(17)

52115208

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Examen de: **(5602) MAQUINAS ELECTRICAS (P. 1997)**

21 de Diciembre de 2010.

EXAMEN

Parte Práctica (Problemas: 50% del examen) (Eliminatorio: mínimo 50% del práctico)

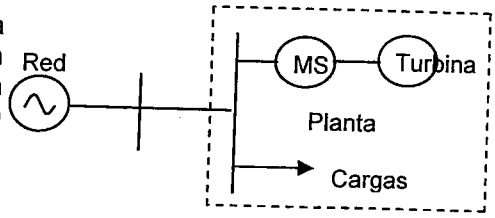
Problema No. 1 (50% del práctico, 25% del examen)
Se tiene una instalación trifásica alimentada desde una barra B de 6.6 kV nominales entre fases, 50 Hz. Esta barra se encuentra a su vez alimentada desde otra barra A también de 6.6 kV, pero supuesta ésta de potencia infinita, mediante un cable trifásico de resistencia despreciable y reactancia X_l = 1.3 Ohm por fase.

En la barra B se conecta una carga tal que bajo la tensión nominal debe consumir una corriente de 400 A con cos φ = 0.9 inductivo. Sin embargo se observa que al conectar dicha carga, la tensión en B cae. A los efectos de evitar esa caída de tensión, en la barra B se conecta una máquina sincrónica MS para funcionar en principio sólo como compensador de reactiva (compensador sincrónico), y llevar la tensión de B a su valor nominal.

Datos MS: Un = 6.6 kV, Conexión en estrella. Resistencia de fase despreciable.
En vacío a 50 Hz se midió una tensión de 7400 V entre fases para una corriente de excitación i_{exc} = 200 A. Se admitirá que MS trabaja en régimen lineal.
Ensayo en cortocircuito a 50 Hz: para i_{exc} = 54 A se midió una corriente de línea I_{cc} = 438 A.

Se pide:
1) (16/25) Determinar la corriente de línea y la corriente de excitación de MS en el funcionamiento indicado, con la barra B a tensión Un.
2) (9/25) En la barra B se desconecta la carga. Con la corriente de excitación fija en el valor determinado en 1), calcular el nuevo valor de la corriente de línea de MS y la tensión en la barra B.

Problema No. 2 (50% del práctico, 25% del examen)
En una planta industrial se tiene autoproducción de energía eléctrica, mediante una turbina de vapor, con vapor generado en el propio proceso de la planta. La potencia mecánica entregada en el eje de la turbina se puede regular a voluntad entre 0 y 100 kW, la cual se emplea como motor primario de una máquina sincrónica MS empleada como alternador, cuyos datos se indica más abajo. El objetivo es tener total autoproducción del consumo eléctrico de la planta, cuya carga total suma 84 kW con cos φ = 0.7 inductivo, de forma tal que, aunque la planta se mantiene siempre conectada a la red de 6 kV (entre fases, supuesta de potencia infinita) se busca que la corriente intercambiada con la red sea nula.



Datos Alternador: Valores nominales 125 kVA, 6 kV (entre fases) conexión en estrella, 50 Hz
Rotor cilíndrico de 2 polos

Ensayos a frecuencia nominal:

a) ensayo en vacío:

iexc (A)	0	2	4	6	8	10	12	15.6
Uo (kV) (fase-fase)	0	2.2	4.4	6.0	6.88	7.49	7.82	8.25

b) Ensayo en devatado bajo tensión nominal: iexc = 11.33 A, Id = 12 A
c) Ensayo en cortocircuito: iexc = 3 A, Icc= 9 A

Se pide:
1) (18/25) Determinar la potencia mecánica en el eje de la turbina y la corriente de excitación del alternador, para lograr el objetivo de tener corriente nula con la red.
2) (7/25) Si con la MS girando a la velocidad de sincronismo se desconectara la turbina y luego se cortara la corriente de excitación del alternador, pero dejando MS conectada por sus bornes a la red de 6 kV, ¿cuál sería el valor de la corriente consumida de la red por el conjunto de la planta?

Notas: Para la pregunta 1) se aplicará el método de Potier. La pregunta 2) se resolverá por el método aproximado de la reactancia sincrónica variable Xs(iexc). En todos los cálculos se supondrá despreciable la resistencia de estator del alternador, así como todas las pérdidas.

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Examen de: **(5602) MAQUINAS ELECTRICAS (P. 1997)**

21 de Diciembre de 2010.

EXAMEN

Parte Teórica (Preguntas: 50% del examen)

Pregunta 1 (25% del examen)

Armónicos en los transformadores trifásicos

a) Explicar cuáles son las causas que normalmente provocan la aparición de armónicos en las corrientes y tensiones de un transformador trifásico, aún cuando se lo alimente en su primario con un sistema de tensiones trifásicas, equilibradas y directas, perfectamente sinusoidales, sin armónicos.
b) En las condiciones de a) indicar los motivos por los que no se espera encontrar armónicos de rango par en las corrientes.
c) Indicar los métodos constructivos que conoce para reducir o limitar la amplitud de los armónicos de tensiones y corrientes en los bobinados primario y secundario de un transformador trifásico YNyn, justificando los mismos e indicando el campo de aplicación de cada método.

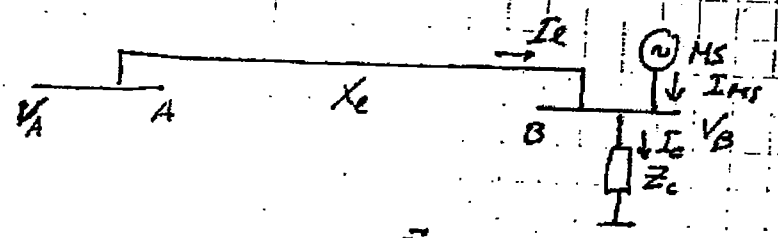
Pregunta 2 (25% del examen)

Estabilidad del funcionamiento de la Máquina Sincrónica.

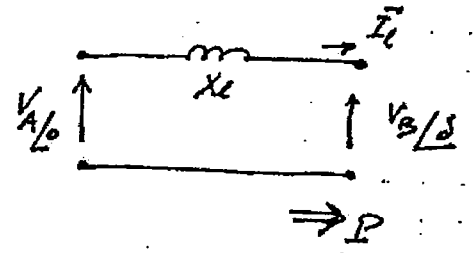
Se considera el caso de una máquina sincrónica MS (de polos lisos, sin bobinados amortiguadores, funcionando en régimen lineal, de resistencia de bobinados despreciable y reactancia sincrónica Xs) trabajando como alternador y conectada en sus bornes a una red eléctrica de potencia infinita, y con corriente de excitación mantenida constante.

1. Estableciendo las ecuaciones eléctricas y mecánicas que rigen el funcionamiento en régimen permanente equilibrado, mostrar que ante una pequeña variación en la potencia mecánica aplicada al eje de MS, la velocidad de la máquina entra en un régimen oscilatorio superpuesto a la velocidad sincrónica.
2. Analizando las ecuaciones que rigen este movimiento oscilatorio, indicar cuál es la condición de estabilidad del funcionamiento de MS. Mostrar que para cualquier estado inicial $P0$ de la potencia mecánica en el eje, existe un $\Delta P_{máx}$ (dependiente de $P0$) tal que si se aplica una variación ΔP de potencia en el eje, con $\Delta P > \Delta P_{máx}$, el funcionamiento resulta inestable, con pérdida del sincronismo.

Ejercicio N°2



MS : conv. tipo generador.



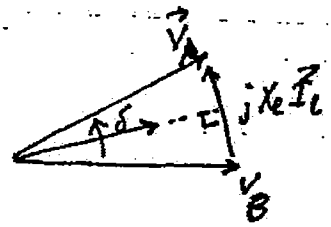
$V_B = V_A = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3819{,}5\ V$

$X_\ell = 1{,}3\ \Omega$

$P = 3\,\frac{V_A V_B}{X_\ell}\sin\delta$ $\qquad P = \sqrt{3}\ 6600 \cdot 400 \cdot 0{,}9 = 4115353\ W$

$\sin\delta = \frac{P \cdot X_\ell}{3\,V^2} = \frac{P \cdot X_\ell}{U^2} = \frac{4115353\ W \cdot 1{,}3\ \Omega}{6600^2\ V^2} = 0{,}1228$

$\Rightarrow \boxed{\delta = 7°{,}05}$



$\boxed{\vec{V}_B + jX_\ell\vec{I}_\ell = \vec{V}_A}$

$\vec{I}_\ell = \frac{\vec{V}_A - \vec{V}_B}{jX_\ell}$

$\vec{I}_\ell = \frac{\frac{6600}{\sqrt{3}}\angle 0 - \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle -7°{,}05}{1{,}3\angle 90°} = 360{,}44\ A\angle -3°{,}525$

$\boxed{\vec{I}_\ell + \vec{I}_{MS} = \vec{I}_c}$

$\vec{I}_c$: 400 A bajo $\cos\varphi = 0{,}9$ inductivo $\Rightarrow \varphi = 25{,}84$

$\Rightarrow \vec{I}_c = 400\ A\angle -7°{,}05 - 25{,}84 = 400\ A\angle -32{,}89$

$\boxed{\vec{I}_{MS} = \vec{I}_c - \vec{I}_\ell = 400\angle -32{,}89 - 360{,}44\angle -3{,}525 = 196{,}5\angle -96{,}98}$

$\left.\begin{array}{l}\vec{V}_{MS} = \vec{V}_B = \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle -7°{,}05 \\ \vec{I}_{MS} = 196{,}5\angle -96{,}98\end{array}\right\} \Rightarrow$ equivale a (cambiando la referencia de ángulo) $\left\{\begin{array}{l}\vec{V}_{MS} = \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle 0 \\ \vec{I}_{MS} = 196{,}5\angle -89{,}9 \\ \simeq 196{,}5\angle -90\end{array}\right.$

Verificamos que:

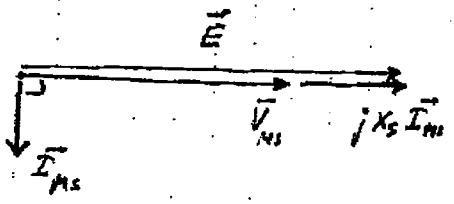
$\Rightarrow$ MS trabaja como compensador sincrónico.

$\Rightarrow \boxed{I_{MS} = 196{,}5\ A,\ \text{en cuadratura con } V_{MS}.}$

Cálculo de la corriente de excitación de MS

$$X_s = \frac{E\,(i_{exc} = 200\,A)}{I_{cc}\,(i_{exc} = 200\,A)} = \frac{(7400\,V/\sqrt{3})}{\left(\frac{200}{54}\right)\cdot 438\,A} = 2{,}63\ \Omega$$

MS funcionando como compensador sincrónico $\vec{I}_{MS} \perp \vec{V}_B = \vec{V}_{MS}$



$\vec{V}_{MS} + jX_s\vec{I}_{MS} = \vec{E}$ pero son colineales

$$\Rightarrow E = V_{MS} + X_s I_{MS}$$

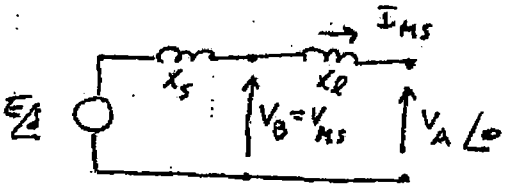
$$= \frac{6600}{\sqrt{3}} + 2{,}63\cdot 196{,}5 = 4327{,}3\ V$$

$$\sqrt{3}E = 7495{,}1\ V$$

$$\Rightarrow \boxed{i_{exc} = \frac{7495{,}1}{7400}\cdot 200 = 202{,}57\ A}$$

---

2)

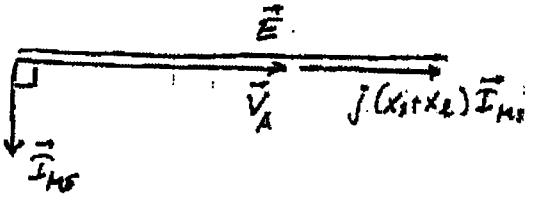


$$\vec{V}_A = V_A\angle 0 = \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle 0$$

$$\vec{E} = E\angle\delta \qquad E = 4327{,}3\ V$$

$$\delta\,? : \quad P = \frac{3V_A E}{(X_s + X_\ell)}\sin\delta$$

Pero $P = 0$ por $\left\{\begin{array}{l}\text{compensador sincrónico}\\ \text{Pérdidas MS y cable despreciadas.}\end{array}\right\} \Rightarrow \underline{\delta = 0}$



$$\Rightarrow I_{MS} = \frac{E - V_A}{X_s + X_\ell}$$

$$\boxed{I_{MS} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{7495{,}1 - 6600}{(2{,}63 + 1{,}3)} = 131{,}5\ A}$$

$\vec{V}_B = \vec{V}_A + jX_\ell\vec{I}_{MS}$ pero son colineales

$$\boxed{V_B = \frac{6600}{\sqrt{3}} + 1{,}3\cdot 131{,}5 = 3891{,}5\ V}$$

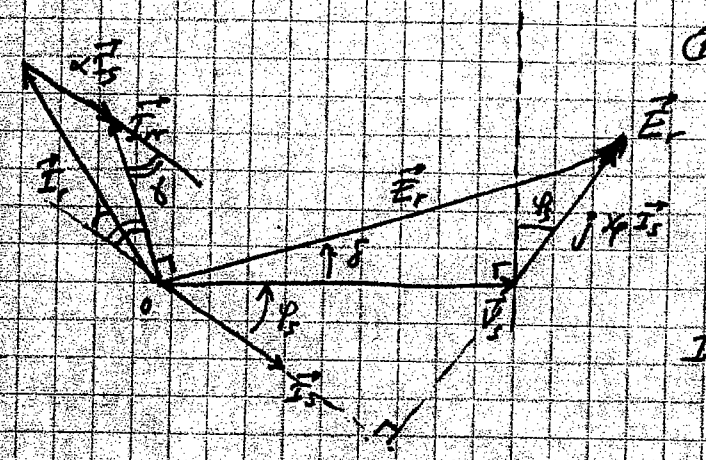
$$\boxed{\sqrt{3}\,V_B = 6896{,}1\ V} \quad \text{ó} \quad \boxed{V_B\,(p.u.) = 1{,}045}$$

5/7

Problema 2. Solución Propuesta.

1) Método de Potier. En ensayo se determinaron previamente α y X_p

$$\boxed{\begin{aligned}\alpha &= 0{,}254\\ X_p &= 48{,}11\ \Omega\end{aligned}}$$



$$① \quad \boxed{E_r^2 = V_s^2 + X_p^2 I_s^2 - 2 V_s X_p I_s \underbrace{\cos\left(\frac{\pi}{2}+\varphi_s\right)}_{-\sin(\varphi_s)}}$$

$$\gamma + \frac{\pi}{2} + (\varphi_s + \delta) = \pi$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma = \frac{\pi}{2} - (\varphi_s + \delta)}$$

$$I_r^2 = I_{rr}^2 + (\alpha I_s)^2 - 2 I_{rr} \cdot \alpha I_s \underbrace{\cos(\pi - \gamma)}_{\underbrace{\cos\left(\frac{\pi}{2} + (\varphi_s+\delta)\right)}_{-\sin(\varphi_s+\delta)}}$$

$$② \quad \boxed{I_r^2 = I_{rr}^2 + \alpha^2 I_s^2 + 2\alpha I_s I_{rr} \sin(\varphi_s + \delta)}$$

$$\boxed{P = 84\ kW = P_{\text{mecánica de la Turbina}}}$$

$\delta_{exc}^{?} = ?$ Carga: $P = 84\ kW$ $\cos\varphi_s = 0{,}7$ inductivo $\Rightarrow$ MS sobreexcitada

$$\Rightarrow \varphi_s = \operatorname{Arcos}(0{,}7) = 45°{,}5730$$

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{84\ kW}{0{,}7} = 120\ kVA \Rightarrow I_s = \frac{120\ kVA}{\sqrt{3}\ 6\ kV}$$

$$\boxed{\vec{I}_s = 11{,}547\ A \angle \varphi = -45°{,}5730}$$

$$① \Rightarrow E_r^2 = \left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)^2 + (48{,}11 \cdot 11{,}547)^2 + 2\,\frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot 48{,}11 \cdot 11{,}547 \sin(45°{,}5730)$$

$$E_r = 3880{,}4\ V \Rightarrow \sqrt{3}\,E_r = 6720{,}9\ V \Rightarrow \boxed{I_{rr} = 7{,}638\ A}$$

$$I_{rr} = 6 + \frac{8-6}{6{,}88-6}(6{,}7209 - 6) = 7{,}638\ A$$

$$\sin\delta = \frac{X_p I_s \cos\varphi_s}{E_r} = \frac{48{,}11 \cdot 11{,}547 \cdot 0{,}7}{3880{,}4} \Rightarrow \boxed{\delta = 5°{,}752}$$

$$② \Rightarrow i_{exc}^{\circ 2} = I_r^2 = (0{,}254 \cdot 11{,}547)^2 + 7{,}638^2 + 2 \cdot 0{,}254 \cdot 11{,}547 \cdot 7{,}638 \sin(45°{,}5730 + 5°{,}752)$$

$$\boxed{i_{exc} = I_r = 10{,}096\ A} \simeq \boxed{i_{exc}^{\circ} = 10{,}1\ A}$$

2). Método de $X_S(i_{exc})$ $\qquad i_{exc_{cc}} = 3A \Rightarrow I_{Sc_{cc}} = 9A \Rightarrow I_{Sc} = 3\, i_{exc_{cc}}$

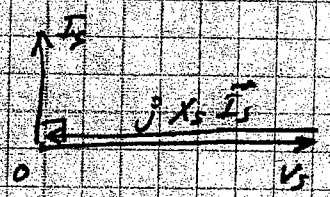
i_{exc} (A)	0	2	4	6	8	10	12	15,6
U_0 (entre fases) kV	0	2,2	4,4	6,00	6,88	7,49	7,82	8,25
I_{Sc} (A)	0	6	12	18	24	30	36	46,8
$X_S = \frac{U_0}{\sqrt{3}\, I_{Sc}}$ (Ω)	(211,7)	211,7	211,7	192,2	165,5	144,1	125,9	101,8

Extrapolando en la zona $X_S = cte$.

Si $i_{exc} = 0 \Rightarrow \boxed{X_S(0) = 211,7\ \Omega}$

$$I_S = \frac{V_S}{X_S} = \frac{6000\ V}{\sqrt{3}\ 211,7\ \Omega} = 16,363\ A.$$

$\rightarrow E = 0$



Bohn-Tschebyscheff:

$$\vec{V}_S + jX_S\vec{I}_S = \vec{E} = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{I}_S = 16,363\ A \angle 90^\circ}$$

$\delta = 90^\circ$ según el referencial

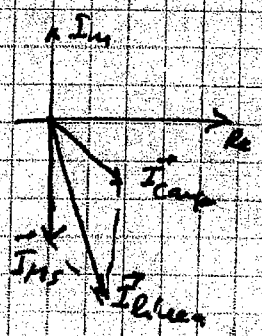
$$\vec{I}_{carga} = 11,547\ A \angle -45,5830$$

Se debe tomar a $\boxed{\vec{I}_{MS} = 16,363\ A \angle -90^\circ}$ porque tanto las cargas como MS consumen reactiva en sus bornes (MS sobreexitado!)

conv. signos receptor

$$\vec{I}_{línea} = \vec{I}_{carga} + \vec{I}_{MS}$$

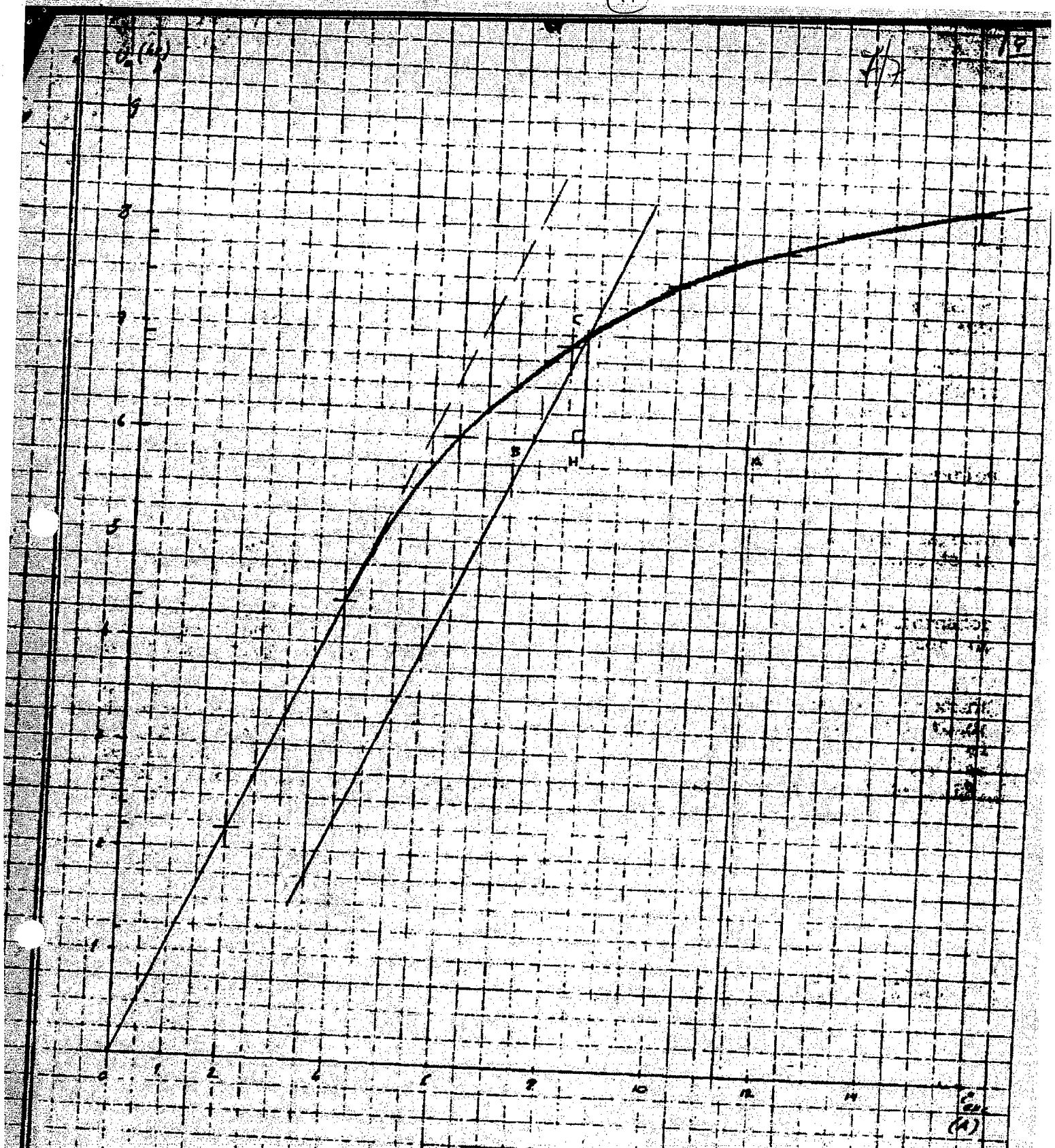
ambos en conv. signos receptor



$$\vec{I}_{línea} = (8,0829 - j\,8,2462) - j\,16,363\ A$$

$$= 8,0829 - j\,24,6095$$

$$\boxed{\vec{I}_{línea} = 25,90\ A \angle -71,8174}$$



$AH = \alpha I_{sd} = 30{,}5 \text{ mm} = 3{,}05 \text{ A}$

$CH = \sqrt{3}\, X_p I_{sd} = 20 \text{ mm} = 1 \text{ kV}$

$I_{sd} = 12 \text{ A} \Rightarrow$

$$\boxed{\begin{aligned} \alpha &= \frac{3{,}05 \text{ A}}{12 \text{ A}} = 0{,}254 \\ X_p &= \frac{1000 \text{ V}}{\sqrt{3}\, 12 \text{ A}} = 48{,}11\ \Omega \end{aligned}}$$