



Software para el procesamiento de los ensayos de la máquina sincrónica

Orlando L. Rodríguez
Vladimir Rodríguez

Recibido: Octubre del 2008
Aprobado: Diciembre del 2008

Resumen/ Abstract

Este trabajo resuelve, haciendo uso de las facilidades que brinda el *MATLAB*, de forma cuasi analítica, este problema. El software sigue los mismos pasos que realiza manualmente por el método tradicional. Fue implementado el método de la fuerza magnetomotriz. Para el ajuste de la curva en el tramo saturado se emplea una aproximación según la función arcotangente, en el sentido de los mínimos cuadrados. El punto intercepción entre curvas se calcula con métodos numéricos, hasta una precisión que supera la que pueden tener los datos del experimento. Está destinado para su uso en la industria y para la docencia en las universidades.

Palabras claves: ensayos de la máquina sincrónica, métodos numéricos, software libre

Synchronous Machine tests, such as no load, short circuit and zero power factor, are achieved to trace Zero Power-factor, Regulation and External Load characteristics, in addition to Voltage Regulation for any given state. To carry out this results we are familiarized with graphical methods, which are cumbersome and imprecise. This is a new cuasi analytic approach to this problem by means of a MATLAB software. Algorithm is similar to that followed by someone who is carrying out solutions by traditional way. It was implemented Magneto Motriz Force method. Saturation was approached to an inverse tangent curve in a least means square sense. To compute the interception point between curves it was used numerical methods which achieved a precision higher than experiments offer. This software is intended to be used either in Indutry or in universities with academic purpose.

Keywords : synchronous machine tests, numerical methods, open source

INTRODUCCIÓN

Las máquinas de corriente continua y de inducción tienen un amplio rango de aplicaciones industriales tales como tracción, bombeo y otros. Sin embargo, la operación del sistema eléctrico de potencia requiere la conversión de grandes cantidades de energía primaria petróleo, gas natural, agua, carbón, uranio, en energía y potencia eléctrica. La energía eléctrica puede ser transportada y convertida a otras formas de energía de manera limpia y económica. La

máquina sincrónica es hoy por hoy, la más ampliamente utilizada para convertir grandes cantidades de energía mecánica en eléctrica [1]. La razón de ello reside en el hecho de que el conjunto de los generadores de un sistema eléctrico que funcione correctamente debe suministrar en todo momento las potencias activa y reactiva que en ese instante demandan los abonados. Es cierto que en las inductancias y capacidades del sistema se almacena una cierta cantidad de energía en forma de campo

electromagnético, pero esa reserva es tan pequeña que no permite su uso para cubrir eventuales desequilibrios entre la producción y el consumo. Dado que las potencias activa y reactiva pueden variar, y de hecho varían, de forma independiente, las máquinas utilizadas como generadores en el sistema eléctrico deben tener la capacidad de variar por separado ambas magnitudes. Y ésta es precisamente la gran ventaja de las máquinas sincrónicas frente a las asincrónicas.

Durante la operación de la máquina sincrónica en régimen permanente, la velocidad mecánica del rotor es igual a la velocidad angular del campo magnético rotatorio producido por el estator. En estas condiciones, sobre los conductores o bobinas del campo no se induce fuerza electromotriz. Para producir fuerza magnetomotriz en el rotor es necesario inyectar corriente en esta bobina mediante una fuente externa. De esta forma se obtienen dos campos magnéticos rotatorios que giran a la misma velocidad, uno producido por el estator y otro por el rotor. Estos campos interactúan produciendo torque eléctrico medio y se realiza el proceso de conversión electromecánica de energía.

La bobina del rotor o campo de la máquina sincrónica se alimenta mediante la inyección de corriente continua, como se mencionó anteriormente, con la finalidad de producir un campo magnético de magnitud constante, semejante al de un imán permanente, pero de una intensidad mucho mayor. Debido a que el rotor de la máquina gira en régimen permanente a la velocidad sincrónica, el campo magnético constante producido en este sistema se comporta, desde el punto de vista del estator, como un campo magnético rotatorio.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SINCRÓNICO

El ensayo de vacío, la prueba de corto circuito y de factor de potencia cero, se realizan con el objetivo de obtener la característica de factor de potencia cero, la característica de regulación, la característica externa y la regulación de tensión.

A. Triángulo de potier

El primer paso para la obtención de estas curvas, es la realización del llamado triángulo de Potier. Primeramente debemos superponer la curva de cortocircuito a la de vacío y ubicar el punto de la prueba de factor de potencia cero. Buscando la corriente de excitación que produce corriente nominal de cortocircuito obtenemos, desde el origen el segmento OA. Desplazamos luego este segmento de forma tal que el nuevo punto A coincida con el punto de la prueba de factor de potencia cero, tendremos el segmento O'A'. Desde el punto O' y con la misma pendiente del tramo recto de la característica de vacío,

trazamos una recta que intercepta a la curva de vacío en el punto C'. Si trazamos desde el punto C' una perpendicular, el intercepto con el segmento O'A' será el punto B'. El triángulo A'B'C' será el triángulo de Potier. El cateto A'B' será equivalente a KaFa (Reacción de armadura referida al rotor) y el cateto B'C' será igual a laXσa (Caída de tensión en la reactancia de dispersión) [2].

B. Característica de factor de potencia cero

Para obtener esta característica basta con desplazar el triángulo de Potier paralelo a sí mismo con el punto C' sobre la característica de vacío mientras el punto A' describe la curva en cuestión.

C. Regulación de tensión

Para obtener la regulación de tensión existen dos métodos que se describen a continuación por separado.

Método de FEM

Primeramente hallamos la reactancia sincrónica. Para esto nos valemos de la tensión de vacío nominal (E_{on}) y con la correspondiente corriente de excitación (I_{ccn}) tomamos la corriente de cortocircuito que se asocia a esta última. Para esto utilizamos (1).

Donde:

$$X_s = \frac{E_{on}}{\sqrt{3}I_{ccn}} \quad X_s - \text{Reactancia sincrónica (ohm).} \quad (1)$$

Luego sumamos a la tensión de línea la caída de tensión correspondiente a la corriente en cuestión y producida en la impedancia del estator ($r+jX_s$). Así se obtiene la FEM de vacío (E_o) como en (2).

$$\bar{E}_o = \bar{U}_f + \bar{I}(r + jX_s) \quad (2)$$

Donde:

X_s – Reactancia sincrónica (ohm).
 r – Resistencia del estator (ohm).
 I – Corriente del estator (A).
 U_f – Tensión de fase (V).

Método de FMM

El método anterior tiene la desventaja de que no toma en cuenta la saturación de la máquina, el que se describe a continuación es mucho más preciso. Una vez hallado el triángulo de Potier hallamos la FEM resultante en el entrehierro (E_δ) con ayuda de (3):

Donde: (3)

$X_{\sigma a}$ – Reactancia de dispersión (ohm).
 r – Resistencia del estator (ohm).

$$\bar{E}_\delta = \bar{U}_f + I_a r + j I_a X_{\sigma a}$$

I_a – Corriente del estator (A).
 U_f – Tensión de fase (V).

Con el módulo de esta última, (en línea) hallamos la FMM de excitación correspondiente y restándole fasorialmente $K_a F_a$ como en (4), obtenemos la FMM de vacío.

$$\bar{F}_o = \bar{F}_\delta - K_a \bar{F}_a \quad (4)$$

Donde:

F_o – Fuerza magnetomotriz de vacío (A).
 F_δ – Fuerza magnetomotriz del entrehierro (A).

Con este valor y mediante la curva de vacío hallamos finalmente E_o . La regulación de tensión por ambos métodos la hallamos por medio de (5).

$$\Delta V = \frac{E_o - V_n}{V_n} * 100\% \quad (5)$$

Donde:

ΔV – Regulación de tensión (V).
 V_n – Tensión nominal (V).

Aunque este método asume que la máquina es de polos lisos, sus resultados son perfectamente aplicables a la máquina de polos salientes [3].

D. Característica de regulación

Esta característica determina la dependencia $I_{ex} = f(I_a)$ para tensión, factor de potencia y frecuencia constantes. Muestra cómo ha de variarse la corriente de excitación de un generador sincrónico, para que con las variaciones de la carga su voltaje se mantenga invariable. Dado que suponemos de condición inicial el factor de potencia constante y una corriente de armadura dada, nos damos a la tarea de determinar la corriente de excitación de la siguiente forma. Primeramente calculamos el factor de reducción de la corriente de estator al rotor (K_a) y la reactancia de dispersión, por medio de (6) y (7) respectivamente.

$$X_{\sigma a} = \frac{I_a X_{\sigma a}}{I_a} \quad (6)$$

$$K_a = \frac{K_a F_a}{I_a} \quad (7)$$

Donde:

I_a – Corriente a la que se realiza la prueba de factor de potencia cero.

Una vez determinados estos valores seguimos con (3) para hallar la FEM en el entrehierro. Y al igual que en el cálculo de la regulación de tensión, obtenemos la FMM de vacío. La corriente de excitación aplicada en este punto (I_{ex}) es equivalente a este último resultado, como vemos en (8).

$$I_{ex} = F_o \quad (8)$$

E. Característica externa

Esta característica determina la dependencia $U = f(I_a)$ para corriente de excitación, factor de potencia y frecuencia constantes. Indica como varía el voltaje del generador cuando variamos la magnitud de la carga con excitación constante. El procedimiento a seguir para obtenerla se explica a continuación. En (9) se obtiene el valor del módulo de la FMM del entrehierro, teniendo como datos: su ángulo (perpendicular a su FEM), el módulo de la FMM de vacío y el vector $K_a F_a$.

$$\bar{F}_\delta = \bar{F}_o + K_a \bar{F}_a \quad (9)$$

Mediante la curva de vacío hallamos la FEM resultante en el entrehierro y con ésta calculamos la tensión de fase según (10).

$$\bar{U}_f = \bar{E}_\delta - I_a r - j I_a X_{\sigma a} \quad (10)$$

Es necesario suponer que la tensión y E_δ tienen el mismo ángulo.

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Esta aplicación fue desarrollada con el ambiente de desarrollo de interfaces gráficas del *MatLab*, *GUIDE*, por sus siglas en inglés. Aprovechando la similitud de la sintaxis, se realizaron las modificaciones pertinentes para que el programa pueda ser utilizado además en *Octave*.

A. Ventana principal

En la ventana principal contamos con una línea de asistencia para efectuar correctamente la introducción de los datos, véase figura 1. Se comienza introduciendo los datos de la máquina en el grupo de entradas de la esquina superior izquierda. Posteriormente se introducen y “plotean” los datos de los ensayos de cortocircuito y vacío en ese orden, respectivamente. Luego el usuario debe introducir el número de puntos que, a su juicio, se encuentran alineados. Con esta información se ajusta el tramo recto de la curva según una recta, y el tramo curva según un polinomio de grado tres, véase figura 2. A continuación se entran los datos de la prueba de factor de potencia cero y se traza el triángulo de Potier.

A partir de este punto ya el usuario es libre de ejecutar las opciones del programa de acuerdo a sus intereses. Se puede calcular la regulación de tensión para diferentes estados de carga (esquina inferior derecha) y trazar las características de regulación y externa para distintos valores del factor de potencia.



Fig. 1. Ventana principal del programa.

B. Algoritmo para el trazado del triángulo de potier

Primeramente hallamos la corriente de excitación que produce en cortocircuito una corriente de estator igual a la de la prueba de factor de potencia cero. Recordemos que la característica de cortocircuito es una recta, figura 3 y que este valor obtenido es equivalente a la longitud del segmento $O'A'$ en la figura 4.

Luego se obtiene el intercepto de la recta que pasa por el punto O' y tiene la pendiente del tramo recto de la curva de saturación.

Con la descripción de esta recta y los coeficientes del ajuste polinómico del tramo saturado de la curva se calculan las coordenadas del intercepto de ellas (punto C') por el método de bisección del intervalo. Naturalmente el punto B' tiene la abscisa de C' y la ordenada de A' . El factor de reducción de la reacción de armadura y la reactancia de dispersión, se obtienen de (6) y (7) respectivamente, como ya se explicó anteriormente.

La curva de factor de potencia cero (color verde en la figura 4) se traza restado a la curva de vacío el valor de los catetos de triángulo en cada punto. Con estos resultados estamos listos para el trazado de las características de la máquina.

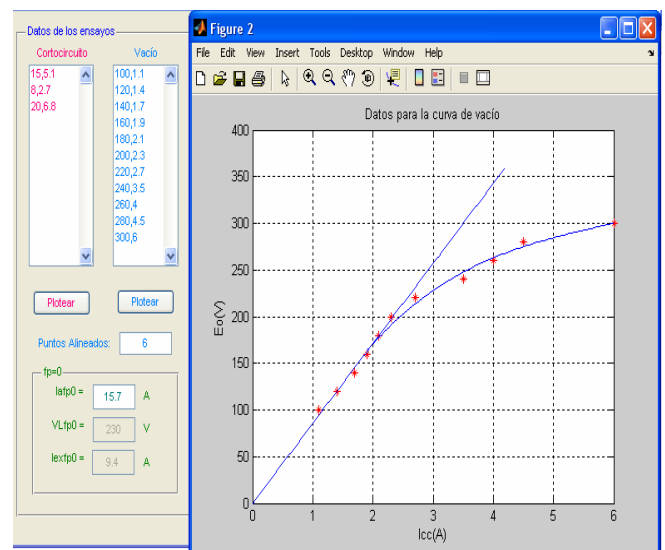


Fig. 2. Curva de vacío.

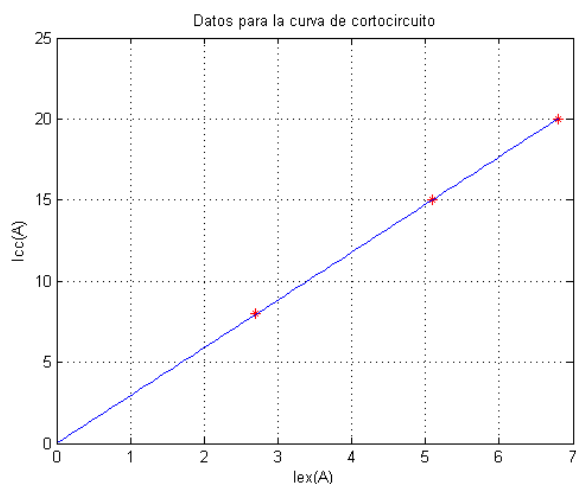


Fig. 3. Curva de cortocircuito.

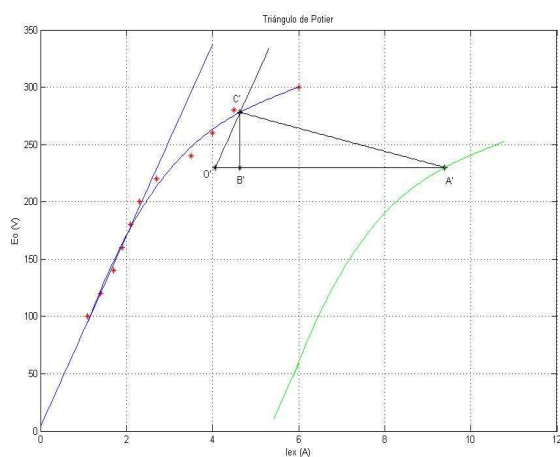


Fig. 4. Triángulo de Potier.

C. Algoritmo para el cálculo de la regulación de tensión

El primer paso en el cálculo de la regulación de tensión es obtener E_δ a partir de los datos del régimen de carga, véase figura 5, y haciendo uso de (3). Es importante seleccionar correctamente el carácter inductivo o capacitivo del factor de potencia, por medio de los "radio buttons" que se encuentran en la esquina inferior izquierda de la figura 1. Con los coeficientes del ajuste de la curva de vacío se obtiene la FMM del entrehierro y con esta la FMM de vacío según (4).

Cálculo de la regulación de tensión

In=

A
Vn=

V
fpn=

36 %

Fig. 5. Cálculo de la regulación de tensión en porciento.

Mucho más interesante resulta el próximo paso, en el que debemos obtener la FEM de vacío a partir de su FMM. En el caso más común en que la carga es inductiva, se tienen valores de estas dos magnitudes que pueden sobrepasar las mediciones de los ensayos. En estos casos se necesita una extrapolación de la curva de vacío, puesto que el ajuste polinómico se vuelve inaceptable fuera del intervalo de mediciones. Se optó pues, por realizar un ajuste en el sentido de los mínimos cuadrados, para aproximar el tramo curvo de la característica, a una función arcotangente. Finalmente, con este resultado y utilizando (5), se muestra la regulación de tensión porcentual, como en la figura 5.

D. Algoritmo para el trazado de la característica de regulación

Esta curva se traza para tensión de línea nominal y en el rango de corrientes de estator de cero a $1.25I_n$. Para cambiar estos parámetros solo se deben alterar estos datos de entrada al programa.

Se sigue el procedimiento anterior para cada valor de la corriente de salida y nos detenemos en el cálculo de la FMM del entrehierro que es nuestra variable de salida (8).

E. Algoritmo para el trazado de la característica externa

En (9) se representa la situación que ilustramos vectorialmente en la figura 6. El módulo de F_δ se obtiene despejando la expresión de la ley de los cosenos para este triángulo (11).

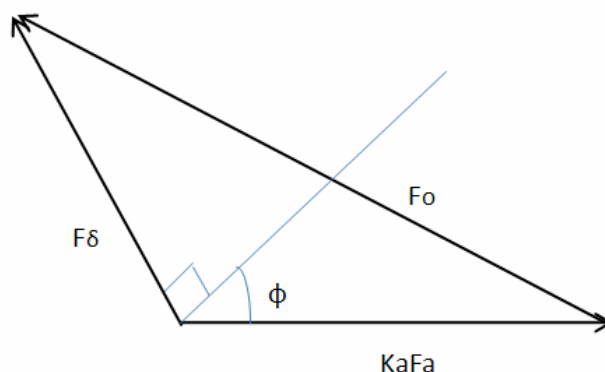


Fig. 6. Diagrama vectorial de fuerzas magnetomotrices.

$$F_o^2 = F_\delta^2 + (K_a F_a)^2 - 2 * K_a F_a * F_\delta * \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$F_\delta = a + \sqrt{a^2 + F_o^2 - (K_a F_a)^2}$$

$$a = K_a F_a * \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

(11)

Donde:

φ – ángulo del factor de potencia.

Para el cálculo de E_δ a partir de su FMM se sigue el procedimiento descrito en el cálculo de la regulación de tensión y se obtiene la tensión de salida mediante (10).

CASO DE ESTUDIO

La validación del programa se hizo a partir de ensayos realizados a una máquina sincrónica específica. A continuación se exponen los datos y mediciones de laboratorio para este generador, al que pertenecen los valores que se observan en las figuras anteriores.

A. Datos de los ensayos

Los datos de chapa de la máquina ensayada se pueden ver en la tabla 1. Los resultados de las pruebas de vacío y coroto circuito se muestran en la tabla 2 y la tabla 3 respectivamente.

B. Características de regulación y externa

Solamente nos resta mostrar las curvas de las características de regulación y externa, para la máquina ensayada. En la figura 7 se muestra el trazado de la característica de regulación para tensión nominal y factor de potencia 0.8 inductivo, 1 y 0.8 capacitivo respectivamente.

Estos resultados de los ensayos se pueden ver en asteriscos rojos en las figura 2 y figura 3 respectivamente. Y desde luego, el trazado del triángulo de Potier de la figura 4 así como la regulación de tensión de la figura 5 se corresponde con estas mediciones.

Datos de chapa de la máquina. Tabla. 1		
	Valor	Especificación
U_n	230 V	Tensión nominal
f_n	60 Hz	Frecuencia nominal
n	1800 r.p.m.	Velocidad nominal
fp	0.8	Factor de potencia nominal
S_n	6.25 kVA	Potencia nominal
I_n	15.7 A	Corriente nominal
I_{ex}	8.1 A	Corriente de excitación
η	82 %	Eficiencia
Clase de Aislamiento B		

Resultado de la prueba de vacío. Tabla 2.

I_{ex} (A) Corriente de excitación	V_o (V) Tensión de línea
6.0	300
4.5	280
4.0	260
3.5	240
2.7	220
2.3	200
2.1	180
1.9	160
1.7	140
1.4	120
1.1	100

Tabla3

Resultado de la prueba de corto circuito			
Corriente	Punto 1	Punto 2	Punto 3
I_{ex} (A)	2.7	5.1	6.8
I_a (A)	8.0	15.0	20.0

En la figura 8 se muestra la característica externa para corriente de excitación nominal y factor de potencia 0.8 inductivo, 1 y 0.8 capacitivo respectivamente. Estas curvas pueden ser comparadas con las de la referencia 4 para corroborar de forma cualitativa su veracidad.

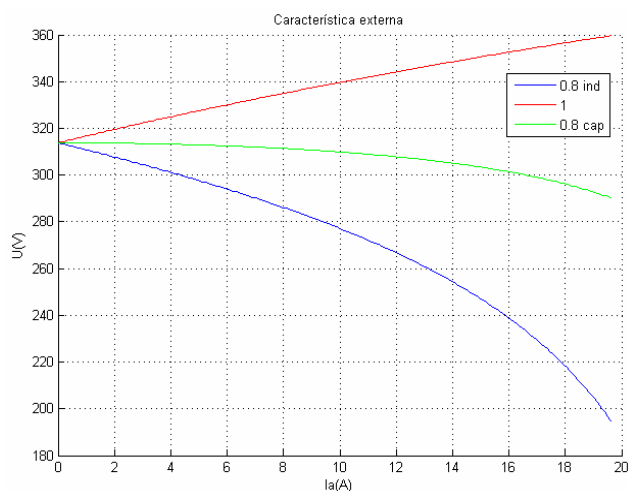


Fig. 8. Característica externa de la máquina ensayada.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al profesor de máquinas eléctrica Elías de la Rosa, por instarnos a desarrollar estos algoritmos de forma genérica, para poderse reutilizar y por algunas sugerencias que resultaron vitales.

REFERENCIAS

- [1] S. Chapman: *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill, 2005.
- [2] Santana y Costa : *Prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas III*. La Habana, 1988.
- [3] Kostenko y Piotrovski: *Máquinas Eléctricas*. 2nd ed., Moscú, 1979.
- [4] Voldek: *Máquinas Eléctricas*. La Habana, 1987.

AUTORES

Orlando Lázaro Rodríguez González.

Ingeniero Eléctrico, especialista en Automática, Telemecánica y Comunicaciones para el Transporte Ferroviario, en el Instituto de Transporte de Moscú. Doctor en Ciencias Técnicas Investigador Auxiliar .Jefe del Centro Nacional de Radares del Instituto de Meteorología (2003 hasta la fecha). Profesor Titular Adjunto de la Universidad de Camagüey. Cuba.

e- mail : orlando@cmw.insmet.cu

Vladimir Rodríguez Díez.

Ingeniero Eléctrico, Profesor Instructor. Universidad de Camagüey (desde 2008 hasta la fecha)

e-mail: vladimir.rodriguez@reduc.edu.cu