

DETERMINACIÓN EN LÍNEA DEL ÁNGULO DE CARGA DE UN GENERADOR SÍNCRONO

RESUMEN

Para realizar estudios de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es necesario disponer de modelos de los diferentes elementos componentes, entre los cuales se encuentra la máquina síncrona. Generalmente estos modelos son presentados en función de los parámetros de la máquina, los cuales pueden ser dados por el fabricante, obtenerse mediante ensayos o mediante técnicas de identificación en línea. En estas últimas metodologías, es necesario disponer de la medida del ángulo de carga para todo instante de tiempo, debido a que parámetros como las reactancias de eje directo y eje en cuadratura dependen sustancialmente de esta variable. Para este caso es necesario disponer de hardware y software específico para determinar esta variable.

En este documento se presenta una metodología basada en un microcontrolador para determinar el ángulo de carga. La estimación del ángulo está basada en la posición relativa del eje del rotor y del voltaje terminal de la máquina. Al final se presentan los resultados obtenidos para una máquina síncrona a escala existente en el laboratorio.

PALABRAS CLAVES: Generador síncrono, ángulo de carga, estabilidad.

ABSTRACT

Stability studies require of good synchronous machine models. These models are normally presented as a function of the machine parameters. These parameters could be obtained from the data sheets, tests or from other online identification methodologies. In these methodologies, it is necessary to obtain torque angle measurements in each time instant because parameters as the synchronous reactances in the q- and d-axis depend on such angle. For this reason it is necessary to have the specific hardware and software to obtain this variable.

In this paper a development and implementation of a microprocessor based methodology used to compute the torque angle is presented. The angle estimation is based on the relative positions of the rotor axis and the terminal voltages. Presented results are obtained from a scalable synchronous machine in the laboratory.

KEY WORDS: Synchronous generator, load angle, stability

1. INTRODUCCIÓN

Para realizar estudios de estabilidad y analizar los problemas relacionados con el control de los niveles de tensión y frecuencia de los sistemas de potencia, es importante conocer los parámetros y variables de los generadores síncronos [1]. Entre algunas de las medidas de interés, se encuentra el ángulo del par o de carga δ , que permite analizar la respuesta de la máquina ante condiciones transitorias, indicando si ante la perturbación el generador pierde o no el sincronismo. Asimismo el ángulo de carga, permite determinar parámetros tales como reactancias de eje directo X_d y eje en cuadratura X_q , sin necesidad de recurrir a los procedimientos de los ensayos clásicos.

Muchas publicaciones se enfocan en determinar el ángulo

ANA MARÍA PÉREZ L

Tecnóloga en Electricidad
Estudiante X semestre
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
anaperez@ohm.utp.edu.co

YIMY ALEXANDER ROMERO

Tecnólogo en Electricidad
Estudiante X semestre
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
jarr5@ohm.utp.edu.co

SANDRA MILENA PÉREZ L

Ingeniera Electricista, M.Sc.
Profesor asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
saperez@utp.edu.co

Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad - ICE³

del par. Entre ellas se puede citar la metodología expuesta en [3], donde se utiliza un sensor de entrehierro para detectar el desplazamiento del rotor con respecto a la componente fundamental del voltaje terminal, para una máquina de polos salientes. Uno de los problemas que surge al implementar este método es que no siempre se puede tener la disponibilidad de contar con sensores de este tipo.

En [4], se desarrolla una técnica para determinar el ángulo del rotor y la velocidad del generador teniendo como base las redes neuronales artificiales que usan medidas fasoriales de voltaje y corriente en tiempo real. Para desarrollar este método se entrenan dos redes diferentes, una que estima el ángulo del rotor y la otra que encuentra la velocidad de la máquina. Una desventaja de este método es que se necesita disponer de

varios datos de entrada, así como de un tiempo relativamente grande para el entrenamiento de la red.

En [5], se utilizan redes neuronales de base radial (RBFNN) para determinar el ángulo delta y el flujo de eje directo, mediante variaciones del torque mecánico y voltaje de campo. Una ventaja de este tipo de técnica es que permite entrenar la red para aplicaciones en línea.

En [6] se aplica un método que determina el ángulo del par y la frecuencia del generador síncrono, haciendo uso de un foto sensor que detecta la posición del rotor y entrega una salida de voltaje que posteriormente es comparada con una señal de referencia del voltaje terminal. La diferencia entre estas señales representa el ángulo de carga. Todo el proceso de comparación y medición es realizado por un microcontrolador Intel 80-386.

En este trabajo se explica la medición del ángulo de par en línea, con un sistema basado en un microcontrolador MC68HC908JK3 de la familia Motorola, el cual recibe la salida de un sensor óptico, cuyo haz incide sobre el rotor de la máquina.

En este artículo se presenta inicialmente la configuración implementada en el laboratorio con una máquina síncrona a escala. Posteriormente se explica la filosofía de la metodología utilizada y se presentan los resultados obtenidos.

2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La figura 1, presenta el diagrama de la configuración implementada en el laboratorio.

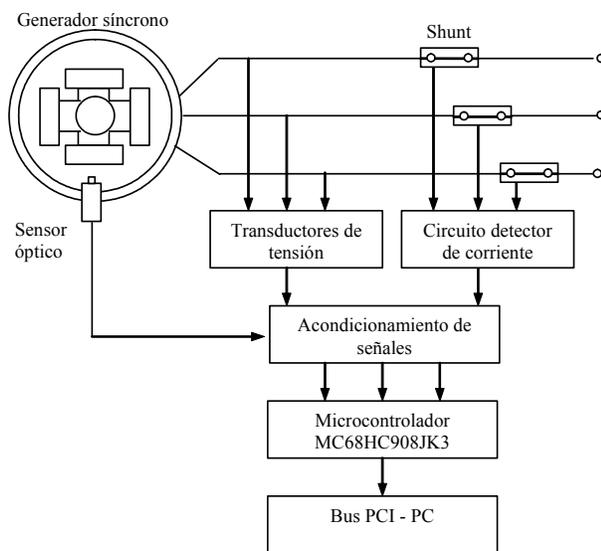


Figura 1. Configuración experimental utilizada en un generador síncrono de 120VA

El sistema total consta de un primomotor (motor síncrono trifásico, 175W – 1800 rpm, 208 V), el cual acciona un generador síncrono (120VA, 1800 rpm, 208 V, 0.33 A).

La alimentación del circuito de campo del generador, se realiza a través de un excitador de estado sólido del tipo puente rectificador semicontrolado, el cual realiza la variación de la corriente mediante la variación del ángulo de encendido de los tiristores, de acuerdo a la variación presentada en el voltaje medido en terminales.

Los voltajes de las tres fases del generador son medidos con transductores de tensión. La corriente de línea es medida con resistencias shunt y circuitos de aislamiento apropiados, con el fin de determinar cuando la máquina esta en condiciones de vacío y carga. La determinación de la posición del rotor es medida con un sensor óptico, el cual incide sobre una cinta reflexiva colocada en el eje de la máquina.

Después del acondicionamiento de todas las señales, estas son llevadas al microcontrolador MC68HC908JK3 de Motorola, de 8 bits manejado por un reloj de 5.03 MHz, que se encarga de determinar el ángulo del par, con una resolución de 0.042 grados eléctricos para un sistema de 60 Hz. Posteriormente se utiliza un PC para efectos de visualización.

3. DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DEL PAR

Descripción del método

El ángulo del par δ , está definido como la diferencia angular entre dos tensiones: el voltaje interno inducido E por el campo magnético del rotor y el voltaje en terminales de la máquina V [2] así como lo ilustra la figura 2. De esta manera puede decirse que la fase de E esta relacionada con la posición mecánica del rotor, y δ puede definirse como el ángulo eléctrico entre un eje de referencia en el rotor con respecto al voltaje en terminales.

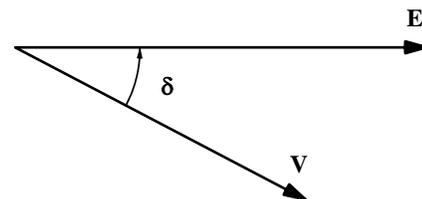


Figura 2. Definición del ángulo del par.

Cuando la carga de la máquina es nula, ambas tensiones son idénticas en magnitud y fase y el ángulo δ es cero. A medida que empieza el incremento de carga en la máquina, se observa como el pulso producido cuando la la señal de tensión en terminales presenta un cruce por

cero ascendente, se empieza a desplazar con respecto a la referencia del pulso del rotor, como se ilustra en la figura 3. Allí se compara la diferencia entre los pulsos generados por un circuito detector de cruce por cero del voltaje terminal y los pulsos obtenidos por el sensor óptico, cada vez que el rotor realiza un giro de 360° para una carga específica en el generador.

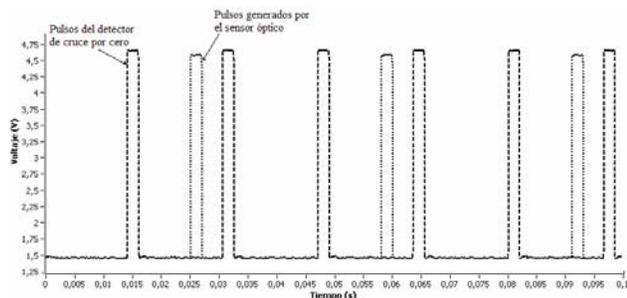


Figura 3. Principio de operación utilizado en la medición del ángulo del par

De esta forma, el esquema general de medición del ángulo del par implementado requiere de algunas variables medidas en la máquina como son: voltaje en terminales del generador, la corriente de línea y la posición de referencia del eje.

Estas entradas son manipuladas en el microcontrolador, con el fin obtener una tensión de salida proporcional al ángulo del par tal, como lo ilustra la figura 4.

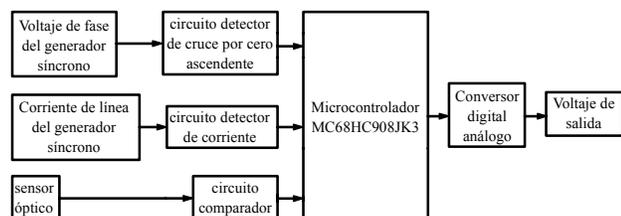


Figura 4. Esquema general del circuito medidor del ángulo del par.

Los circuitos implementados en el esquema anterior fueron los siguientes:

a. Circuito detector de posición del rotor: El sensor óptico entrega un nivel de tensión en el orden de 10 a 12V cuando se refleja en una cinta reflectiva en el eje del rotor, utilizada para fijar la posición de referencia y de 0 V en el caso contrario. Con el fin de entregarle una señal en niveles TTL al microcontrolador, se utilizó un circuito comparador, que atenúa la señal en el orden de 5V.

b. Circuito detector de cruce por cero ascendente, que consiste en la generación de pulsos, cuando la onda de voltaje en terminales cambia de niveles de tensión negativos a positivos.

c. Circuito detector de corriente: Utilizado para determinar si la máquina está en vacío o con carga.

En la figura 5 se ilustran las señales de pulsos requeridas para el cálculo del ángulo. En la figura (a) se tienen los pulsos del sensor óptico que indican la posición de referencia del eje del rotor cada vez que este da una vuelta completa, y los pulsos del detector de cruce por cero ascendentes (c, e) del voltaje en terminales, para las condiciones de vacío (b) y carga del generador (d) respectivamente.

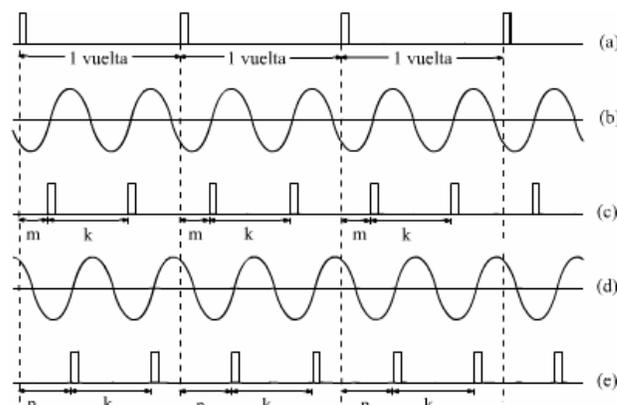


Figura 5. Pulsos de posición del eje y detector de cruce por cero ascendente para condiciones en vacío y con carga del generador.

De acuerdo con la figura 5, el principio de funcionamiento del sistema se basa inicialmente en el cálculo de las siguientes variables, para condición de vacío del generador, figura 5c:

m: Es el tiempo de calibración, definido como la diferencia entre la tensión en terminales y la posición del rotor.

k: Es el tiempo entre pulsos del detector de cruce por cero del voltaje terminal. Para este caso corresponderá al periodo de una señal de 60 Hz.

Estas variables son almacenadas, para posteriormente utilizarlas bajo condiciones de carga. Además en esta última condición figura 5e, se halla:

n: Es el tiempo de operación, definido como la diferencia entre la tensión en terminales y la posición del rotor.

Tpa: Definido como la diferencia entre n y m.

Para el cálculo del ángulo δ se utiliza (1):

$$\delta = \frac{360^\circ * Tpa}{k} [\text{grados eléctricos}] \tag{1}$$

Una vez obtenidas estas variables, el microcontrolador realiza el conteo de temporización.

Cada conteo que el microcontrolador realiza lo hace en $1.98\mu s$. Para un periodo de la señal de voltaje, se toman 8417 cuentas, según (2), que corresponden a un tiempo de 16.66ms.

$$t_v = \frac{k}{\Delta T} = \frac{16.66 \times 10^{-3} s}{1.98 \times 10^{-6} s} = 8417 \quad (2)$$

Con la resolución que tiene el microcontrolador MC68HC908JK3, se pueden tomar lecturas que varían cada 0.042 grados eléctricos.

Con el fin de ilustrar mejor el proceso de conteo realizado por el microcontrolador, se presenta el siguiente ejemplo:

En la figura 6, se presenta el conteo para una señal de voltaje de 60 Hz, suponiendo que se realizaron 12 cuentas, durante todo el periodo de la señal.

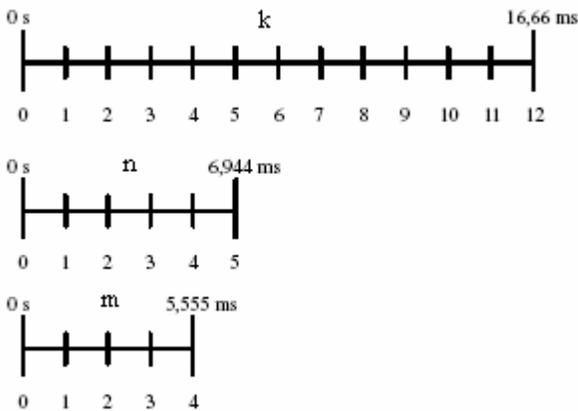


Figura 6. Conteo de temporización

Para el caso específico en que n fuera de 6.944 ms y m de 5.555 ms, los conteos serían de 5 y 4 respectivamente, lo cual permitiría determinar el ángulo δ , con $T_{pa} = n - m$, como se ilustra en (2):

$$\delta = \frac{360^\circ * (6.944 - 5.555)}{16.66} = 30.01 [\text{grados eléctricos}] \quad (3)$$

Cuyo resultado es aproximado al realizado con cuentas tal como se presenta en (4):

$$\delta = \frac{360^\circ * (5 - 4)}{12} = 30.00 [\text{grados eléctricos}] \quad (4)$$

En la figura 7, se presenta el diagrama de flujo simplificado del programa realizado para la medición del ángulo del par.

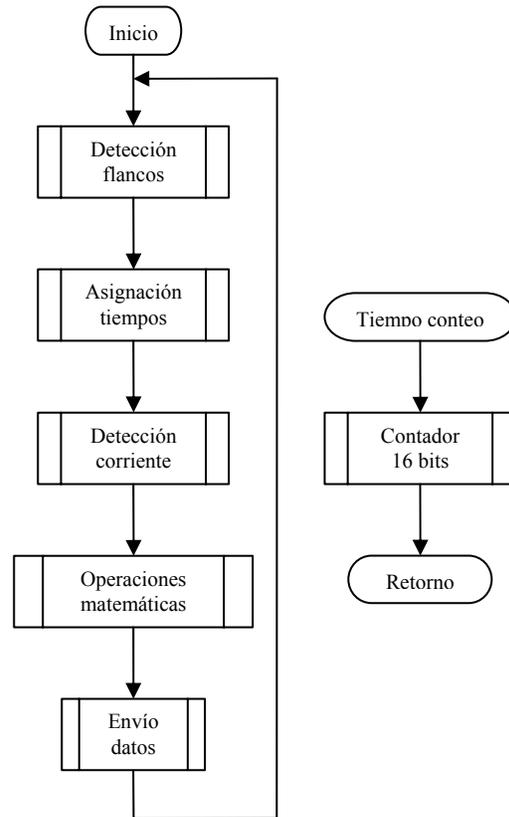


Figura 7. Diagrama de flujo del programa

4. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Descripción de las pruebas

Para las pruebas del sistema implementado se realizaron mediciones del ángulo δ , bajo condiciones de estado estable de la máquina e incremento súbito de la carga.

4.2 Presentación de resultados

En la figura 8 se ilustra el ángulo de par registrado en condiciones de estado estable, para un punto de operación de $P = 1.58$ p.u. a factor de potencia unitario.

La variación que se observa en la medición es debida a la mínima pero existente oscilación presentada entre las dos señales de pulsos entre las cuales se realiza la determinación del ángulo.

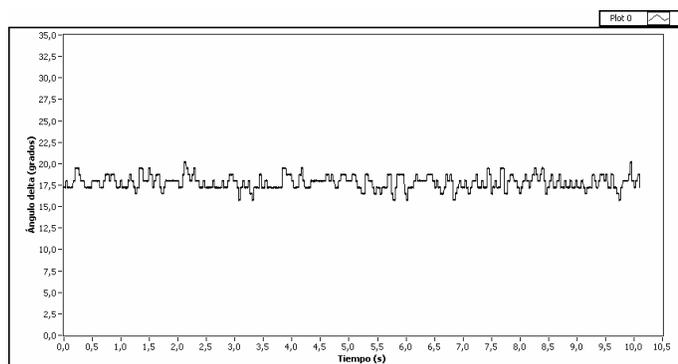


Figura 8. Medición del ángulo δ bajo condiciones de estado estable.

Al realizar variaciones de potencia activa en la carga de la máquina, desde 35% al 100% de su valor nominal, con incrementos del 5%, se observa en la figura 9 la relación entre el ángulo y la potencia cuando se aplica una carga trifásica resistiva.

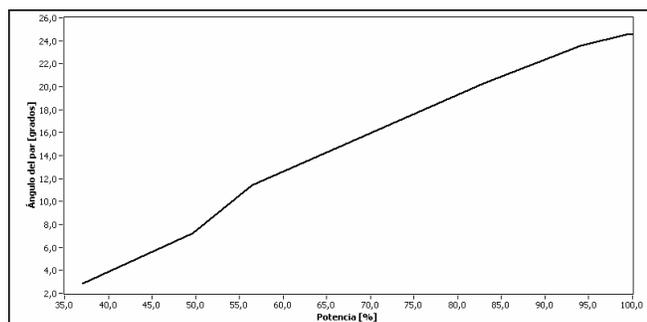


Figura 9. Medición del ángulo δ bajo condiciones de cambio de potencia.

De la figura 9 se observa que para una carga máxima con factor de potencia unitario le corresponde un ángulo de carga de 25° .

La respuesta dinámica del generador cuando la carga es súbitamente aplicada y removida se presenta en la figura 10.

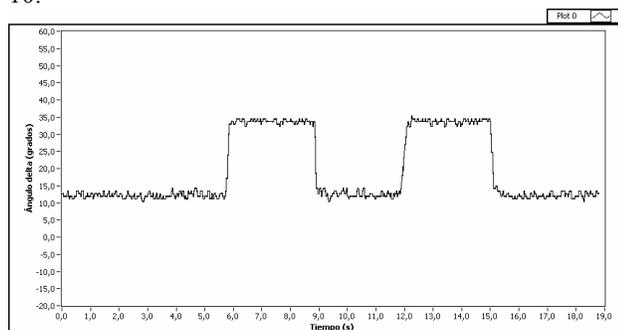


Figura 10. Respuesta dinámica del ángulo δ bajo carga

La carga aplicada inicialmente fue de 0.55 p.u y súbitamente se incrementa a 1.27 p.u. Se observa que un incremento en este tipo de carga no representa la pérdida de estabilidad para la máquina.

4. CONCLUSIONES

Ha sido implementado un sistema simple y económico para la determinación del ángulo del par basado en un microcontrolador. La respuesta del sistema es muy rápida, la resolución con la cual puede medirse el ángulo es de 0.042 grados eléctricos, la cual puede incrementarse fácilmente. Con la medición de este ángulo, se pueden implementar algoritmos más sofisticados para la determinación de algunos parámetros de la máquina síncrona en línea, entre ellos las reactancias de eje directo y cuadratura aplicando por ejemplo la metodología de Heffron Phillips, sin necesidad de sacar de operación a la máquina del sistema al cual se encuentre conectada.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Kundur P, “Power System Stability and Control, McGraw Hill, 1994.

[2] IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, IEEE Std. 115 A, 1983

[3] Despalatovic, Jadric, Terzic & Macan, “On-line hydrogenerator power angle and synchronous reactances determination based on air gap measurement”, IEEE Power systems conference and exposition, vol 3, 10 – 13 October 2004.

[4] Del Angel, Glavic & Wehenkel, “Using artificial neural networks to estimate rotor angles and speeds from 6 phasor measurements”, Proceedings of Intelligent Systems Applications to Power Systems Conference, Greece, 31 August – 3 September 2003.

[5] Abido & Abdel-Magid, “On-line identification of synchronous machines using radial basis function neural networks”, IEEE Transactions on Power Systems, vol 12, N° 4, November 1997.

[6] Rosales, Mota & Cursino “A microcomputer – based load angle and frequency measurement”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brusseis, Belgium, pp. 606-609, June 1996.