

CDU: 621.313.323:621.316 (729.1)

ANEXO

Muestra	X			SDC			S <sup>2</sup>			F <sub>EXP</sub>				
	V <sub>D</sub>	P <sub>D</sub>	V <sub>E</sub>	P <sub>E</sub>	E	R	T	E	R		T			
1	30,16	29,48	29,74	30,14	162,8	572,4	735,2	3	16	19	54,27	35,78	-	1,52
2	30,14	30,42	30,22	30,04	25,7	116,3	140,9	3	16	19	8,57	7,20	-	1,19
3	29,70	29,82	29,46	29,54	111,3	369,3	480,6	3	16	19	37,10	23,08	-	1,61
4	29,58	29,70	29,86	29,78	21,4	174,8	196,2	3	16	19	7,13	10,93	-	0,65
5	30,26	30,20	30,10	30,60	19,6	52,2	71,8	3	16	19	6,53	3,26	-	2,00

94

### SOBRE LAS POSIBILIDADES DE UTILIZACION DE LOS MOTORES SINCRONICOS PARA LA COMPENSACION DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES DISTRIBUIDORAS CON CARGA ASINCRONICA

C.Dr. Eugeny Maximovich P., Instituto de Minas de Leningrado. Ing. Luis Rojas P., Instituto Superior Minero Metalúrgico. Ing. Angel Columbiè N., Instituto Superior Minero Metalúrgico.

#### RESUMEN

El trabajo presenta un estudio de las propiedades del motor sincrónico en dependencia de la variación de la carga en su eje y de la corriente de excitación.

Se muestran las correlaciones que determinan la capacidad compensadora del motor sincrónico, partiendo de la correlación de las pérdidas de potencia en el motor y en la red compensada.

Finalmente se dan las expresiones que permiten valorar la conveniencia técnico-económica de la utilización del motor sincrónico o de condensadores en calidad de instalaciones compensadoras en las redes distribuidoras, partiendo de la correlación de las pérdidas de potencia en el motor y en la red compensada, y del mínimo de gastos reducidos.

#### ABSTRACT

This work presents a study on the properties of synchronous motors depending on charge variation in their axis, and on the excitation current. It also shows the correlations determining the compensating capacity of the synchronous motor, on the basis of the correlation of power loss in the motor, and in the compensated network.

Finally, expressions are given, which allow to assess the technical and economic convenience of using the synchronous or condenser motor as compensating facilities in the distribution network, on the basis of the correlation of power loss in the motor and in the compensated network, and with the minimum reduced expenditure.

95

Para los accionamientos de mecanismos que no requieren conexiones y regulaciones frecuentes de la velocidad (bombas, ventiladores, compresores) en la práctica se utilizan los motores sincrónicos. Una propiedad importante de estos motores es su capacidad de entregar potencia reactiva a la red, y compensar la potencia reactiva de los motores asincrónicos. Esto permite aumentar el  $\cos \varphi$ , o sea disminuir la componente reactiva de la corriente en las redes eléctricas y producto de esto disminuir las pérdidas, conllevando a un considerable ahorro de energía.

De lo anteriormente expresado se deduce que el motor sincrónico es un eslabón de notable importancia en el sistema eléctrico. Por eso la investigación de sus regímenes de trabajo en las redes y sistemas eléctricos tiene un gran significado práctico.

En este trabajo se realiza el análisis de la capacidad compensadora del motor sincrónico, llevándose a cabo el mismo sobre la base de un motor de polos lisos.

La ecuación de equilibrio eléctrico del motor sincrónico tiene la forma:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I} Z_s \quad (1)$$

donde:

$\dot{U}, \dot{I}$  - tensión y corriente de fase del motor respectivamente;

$\dot{E}_0$  - Fem debido al flujo magnético principal formado o creado por el devanado de excitación;

$Z_s = R + jX_s$  - impedancia del devanado del estator;

$X_s$  - reactancia sincrónica del devanado del motor.

En las máquinas reales de potencias medianas y grandes  $R \ll X_s$ , por eso con un grado de exactitud aceptable para la práctica puede escribirse:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I} j X_s \quad (2)$$

El diagrama vectorial correspondiente a la ecuación (2) tiene la forma representada en la figura No.1 en la cual se muestran dos casos:

- a) Para  $\varphi < 0$  - motor sobrecitado  $E_0 > U$
- b) Para  $\varphi > 0$  - motor subexcitado  $E_0 < U$

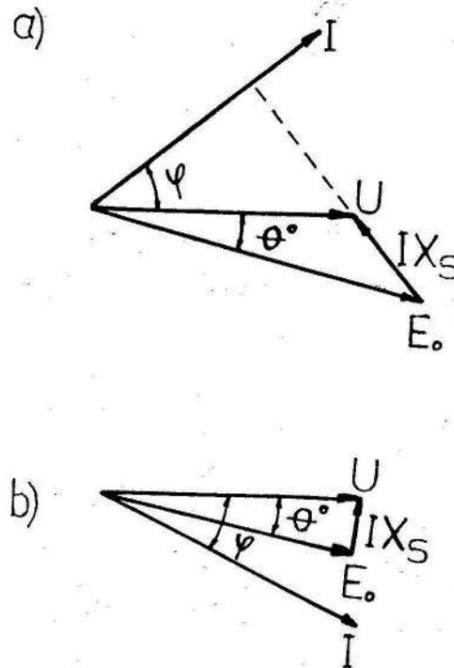


Fig. No.1. Diagrama vectorial del motor sincrónico.

Con la variación del momento en el eje del motor varía la magnitud del ángulo  $\vartheta$  entre los ejes de los campos magnéticos sincrónicamente giratorios del estator y del rotor. Como se ve del diagrama vectorial (fig. No.1) la variación de la excitación de la máquina sincrónica (variación de  $E_0$ ) conlleva a la variación del signo del ángulo  $\varphi$  entre la corriente del estator  $I$  y la tensión de la red  $U$ , por consiguiente la variación del signo de la potencia reactiva de acuerdo con la expresión:

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi \quad (3)$$

En el régimen de sobrecitación ( $E_0 < U, \varphi < 0$ ) la potencia reactiva es negativa, se entrega a la red.

La potencia electromagnética del motor sincrónico ( $R=0$ ) es igual a:

$$P_{em} = 3 \frac{E_0 U}{X_s} \sin \vartheta \quad (4)$$

El momento electromagnético desarrollado por el motor:

$$M_{em} = \frac{3}{\Omega_1} \frac{E_0 U}{X_s} \sin \vartheta \quad (5)$$

donde:

$$\Omega_1 = \frac{2 \pi f}{p} - \text{frecuencia angular de rotación del campo}$$

$p$  - número de pares de polos

La potencia reactiva del motor sincrónico:

$$Q = 3 \left( \frac{E_0 U}{X_s} \cos \vartheta - \frac{U^2}{X_s} \right) \quad (6)$$

La variación de la potencia  $P_{em}$  y  $Q$  en función del ángulo  $\vartheta$  se muestra en la figura No. 2.

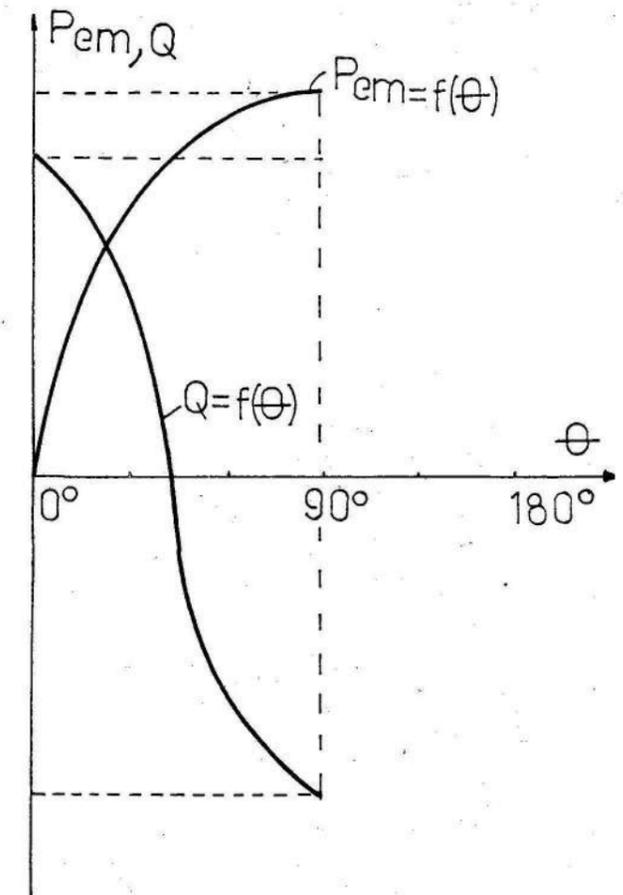


Fig. No.2. Dependencias de la potencia electromagnética y la potencia reactiva del motor sincrónico del ángulo de carga.

De los gráficos se deduce que la  $P_{em \max}$  se alcanza para  $\vartheta = 90^\circ$ ,

La potencia reactiva  $Q$  es función par del ángulo  $\vartheta^\circ$  o sea la variación del signo de  $\vartheta^\circ$  no conlleva a la variación del signo de la potencia reactiva. De la expresión (6) para  $Q$  se deduce que el cambio de signo de la potencia reactiva está relacionado con la correlación de  $E_o$ ,  $U$  y la magnitud del ángulo  $\vartheta^\circ$ , quedando determinado el signo de la potencia reactiva por la diferencia:

$$E_o \cos \vartheta^\circ - U$$

Para un momento dado en el eje de la máquina, o sea el ángulo de carga  $\vartheta^\circ$ , la potencia reactiva va a ser positiva sólo en el caso que  $E_o > U$ .

Gran interés representa la dependencia  $P_{em} = f(Q)$  que permite determinar el carácter de la potencia reactiva para diferentes cargas.

De las expresiones (4) y (6) se obtiene en unidades relativas:

$$\left(Q + \frac{U^2}{X_s}\right)^2 + P_{em}^2 = \left(\frac{E_o U}{X_s}\right)^2 \quad (7)$$

$$\frac{P_{em}}{Q + \frac{U^2}{X_s}} = \operatorname{tg} \vartheta^\circ \quad (8)$$

$$\frac{Q}{P_{em}} = \operatorname{tg} \varphi \quad (9)$$

A la ecuación (7) en las coordenadas  $P_{em}$ ,  $Q$  corresponden los gráficos mostrados en la figura No.3. Las dependencias  $P_{em} = f(Q)$  representan circunferencias para diferentes valores constantes de  $E_o$  ( $I_{exc}$ ) con coordenadas de centro iguales a  $\left(\frac{U^2}{X_s}, 0\right)$ . En la figura No.3 están representados los gráficos para los valores  $E_o = 0,5 U$ ;  $E_o = U$ ;  $E_o = 1,5 U$ .

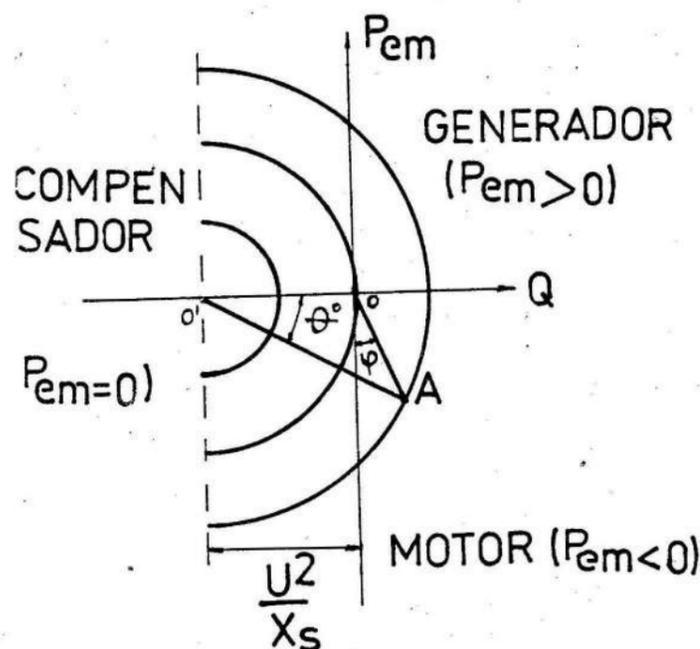


Fig. No.3. Dependencias  $P_{em} = F(Q)$  del motor sincrónico para diferentes regímenes.

De los gráficos  $P_{em} = F(Q)$  es fácil establecer la dependencia  $\cos \varphi = f(P_2)$ .

Supongamos que para la carga nominal del motor sobreexcitado  $E_o = 1,5 U$ . La potencia electromagnética del motor  $P_{em} = P_{2n} + P_{mec}$  ( $P_{mec} \ll P_{2n}$ ) en este régimen corresponde a  $P_{em}$  en el punto A. Si disminuimos la carga en el eje del motor para  $E_o = \text{const}$ , entonces el punto de trabajo A para  $P_{em} < P_{em A}$  se desplaza hacia el eje  $Q$  y por consiguiente el ángulo  $\varphi$  aumenta, el  $\cos \varphi$  disminuye y la potencia reactiva conserva su signo, aumentando en valor absoluto. El vector de la potencia total OA en la escala de corriente va a determinar la corriente del estator del motor.

El ángulo de carga  $\vartheta^\circ$  en el motor no debe sobrepasar el valor límite según la condición de estabilidad estática  $\vartheta^\circ \text{ lim}$ . Analicemos la variación de la magnitud de la Fem mínima  $E_o \text{ lim}$  la cual corresponde a la frontera de estabilidad estática.

Como fue mostrado anteriormente vamos a despreocupar la resistencia activa del estator ( $R=0$ ). El régimen nominal del motor se caracteriza por la potencia activa:

$$P_{em n} = P_n = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_n$$

$$P_{em n}^* = P_n^* = \cos \varphi_n \quad (\text{en unidades relativas})$$

La potencia reactiva es:

$$Q_n = \sqrt{3} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (\text{en unidades relativas})$$

$$Q_n = \sin \varphi_n$$

El ángulo de carga en el régimen nominal  $\vartheta_n^\circ$  se halla a partir de las expresiones (4) y (6) denotando a  $E_o = E_{on}$  y  $\vartheta^\circ = \vartheta_n^\circ$  y asumiendo  $U^* = 1$ . En este caso obtenemos las siguientes expresiones:

$$\operatorname{tg} \vartheta_n^\circ = \frac{X_s \cos \varphi_n}{1 + X_s \sin \varphi_n} \quad (10)$$

$$E_{on} = X_s \frac{\cos \vartheta_n}{\sin \varphi_n} = X_s \frac{\cos \vartheta_n}{\operatorname{tg} \vartheta_n} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta_n}$$

$$E_{on} = \sqrt{1 + 2 X_s \sin \varphi_n + X_s^2} \quad (11)$$

En ausencia de una regulación especial de la corriente de excitación del motor, el valor límite del ángulo de carga es igual  $\vartheta^\circ = 90$ . Por eso la Fem mínima desde el punto de vista de la estabilidad estática  $E_o \text{ lim}$ , para la potencia activa  $P_{em}$ , se determina de la expresión (4)

$$\frac{E_o \text{ lim} \cdot U}{X_s} = P_{em} \quad (12)$$

Dividiendo la ecuación (12) por (11), obtenemos:

$$\frac{E_{o \text{ lim}}}{E_{on}} = \frac{P_{em} X_s}{U \sqrt{1+2 X_s \sin \varphi_n + X_s^2}} \quad (13)$$

De aquí se deduce que para la tensión nominal ( $U = 1$ ) la  $F_{em}$   $E_{o \text{ lim}}$  está más cerca del valor nominal  $E_{on}$  mientras mayor sea la carga del motor  $P_{em}$  y menor sea en el régimen nominal el  $\sin \varphi_n$ . A mayor reactancia  $X_s$  mayor es la relación

$$\frac{E_{o \text{ lim}}}{E_{on}}$$

La estabilidad estática del motor sincrónico  $K_m$ , caracterizada por la relación de estabilidad de la potencia electromagnética máxima  $P_{em \text{ max}}$  a la potencia electromagnética nominal  $P_{em n}$ , aumenta con la disminución de la reactancia  $X_s$  y del  $\cos \varphi_n$ , como se ve de las relaciones anteriores.

Para la valoración de la conveniencia de la utilización de los motores sincrónicos en calidad de fuente de potencia reactiva, es necesario valorar las pérdidas complementarias ocurridas durante la generación de potencia reactiva propiamente en el motor y en la red de distribución.

La potencia reactiva máxima de un motor sincrónico que puede ser utilizada en el nodo de carga:

$$Q_{\text{max}} = \frac{P_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n} - Q_{\text{ext}} \quad (14)$$

donde:

$P_n$ ,  $\varphi_n$ ,  $\eta_n$  - la potencia es, el eje del motor, el ángulo de desfase (generalmente  $\cos \varphi_n = 0,9$  adelantado) y el coeficiente de utilización nominales respectivamente.

La regulación de la corriente de excitación de los motores sincrónicos con el objetivo de variar la potencia reactiva, conlleva a la variación de las pérdidas de potencia en el devanado del estator y el rotor, y en el sistema de excitación.

Las pérdidas de potencia durante la generación de potencia reactiva con corriente adelantada dependen de la magnitud de la potencia generada. Analíticamente estas pérdidas pueden ser calculadas a través de la dependencia cuadrática:

$$\Delta P_m = \Delta P_{m n} (\alpha_m D_1 + \alpha_m^2 D_2) \quad (15)$$

donde:

$\Delta P_{m n}$  - pérdidas nominales de la potencia del motor en el régimen nominal;

$\alpha_m = \frac{Q}{Q_n}$  - potencia reactiva del motor, relativa respecto a la nominal  $Q_n$ ,

$D_1$  y  $D_2$  - Coeficientes de pérdidas tomados constantes para el motor dado.

La suma de las pérdidas ( $D_1 + D_2$ ) es igual a las pérdidas de potencia activa durante la generación de potencia reactiva ocurridas propiamente en el motor para  $\alpha_m = 1,0$  o sea la variación de las pérdidas de potencia en el motor durante el paso del régimen con corriente adelantada ( $\cos \varphi = 0,9$ ).

al régimen con  $\cos \varphi = 1$ . Los valores de los coeficientes de potencia  $D_1$  y  $D_2$  están determinados por los parámetros del motor. En ausencia de los datos exactos de sus valores, estos pueden ser tomados como los valores medios para los motores según la frecuencia de rotación (tabla No.1). [2]

TABLA No.1 COEFICIENTES DE POTENCIA EN FUNCION DE LA FRECUENCIA DE ROTACION

(rpm)	100 - 250	250 - 500	600 - 1 000
$D_1$	0,15	0,13	0,1
$D_2$	0,11	0,1	0,08

El análisis de las pérdidas de potencia activa  $\Delta P_m$  demostró que para una serie de motores sincrónicos [1] con  $n = 1 000$  a  $3 000$  rev/min  $\Delta P_m$  constituye el 63-97 % de la potencia de excitación.

Si en el nodo de carga se consume la potencia reactiva  $Q_c$ , al conectar al nodo un dispositivo compensador con potencia  $Q_{\text{comp}}$  (motor sincrónico, condensador estático, etc) la potencia reactiva disminuye y se hace igual a  $Q_c - Q_{\text{comp}}$ . En este caso las

pérdidas de potencia activa producto de la carga reactiva en la línea con resistencia  $R_1$  que alimenta al nodo de carga, se determinan (para la tensión nominal) como:

$$\Delta P_1 = \frac{R_1}{U_n^2} Q_c^2 (1 - 2 \alpha_{\text{comp}} + \alpha_{\text{comp}}^2) \quad (16)$$

donde:

$\alpha_{\text{comp}} = \frac{Q_{\text{comp}}}{Q_c}$  - valor relativo (respecto a la potencia de carga  $Q_c$ ) de la potencia reactiva del dispositivo compensador.

Evidentemente, la mayor disminución posible de las pérdidas de potencia del motor se obtiene para  $\alpha_{comp} = 1$  ( $Q_{comp} = Q_c$ ).

Las pérdidas anuales de energía eléctrica en la línea producto de la carga reactiva, si esta es presentada en forma de un gráfico ordenado escalonado con  $n_T$  pasos, pueden ser calculados por la fórmula:

$$\Delta W_{ma} = \sum_{i=1}^{n_T} \frac{R_1}{U_n^2} Q_i^2 T_i \frac{K_{\Phi i}^2}{K_{m i}^2} - 2 \frac{\alpha_{m i}}{K_{m i}} + \alpha_{m i}^2 \quad (17)$$

donde:  
 $T_i$  - duración de cada paso de carga.

$$K_{\Phi i} = \frac{Q_{e i}}{Q_{med i}} ; K_{m i} = \frac{Q_{max i}}{Q_{med i}}$$

- coeficiente de forma y de máximo del gráfico.

La selección del método de regulación de la potencia reactiva en el nodo de carga es necesario realizarla por los gastos reducidos:

$$G = E_n K + G_e \quad (18)$$

donde:

$K$  - inversiones capitales;  
 $E_n$  - coeficiente normativo de amortización;  
 $G_e$  - gastos de explotación anuales.

Los motores sincrónicos, como regla, son suministrados con un sistema de excitación que contiene un regulador automático. Por eso en la comparación de los motores sincrónicos con otras fuentes de potencia reactiva, en el cálculo de los gastos reducidos debe ser considerado solamente el costo de las pérdidas activas de energía eléctrica.

$$G = C_o W_a \quad (19)$$

donde:  
 $C_o$  - costo de las pérdidas de energía eléctrica

Las pérdidas de cálculo de energía eléctrica en una instalación de condensadores para el gráfico ordenado anual de cálculo de la carga de  $n_T$  pasos  $Q_{comp i}$  con duración  $T_{comp i}$  se determina por:

$$\Delta W_{a comp} = \sum_{i=1}^{n_T} \Delta P_{e comp} Q_{comp i} T_{comp i} \quad (20)$$

Las pérdidas específicas  $\Delta P_{e comp}$  están determinadas por el tipo de condensador y el régimen de su trabajo. En los cálculos puede ser tomado el valor de  $\Delta P_{e comp}$  según la tensión de las instalaciones, como sugiere la Tabla No.2.

TABLA No.2 PERDIDAS ESPECIFICAS DE LA POTENCIA EN FUNCION DE LA TENSION

V	220,380,500	600, 1 050	1 050
$P_e comp \%$	0,3 0,45	0,25 0,35	0,2 0,35

Las inversiones específicas para los condensadores  $X_{ce}$ , de manera orientativa pueden ser tomadas para condensadores de 380 V de 11-13 pesos/kVAR y para condensadores de 6-10 kV de 6-8 pesos/kVAR.

Tomando en consideración las correlaciones anteriormente mostradas, la fórmula de los gastos reducidos puede ser escrita en la forma:

$$G(Q_{cond}) = A_{cond} Q_{cond}^2 - B_{cond} Q_{cond} + C_{cond} \quad (21)$$

donde:

$A_{cond}, B_{cond}, C_{cond}$  - coeficiente  
 $Q_{cond}$  - potencia de la instalación compensadora

Tomando la derivada  $\frac{\delta(Q_{cond})}{\delta Q_{cond}}$  e igualándola a cero, obtenemos:

$$2 A_{cond} Q_{cond} - B_{cond} = 0 \quad (22)$$

De donde puede determinarse el valor óptimo de la potencia de la instalación compensadora  $Q_{cond \text{ ópt}}$  para la cual se alcanza el mínimo de gastos reducidos:

$$Q_{cond \text{ ópt}} = \frac{B_{cond}}{2 A_{cond}} \quad (23)$$

#### CONCLUSIONES

Las correlaciones obtenidas en este trabajo permiten determinar la posibilidad y la conveniencia de la utilización del motor sincrónico para la compensación de la potencia reactiva en las redes de distribución de las empresas industriales.

El cálculo debe realizarse en cada caso concreto teniendo en cuenta los parámetros y regímenes de trabajo de la red, y del motor sincrónico, partiendo del criterio de obtención de pérdidas mínimas de energía eléctrica. Si es necesario utilizar otras fuentes de potencia

reactiva (otros dispositivos compensadores por ejemplo, condensadores), el cálculo y la selección de estos dispositivos debe realizarse partiendo del mínimo de gastos reducidos.

Debe resaltarse que en las empresas industriales por ejemplo en las niquelíferas, existen motores sincrónicos modernos con sistemas automáticos de excitación. Sin embargo, en la práctica realmente este sistema automático no es utilizado para la regulación de la corriente de excitación, la cual es establecida en algún valor constante. Al mismo tiempo las redes

de distribución de estas empresas poseen grandes sobrecorrientes de potencia reactiva, trabajando con un  $\cos \varphi$  bajo.

Por eso, la optimización del trabajo de las redes, por el criterio del mínimo de pérdidas de energía eléctrica, puede ser lograda mediante la utilización de los sistemas de regulación automática, existentes en dichos motores, sin gastos adicionales. En estas direcciones se llevan a cabo las investigaciones correspondientes, cuyos resultados serán expuestos en otros trabajos.

#### REFERENCIAS

1. ABRAMOVICH, B.N. y A.A. KRUGLIG: *Excitación, regulación y estabilidad de los motores sincrónicos*. Leningrado, Energoatomizdat, 1983.

2. KRUPOVICH, V.I. y Otros: *Manual de suministro eléctrico*. Moscú, Energía, 1980.

NOTAS SOBRE EL ARTICULO DEL LIC. JORGE L. COBIELLA REGUERA: PROPUESTA DE UNA UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA EN EL EOCENO DE CUBA ORIENTAL; REVISTA MINERIA Y GEOLOGIA, CUBA, 2-1983, PP. 17-36.-

Károly BREZSNYANSKY, Oficina Central de Geología, Budapest, Hungría y Dr. Elemér NAGY, Instituto Estatal de Geología de Hungría.

En el artículo citado el estimado Autor Lic. Jorge L. Cobiella Reguera expresa su duda sobre la validez y el carácter formal de la Formación Sagua de Tánamo de edad Eoceno Superior, descrita y mapeada por la Brigada Cubano-Húngara del Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba (3 ; 4). En ese artículo expone una serie de opiniones que solamente son explicables por falta de informaciones correctas del autor.

1. El nombre de la formación en discusión establecido por la Brigada Cubano-Húngara no es "Sagua", como el Lic. Cobiella lo cita, sino "Sagua de Tánamo" (3 ; 4).
2. Dicho autor no conoce, y por eso no los aplica en su trabajo citado, los criterios del término "formación" en el sentido aprobado por la Comisión Estratigráfica de la Unión Internacional de las Ciencias

Geológicas (IUGS), (2).- Según dicha comisión el criterio principal es: "cuerpo litológico que tiene límites mapeables". Adicionalmente quisieramos mencionar que los primeros pasos para crear un Código Estratigráfico Cubano ya se han efectuado por E. Nagy y F. Formell Cortina (5).

3. La "Formación Mucaral" del artículo que estamos analizando no corresponde al criterio arriba mencionado. El autor agrupa en una sola formación unidades litoestratigráficas distintas, las cuales son mapeables separadamente. La parte inferior de la "Formación Mucaral" está formada por un complejo de tobas ácidas (véase la Formación Vigía y la Formación Castillo de Los Indios) su parte media es una serie de capas de caliza (véase la Formación Charco Redondo y la Formación Puerto Boniato) y en