

Fig. 8-10 Obtención del Triángulo

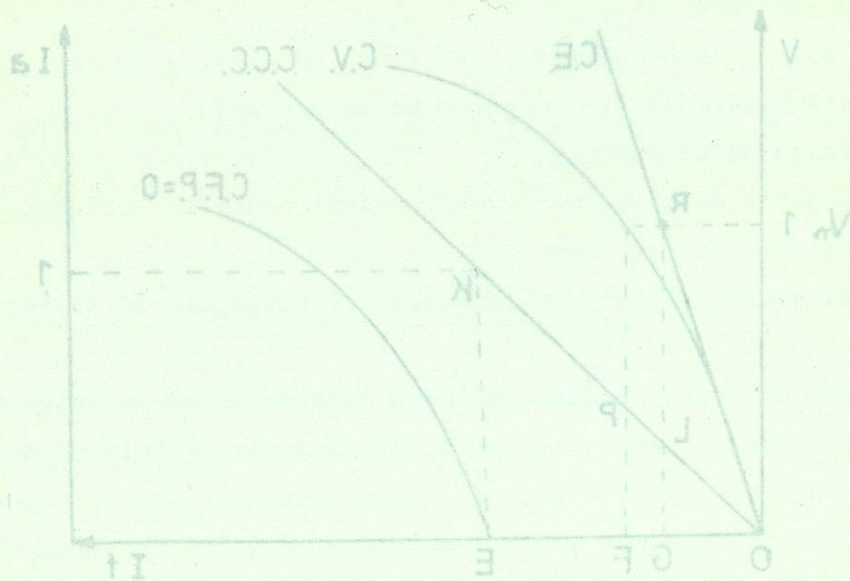


Fig. 8-11 Relación de Corto Circuito

O sea que en la gráfica sería:

$$R_{cc \text{ sat.}} = \frac{OF}{OE} = \frac{PF}{KE} = \frac{PF}{1} = PF$$

La relación de corto circuito sin considerar la saturación sería:

$$R_{cc \text{ no sat.}} = \frac{OG}{OE} = \frac{LG}{KE} = \frac{LG}{1} = LG$$

Realmente, las ecuaciones anteriores se formaron gracias a la relación de triángulos semejantes.

La relación de corto circuito es un factor importante en la máquina síncrona por las razones siguientes. La fuerza magnetomotriz del campo OE (fig. 8-11), necesaria para producir la corriente nominal en corto circuito es mayor que la fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura y la caída  $I_a X_d$  (ver fig. 8-5). Una  $R_{cc}$  pequeña indica una reacción de armadura mayor, es decir una máquina sensible con respecto a las variaciones de carga y viceversa.

Determinación de la Reactancia síncrona de eje directo  $X_d$ . Esta reactancia puede determinarse de las características de vacío y de C.C. considérese la fig. 8-11. La corriente de campo OG induce el voltaje  $V_n$  en vacío (sin saturación). Cuando el estator está en C.C. a la misma corriente OG el voltaje inducido es el mismo solo que se consume por la caída en la impedancia síncrona  $X_d$ .

0 sea que en la gráfica sería:

$$R_{cc} \text{ sat.} = \frac{OE}{OF} = \frac{PF}{PE} = \frac{PF}{1} = PF$$

La relación de corto circuito sin considerar la saturación se--

$$R_{cc} \text{ no sat.} = \frac{OG}{OE} = \frac{IG}{IF} = \frac{IG}{1} = IG$$

Asimismo, las ecuaciones anteriores se formaron gracias a la -  
 relación de triángulos semejantes.

La relación de corto circuito es un factor importante en la má-  
 quina síncrona por las razones siguientes. La fuerza magneto-  
 motriz del campo OE (fig. 8-11), necesaria para producir la co-  
 rriente nominal en corto circuito es mayor que la fuerza magne-  
 tomotriz de la reacción de armadura y la caída IaXd (ver fig. 8-9).  
 Una Rcc pequeña indica una reacción de armadura mayor, es decir una máquina sensible con respecto a las variaciones de  
 carga y viceversa.

Determinación de la reactancia síncrona de eje directo Xd. Es-  
 ta reactancia puede determinarse de las características de va-  
 rios y de C.C. considérese la fig. 8-11. La corriente de campo  
 que induce el voltaje Vn en vacío (sin saturación). Cuando el  
 estator está en C.C. a la misma corriente OG el voltaje induci-  
 do es el mismo solo que se consume por la caída en la impedan-  
 cia síncrona Xd.

$$E_f = GR = V_n = I_a X_l + I_a X_a \text{ (despreciando } R_a)$$

$$X_l + X_a = X_d$$

$$X_d \frac{V_n}{I_a} \approx \frac{V_n}{GL} \approx \frac{1}{GL}$$

como se mostró antes, GL es la relación de corto circuito no sa-  
 turada por lo que:

$$X_d = \frac{1}{R_{cc} \text{ no sat.}}$$

es decir, la reactancia síncrona en P.U. es igual al inverso de la  
 relación de corto circuito no saturada.

6 Regulación de la Tensión.- El porcentaje de regulación es un con-  
 cepto importante en los generadores síncronos ya que representa  
 el porcentaje de elevación que sufriría el voltaje en las termi-  
 nales al perder la carga, sin cambiar corriente de campo y velo-  
 cidad. El porcentaje de regulación de voltaje se define por:

$$\% \text{ Reg.} = \frac{E_f - V_n}{V_n} * 100 \quad \text{ec. 8-1}$$

Ef - voltaje inducido solo por If

Vn - voltaje en terminales a plena carga

En generadores síncronos el porcentaje de regulación de volta-  
 je debe ir asociado con el tipo de carga aplicada ya que, para  
 la misma potencia de salida existen diferentes regulaciones en-  
 cargas inductivas que en resistivas o capacitivas.

El = GR = Vn = Ia Xl + Ia Xa (despreciando Ra)  
 Xl + Xa = Xd  

$$X_d \frac{V_n}{I_a} = \frac{V_n}{I_a} = \frac{1}{G_L}$$
  
 como se mostró antes, GL es la relación de corto circuito no sa  
 turada por lo que:  

$$X_d = \frac{1}{R_{cc}}$$
  
 es decir, la reactancia síncrona en P.U. es igual al inverso de  
 la relación de corto circuito no saturada.  
 regulación de la tensión. - El porcentaje de regulación es un con  
 cepto importante en los generadores síncronos ya que representa  
 el porcentaje de elevación que sufrirá el voltaje en las termi-  
 nales al perder la carga, sin cambiar corriente de campo y velo  
 cidad. El porcentaje de regulación de voltaje se define por:  

$$\% \text{ reg.} = \frac{E - V_n}{V_n} * 100$$
  
 El voltaje inducido solo por el  
 Vn - voltaje en terminales a plena carga  
 en generadores síncronos el porcentaje de regulación de volta-  
 je debe ir asociado con el tipo de carga aplicada ya que, para  
 la misma potencia de salida existen diferentes regulaciones en  
 cargas inductivas que en resistivas o capacitivas.

Existen varios métodos para determinar la regulación de un generador mediante cálculo. Este que vamos a proponer, es el recomendado por la AIEE.

- 1) Se determinan por pruebas, la característica en vacío y los 2 puntos de la característica de carga a  $f_p = 0$ , siendo uno de los 2 puntos a corriente nominal y la armadura en corto circuito (punto E de la fig.8-12) y el otro a corriente y voltaje nominales sobre la misma característica ( $f_p = 0$ ) (ver fig. 8-12).

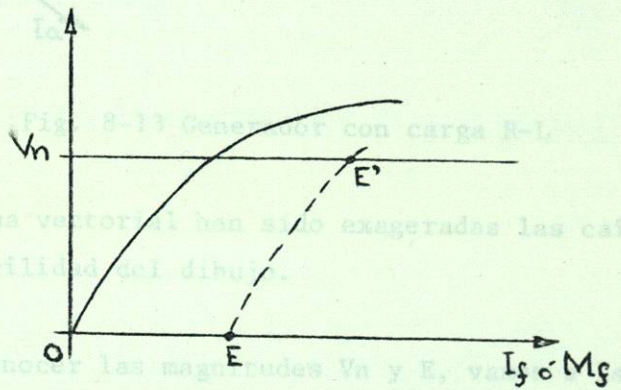


Fig. 8-12 Datos mediante prueba

A partir de esto, puede determinarse el triángulo de Potier como se explicó en otro punto de este capítulo.

Vamos a suponer una carga R-L, para concretar un diagrama vectorial. La ecuación de voltaje que podemos plantear es la siguiente:

$$E = V_n + I_a R_a + I_a X_l$$

Existen varios métodos para determinar la regulación de un generador mediante cálculo. Este que vamos a proponer, es el recomendado por la AIEE.

Se determinan por pruebas, la característica en vacío y los puntos de la característica de carga a  $\phi = 0$ , siendo uno de los puntos a corriente nominal y la armadura en corto circuito (punto E de la fig. 8-12) y el otro a corriente y voltaje nominales sobre la misma característica ( $\phi = 0$ ) (ver fig. 8-12).

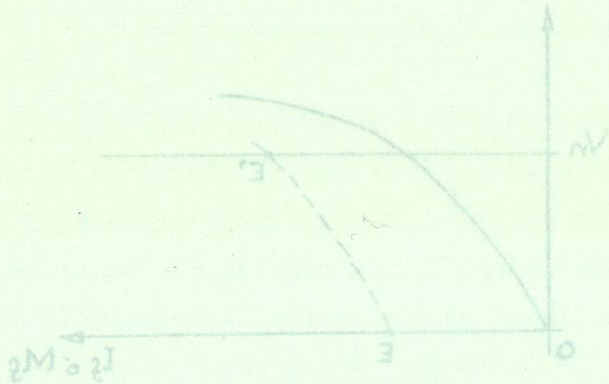


Fig. 8-12 Datos mediante prueba

A partir de esto, puede determinarse el triángulo de Potier como se explicó en otro punto de este capítulo.

Vamos a suponer una carga R-L, para concretar un diagrama vectorial. La ecuación de voltaje que podemos plantear es la siguiente:

$$E = V_n + I_a R_a + I_a X_l$$

Donde E representa al voltaje inducido por la Fmm resultante del campo y la reacción de armadura. El diagrama vectorial sería el que aparece en la fig. 8-13.

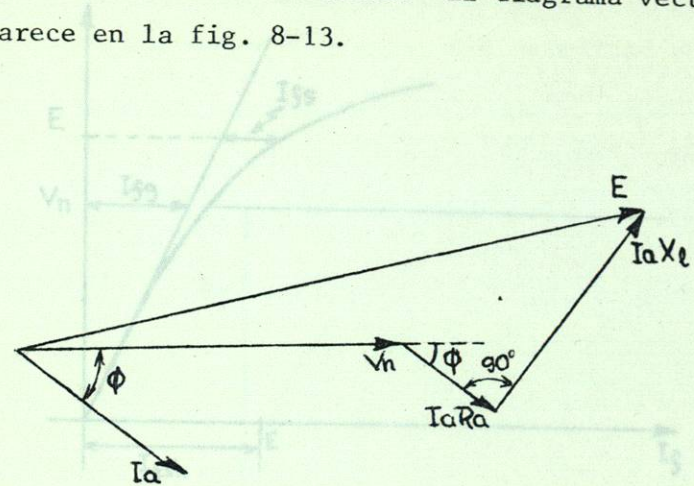


Fig. 8-13 Generador con carga R-L

En el diagrama vectorial han sido exageradas las caídas  $I_a R_a$ , --  $I_a X_l$  para facilidad del dibujo.

Después de conocer las magnitudes  $V_n$  y E, vamos a las gráficas -- ya conocidas y calculamos los siguientes valores de corriente de campo (ver fig. 8-14).

En seguida, conociendo tales valores característicos de corriente de campo formamos un diagrama vectorial como el de la figura 8-15.

Resolviendo el diagrama vectorial de la fig. 8-15 encontramos --  $I_{ft}$  que es la corriente de campo que nos va a inducir  $E_f$  (ver --

El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13.

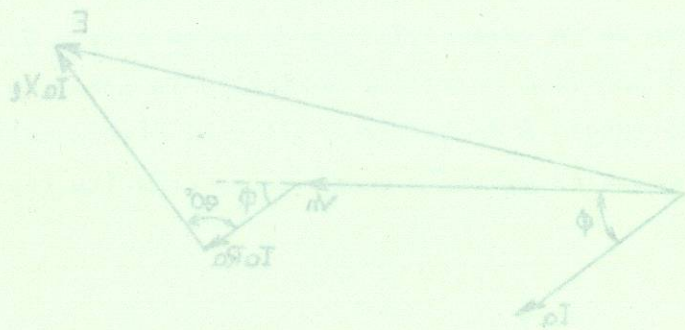


Fig. 8-13 Generador con carga R-L

El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13.

Después de conocer las magnitudes  $V_n$  y  $E$ , vamos a las gráficas para encontrar los valores de corriente de campo (ver fig. 8-14).

En seguida, conociendo tales valores característicos de corriente de campo formamos un diagrama vectorial como el de la figura 8-15.

Resolviendo el diagrama vectorial de la fig. 8-15 encontramos que es la corriente de campo que nos va a inducir  $E_f$  (ver --

fig. 8-16)

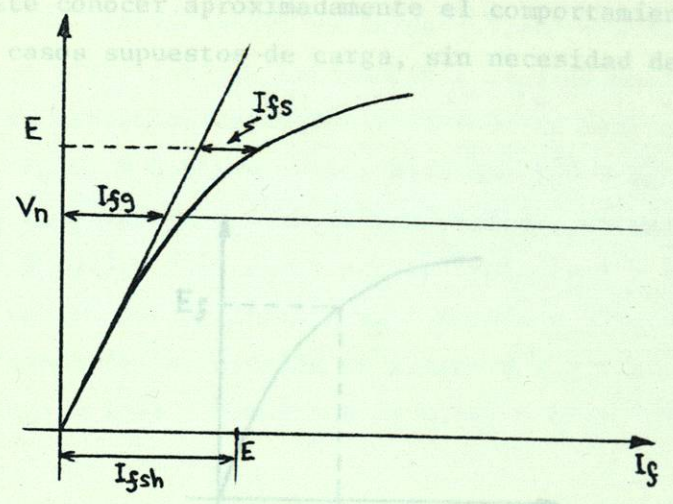


Fig. 8-14. Cálculo de  $I_{fg}$ ,  $I_{fs}$ ,  $I_{fsh}$

Fig. 8-16 Cálculo de  $E_f$  por el método de AIEE

El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13. El diagrama vectorial de campo de un generador con carga R-L se muestra en la fig. 8-13.

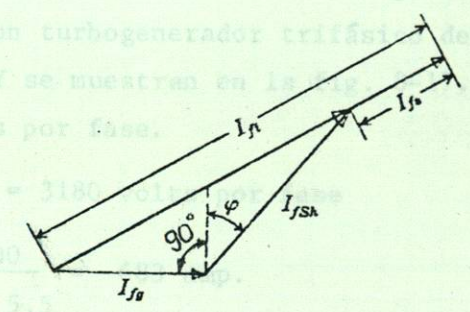


Fig. 8-15 Diag. vectorial de corrientes de campo

Y de esta forma, podremos hacer el cálculo del porcentaje de regu-

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
UNIVERSIDAD ALFONSO X

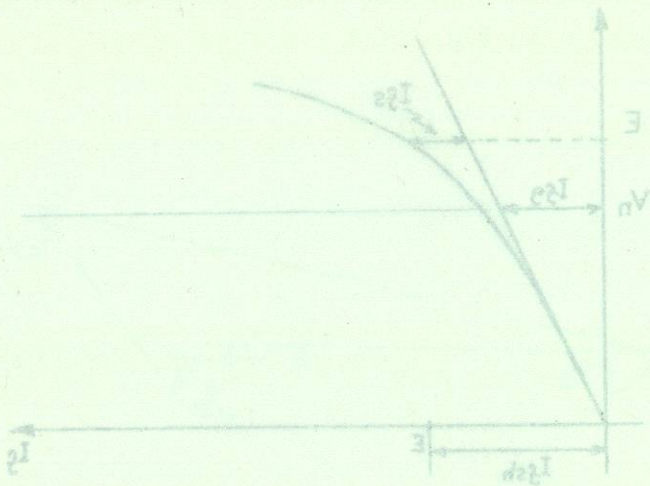


Fig. 8-14 Cálculo de  $I_{fs}$ ,  $I_{fa}$ ,  $I_{fb}$

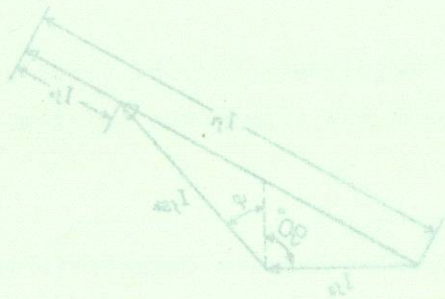


Fig. 8-15 Diag. vectorial de corrientes de campo

Si se desea hacer el cálculo del porcentaje de regu...

lación (ver ecuación 8-1). Esta forma de cálculo de regulación nos permite conocer aproximadamente el comportamiento de la máquina en casos supuestos de carga, sin necesidad de hacer mediciones.

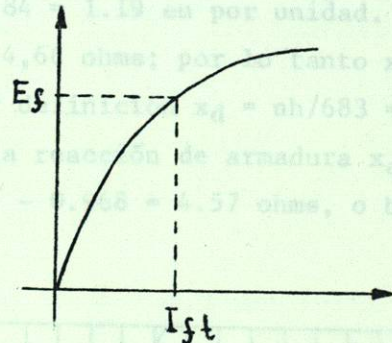


Fig. 8-16 Cálculo de  $E_f$  por el método de la AIEE

Ejemplo 8-1 Las características en vacío y a plena carga-factor de potencia cero de un turbogenerador trifásico de 6500 kva 5500 volts, conectado en Y se muestran en la fig. 8-17. La ordenada está trazada en volts por fase.

$$V_n = \frac{5500}{\sqrt{3}} = 3180 \text{ volts por fase}$$

$$I_a = \frac{6500}{\sqrt{3} \times 5.5} = 683 \text{ amp.}$$

Si siguiendo los métodos conocidos, se construye el triángulo  $0'l_n$ , y se determina el triángulo  $l_m n$  de Potier. De éste,  $mn = 71$  es la reacción de armadura  $M_a$  expresada en función de los amperes del campo,  $l_m = 660$  volts es la tensión de la reactancia de dis...

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

ción (ver ecuación 8-1). Esta forma de cálculo de regulación  
 nos permite conocer aproximadamente el comportamiento de la má-  
 quina en casos supuestos de carga, sin necesidad de hacer medi-

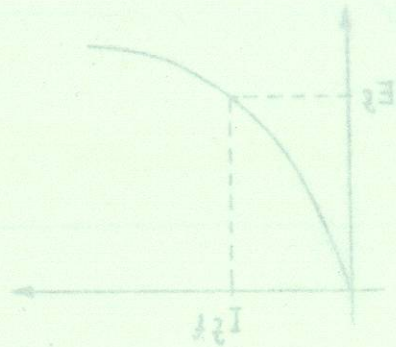


Fig. 8-16 Cálculo de Rf por el método de la AIEE

Ejemplo 8-1 Las características en vacío y a plena carga-factor  
 de potencia cero de un turbogenerador trifásico de 6500 kva 2500  
 volts, conectada en Y se muestran en la fig. 8-17. La ordenada  
 está trazada en volts por fase.

$$V_n = \frac{2500}{\sqrt{3}} = 1443 \text{ volts por fase}$$

$$I_a = \frac{6500}{\sqrt{3} \times 2.5} = 883 \text{ amp.}$$

siguendo los métodos conocidos, se construye el triángulo O'm  
 y se determina el triángulo Im de Potier. De éste, mn = 71 es  
 la reacción de armadura M<sub>a</sub> expresada en función de los amperes-  
 del campo, Im = 660 volts es la reacción de la reactancia de dis-

persión; por lo tanto  $x_1 = 660/683 = 0.968$  ohm: La reactancia -  
 de dispersión en p.u. es  $660/3180 = 0.208$ . La relación de corto  
 circuito (no saturada) RCC es  $A_a/O_n = 73/87 = 0.84$ , y el valor -  
 es  $A_b/O_n = 0.92$  (para la saturación a tensión nominal). Tambiën-  
 de la característica de cortocircuito en la base en por unidad)-  
 la RCC =  $F_o'L' = 0.84$ ; el valor saturado RCC =  $F_oL = 0.92$ . Por-  
 lo tanto  $x_a = 1/0.84 = 1.19$  en por unidad. La impedancia unita-  
 ria es  $3180/683 = 4,66$  ohms; por lo tanto  $x_d = 1.19 \times 4.66 = 5.54$   
 ohms. Tambiën por definición  $x_d = nh/683 = 3780/683 = 5.54$  ohms  
 La reactancia de la reacción de armadura  $x_{ad} = x_d - x_1$  (ec. 7-3)  
 de aquí  $x_{ad} = 5.54 - 0.968 = 4.57$  ohms, o bien  $4.57/4.66 = 0.98$ -  
 p.u.

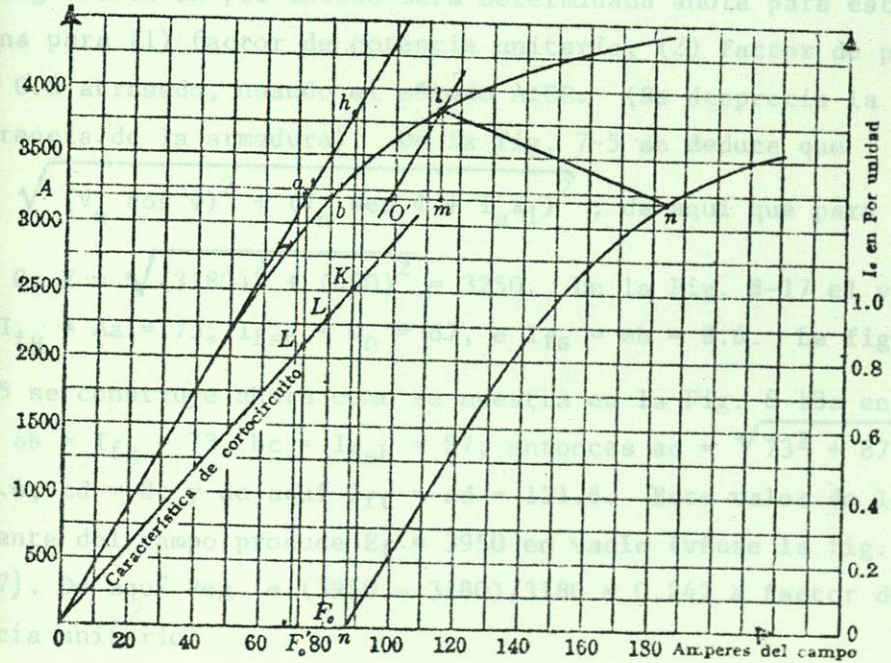


Fig. 8-17  $E = \sqrt{(3180 \times 0.8)^2 + (660 + 660)^2} = 3615$  volts.

... por lo tanto  $x_1 = 0.968 \text{ ohm}$ ; La reactancia de dispersión en p.u. es  $0.208 = 0.208 \times 3180 = 660$ . La relación de corte circuito (no saturada) RCC es  $Aa/On = 73/87 = 0.84$ , y el valor es  $Aa/On = 0.92$  (para la saturación a tensión nominal). También de la características de corrector en la base en por unidad) la RCC =  $F_o'L' = 0.84$ ; el valor saturado RCC =  $F_oL = 0.92$ . Por lo tanto  $x_a = 1/0.84 = 1.19$  en por unidad. La impedancia unitaria es  $3180/683 = 4.66 \text{ ohms}$ ; por lo tanto  $x_d = 1.19 \times 4.66 = 5.54$  ohms. También por definición  $x_d = n/683 = 3780/683 = 5.54$  ohms. La reactancia de la reacción de armadura  $x_{ad} = x_d - x_1$  (ec. 7-3) de aquí  $x_{ad} = 5.54 - 0.968 = 4.57 \text{ ohms}$ , o bien  $4.57/4.66 = 0.98$ .

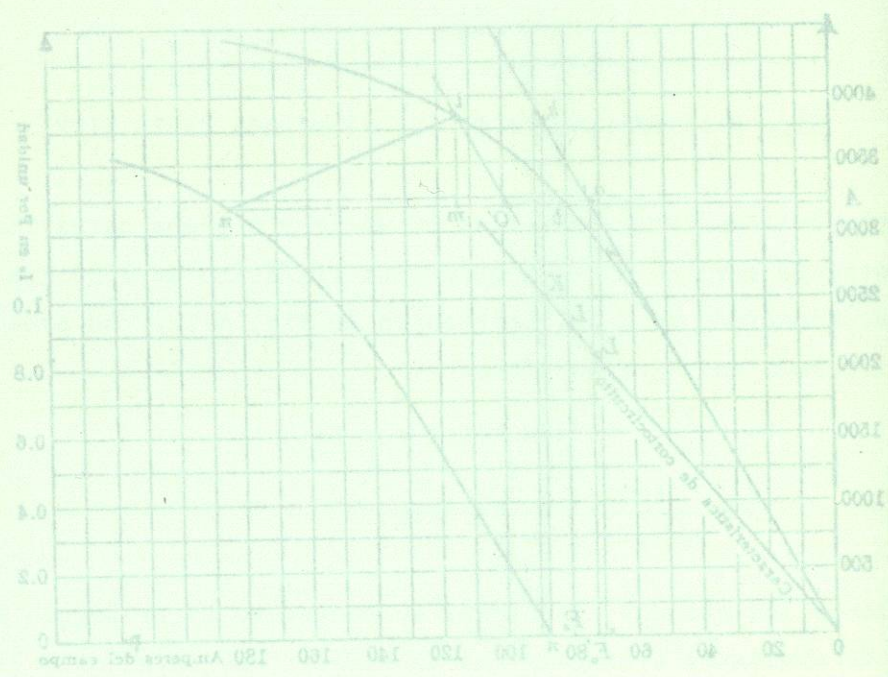


Fig. 8-17  
 112

De la fig. 8-17  $I_{fg} = 73$ ,  $I_{fsh} = 87$ ,  $I_{fs} = 16$ . La fig. 8-18a parece ahora como la mostrada en la fig. 8-13b. Aquí  $ab = 73$ ,  $bc = 87$ ,  $cd = 8$ ,  $ad = 121.6$ . Este  $I_{ft}$  produce  $E_f = 3950$  en vacío, de aquí  $Reg = \frac{4280 - 3180}{3180} = 0.314$  a factor de potencia unitario.

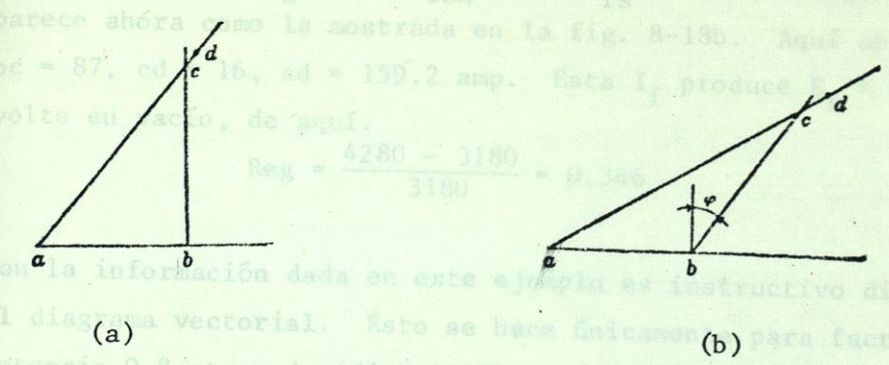


Fig. 8-18

La regulación en por unidad será determinada ahora para esta máquina para (1) factor de potencia unitario, (2) Factor de potencia 0.8 atrasado, usando el método AIEE. (Se desprecia la resistencia de la armadura). De la fig. 7-5 se deduce que :

$$E = \sqrt{(V_n \cos \phi)^2 + (V_n \sin \phi + I_a x_1)^2}$$

de aquí que para  $\phi = 0$ ,  $E = \sqrt{(3180)^2 + (660)^2} = 3250$ . De la Fig. 8-17 el valor de  $I_{fg} = Aa = 73$ ,  $I_{fsh} = O_n = 87$ , e  $I_{fs} = ab = 8.6$ . La fig. 8-15 se construye ahora como se muestra en la Fig. 8-18a en la que  $ab = I_{fg} = 73$ ,  $bc = I_{fsh} = 87$ ; entonces  $ac = \sqrt{73^2 + 87^2} = 113.6$ ,  $cd = 8$ , y de aquí  $I_{ft} = ad = 121.6$ . Este valor de la corriente del campo produce  $E_f = 3950$  en vacío (véase la fig. 8-17). De aquí  $Reg. = (3950 - 3180)/3180 = 0.242$  a factor de potencia unitario.

Para  $\cos \phi = 0.8$  corriente atrasada

$$E = \sqrt{(3180 \times 0.8)^2 + (3180 \times 0.6 + 660)^2} = 3615 \text{ volts.}$$



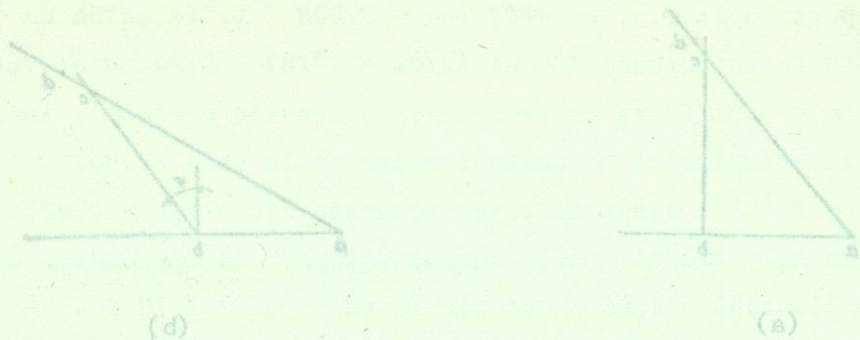


Fig. 8-18

La regulación en por unidad será determinada ahora para esta máquina para (1) factor de potencia unitario, (2) factor de potencia 0.8 atrasado, usando el método AIEE. (Se desprecia la resistencia de la armadura). De la fig. 7-2 se deduce que:

$$E = \sqrt{V_n \cos \phi + (I_a x_l)^2}$$

De la fig. 8-17 el valor de  $E = 3615$  V. De la fig. 8-18a en la que  $ab = 73$ ,  $bc = 87$ , entonces  $ac = \sqrt{73^2 + 87^2} = 113.6$ , y de aquí  $I_c = ad = 121.6$ . Hace valor de la corriente del campo produce  $E_f = 3920$  en vacío (véase la fig. 8-17). De aquí  $\text{Reg.} = (3920 - 3180) / 3180 = 0.232$  a factor de potencia unitario.

Para  $\cos \phi = 0.8$  corriente atrasada

$$E = \sqrt{(3180 \times 0.8)^2 + (3180 \times 0.6 + 660)^2} = 3615 \text{ voltas.}$$

De la fig. 8-17  $I_{fg} = 73$ ,  $I_{fsh} = 87$ ,  $I_{fs} = 16$ . La fig. 8-15 aparece ahora como la mostrada en la fig. 8-18b. Aquí  $ab = 73$ ,  $bc = 87$ ,  $cd = 16$ ,  $ad = 159.2$  amp. Esta  $I_f$  produce  $E_f = 4280$  volts en vacío, de aquí.

$$\text{Reg} = \frac{4280 - 3180}{3180} = 0.346$$

Con la información dada en este ejemplo es instructivo dibujar el diagrama vectorial. Esto se hace únicamente para factor de potencia 0.8 atrasado (fig. 8-19). La figura está dibujada a escala, así que  $V = 3180$ ,  $E = 3615$ ,  $M_r = 100$ ,  $M_a = 71$ ,  $M_f = 159.2$ ,  $\cos \phi = 0.8$ .

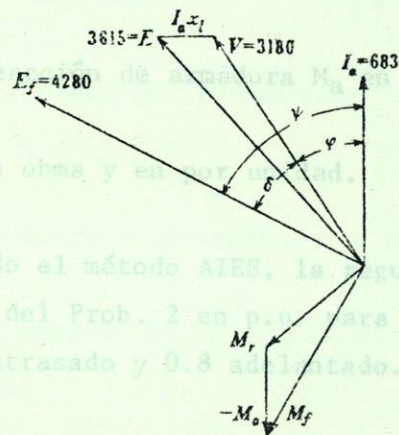


Fig. 8-19

## PROBLEMAS

1. Determinése para la máquina del ej. 8-1 la regulación de la tensión para factor de potencia 0.8 adelantado, y dibújense los

De la fig. 8-17  $I_{lg} = 73$ ,  $I_{fsh} = 87$ ,  $I_{fs} = 16$ . La fig. 8-15 a- parece ahora como la mostrada en la fig. 8-18b. Aquí  $\phi = 73$ ,  $\phi = 87$ ,  $\phi = 16$ ,  $\phi = 159.2$  amp. Esta  $I_f$  produce  $E_c = 4280$  volts en vacío, de aquí.

$$\text{Reg} = \frac{4280 - 3180}{3180} = 0.346$$

Con la información dada en este ejemplo es instructivo dibujar el diagrama vectorial. Esto se hace únicamente para factor de potencia 0.8 atrasado (fig. 8-19). La figura está dibujada a escala, así que  $V = 3180$ ,  $E = 3615$ ,  $M_a = 100$ ,  $M_f = 71$ ,  $M_f = 159.2$ ,  $\cos \phi = 0.8$ .

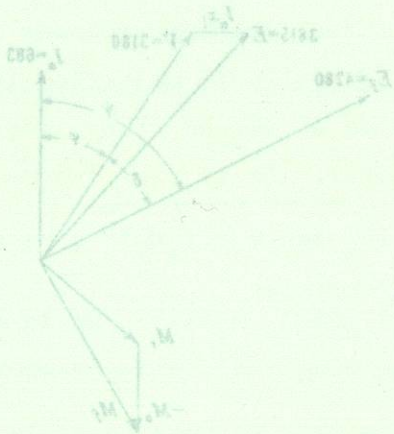


Fig. 8-19

PROBLEMAS

1. Determinese para la máquina del ej. 8-1 la regulación de la tensión para factor de potencia 0.8 adelantado, y dibújense los

diagramas de tensión y fmm.

2. Las curvas en vacío y de plena carga a factor de potencia cero para un turbogenerador trifásico conectado en Y de 12.0 kv, 5000 kva y 60 hertz son como sigue, la tensión por-fase (resistencia de la armadura despreciable);

amp):	10	20	30	40	43.0	50	60	70	80	90	100	110
en vacío):	1750	3500	5120	6360	6700	7260	7860	8280	8580	8780	-	-
plena carga):	-	-	-	-	0	1080	2720	4250	5380	6180	6750	7080

- Constrúyase el triángulo de Potier y determínese  $x_d$  en ohms. y en por-unidad.
- Determínese la reacción de armadura  $M_a$  en función de los amperes del campo.
- Determínese  $x_d$  en ohms y en por unidad.

3. Determinese, usando el método AIEE, la regulación de la tensión para la máquina del Prob. 2 en p.u. para factor de potencia unitaria y para 0.8 atrasado y 0.8 adelantado.

4. Trácese para la máquina del Prob. 2 la característica de cortocircuito y determínese la RCC saturada y no saturada.

5. Las características en vacío y a plena carga factor de potencia cero de un turbogenerador enfriado por hidrógeno trifásico de 23 500 kva, 13 800 volts, 60 hertz, 2 polos, 0.85 f.p. atrasado están dados abajo en valores en p.u.

Características en vacío

$I_f$ :	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.6
V(en vacío):	0.13	0.23	0.45	0.69	0.87	1.0	1.09	1.15	1.21

Característica factor de potencia cero

$I_f$ :	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
V(plena carga)	0.015	0.13	0.25	0.49	0.61	0.69	0.83	0.92	0.99	1.25

Amperes unitarios del campo = 185

Tensión unitaria = 13 800

Despréciese la resistencia de la armadura.

- (a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese  $x_1$  en ohms. y en p.u.
- (b) Determínese la reacción de armadura  $M_a$  en función de los amperes del campo.
- (c) Determínese el valor de  $x_d$  en ohms y en p.u.

6. Determínese para la máquina del Prob. 5 la regulación de la tensión para f.p. 0.8 atrasado y f.p. 0.8 adelantado, usando el método AIEE.

Dibújense los diagramas vectoriales de fem y fmm.

7. Determínese la RCC no saturada para la máquina del Prob. 5

8. Un turbogenerador trifásico enfriado por hidrógeno de 70 600-

Características en vacío

$I_f$	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.6
$V$ (en vacío)	0.13	0.23	0.42	0.62	0.87	1.0	1.09	1.15	1.21

Características factor de potencia cero

$I_f$	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
$V$ (plena carga)	0.015	0.13	0.25	0.42	0.61	0.69	0.83	0.92	0.99	1.25

Amperes unitarios del campo = 182  
Tensión unitaria = 13 800

Después de la resistencia de la armadura.

(a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese  $X_l$  en ohms. y en p.u.

(b) Determínese la reacción de armadura  $M_a$  en función de los amperes del campo.

(c) Determínese el valor de  $X_d$  en ohms y en p.u.

6. Determínese para la máquina del Prob. 5 la regulación de la tensión para f.p. 0.8 atrasado y f.p. 0.8 adelantado, usando el método AIEE.

Dibújense los diagramas vectoriales de fem y fmm.

7. Determínese la RCC no saturada para la máquina del Prob. 5.

8. Un turbogenerador trifásico enfriado por hidrógeno de 70 600-

kva, 13 800 volts, 60 herts, 2 polos, 0.85 de f.p. atrasado tiene características idénticas en vacío y plena carga, factor de potencia cero, que las del Prob. 5, en base en p.u. No obstante, para este generador.

BIBLIOGRAFIA

Amperes unitarios del campo = 350  
Tensión unitaria = 13800

- (a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese  $X_l$  en ohms. y en p.u.
- (b) Determínese la reacción de armadura  $M_a$  en amperes del campo.
- (c) Determínese el valor de  $X_d$  en ohms y en p.u.

9. Determínese para la máquina del prob. 8 la regulación a factor de potencia unitario, 0.8 atrasado y 0.8 adelantado, usando el método AIEE. Constrúyanse los diagramas vectoriales de fem y fmm.