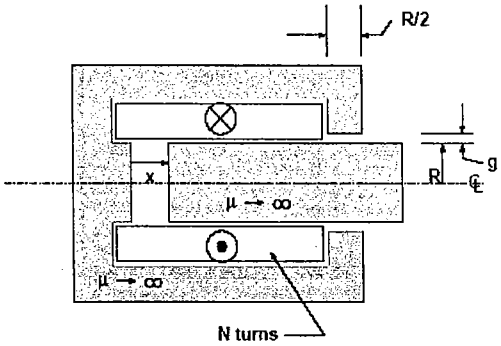
INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Examen de: **(5602) MAQUINAS ELECTRICAS (Plan 1997)**

8 de Julio de 2010.

EXAMEN PARCIAL - Preguntas: 100% del examen

Pregunta 1 (35% del examen)
Se tiene el dispositivo indicado en la figura. Se trata de un electroimán con simetría de revolución, cuyo núcleo móvil de hierro, de forma cilíndrica de radio R, puede moverse por efecto de la corriente que circule por el bobinado de N espiras. Observar que el circuito magnético posee, además del entrehierro dado por el desplazamiento x del núcleo móvil, otro entrehierro de forma anular dado por la distancia g existente entre el núcleo móvil y la carcasa de hierro del electroimán. Se supondrá que la permeabilidad magnética del hierro es infinita y que g<<R.



52115096

a) Determinar la expresión de la autoinductancia L(x) de dicho dispositivo.
b) Para una posición x dada y suponiendo que por el bobinado circula una corriente i alterna, sinusoidal, de frecuencia f, ¿de qué parámetro(s) de la corriente depende el valor medio <F> de la fuerza de origen magnético aplicada al núcleo móvil?

Pregunta 2 (30% del examen)
Diagrama de Mordey.
a) Describir el diagrama de Curvas "en V" (o diagrama de Mordey) de una Máquina Sincrónica (MS) de polos lisos en régimen lineal. Indicar qué parámetros del funcionamiento de la máquina se grafica en abscisas y en ordenadas, y qué familia de curvas se representa en el diagrama, bajo qué hipótesis.
b) A partir del diagrama fasorial de la MS, supuesta con resistencia de fase de estator despreciable, dar una explicación a la forma general de la familia de curvas representada en el diagrama de Mordey.
c) Indicar el andamiento particular que tienen las curvas correspondientes a potencia activa nula, y cómo se puede explicar el mismo.

Pregunta 3 (35% del examen)
Estabilidad de maquinas sincronicas.
Se tiene un motor sincrónico MS, conectado en estrella y alimentado desde una red de potencia infinita (tensión y frecuencia constantes) de tensión V_s por fase. La corriente de excitación se mantiene constante, y está asociada a un valor E de la tensión interna, por fase.

En las condiciones indicadas, si el motor está entregando inicialmente una potencia $P_0 = (3/2)\ (V_s.E)/X_s$ indicar cuál es el máximo incremento instantáneo de carga, expresado como $\Delta P = f(P_0,\delta 1)$, que podría teóricamente aplicarse al eje del motor sin que éste pierda la estabilidad. Se dejará expresada la relación que define el ángulo $\delta 1$, aunque no se exige resolverla.

Se supondrá que el modelo de Behn-Eschemburg es aplicable al motor MS, y que la reactancia sincrónica X_s representa adecuadamente el funcionamiento de MS, aún durante los transitorios. Se despreciarán todas las pérdidas eléctricas y mecánicas de la máquina.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto de Documentación y Biblioteca
Montevideo Uruguay

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

8 de Julio 2010.

EXAMEN TOTAL

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

Problema No. 1 (60% del práctico, 30% 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 reactancia X/ = 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 sensiblemente. A los efectos de evitar esa caída de tensión, en la barra B se conecta una máquina sincrónica MS para funcionar exclusivamente como compensador de reactiva, y llevar la tensión de B a su valor nominal.

Datos MS: Un = 6.6 kV, Conexión en estrella. Resistencia de fase despreciable. Curva de vacío a 50 Hz:

iexc (A)	0	54	100	150	200	250	275
E entre fases (V)	0	2600	4800	6470	7400	7930	8150

Ensayos en devatado a 50 Hz, para I_d = 438 A :

a) i_{exc} = 54 A , U_d = 0 b) i_{exc} = 250 A , U_d = 6600 V

Se pide:

1) Determinar la corriente de línea de MS en el funcionamiento indicado, con la barra B a tensión Un.
2) Empleando el método de Potier, calcular la corriente de excitación requerida por MS en ese funcionamiento. Se admite la linealización por tramos de la curva de vacío.
3) Teniendo la corriente de excitación regulada como en 2) y manteniendo fijo su valor, se desconecta completamente la carga. Calcular el valor resultante de la tensión en la barra B, y la corriente de línea de MS en este funcionamiento. Para corriente de excitación fija, se admitirá aplicable el modelo de Behn-Eschemburg, tomando $X_s(i_{exc})$.

Problema No. 2 (40% del práctico, 20% del examen)

Dos alternadores trifásicos iguales, conectados en estrella, cada uno de 850 kVA, 2200 V, están rígidamente acoplados al mismo motor. Los alternadores son de 64 polos (p=32), y tienen una reactancia sincrónica de 2.12 Ω por fase, considerándose despreciable su resistencia. Sus estatores están eléctricamente acoplados en paralelo, suministrando el conjunto 1400 kW con factor de potencia 0.87 inductivo y bajo la tensión nominal de 2200 V.

El sistema de excitación es único para las dos máquinas, trabajando entonces ambas con la misma corriente de excitación. Los estatores de los alternadores están perfectamente alineados pero por la imprecisión del montaje mecánico los rotores resultaron montados con un desplazamiento angular mecánico o geométrico de 30' (minutos de grado) uno respecto del otro.

Se pide:

1) Indicar el ángulo eléctrico o ángulo de fase con que deben resultar desfasados entre sí los fasores asociados a las tensiones internas de ambos alternadores, y determinar el módulo de dichas tensiones internas E en el funcionamiento bajo carga descripto.
2) Calcular la potencia suministrada por cada máquina y la respectiva corriente de línea en esas condiciones.

Nota:
En todo el problema se supone que los alternadores trabajan en régimen lineal. A pesar de que en realidad se trata de máquinas de polos salientes, se admitirá que el modelo de Behn-Eschemburg representa

FACULTAD DE INGENIERIA Centro de Documentación Montevideo - Uruguay

adecuadamente el funcionamiento de las mismas, con el valor de reactancia sincrónica indicado.

y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

(17)

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

8 de Julio 2010.

EXAMEN TOTAL

Parte Teórica (Preguntas: 50% del examen)

Pregunta 1 (20% del examen)

Diagrama de Mordey.

1) Describir el diagrama de Curvas "en V" (o diagrama de Mordey) de una Máquina Sincrónica (MS) de polos lisos en régimen lineal. Indicar qué parámetros del funcionamiento de la máquina se grafica en abscisas y en ordenadas, y qué familia de curvas se representa en el diagrama, bajo qué hipótesis.
2) A partir del diagrama fasorial de la MS, supuesta con resistencia de fase de estator despreciable, dar una explicación a la forma general de la familia de curvas representada en el diagrama de Mordey.
3) Indicar el andamiento particular que tienen las curvas correspondientes a potencia activa nula, y cómo se puede explicar el mismo.

Pregunta 2 (30% del examen)

Estabilidad de maquinas sincronicas.

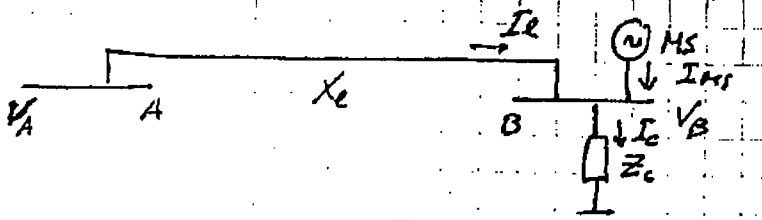
Se tiene un motor sincrónico MS, conectado en estrella y alimentado desde una red de potencia infinita (tensión y frecuencia constantes) de tensión V_s por fase. La corriente de excitación se mantiene constante, y está asociada a un valor E de la tensión interna, por fase.

En las condiciones indicadas, si el motor está entregando inicialmente una potencia $P_0 = (3/2)\ (V_s.E)/X_s$ indicar cuál es el máximo incremento instantáneo de carga, expresado como $\Delta P = f(P_0,\delta 1)$, que podría teóricamente aplicarse al eje del motor sin que éste pierda la estabilidad. Se dejará expresada la relación que define el ángulo $\delta 1$, aunque no se exige resolverla.

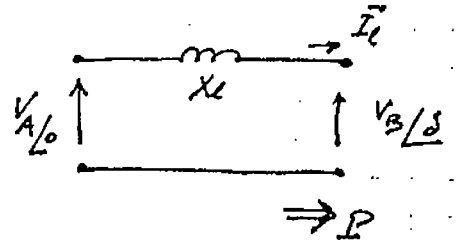
Se supondrá que el modelo de Behn-Eschemburg es aplicable al motor MS, y que la reactancia sincrónica X_s representa adecuadamente el funcionamiento de MS, aún durante los transitorios. Se despreciarán todas las pérdidas eléctricas y mecánicas de la máquina.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto de Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

4/90



MS : conv. signo generador.



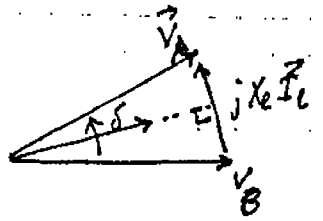
$V_B = V_A = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3819{,}5\ V$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

$$\left.\begin{aligned} \vec{V}_{MS} &= \vec{V}_B = \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle -7{,}05 \\ \vec{I}_{MS} &= 196{,}5\angle -96{,}98 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} \vec{V}_{MS} &= \frac{6600}{\sqrt{3}}\angle 0 \\ \vec{I}_{MS} &= 196{,}5\angle -89{,}9 \\ &\simeq 196{,}5\angle -90 \end{aligned}\right.$$

equivale a (cambiando la referencia de ángulos)

Verifico que:
$\Rightarrow$ MS trabaja como compensador sincrónico.

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

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto de Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

3) Determinación de $X_s(i_{exc})$

$$I_{sc} = \frac{i_{exc}}{54} \cdot 438 = 8{,}111\ i_{exc}$$

$$\sqrt{3}\, X_s(i_{exc}) \cdot I_{sc}(i_{exc}) = E(i_{exc})$$

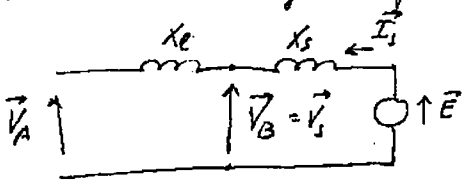
$$\Rightarrow \boxed{X_s(i_{exc})} = \frac{E(i_{exc})}{\sqrt{3}\, I_s(i_{exc})} = \boxed{\frac{E(i_{exc})}{8{,}111 \cdot \sqrt{3}\ i_{exc}}} = \frac{E}{14{,}05\ i_{exc}}$$

i_{exc} (A)	0	54	100	150	200	250	275
E (entre fases) (V)	0	2600	4800	6470	7400	7930	8150
$X_s(i_{exc})$ (Ω)		3,427	3,417	3,070	2,634	2,258	2,110

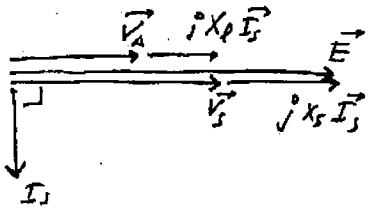
Si $i_{exc} = 196{,}35$ A $\Rightarrow X_s(196{,}35\ A) = 3{,}070 - \left(\frac{3{,}070 - 2{,}634}{200 - 150}\right)(196{,}35 - 150)$

$$\boxed{X_s = 2{,}666\ \Omega} \qquad \boxed{E = 6470 + \left(\frac{7400 - 6470}{200 - 150}\right)(196{,}35 - 150) = 7332{,}11\ V}$$

Al no estar la carga, el funcionamiento es sin potencia activa $\Rightarrow$ "desatado"



$$P = 3\,\frac{V_A E}{(X_\ell + X_s)} \sin\delta = 0 \Rightarrow \delta = 0$$



$$\vec{V_s} + jX_s \vec{I_s} = \vec{E}$$
$$\vec{V_A} + jX_\ell \vec{I_s} = \vec{V_s}$$
$$\vec{V_A} + j(X_\ell + X_s)\vec{I_s} = \vec{E}$$

Se transforman en eq. escalares:

$$\boxed{\begin{aligned} E &= V_s + X_s I_s \\ E &= V_A + (X_s + X_\ell) I_s \\ V_s &= V_A + X_\ell I_s \end{aligned}}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_s = \frac{E - V_A}{X_\ell + X_s}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{7332{,}11 - 6600}{1{,}3 + 2{,}666} = \boxed{106{,}58\ A}$$

$$\boxed{V_s = V_A + X_\ell I_s = \frac{6600}{\sqrt{3}} + 1{,}3 \cdot 106{,}58 = 3{,}949{,}06\ V}$$

$$\boxed{U_s = \sqrt{3}\, V_s = 6840\ V \quad (1{,}036\ p.u.)}$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. de Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

3) Determinación de $X_s(i_{exc})$

$$I_{scc} = \frac{i_{exc}}{54} \cdot 438 = 8{,}111\ i_{exc}$$

$$\sqrt{3}\, X_s(i_{exc}) \cdot I_{scc}(i_{exc}) = E(i_{exc})$$

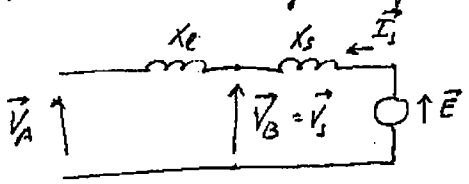
$$\Rightarrow \boxed{X_s(i_{exc}) = \frac{E(i_{exc})}{\sqrt{3}\, I_s(i_{exc})} = \frac{E(i_{exc})}{8{,}111 \cdot \sqrt{3}\ i_{exc}}} = \frac{E}{14{,}05\ i_{exc}}$$

i_{exc} (A)	0	54	100	150	200	250	275
E (entre fases) (V)	0	2600	4800	6470	7400	7930	8150
$X_s(i_{exc})$ (Ω)		3,427	3,417	3,070	2,634	2,258	2,110

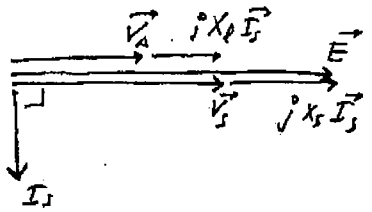
Si $i_{exc} = 196{,}35$ A $\Rightarrow X_s(196{,}35\ A) = 3{,}070 - \left(\frac{3{,}070 - 2{,}634}{200 - 150}\right)(196{,}35 - 150)$

$$\boxed{X_s = 2{,}666\ \Omega} \qquad \boxed{E = 6470 + \left(\frac{7400 - 6470}{200 - 150}\right)(196{,}35 - 150) = 7332{,}11\ V}$$

Al no estar la carga, el funcionamiento es sin potencia activa $\Rightarrow$ "desatado"



$$P = 3\,\frac{V_A E}{(X_\ell + X_s)} \sin\delta = 0 \Rightarrow \delta = 0$$



$$\vec{V}_s + jX_s\vec{I}_s = \vec{E}$$

$$\vec{V}_A + jX_\ell\vec{I}_s = \vec{V}_s$$

$$\vec{V}_A + j(X_\ell + X_s)\vec{I}_s = \vec{E}$$

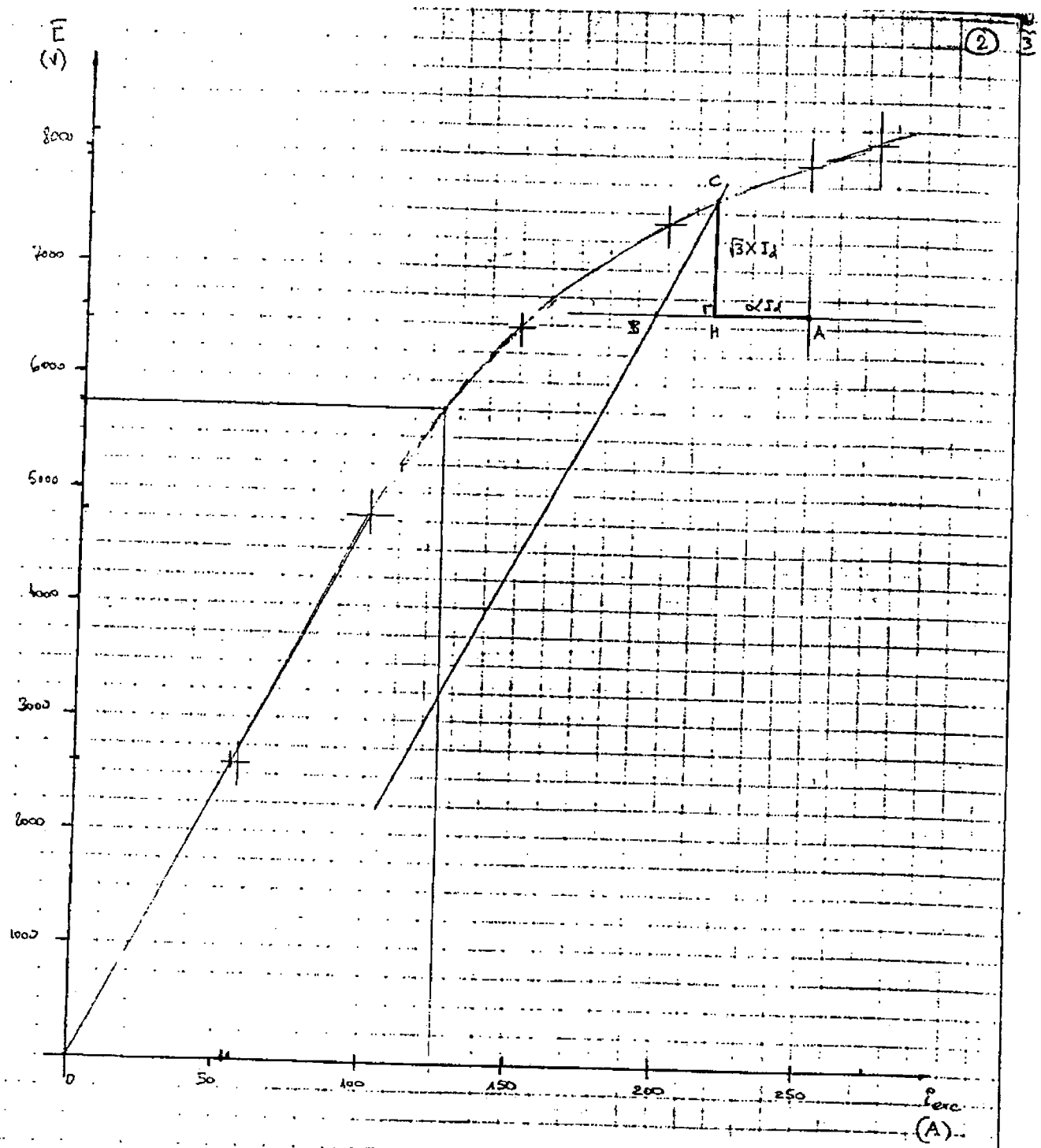
Se transforman en ecs. escalares:

$$\boxed{\begin{aligned} E &= V_s + X_s I_s \\ E &= V_A + (X_s + X_\ell) I_s \\ V_s &= V_A + X_\ell I_s \end{aligned}}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_s = \frac{E - V_A}{X_\ell + X_s}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{7332{,}11 - 6600}{1{,}3 + 2{,}666} = \boxed{106{,}58\ A}$$

$$\boxed{V_s = V_A + X_\ell I_s = \frac{6600}{\sqrt{3}} + 1{,}3 \cdot 106{,}58 = 3{,}949{,}06\ V}$$

$$\boxed{U_s = \sqrt{3}\, V_s = 6840\ V \quad (1{,}036\ p.u)}$$



$I_d = 438$ A.

$AB = 54$ A

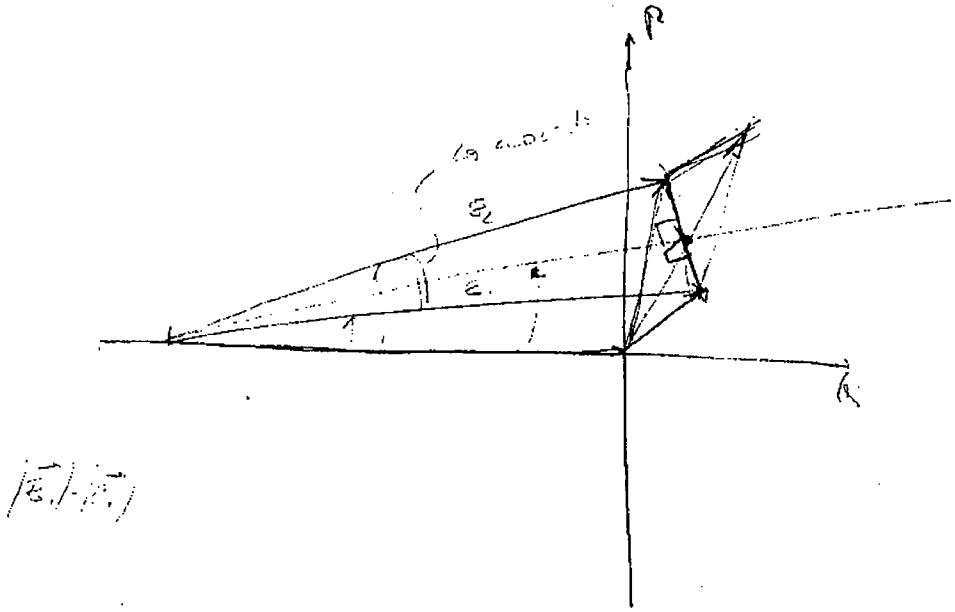
$AH = \alpha I_d = 17$ mm $= 34$ A

$$\Rightarrow \boxed{\alpha = \frac{34\ A}{438\ A} = 0{,}0776}$$

$CH = \sqrt{3} X_p I_d = 20$ mm $= 1000$ V

$$\Rightarrow \boxed{X_p = \frac{1000\ V}{\sqrt{3} \cdot 438\ A} = 1{,}318\ \Omega}$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto de Documentación y Biblioteca
Montevideo



$|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$

$2\vec{I}_1 + 2\vec{I}_2 = 2\vec{I}_t$

Igualdad de corriente. $I \angle \varphi_t$

(1) $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 = \vec{I}_t$

(2) $\vec{V}_1 + jX_s\vec{I}_1 = \vec{E}_1$

(3) $\vec{V}_2 + jX_s\vec{I}_2 = E_2$

(4) $\vec{V}_1 = \vec{V}_2 = \vec{V}$ (operación en paralelo de las estatas)

(1)' $\vec{V} + jX_s\vec{I}_1 = \vec{E}_1$

(2)' $\vec{V} + jX_s\vec{I}_2 = \vec{E}_2$

(5) $2\vec{V} + jX_s(\vec{I}_1 + \vec{I}_2) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ Notación $\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

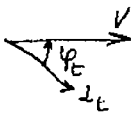
(5) $\vec{V} + jX_s\dfrac{\vec{I}_t}{2} = \dfrac{\vec{E}_t}{2}$

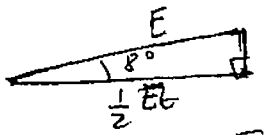
Dato. (o se calcula de los datos) $\vec{I}_t = |I_t|\angle Ang(I_t)$ / de la potencia

$\Rightarrow$ Se puede calcular $\vec{E}_t$ (ó $\frac{\vec{E}_t}{2}$) en $\parallel$ y Ang.

con E_t

$I = 3VI_t\cos\varphi_t$

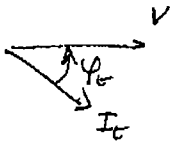




$E\cos\delta° = \frac{E_t}{2} \Rightarrow$ Ecs E_1 y E_2

FACULTAD DE INGENIERIA
Centro de Documentación y Biblioteca
Montevideo Uruguay

$\cos\varphi_t = 0{,}87 \Rightarrow \varphi_t = 29{,}54°$



$I_t = \dfrac{P}{\sqrt{3}\,U\cos\varphi_t} = \dfrac{1400\ 10^3}{\sqrt{3}\ 2200\cdot 0{,}87} = 422{,}30\ A.$

$X_s = 2{,}12\ \Omega$ (dato)

$\frac{1}{2}\vec{E}_t = \vec{V} + jX_s\dfrac{\vec{I}_t}{2}$

$= \dfrac{2200}{\sqrt{3}}\angle 0 + \underset{\substack{\uparrow \\ \shortparallel \\ 1\angle 90°}}{j}\cdot 2{,}12\,\Omega\cdot 211{,}15\angle -29{,}54$

$= \dfrac{2200}{\sqrt{3}}\angle 0 + 447{,}64\angle 60{,}46$

$= (1270{,}17 + j0) + 220{,}70 + j\,389{,}45 = 1490{,}87 + j\,389{,}45$

$\boxed{\frac{1}{2}\vec{E}_t = 1540{,}90\angle 14°{,}64}$ $\nearrow +8°$ $\searrow -8°$

$E = \dfrac{\frac{1}{2}|\vec{E}_t|}{\cos 8°} = \dfrac{1540{,}90}{\cos 8°} = 1556\ V$

$\Rightarrow \vec{E}_1 = 1556{,}0\angle 22°{,}64 = 1436{,}10 + j\,598{,}57$

$\vec{E}_2 = 1556{,}0\angle 6{,}64 = 1545{,}56 + j\,179{,}92$

$\Rightarrow P_1 = 3\dfrac{E_1 V}{X_s}\sin\delta_1 = 3\cdot\dfrac{1556\cdot 1270{,}17}{2{,}12}\sin 22°{,}64 = 1076{,}59\ kW$ ~~2 587,26 kW~~

$P_2 = 3\dfrac{E_2 V}{X_s}\sin\delta_2 = 3\cdot\dfrac{1556\cdot 1270{,}17}{2{,}12}\sin 6°{,}64 = 323{,}39\ kW$

$1399{,}98$

$1400{,}4\ kW$

$jX_s\vec{I}_1 = \vec{E}_1 - \vec{V} = \underbrace{1556\angle 22°{,}64}_{1436{,}10 + j\,598{,}57} - 1270{,}17 = 165{,}93 + j\,598{,}57 =$

$= 621{,}53\angle 74°{,}51$

$\boxed{\vec{I}_1 = 293{,}17\ A\angle -15°{,}41}$

$jX_s\vec{I}_2 = \vec{E}_2 - \vec{V} = 1545{,}56 + j\,179{,}92 - 1270{,}17 = 328{,}95\angle 33°{,}15$

$\boxed{\vec{I}_2 = 155{,}17\ A\angle -56°{,}34}$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto de Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay