la tensión en el extremo receptor en vacío si el emisor está a 400 kV y la potencia natural.

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{0{,}03 + j0{,}33}{j3{,}5\cdot 10^{-6}}} = \boxed{307{,}7\angle -2{,}60^\circ\ \Omega}$$

$$\gamma l = 300\sqrt{(0{,}03 + j0{,}33)\,j3{,}5\cdot 10^{-6}} = 0{,}0146 + j0{,}3227$$

$$A = \cosh\gamma l = 0{,}9485\angle 0{,}28^\circ \qquad B = Z_c \sinh\gamma l = 97{,}7\angle 84{,}9^\circ\ \Omega$$

$$C = \frac{\sinh\gamma l}{Z_c} = 1{,}03\cdot 10^{-3}\angle 90{,}1^\circ\ \text{S}$$

Vacío ($I_R = 0$):

$$U_R = \frac{400}{0{,}9485} = \boxed{421{,}7\,\text{kV}}$$

La tensión sube un 5,4 % (efecto Ferranti). La línea absorbe del emisor unos 251 A capacitivos, unos 174 Mvar: por eso se instalan reactancias en las líneas largas.

Potencia natural:

$$P_{SIL} = \frac{400^2}{307{,}7} = \boxed{520\,\text{MW}}$$

El modelo en π nominal daría $A = 0{,}948\angle 0{,}29°$: con 300 km la diferencia todavía es pequeña, pero crece con la longitud.

Tabla de resultados

Problema	Tema	Resultado principal
1	T3	$I = 20{,}33$ A, $U_{carga} = 393{,}7$ V, $\cos\varphi = 0{,}889$
2	T4	$U_g = 1{,}14$ pu (15,73 kV), $E = 1{,}208\angle 14{,}15°$
3	T5	Caída 3,77 % (aprox.), $U_1 = 20{,}77$ kV, $\eta = 98{,}64\,\%$
4	T5	639 kVA y 361 kVA; máximo 986 kVA
5	T6	$E = 1{,}752\angle 33{,}24°$, $P_{\max} = 1{,}46$ pu
6	T6	$Q_c = 1106$ kvar, pérdidas de 21,3 a 13,3 kW
7	T7	$U_R = 421{,}7$ kV en vacío, $P_{SIL} = 520$ MW