

MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE POTENCIA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO

Játiva Jesús, Ph.D. Villacreses Schubert
Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional
Quito, Ecuador

Resumen

Este artículo presenta una metodología para realizar la medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico de cuatro polos. La medición está basada en la determinación del ajuste o cambio de la posición angular de la señal de voltaje terminal respecto a la posición del rotor, siguiendo el cambio de carga abastecida por el generador. La medición del ángulo de potencia es realizada mediante la determinación del desfase temporal existente entre la detección de una marca adherida al eje de la máquina y el cruce por cero del semiciclo positivo de la señal de voltaje terminal, tomando en cuenta el número de polos del generador y como referencia la medición del desfase temporal en condiciones de operación en vacío. Esta medición es realizada bajo diferentes condiciones operativas como son: operación aislada y conectado a barra infinita, los resultados obtenidos son comparados con el cálculo teórico del ángulo, para cada condición especificada.

Índices – Ángulo de potencia, Medición por desfasaje temporal, LabVIEW, Estabilidad de pequeña señal.

Abstract

This paper presents the measurement of the power angle of a synchronous generator of four poles. The measurement is based on the determination of the adjustment or change of the angular position of the signal voltage terminal with respect to the position of the rotor, in accordance with the change of load supplied by the generator. The power angle measurement is done by the determination of the time lag between the detection of a adhered check mark in the shaft of the machine and the zero crossing of the positive semi-cycle of the signal terminal voltage, taking into account the number of poles of the generator and as a reference the time lag under no-load operating conditions. This measurement is performed under different operating conditions as: insolated operation and connected to infinite bar, the results obtained are compared with the theoretical calculation of the angle for each specified condition.

Indexes – Power angle, Measurement by temporary phase shift, LabVIEW, Small signal stability.

1. INTRODUCCIÓN

En un sistema eléctrico de potencia la generación de energía depende del sincronismo de las máquinas que lo conforman. La operación sincrónica está influenciada por la dinámica del ángulo de potencia y su relación con la potencia entregada al sistema.

El desarrollo de dispositivos de adquisición de datos y software dedicados han facilitado la implementación de

sistemas de monitoreo y medición de las variables del sistema eléctrico de potencia como son: frecuencia, voltaje, corriente, potencia, entre otras.

Es así que el ángulo de potencia constituye una importante variable a monitorear, puesto que provee información acerca del punto de operación del generador respecto a su límite de estabilidad en los estados estable y dinámico.

2. ÁNGULO DE POTENCIA

El campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica es el resultado de la combinación de las fuerzas magnetomotrices f.m.m. producidas por los devanados del inductor e inducido. En principio es el devanado de campo el que produce la densidad de flujo en el entrehierro, induciendo una fuerza electromotriz f.e.m. en los devanados del estator, al cerrar el circuito a los terminales del generador se produce la circulación de corriente en dicho devanado, creando una f.m.m. de reacción que al combinarse con la f.m.m. de campo origina una densidad de flujo resultante en el entrehierro.

El par electromagnético sobre el rotor actúa en el sentido que tiende a alinear sus polos con el flujo resultante en el entrehierro, pudiendo ser expresado con la ecuación (1).

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{polos}}{2} \right)^2 \cdot \Phi_r \cdot F \cdot \text{sen}(\delta) \quad (1)$$

Donde:

T: es el torque electromagnético sobre el rotor.

Φ_r : es el flujo resultante en el entrehierro

F: es la f.m.m. de rotor

δ : es el desfase angular existente entre las ondas de flujo resultante en el entrehierro y la f.m.m. del rotor, llamado ángulo de potencia.

Cuando el generador opera en vacío el flujo generado por la f.m.m. de campo se manifiesta como un voltaje interno E_f inducido en los devanados de estator. De igual manera cuando el generador opera bajo carga el flujo resultante en el entrehierro se manifiesta como un voltaje inducido en los devanados de estator, asumiendo la caída de voltaje en la resistencia del devanado como despreciable y considerando el flujo de dispersión en inducido como pequeño frente al del entrehierro este voltaje está representado por el voltaje terminal V_t . Es así que el ángulo de potencia δ puede ser definido como la separación angular entre el voltaje terminal de un generador y su voltaje interno, como se muestra en la Figura 1.

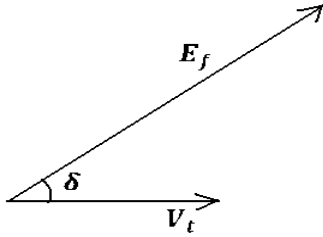


Figura 1. Ángulo de potencia

2.1. Diagrama fasorial generador sincrónico de polos salientes

El análisis de un generador sincrónico de polos salientes en estado estable en un sistema trifásico equilibrado es realizado mediante la descomposición de los efectos de la reacción de inducido en los ejes de cuadratura y directo.

El eje directo se encuentra perpendicular al voltaje interno, mientras que el eje en cuadratura está en la misma dirección del voltaje interno, adelantado al eje directo en 90° . Los efectos de la reacción de inducido son descompuestos en cada uno de los ejes y son representados por reactancias sincrónicas que dan cuenta de los efectos inductivos, incluyendo dispersión y reacción de inducido, siendo estas x_q la reactancia de eje en cuadratura y x_d la reactancia de eje directo.

El voltaje en bornes V_t difiere del voltaje interno generado en la cuantía correspondiente a la caída de voltaje en la resistencia de los devanados de estator, y las reactancias sincrónicas directa y en cuadratura, mostrado en el diagrama fasorial de la Figura 2.

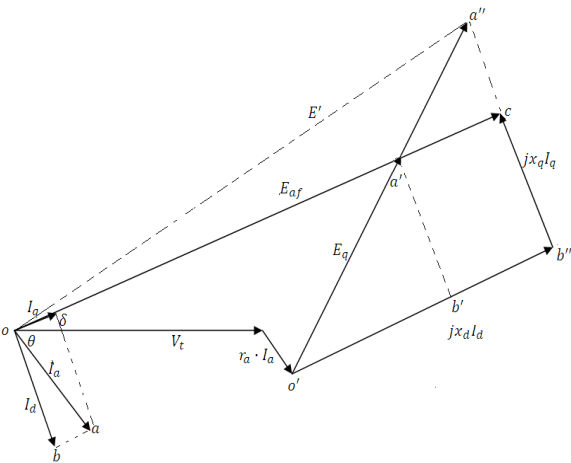


Figura 2 Diagrama fasorial de un generador sincrónico de polos salientes

La ecuación (2) permite la determinación del voltaje interno a partir de la descomposición de la corriente en eje directo y en cuadratura, presuponiendo el conocimiento del ángulo δ .

$$E_{af} = V_t + r_a I_a + jx_q I_q + jx_d I_d \quad (2)$$

La determinación del ángulo δ se realiza mediante la ecuación (3).

$$E_q \angle \delta = V_t + r_a I_a + jx_q I_q \quad (3)$$

3. RELACIÓN POTENCIA ÁNGULO Y ECUACIÓN DE OSCILACIÓN DE UN GENERADOR

La relación entre la potencia y la posición angular de los rotores de los generadores sincrónicos es un concepto fundamental en el estudio de estabilidad de ángulo.

En el sistema generador-barra infinita mostrado en la Figura 3, se considera un sistema de transmisión conformado por elementos pasivos lineales, el efecto de la resistencia no es considerado y el generador es de polos salientes.

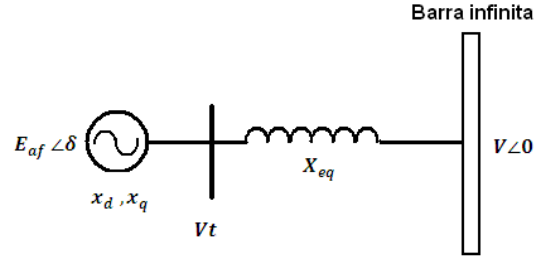


Figura 3. Sistema generador-barra infinita

Al representar el sistema en su diagrama fasorial y considerar el efecto del sistema de transmisión en componentes eje directo y cuadratura se tiene el diagrama mostrado en la Figura 4.

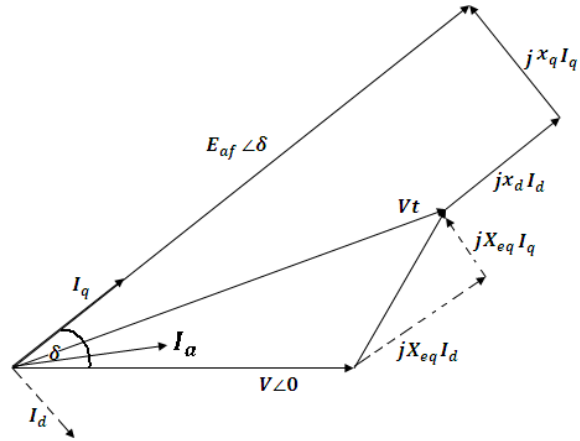


Figura 4. Diagrama fasorial de un generador de polos salientes-barra infinita con reactancia de transmisión

De donde el valor total de las reactancias entre el voltaje interno E_{af} y el voltaje en la barra infinita de acuerdo al diagrama fasorial está dado por las ecuaciones (4).

$$\begin{aligned} X_{Tq} &= x_q + X_{eq} \\ X_{Td} &= x_d + X_{eq} \end{aligned} \quad (4)$$

Del diagrama fasorial se demuestra que la relación potencia-ángulo satisface la ecuación (5).

$$Pe = \frac{E_{af} V}{x_{Td}} \cdot \text{sen}(\delta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_{Tq}} - \frac{1}{x_{Td}} \right) \text{sen}(2\delta) \quad (5)$$

Donde:

V : Voltaje en la barra infinita en [pu]

E_{af} : Voltaje interno de la máquina en [pu]

x_q : Reactancia de eje en cuadratura [pu]

x_d : Reactancia de eje directo [pu]

X_{eq} : Reactancia equivalente del sistema de transmisión [pu]

δ : Ángulo de potencia

P_e : Potencia eléctrica en [pu]

La ecuación de oscilación describe el movimiento relativo entre el rotor y el campo giratorio resultante en el entrehierro, y relaciona las variables físicas del movimiento del rotor como son la inercia y la velocidad mecánica con la potencia eléctrica generada. La ecuación (6) muestra la ecuación de oscilación sin considerar el efecto de amortiguamiento.

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (6)$$

Donde:

H : Constante de inercia en [MJ/MVA]

ω_s : Velocidad sincrónica en [rad/s]

δ : Angulo de potencia [rad]

P_m : Potencia mecánica en [pu]

P_e : Potencia eléctrica en [pu]

4. ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE-PEQUEÑA PERTURBACIÓN

Se refiere a la habilidad de las máquinas interconectadas en un sistema para permanecer en sincronismo después de haber sido sometidas a una pequeña perturbación. La ecuación de oscilación es una función no lineal de la potencia y el ángulo, sin embargo para pequeñas perturbaciones puede ser linealizada. Para ilustrar la estabilidad de pequeña perturbación se plantea las ecuaciones para el análisis de una máquina no regulada conectada a una barra infinita como en la figura 5.

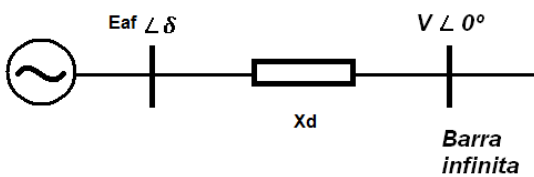


Figura 5 Sistema generador barra infinita

De donde se puede describir el comportamiento del ángulo de potencia y la velocidad angular en función del tiempo para un pequeño impacto de potencia, dado por las ecuaciones (7) y (8).

$$\delta = \delta_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t + \theta) \right] \quad (7)$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t) \quad (8)$$

Donde:

$P_s = \left. \frac{dP_e}{d\delta} \right|_{\delta_0}$: Coeficiente de sincronizante

$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H} \cdot P_s}$: Frecuencia natural de oscilación

$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{HP_s}}$: Relación de amortiguamiento

$\theta = \cos^{-1}(\xi)$

ω_d : Frecuencia de oscilación

5. MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE POTENCIA

La separación angular entre el voltaje interno de la máquina y el voltaje entre sus terminales es realizada mediante la determinación del desfase de tiempo existente entre la detección de la posición de un punto específico del eje de la máquina y el cruce por cero de subida en la señal de voltaje terminal del generador, tomando como referencia la posición de la señal de voltaje respecto a la posición del rotor en condiciones de carga nula.

Para el desarrollo e implementación de la medición es necesario considerar los siguientes aspectos.

- El número de pares de polos de la máquina indica el número de ciclos de la señal de voltaje terminal por cada revolución del rotor.
- Cuando la carga del generador es nula, el ángulo δ es cero, el incremento de la carga abastecida por el generador aumenta la magnitud de las corrientes en los devanados del estator y en consecuencia el ángulo δ busca una nueva posición acorde a la potencia generada.

Tomando en consideración estos aspectos y la técnica de medición a ser utilizada, la medición del ángulo de potencia es realizada mediante la implementación de dos circuitos detectores, un dispositivo de adquisición de datos y una aplicación en LabVIEW.

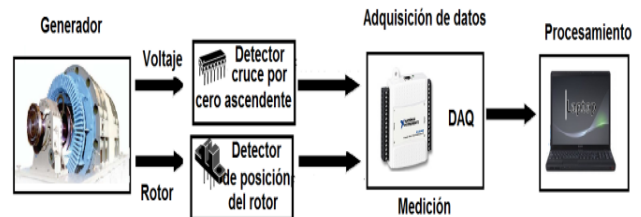


Figura 6. Diagrama de bloques del medidor de ángulo de potencia

Los circuitos utilizados generan señales eléctricas que permiten determinar la posición del rotor y la fase del voltaje terminal del generador. Estas señales eléctricas están asociadas con las fuerzas magnetomotrices entre las cuales se presenta el ángulo de potencia, las señales obtenidas son ingresadas al dispositivo de adquisición de datos, para la medición del desfase existente entre las señales, finalmente mediante una aplicación en LabVIEW se despliega la medición.

Los circuitos implementados en el diagrama de la figura 6 son los siguientes:

• Detector de cruce por cero ascendente

Consiste en la generación de un pulso positivo cuando la señal de voltaje terminal del generador cambia de niveles negativos a positivos en cada ciclo, de tal manera que

genera un tren de pulsos TTL asociado con la posición de la señal de voltaje terminal.

- **Detector de posición del rotor**

Consta de un sensor óptico de rayos infrarrojos por reflexión, ubicado en la parte inferior del acople motor-generador, éste se encarga de la detección de una marca reflejante en el acople, de tal manera que genera un tren de pulsos TTL asociado con la posición de la marca.

Las señales producidas por los circuitos descritos tienen el comportamiento mostrado en la figura 7 donde la señal de posición del rotor es representada en color azul, la señal de cruce por cero ascendente en color rojo y la señal del voltaje terminal en naranja.

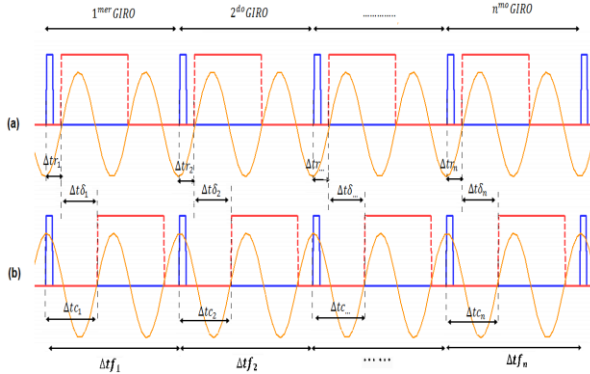


Figura 7. Medición del ángulo de potencia

Como se observa en la figura 7 (a) existe un desfase inicial entre la señal de rotor y de voltaje, que es producido por la ubicación arbitraria de la marca en el acople motor-generador, este desfase inicial en vacío es tomado como referencia a partir del cual se medirá el ángulo de potencia. En la parte (b) se observa el incremento del desfase entre la señal de rotor y voltaje, relacionado con el ángulo de potencia.

El principio aplicado para medición del ángulo de potencia mostrado en la figura 7, identifica las variables para la determinación del ángulo de potencia. Es indispensable recordar que el generador utilizado es de cuatro polos por lo cual se multiplica por dos la medición, ángulo de potencia en grados eléctricos ($^{\circ}$), las siguientes relaciones permiten el cálculo.

$$\Delta t\delta_i = \Delta t c_i - \Delta t r_i \quad (9)$$

$$\begin{matrix} \Delta t f_i & \dots & 360^{\circ} \\ \vdots & \nearrow & \vdots \\ \Delta t \delta_i & \dots & ? \delta \end{matrix} \quad (10)$$

$$\delta_i = 360 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta t \delta_i}{\Delta t f_i} [^{\circ}] \quad (11)$$

Donde:

δ_i : Es el ángulo de potencia para operación bajo carga.

$\Delta t r_i$: Tiempo de referencia, es el desfase temporal entre la señal de posición del rotor y el cruce por cero ascendente de la señal de voltaje, tomado en operación en vacío estable, y representa la referencia para $\delta = 0$.

$\Delta t c_i$: Tiempo de carga, es el desfase temporal entre la señal de posición del rotor y el cruce por cero ascendente de la señal de voltaje, tomado en operación bajo carga.

$\Delta t f_i$: Tiempo de frecuencia, es el tiempo que demora el rotor en dar un vuelta.

$\Delta t \delta_i$: Tiempo de ángulo de potencia, es la diferencia entre el tiempo de carga y el tiempo de referencia.

6. RESULTADOS

La medición del ángulo de potencia fue realizada para diferentes condiciones operativas como son el estado estable en vacío y con carga, el aumento de carga y la variación de la excitación de campo. Los resultados obtenidos en cada medición fueron comparados con sus contrapartes calculadas, a continuación se muestra cada una de las pruebas desarrolladas y los resultados obtenidos, así como el sistema utilizado.

6.1. ESTADO ESTABLE EN VACÍO Y CON CARGA

La medición de estado estable con carga se la realiza partiendo del estado estable en vacío operando el generador aislado, la frecuencia a 60 Hz y voltaje terminal cercano a 210 V.

Las pruebas se realizan para los cuatro pasos con los que cuenta el banco resistivo utilizado como carga. El procedimiento consiste en efectuar un paso de carga, regresar al generador a condiciones nominales de voltaje y frecuencia, una vez estabilizado el generador se toma la medición del ángulo mostrado por el medidor de ángulo de potencia, valores de potencia, voltaje y corriente.

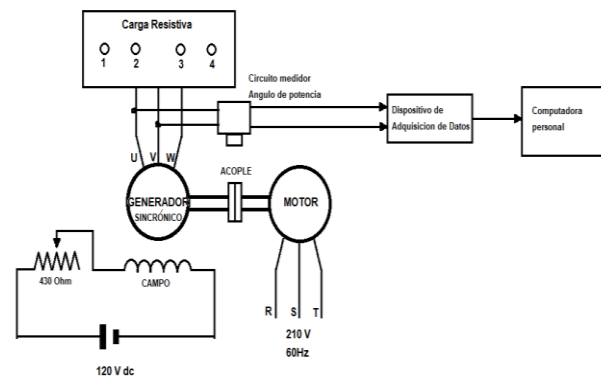


Figura 6 Esquema del sistema físico utilizado en la medición del ángulo de potencia para estado estable en vacío y con carga

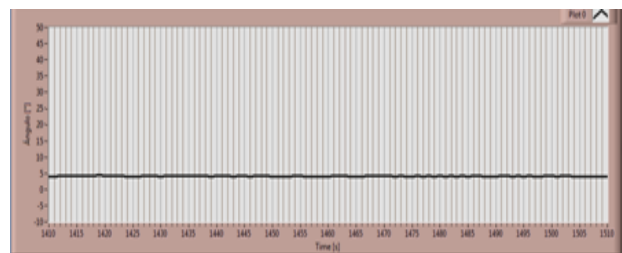


Figura 7 Comportamiento del ángulo de potencia en estado estable con carga

La comparación entre el valor medido y el calculado permiten la validación del resultado obtenido con el medidor de ángulo de potencia, la tabla 1 muestra la comparación entre el cálculo teórico con la ecuación (3) y la medición.

Tabla 1. Cálculo del error en la medición

$\delta_{calculado}$ [°]	δ_{medido} [°]	$ \varepsilon $ [°]
Primer Paso de Carga		
4,44	4,73	0,29
Segundo Paso de Carga		
8,76	9,07	0,31
Tercer Paso de Carga		
13,11	13,25	0,14
Cuarto Paso de Carga		
17,24	16,67	0,3

Como se muestra en la tabla 1, existe coherencia entre los valores medidos con la metodología planteada y los cálculos mediante la ecuación (3). Los resultados obtenidos demuestran que es posible el monitoreo o medición de ángulo de potencia mediante la comparación de la posición de rotor y la posición del voltaje terminal de la máquina, para el caso de estado estable.

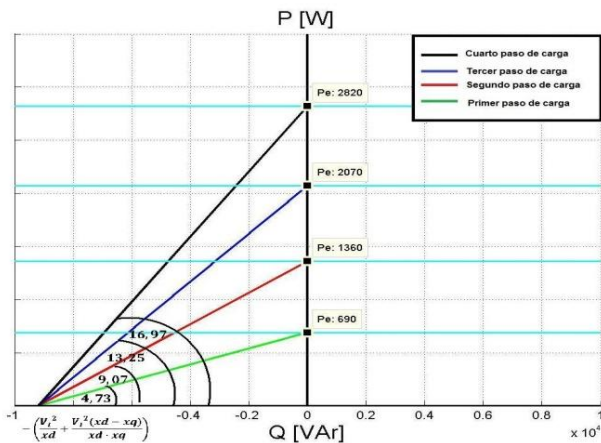


Figura 8 Ángulo de potencia en el plano P-Q

La figura 8 muestra el comportamiento del ángulo de potencia en el plano $P-Q$ para el caso de una carga puramente resistiva, puesto que la potencia reactiva es cero se observa que el movimiento de la potencia activa es a lo largo del eje P , y que está dado por la regulación de velocidad y voltaje, produciendo el consiguiente incremento o decremento del ángulo δ . Se observa que el ángulo de potencia para el plano P-Q esta dado por el arco tangente de la relación entre la potencia activa y el punto $(-V^2/x_q)$.

6.2. AUMENTO DE CARGA HACIA LA BARRA INFINITA

La prueba de aumento de carga consiste en conectar el generador al sistema trifásico de alimentación del laboratorio (barra infinita).

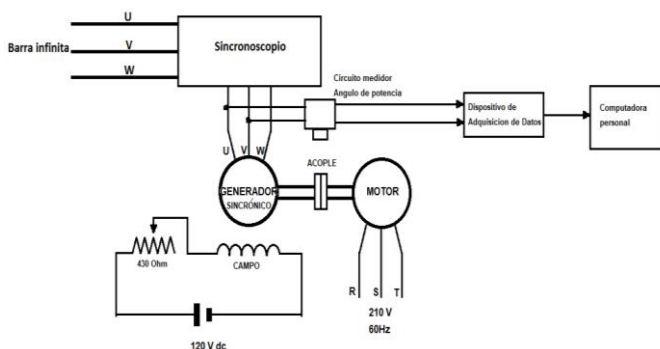


Figura 9. Esquema del sistema físico utilizado en la medición del ángulo de potencia para aumento de carga

Una vez realizada la conexión se procede a la toma de referencia en vacío. Para verificar el aumento de carga se procede al aumento progresivo de la carga abastecida por el generador, mediante el incremento de la potencia mecánica suministrada, sin alterar la excitación de campo para mantener fijo el voltaje interno de la máquina, obteniéndose los resultados de la tabla 2.

Tabla 2 Aumento de carga

	Potencia [W]	Ángulo δ [°]
Estado inicial	0	0
Primer aumento	1070	8,21
Segundo aumento	1660	12,49
Tercer aumento	2170	16,37
Cuarto aumento	3020	22,8

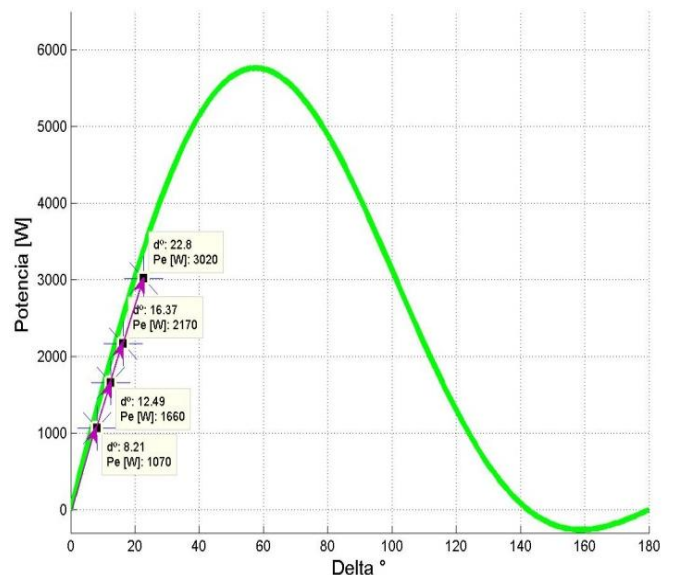


Figura 10. Aumento de carga

Las figuras 11 y 12 muestran la forma de onda monitoreada durante el paso del primer aumento hacia el segundo aumento, frente a su contraparte simulada con la ecuación (7).

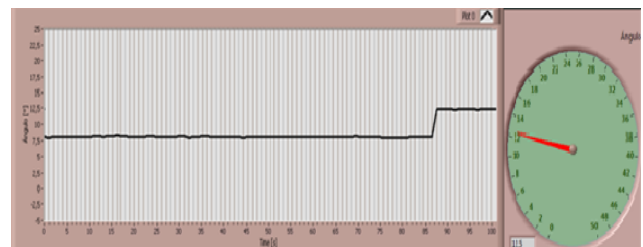


Figura 11. Medición de δ para aumento de carga

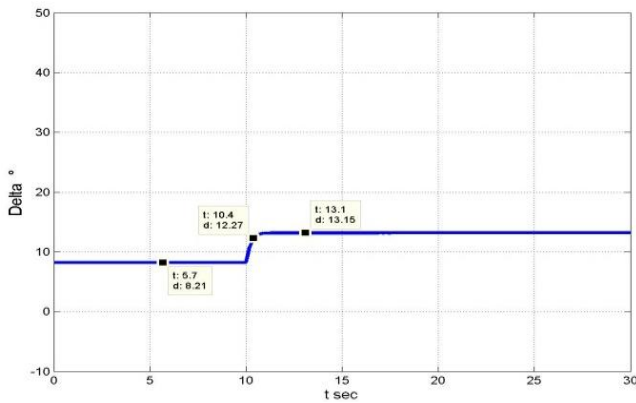


Figura 12. Simulación de δ para aumento de carga

6.3. VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CAMPO

La prueba de variación de la excitación consiste en conectar el generador al sistema trifásico de alimentación del laboratorio (barra infinita). Para visualizar el efecto de la variación de la excitación sobre el ángulo de potencia se fija la potencia mecánica, de tal manera que la potencia eléctrica permanezca casi constante. En esta condición se procede a cambiar el valor de la resistencia usada para el control de corriente de campo. Para análisis se toman mediciones de corriente de campo, factor de potencia y ángulo. En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos en la prueba realizada.

Tabla 3 Datos variación de excitación de campo

P=1730 [W]			
	I_f [A _{dc}]	δ [°]	fp
sobreexcitación	1,5	5,5	0,42
	1,1	8,79	0,77
	0,9	10,63	0,956
subexcitación	0,74	12,33	0,951
	0,6	14,32	0,812
	0,5	15,76	0,695

A partir de los datos mostrados en la tabla 3 es posible determinar el ángulo de potencia, mediante el uso de las relaciones ángulo-potencia en el plano P-Q. La tabla 4 muestra el resultado de los cálculos.

$$\frac{V^2}{x_d} = 4446,52 \text{ VA}$$

$$Q = \left(\frac{P}{fp}\right) * \sin(\text{acos}(fp)); \quad \delta = \text{atan}\left(\frac{P}{\left(\frac{V^2}{x_q}\right) + Q}\right)$$

Tabla 4. Resultado del cálculo de δ y Q

Q [VA]	$\frac{V^2}{x_q} + Q$ [VA]	δ_{cal} [°]	δ_{med} [°]
3738,1	12951	7,60	5,5

1433,5	10647	9,22	8,79
530,9	9744,1	10,07	10,63
-562,5	8650,7	11,31	12,33
-1243,5	7969,7	12,25	14,32
-1789,8	7423,4	13,12	15,76

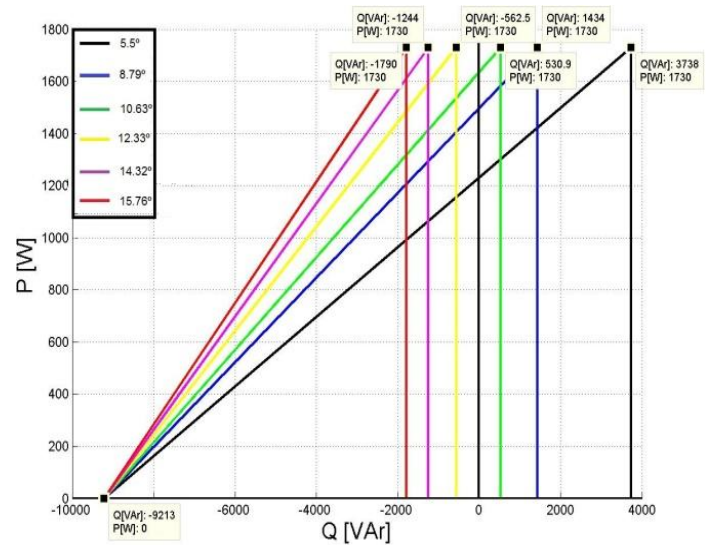


Figura 13. Comportamiento del ángulo δ para variación de la corriente de campo

7. CONCLUSIONES

- Se demuestra que el monitoreo del ángulo de potencia de un generador sincrónico puede ser efectuado por la comparación del desfase temporal existente entre la posición del rotor y el voltaje terminal del generador, tomando en cuenta siempre el número de polos del generador, puesto que de acuerdo a este número se tendrá que acondicionar la señal de voltaje a la misma frecuencia de la señal producida por el detector de posición del rotor.
- Los resultados obtenidos mediante esta técnica de medición son de carácter discreto, debido al hecho de que es necesario medir el desfase entre las dos señales en cada período, estando asociado al número de polos de la máquina y por lo tanto el paso de tiempo entre cada medición es igual al período de la señal de obtenida del rotor.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Walter Brokering, Christie, "Los Sistemas Eléctricos de Potencia", Prentice Hall, Chile, 2008.
- [2] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999.
- [3] Játiva Jesús, "Apuntes de la materia de SEP", EPN, Quito.
- [4] Robert L. Boylestad, "Electrónica Teoría de Circuitos", Sexta Edición, Editorial Pearson, Prentice Hall, 2004.
- [5] Fitzgerald, A.E., Kingsley, Charles, "Máquinas Eléctricas", Sexta Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos, 2003.

- [6] Lajara Vizcaíno, José Rafael, "LabVIEW entorno Grafico de programación", Alfa Omega Grupo Editorial, México, 2007.
- [7] National Instruments, "Empezando con LabVIEW", Edición de abril, 2003.
- [8] Correa Masache, Daniel Hernán, "Modelación y Simulación del Grupo 1 de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1 de Elepco S.A.", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007.
- [9] Test Procedures for Synchronous Machines", Standard 115.1965.
- [10] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=787454&isnumber=17042>.

BIOGRAFÍAS:



Dr. Jesús Játiva Ibarra: Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor of Philosophy Ph.D. (1991) de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de América.

Cursos de postgrado en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional y Consultor de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Schuberth José Villacreses Coral

Nació en Quito, el 16 de octubre de 1986. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Experimental Juan Pío Montufar de la ciudad de Quito. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico.