



XIV ERIAC



LA CONSTANTE DE INERCIA DE LAS MAQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS INTERPRETACIÓN Y ASPECTOS DE SU USO

D.A. PORCARI *

**IMPSA
Argentina**

A.R. CANNATELLA

**IMPSA
Argentina**

H.D. PIRIZ

**IMPSA
Argentina**

Resumen

La constante de Inercia H es un parámetro que comúnmente se pide entre los datos a garantizar por los fabricantes de máquinas eléctricas rotativas. También es de uso común entre los analistas de estabilidad de los sistemas de potencia quienes lo utilizan como dato de entrada para sus programas de simulación. Tiene la ventaja de aportar simplicidad a la ecuación de movimiento de los generadores de un sistema de potencia cuando las cuplas y velocidades están expresados en “por unidad” y el tiempo en segundos.

Alrededor de este parámetro y de la ecuación de movimiento existe cierto nivel de desconocimiento, lo que torna complicado su uso e interpretación y provoca que sea poco difundido entre analistas de procesos dinámicos que no tienen especialización en la parte eléctrica o en la estabilidad de los sistemas de potencia.

Lejos de ser un parámetro difícil de usar o de uso exclusivo en complejos programas de simulación dinámica, es un parámetro muy útil para ser utilizado en cálculos simples, y que permite obtener una idea rápida acerca del comportamiento dinámico de las unidades en diversas situaciones sin tener que utilizar programas de cálculo.

Desde el enfoque de H y del efecto volante o GD^2 , se analiza en el presente artículo el impacto que tiene la inercia sobre el costo y rendimiento del generador sincrónico de polos salientes a medida que el GD^2 requerido en las especificaciones se aleja de su valor natural. También se analiza la influencia de la inercia sobre la operación de la unidad, el dimensionamiento y cálculo de diversos sistemas, el riesgo de resonancia entre la frecuencia natural del rotor y las frecuencias perturbadoras que se originan en las turbinas, y también la influencia de H sobre los ajustes óptimos del regulador de velocidad para la operación en red aislada.

El propósito del presente artículo es refrescar el concepto y significado de este parámetro, difundir su utilización con algunos ejemplos sencillos, clarificar algunos conceptos que hay en su interpretación, y llevar el uso del mismo nuevamente al terreno conceptual de las leyes físicas del movimiento de las masas rotantes, para que el diálogo entre especialistas en sistemas de potencia, en diseño de generadores y en diseño de turbinas resulte más fluido y productivo.

Palabras clave:

Constante de Inercia, Tiempo de Aceleración, Constante de Tiempo Mecánica, Torque Acelerante.

1. INTRODUCCIÓN

El cociente entre la energía cinética almacenada en el rotor cuando gira a velocidad nominal y la potencia aparente nominal de la unidad es la constante de inercia H. Con esta denominación aparece comúnmente en la bibliografía de máquinas eléctricas.

El uso de este parámetro en la ecuación de movimiento de la máquina (en pu) permite hallar en forma simple los tiempos de los procesos de aceleración y desaceleración a los que las masas rotantes son sometidas toda vez que se rompe el equilibrio entre la cupla mecánica y la cupla eléctrica. Esto significa que para ciertas estimaciones aproximadas, el calculista puede obtener los tiempos de aceleración o desaceleración sin necesidad de memorizar o calcular cuplas en Nm, GD2 en Tm² y velocidades de giro en rad/s.

2. EL GD2 NATURAL

La constante de inercia está relacionada con el efecto volante mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \cdot \frac{GD2 \cdot n^2}{kVA} \quad (1)$$

En donde:

GD2 Efecto volante del generador [Tm²]

n Velocidad de rotación nominal [rpm]

kVA Potencia aparente nominal [kVA]

H Constante de Inercia [kW.s/kVA]

Los fabricantes tienen estadísticas de la inercia posible de lograr en diferentes máquinas y han desarrollado fórmulas a partir de las mismas para definir el llamado GD2 natural (GD2n). Este valor se define como el mínimo GD2 que se puede obtener cumpliendo todos los requerimientos electromagnéticos normales y puede aplicarse en aquellos generadores que no tienen que cumplir exigencias extraordinarias del sistema de potencia y del sistema hidráulico.

Hay diferentes formulaciones para el GD2 Natural que en general dan valores aproximados para una determinada potencia y velocidad. Como ejemplo de esto tenemos el valor indicado por la norma Nema MG 5.1.

$$H_n = 0.54 \cdot \ln(kVA \cdot 10^{-3}) + 0.30 \quad (2)$$

A este valor de Hn le corresponde un valor de GD2n obtenido de la ecuación (1).

3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

La ecuación de movimiento (3) describe el efecto del desbalance entre el torque electromagnético y el torque mecánico, para una máquina individual. Resulta útil representar esta ecuación de movimiento en diagrama de bloques para conceptualizar su aplicación (Fig.1).

$$\omega = \frac{1}{2 \cdot H} \int T dt \quad (3)$$

Donde:

ω Velocidad angular [pu]

t Tiempo [s]

T Cupla resultante [pu]

Tm Cupla mecánica [pu]

Te Cupla electromagnética [pu]

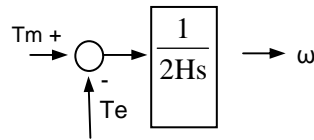


Fig.1. Diagrama de Bloques

3.1 Ejemplo de utilización

Considerando $H = 4.5 \text{ kW.s/kVA}$ para un generador/motor de 206 MVA / 300 rpm, puede calcularse el torque eléctrico que debe suministrar un convertidor estático de frecuencia para arrancar y acelerar la unidad en modo motor/bomba desde reposo a velocidad nominal, en un tiempo máximo de 180 segundos.

De la ecuación (3), para $T = T_m - T_e = \text{constante}$, surge que:

$$\omega = \frac{T \cdot t}{2 \cdot H} \quad (4)$$

Para $\omega = 1$ se habrá cumplido la etapa de aceleración, por lo que el torque calculado resulta ser de 0.05 pu. De esta forma se llega a una conclusión rápida y conceptual que un torque del 5% del nominal será suficiente para lograr la aceleración deseada.

4. USO DE LA CONSTANTE DE INERCIA EN GENERADORES REPOTENCIADOS

En el caso de repotenciar unidades de una central hidroeléctrica, es muy común que se busque producir un mínimo impacto en la obra civil existente, sobre todo cuando se encuentra en buen estado. Al requerirse conservar las dimensiones y la velocidad de las unidades generadoras, el GD2 de las mismas se mantiene prácticamente constante y el hecho de pasar a una potencia nominal mayor, tiene como resultado un nuevo valor de H que resultará menor que el original.

Realizar los estudios de desempeño de la unidad repotenciada utilizando la ecuación de movimiento en p.u. podría conducirnos a una conclusión apresurada de que la máquina es menos estable con respecto a su condición previa a la repotenciación, debido a la reducción de H. Para clarificar y conceptualizar este problema, se citan a continuación dos casos particulares.

4.1 Desempeño de la Unidad en Red Aislada

Al estudiar la operación en red aislada, la nueva unidad repotenciada presentaría una mayor desviación de la frecuencia para un mismo valor de toma de carga en pu, con respecto a la respuesta que daría la unidad original. Esto se debe a que la base para el sistema pu cambia de la potencia original a la nueva potencia, lo que conduce correctamente a respuestas diferentes.

Para que los modelos arrojen respuestas correctas y puedan ser adecuadamente analizadas, deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El escalón de potencia en pu está siempre expresado en referencia a la potencia base de la máquina en estudio. Por ello, un mismo escalón en pu representará un valor mayor en kW para la máquina repotenciada que para la original.
- El coeficiente de autorregulación de las cargas D se expresa como una variación de potencia, respecto a la potencia nominal, para una variación de frecuencia dada. Por ello, deberá adecuarse su valor en el caso de cambio de la potencia base. Esto hace que la relación entre H y D se mantenga constante entre la máquina original y la repotenciada.

Se muestra en la Tabla I un ejemplo de repotenciación, donde se simuló la variación de frecuencia ante un escalón repentino de carga, del mismo valor en kW para ambos casos. Puede verificarse en la Fig.2 que, respetando las premisas arriba indicadas, la respuesta de la máquina ante el escalón de carga, es la misma para ambos casos.

TABLA I. REPOTENCIACIÓN. DATOS DEL GENERADOR

	Generador Original	Generador Repotenciado
Potencia Nominal [kVA]	75300	78000
GD2 [Tm ²]	10809	10809
H [kW.s/kVA]	2,83	2,46
Escalón de Toma de Carga [kW]	5556	5556
Escalón de Toma de Carga [pu]	0,074	0,064
Coef.de Autorregulación de las Cargas D	0,750	0,652
Relación H/D	3,777	3,777

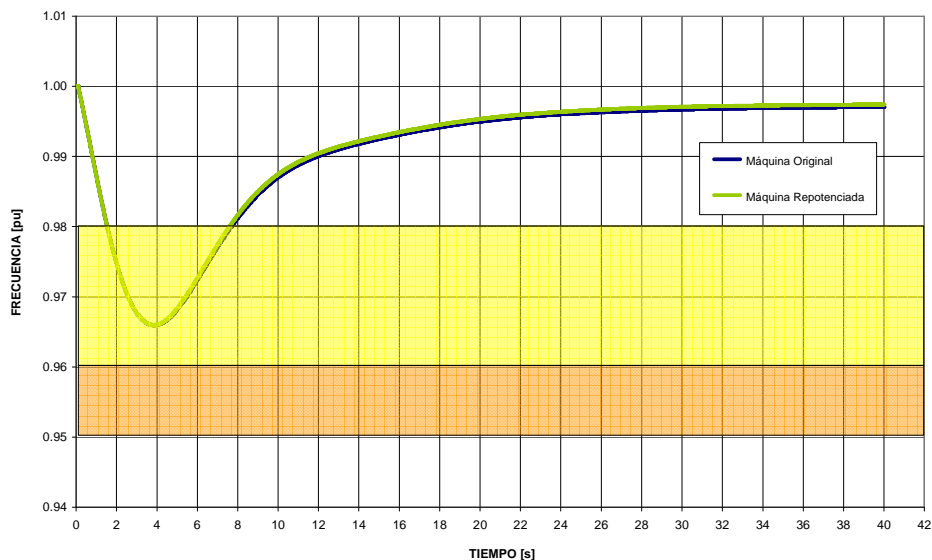


Fig.2. Respuesta Ante un Escalón de Toma de Carga

4.2 Frenado de la unidad

Una situación similar se presenta cuando estudiamos el tiempo que tardará en detenerse la máquina durante una parada normal con el uso de la ecuación de movimiento expresada en sistemas por unidad [2]. La disminución de H en el generador remodelado podría conducir a la conclusión que la máquina nueva se detendría en menos tiempo cuando en realidad no es así, siendo que la energía cinética almacenada en las partes rotantes es la misma. Se sugiere tener especial cuidado en el análisis en este caso también al efecto de que una misma pérdida mecánica que no ha variado su valor antes y después de la repotenciación, sea representada por valores en p.u. diferentes al simular la máquina original y máquina repotenciada.

5. INFLUENCIA DE LA INERCIA EN LA FRECUENCIA DE OSCILACIONES DEL ROTOR

El diagrama de bloques simplificado para este análisis (Fig.3) solo incluye la dependencia del torque electromagnético del generador con respecto al ángulo de carga δ , es decir para el caso en que el flujo concatenado por el rotor sea constante. No se considera en este caso la influencia amortiguadora del coeficiente de autorregulación de la carga, los arrollamientos amortiguadores y el equipo de excitación.

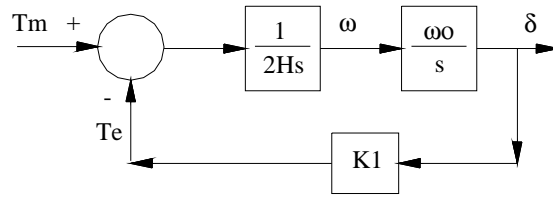


Fig.3. Diagrama de Bloques para Análisis de Oscilaciones

La ecuación característica de este sistema retroalimentado es:

$$1 + K1 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{Ms^2} = 0 \tag{5}$$

De la ecuación característica típica de un sistema de 2^{do} orden puede obtenerse

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{M}} \tag{6}$$

Siendo $M = 2 \cdot H$

La frecuencia natural de oscilación depende de H y K1, siendo este último el coeficiente de torque sincronizante que representa la pendiente de la curva “potencia – ángulo de carga” de la unidad.

Ante eventuales frecuencias perturbadoras eléctricas o mecánicas, se rompe el equilibrio entre la cupla mecánica y la cupla eléctrica. Así, el rotor de la unidad oscilará produciendo aceleraciones y desaceleraciones al ritmo que le impone esta frecuencia natural. En particular para el caso de las turbinas Francis operando a potencia parcial, se producen oscilaciones de presión en el tubo de descarga que se ponen de manifiesto como oscilaciones de potencia eléctrica de origen hidráulico. Durante la etapa de diseño del generador se analiza la cercanía entre estas frecuencias perturbadoras de la turbina y la frecuencia natural del generador para evitar el riesgo de resonancia.

Un criterio de seguridad aplicable en esta situación es obtener un factor de magnificación inferior a 3.1 [3], lo cual implica un alejamiento entre las frecuencias naturales y perturbadoras mayor al 15 %.

Si la cercanía entre frecuencias fuera inferior al valor mínimo, se hace necesario durante la etapa de diseño variar parámetros del generador tales como H, y aquellos que intervienen en el torque sincronizante K1, esto es, Xq, X'd y la corriente de excitación o la potencia reactiva Q. Se analizó esta situación en una aplicación particular para establecer el impacto que tiene, en términos de diseño, dimensionamiento y operación de un generador, producir un corrimiento de esta frecuencia natural a través de la variación de estos parámetros. El estudio se realizó sobre un generador de 90 MVA de potencia nominal, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla II.

El análisis se realizó con el modelo matemático no lineal del generador, con la máquina operando en condiciones nominales y produciendo una perturbación de la cupla mecánica tipo escalón del 3%.

TABLA II. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Parámetro y Variación	F (Hz)	F1 (Hz)	F1 / F (p.u.)	Δf %	
H1 / H	1,35	1,60	1,35	0,85	15,30
Q1 / Q	0,63	1,60	1,59	0,99	0,82
X'd1 / X'd	1,54	1,60	1,54	0,96	3,55
Xq1 / Xq	1,57	1,60	1,57	0,98	1,87

- La Frecuencia F de 1,60 Hz corresponde a la frecuencia natural de la máquina original operando en condiciones nominales con los parámetros H, X'd y Xq originales y Q nominal.
- La frecuencia F1 es la que se obtiene variando uno de los parámetros a la vez.
- La variación de Q es la variación de un parámetro de operación mientras que el resto de las variaciones corresponden a parámetros de diseño y dimensionamiento del generador.

Los resultados obtenidos muestran que H, la constante de inercia, es el parámetro más sensible en esta relación causa-efecto para producir los resultados deseados. La contribución de la variación de los demás parámetros es muy modesta y el hecho de forzar estos a valores mayores atentaría contra las reglas del buen arte del diseño y también contra las especificaciones técnicas. Análisis equivalentes realizados sobre otras aplicaciones conducen a resultados similares.

6. INFLUENCIA DE LA INERCIA DEL GENERADOR SOBRE EL COSTO Y LA EFICIENCIA

El valor mínimo de inercia necesaria viene generalmente indicado en las Especificaciones Técnicas de cada proyecto en particular. Este valor surge de estimaciones realizadas sobre el impacto que la nueva máquina tendrá sobre el comportamiento del sistema de potencia y/o sobre las condiciones hidráulicas del proyecto. El cumplimiento de valores máximos de sobrevelocidad y sobrepresión en la tubería de admisión, en el caso de una central hidroeléctrica, impone considerar un valor mínimo de inercia, que estará prácticamente concentrado en el rotor del Generador.

La solicitud de un GD2 muy elevado en comparación con el valor natural, traerá como consecuencia un incremento en el costo del generador y una pérdida de eficiencia que podría hacer imposible el cumplimiento del valor mínimo solicitado. Se impone en estos casos la necesidad de reestudiar el proyecto y considerar, por ejemplo, la conveniencia de incorporar una chimenea de equilibrio que permita reducir el requerimiento de inercia del generador.

Se muestra a continuación un estudio sobre el impacto que tiene una solicitud excesiva de GD2 respecto al valor natural, sobre el costo y la eficiencia máxima obtenida. Este estudio ha sido desarrollado utilizando el programa de cálculo integrado ARGEN [4]. En la Tabla III se muestran las variaciones de costo y eficiencia, obteniendo el GD2 solicitado con el menor incremento de costo posible. En la tabla IV se muestra la variación de costo teniendo la premisa de mantener el rendimiento solicitado. El valor del GD2nat es de 11400 Tm² y el Rendimiento solicitado es de 98.23%.

TABLA III. VARIACIÓN COSTOS Y EFICIENCIA

GD2solic/GD2nat	Incremento Costo	Rendimiento Obtenido
1.10	3.1%	98.22%
1.20	6.1%	98.21%
1.30	8.5%	98.21%
1.50	13.9%	98.19%
1.80	21.2%	98.18%

TABLA IV. VARIACIÓN COSTOS. EFICIENCIA CONSTANTE

GD2solic/GD2nat	Incremento Costo	Rendimiento
1.10	3.8%	98.23%
1.20	6.8%	
1.30	15.6%	
1.50	21.7%	
1.80	33.8%	

De las tablas anteriores se observa que un excesivo requerimiento de inercia para el generador puede llevar a un incremento del costo de un equipo de alto valor específico dentro del proyecto. Esto resulta más evidente aún en casos donde el rendimiento solicitado se mantiene en un valor alto a pesar de la elevada inercia requerida.

Los resultados obtenidos sugieren, para casos similares al estudiado, que debería analizarse cuidadosamente el proyecto para verificar si hay alguna solución alternativa que minimice el costo del conjunto.

7. TIEMPO DE ACELERACIÓN

La constante de tiempo mecánica M o Tm se define como el tiempo requerido para acelerar la unidad desde el reposo hasta la velocidad nominal, aplicando el torque nominal.

El Tiempo de Aceleración Nominal [5] y la Constante de Tiempo Mecánica [1] son conceptos similares pero sus valores pueden diferir numéricamente, dependiendo de la definición inicial del torque base usado para expresar las magnitudes en pu. Se observan normalmente dos tipos de definiciones diferentes:

$$\text{Definición 1: Torque Base} = \text{Torque Activo} = \frac{\text{Potencia Activa Nominal}}{\text{Frecuencia Angular Mecánica Nominal}}$$

$$\text{Definición 2: Torque Base} = \text{Torque Aparente} = \frac{\text{Potencia Aparente Nominal}}{\text{Frecuencia Angular Mecánica Nominal}}$$

En función de la definición adoptada para la elección del Torque Base, se obtendrán diferentes expresiones para el cálculo del Tiempo de Aceleración o la Constante de Tiempo Mecánica. Para las dos opciones planteadas, su valor se obtendrá de acuerdo a lo siguiente:

$$\text{Definición 1: } T_m = 2 \cdot H \quad (7)$$

$$\text{Definición 2: } T_m = \frac{2 \cdot H}{\cos \varphi} \quad (8)$$

Esto se explica teniendo en cuenta el fenómeno físico de aceleración que depende exclusivamente del torque mecánico activo aplicado a las masas rotantes. Así, si el torque base elegido es el activo, el torque mecánico aplicado deberá considerarse igual a 1 pu llegando así a la expresión (7). En el caso de usar como torque base el aparente, el torque mecánico nominal será numéricamente igual al factor de potencia y se llega a la expresión (8).

Por otro lado, la norma IEC [5] define el Tiempo de Aceleración Nominal (Rated Acceleration Time), de acuerdo a lo siguiente:

$$\tau_j = \frac{J \cdot \omega_n^2 \cdot 10^{-3}}{P_N} \quad (9)$$

ω_n velocidad angular nominal [1/s]

J momento de inercia [kg.m²]

P_N potencia nominal [kW]

Con la ecuación (9) y utilizando los valores en unidades físicas se obtiene el mismo resultado que utilizando la ecuación (8).

Independientemente del sistema de representación utilizado, en pu o en unidades físicas, se considera incorrecta, desde el punto de vista del fenómeno físico conceptual, la adopción como torque nominal de aquel equiparable al torque eléctrico aparente que deriva de la potencia aparente y de la velocidad nominal.

8. LA INFLUENCIA DEL VALOR DE H EN LA OPERACIÓN EN RED AISLADA

Para una operación estable bajo condiciones de red aislada, el ajuste óptimo de los parámetros del regulador de velocidad tiene una influencia notable. Este depende sensiblemente de la constante de tiempo del agua Tw y la constante de tiempo mecánica Tm [5].

La elección óptima del Estatismo Temporal (RT) y del Tiempo de Reset (TR) del regulador depende de los valores de Tw y Tm, y por consiguiente de H. Aunque estos parámetros son propios de los antiguos reguladores mecánico-hidráulicos, las funciones de estos parámetros son ejecutadas eléctricamente en los

modernos reguladores con sistemas electro-hidráulicos. En las referencias [1] y [7] se ofrecen las ecuaciones para el ajuste óptimo de TR y RT y la bibliografía [6] ofrece las ecuaciones que relacionan estos parámetros con las constantes proporcional, integral y derivativa de un regulador moderno.

9. CONCLUSIONES

Los distintos análisis realizados en torno a la inercia del generador muestran que la misma, ya sea representada por el valor de H, el GD2 o el J, es un parámetro de dimensionamiento que resulta ser sensible con un impacto importante en el diseño, en los costos y también el desempeño de la unidad. Dado que su valor está condicionado por requerimientos varios de las especificaciones, el mismo debería resultar en una buena solución de compromiso tal que cumpliendo con las reglas del buen arte, permita un dimensionamiento de la unidad dentro de costos razonables y que a la vez cumpla con los requisitos solicitados. Cuando su valor vaya a ser establecido en una especificación técnica, es recomendable que sea suficientemente revisado para evitar requerimientos antagónicos que podrían forzar el dimensionamiento del generador hacia una zona que lo aleje del diseño óptimo.

Referencias Bibliográficas

- [1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw –Hill, Inc. 1994
- [2] A.R.Cannatella, H.D.Piriz, “Sistemas de Frenado Eléctrico y Frenado Regenerativo en Centrales Hidroeléctricas”, en *XIII ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ*, Mayo de 2009
- [3] M. P. Kostenko, L. M. Piotrovski, *Máquinas Eléctricas II*, Editorial MIR, Moscú, 1979
- [4] E.J.Guerra, A.O.García, F.M.Graffigna, C.A.Verdú, “Optimizing Generators”, *International Water Power and Dam Construction*, November 1994
- [5] Rotating Electrical Machines – Methods for Determining Synchronous Machines Quantities from Tests. *IEC 60034-4: 2008*
- [6] Woodward, *The Controlled System*, PMCC22
- [7] P.L Dandeno, P. Kundur, J. P. Bayne, “Hydraulic Unit Dynamic Performance Under Normal and Islanding Conditions” in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, Nro 6, Nov / Dec 1978.