



TRABAJOS TEORICOEXPERIMENTALES

Optimización del sistema de control de las pequeñas centrales hidroeléctricas (primera parte): Factores que dificultan la regulación

Luis Jerónimo García Faure
Ángel Luis Ricardo Grave de Peralta
Luis Alberto Castañeda Garay

Recibido: Diciembre de 2004
Aprobado: Febrero del 2005

Resumen / Abstract

En ocasiones se aborda el problema de la regulación de la velocidad de las turbinas mediante el gasto de agua como un hecho especializado de determinada rama de la ingeniería, y se trata de aplicar a las micro y minicentrales las mismas soluciones que para la regulación de otros procesos industriales en los cuales el comportamiento dinámico de los sistemas externos ejerce poca influencia sobre el sistema de control utilizado.

Palabras clave: control, minihidroeléctricas, momento de inercia, golpe de ariete

In some occasions the problem of the regulation of the speed of hydraulic turbines is approached by means of the flow of water as a specialized problem of certain branch of the engineering, and it is applied to micro hydropower and mini hydropower the same solutions that are applied to the regulation of other industrial processes in which the dynamic behavior of the external systems exerts little influence on the control system employed.

Key words: control, mini hydropower, moment of inertia, water hammer

INTRODUCCIÓN

En las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) que trabajan de forma aislada, las inercias del sistema hidráulico y del grupo turbina-generador y el gradiente dE/dT (demanda/tiempo) pasan a ocupar un papel fundamental en el análisis del sistema de control. De ahí, la importancia que tiene considerar todos los factores que intervienen en el proceso.

EFFECTO COMBINADO DEL SISTEMA DE CONTROL, LA TUBERÍA Y EL TURBO-GENERADOR

Si la carga a la cual está sometido el generador de una turbina disminuye o aumenta bruscamente, el

sistema de control no actúa de forma instantánea. Las razones son las siguientes:

1. El mecanismo necesita un cierto tiempo, debido a su propia inercia y a las variaciones predeterminadas de Δf y ΔP , desde que se detecta la variación de la frecuencia de la electricidad hasta que este comienza a actuar.
2. El agua debe ser acelerada (o desacelerada) por la tubería hasta alcanzar el gasto correspondiente a la nueva potencia.
3. Debe consumirse energía adicional debido a la inercia mecánica para acelerar (o desacelerar) las masas rotatorias de la máquina.

Variación de la potencia con el gasto de agua

La curva característica de potencia en función del gasto de agua está íntimamente relacionada con el tipo de turbina. La potencia versus el gasto de agua, es una función que se ajusta con mayor precisión al modelo matemático del tipo:

$$A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C \cdot P + D = 0 \quad \dots(1)$$

Donde los coeficientes A, B, C y D dependen de múltiples factores, tales como:

- Velocidad específica (tipo de turbina).
- Momento de inercia del grupo turbogenerador.
- Altura del salto hidráulico.

De lo anterior se puede inferir, que la variación requerida del gasto de agua para compensar una determinada variación de la potencia está en dependencia del tipo de turbina, de sus dimensiones y de la altura del salto hidráulico.¹

Tiempo necesario para compensar

una variación del gasto de agua por la tubería

Si se produce una variación de la carga sobre el grupo turbogenerador, el sistema de regulación debe actuar de forma tal que el punto de operación de la turbina se mueva hacia otro de mayor o menor potencia según sea el caso. Esto implica una variación del gasto por la tubería.

Debido a la inercia del flujo y al rozamiento, se requiere un determinado tiempo para que la nueva masa de agua alcance el equilibrio. Se puede demostrar mediante el principio de impulso - cantidad de movimiento aplicado al elemento de fluido que se necesita acelerar, que el tiempo necesario para llevar el agua desde el reposo hasta la velocidad de régimen está dada por la siguiente expresión:

$$t_H = \frac{L \cdot V}{g \cdot H} \quad \dots (2)$$

Que recibe el nombre de constante de tiempo hidráulico o tiempo transitorio hidráulico. De esa expresión se puede sacar una importante conclusión: Para una velocidad de régimen dada, la constante de tiempo depende de la relación L/H (pendiente de la tubería). Luego, si el sistema está compuesto por un tramo con pequeña pendiente seguido de otro con mayor pendiente, el agua tendrá una mayor aceleración en este último, lo cual puede producir una depresión en el tramo de menor pendiente cuando se abre el regulador para aumentar la entrada de agua a

la turbina. La utilización de chimenea de equilibrio o de cámara de carga, según sea el caso, puede establecer la compensación dinámica de las tuberías. Otro fenómeno dinámico que se puede presentar en el sistema hidráulico y que tiene influencia en el sistema de regulación, es el conocido por golpe de ariete, el cual se puede presentar de forma completa o parcial en dependencia de la velocidad con que se produzca el cierre de la válvula de control del gasto de agua.

El golpe de ariete es un fenómeno cíclico amortiguado de aumento y disminución de la presión debido al cambio que experimenta la energía cinética del fluido en energía piezométrica, la cual, al producirse el cierre de la válvula, viaja como onda de presión positiva en dirección contraria al flujo hacia el embalse dilatando la tubería, que luego al contraerse produce una onda de presión negativa que se invierte hacia la turbina, cumpliendo un ciclo que se repite hasta desaparecer.

El primer ciclo del golpe de ariete es el que se toma en cuenta por ser el que mayor elevación de la presión produce. La duración del primer ciclo del golpe de ariete está dado por:

$$T_s = \frac{2L}{a} \quad \dots (3)$$

El tiempo del primer ciclo del golpe de ariete determina el tiempo mínimo permitido para el cierre del regulador ($T_{c\min}$)

La velocidad de la onda de presión se determina por:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot e} \right)}} \quad \text{m/s} \quad \dots(4)$$

El criterio más general para poder modelar físicamente el comportamiento dinámico del sistema hidráulico está dado por un parámetro adimensional que relaciona la constante hidráulica con el tiempo del primer ciclo de la onda de presión.² Se define por:

$$\rho = \frac{T_H}{T_s} = \frac{a \cdot V}{2gH} \quad \dots(5)$$

Resulta evidente, que con el aumento del parámetro dinámico de la tubería, aumenta la intensidad del golpe de ariete.

Tiempo y potencia necesarios para variar las revoluciones del grupo turbogenerador

La potencia normal en el árbol de la turbina está dada por:

$$P_n = M_n \cdot \omega_n \quad \dots(6)$$

El momento se puede obtener a partir del momento de inercia de las masas rotatorias:

$$M_n = \frac{I \cdot \omega_n}{t_a} \text{ N-m} \quad \dots(7)$$

De (6) y (7) se tiene:

$$T_a = \frac{G \cdot D^2 \cdot n_n^2}{364756 \cdot g \cdot P_n} \text{ s} \quad \dots(8)$$

Siendo: $I = \frac{G \cdot D^2}{4g}$ - momento de inercia de las masas rotatorias en Kg-m².

La expresión (8) recibe el nombre de tiempo transitorio del grupo o tiempo de aceleración. Es el tiempo requerido para llevar las masas rotatorias del grupo turbogenerador desde el reposo hasta las revoluciones y potencia normales.

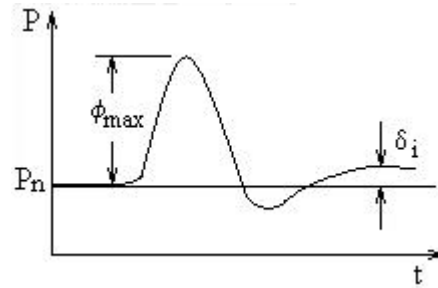
Para variar (aumentar o disminuir) las revoluciones se debe consumir una potencia adicional debido a la inercia que posee el grupo turbogenerador y está dada por:

$$\Delta P = \frac{GD^2(n_n^2 - n^2)}{364756 \cdot g \cdot T_a} \text{ kw} \quad \dots(9)$$

Considerando como ejemplo el caso de una disminución brusca de la carga en el generador, se produce una variación transitoria de la velocidad durante la cual la potencia entregada por la turbina al eje del generador aumenta. La diferencia de energía es suministrada por las masas que están siendo aceleradas. Momentáneamente, el conjunto adquiere una mayor velocidad, que debe ser llevada al estado inicial mediante el sistema de control por la disminución de la potencia hidráulica, como muestra la figura 1.

La desviación máxima a partir de la velocidad inicial, se denomina incremento (o disminución) temporal de

la velocidad ($\phi_{\max}$) y se expresa en porcentaje de la velocidad normal.



Comportamiento dinámico del grupo

1

El incremento temporal de la velocidad máximo permitido por cada tipo de turbina determina el tiempo máximo de cierre del regulador $(T_c)_{\max}$.

La expresión matemática que permite relacionar las tres constantes dinámicas con el incremento temporal de velocidad, recibe el nombre de ecuación de Braun.³ Está dada por:

$$\phi_{\max} = \frac{T_c + 1,5T_H \left(1 - 0,4 \frac{T_H}{T_c}\right)}{2(T_a + 0,25T_c)} \quad \dots(10)$$

Al parámetro adimensional que se obtiene a partir del tiempo de cierre del regulador y el tiempo del primer ciclo del golpe de ariete se le llama parámetro del regulador.² Se expresa mediante:

$$\theta = \frac{T_c}{T_s} = \frac{a \cdot T_c}{2 \cdot L} \quad \dots(11)$$

Si: $\theta < 1$ el cierre es brusco.

$\theta > 1$ el cierre es gradual (recomendado).

La elevación que experimenta la presión en la tubería (h^+) por el cierre del regulador se determina por la ecuación de Allievi-Michaud:⁴

$$\left(\frac{H + h^+}{H}\right) + 2 \frac{T_H}{T_c} \left(\frac{H + h^+}{H}\right)^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{1}{\theta}\right) - \left(1 + 2 \frac{T_H}{T_c}\right) = 0 \quad \dots(12)$$

Para garantizar una respuesta rápida del sistema de regulación y al mismo tiempo evitar la aparición del golpe de ariete y el embalamiento de la máquina durante el cierre del distribuidor, debe cumplirse la siguiente relación:

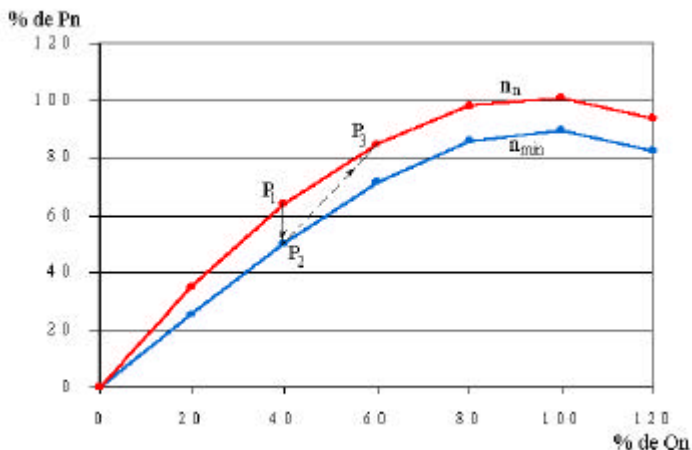
$$T_H < T_c < T_a \quad \dots(13)$$

CONDICIONES REQUERIDAS DURANTE EL AUMENTO DE LA DEMANDA

En las grandes centrales hidroeléctricas que trabajan conectadas a un sistema, el problema principal que debe resolver el lazo de control es garantizar el tiempo de cierre dentro de los límites establecidos para evitar tanto el golpe de ariete como el embalamiento de las máquinas, por lo que prácticamente en la bibliografía no se hace alusión al tiempo de abertura para compensar la potencia por el aumento de la demanda. La explicación de esto está dada por el hecho de que en las grandes centrales, los gradientes dE/dT son mucho menores que en las PCH (las variaciones de energía se producen en períodos de tiempo más largos) y además, el sistema ejerce influencia sobre las máquinas.

En las PCH el proceso de abertura presenta mayor importancia desde el punto de vista del comportamiento del sistema de control, aspecto este que ha sido poco estudiado.

Cuando se produce el aumento de la demanda, debido a que el sistema de control presenta una determinada inercia, la potencia de la máquina disminuye con el gasto de agua constante hasta un número menor de revoluciones, desde el cual el sistema de control debe llevar el grupo turbogenerador hasta la nueva potencia a las revoluciones normales, según se muestra en la figura 2.



Comportamiento de la potencia para compensar la demanda.

Para poder determinar el tiempo y la potencia consumida durante el proceso de abertura del regulador, deben conocerse las variaciones máximas permitidas para la frecuencia eléctrica (Df) y entre la potencia y la demanda (DP) con respecto a los valores normales.

El conocimiento de este proceso reviste gran importancia, porque a medida que se aleja la frecuencia de la frecuencia normal, mayor es la potencia que hay que consumir para alcanzar el nuevo valor de la demanda (DP_{2-3}).

¿ Se cumplen siempre estas condiciones en las micro y minicentrales?

Si por algún motivo el tiempo hidráulico se hace mayor que el tiempo de aceleración del grupo, el lazo de control se hace ineficiente. El sistema de control detecta la diferencia de frecuencias y comienza a actuar pero, antes de que puedan ser restituidas las condiciones iniciales, la velocidad de la turbina continúa disminuyendo y se requiere de un nuevo ajuste sin haber completado el anterior.

A continuación se mencionan las principales condiciones que hacen que esto pueda ocurrir:

- Si la turbina posee una curva de gasto-potencia muy plana, para una pequeña variación de la potencia es necesario una variación muy grande del gasto y por tanto, el tiempo hidráulico puede superar al tiempo de aceleración de la máquina.
- Si además de tener una curva de gasto-potencia muy plana, el grupo presenta inadecuada constante de aceleración por exceso o déficit de volante, se empeoran las condiciones para la regulación.
- Un momento de inercia del grupo muy superior al requerido implica mayor potencia adicional para llevar las masas rotatorias a la velocidad de régimen.
- En centrales aguas fluyentes aisladas con excesivas relaciones de L/H , sin chimeneas de equilibrio o cámaras de carga, resulta prácticamente imposible lograr la estabilidad del sistema de control
- Si además de no poseer cámara de carga o chimenea de equilibrio, el primer tramo de la tubería presenta pequeña pendiente, (alto valor de la relación L/H) el tiempo hidráulico aumenta con respecto al tramo de mayor pendiente. En su descenso el agua produce una depresión en la tubería que puede provocar la ruptura de la columna líquida, empeorando la regulación.

- En las mini y microcentrales que trabajan de forma aislada, el gradiente de variación de la demanda de energía a lo largo del tiempo dE/dt alcanza altos valores. Esto trae como consecuencia, que las respuestas del regulador, hidráulica, y de la máquina, deban ser en menores períodos de tiempo, lo cual en la mayoría de los casos es difícil de lograr.

CONCLUSIONES

El control de las pequeñas centrales hidroeléctricas comienza en el embalse y termina a la salida del generador, por lo que el estudio debe abordarse de forma integral. Después que se han analizado todos los factores que intervienen en la regulación mediante el gasto de agua, si no se cumplen todas las condiciones y restricciones que exige el problema, debe recurrirse a otro método de control, como puede ser, el sistema con carga constante y disipación de la energía (carga fantasma).

En una segunda parte de este trabajo se presenta el modelo matemático que permite llevar a cabo la determinación de los parámetros dinámicos de las PCH en condiciones de optimización.

REFERENCIAS

1. García Faure, L.: "Distribución de la potencia y el caudal de las pequeñas centrales hidroeléctricas para máxima eficiencia", Tesis de maestría, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 1997.
2. Jiandong, Tong: *Small Hydraulic Turbine*. pp. 47- 49, Hangzhou International Center, R.P. China, 1996.
3. Miroslav, Necheleva: *Hydraulic Turbines. Their Design and Equipment*, pp. 290-301 Ed. Artia, Praga, 1957.
4. Souza, Zulcy de: *Centrales hidroeléctricas, dimensionado de componentes*. pp.110-112, Ed. Edgard Blucker Ltd., Brasil, 1992.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS UTILIZADOS

- A, B, C, D: Coeficientes.
 a: Velocidad de la onda de presión.
 D :Diámetro de las masas rotatorias.
 E: Módulo de elasticidad del acero.
 e: Espesor de tubería.
 G: Peso de las masas rotatorias.
 g: Aceleración de la gravedad.
 H: Salto hidráulico.
 h^+ Aumento de la presión en la tubería.
 L: Longitud de tubería.
 M_n : Momento normal.
 n_n : Revoluciones normales.

- P_n : Potencia normal.
 T_a : Constante de aceleración del grupo.
 T_C : Constante de tiempo del regulador.
 T_H : Constante de tiempo hidráulica.
 T_S : Tiempo de la primera onda de presión del golpe de ariete.
 $j_{máx}$: Incremento temporal de velocidad.
 g: Peso específico del agua.
 w: Velocidad angular.

AUTORES

Luis Jerónimo García Faure
 Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Técnicas,
 Profesor Auxiliar, Centro de Estudio de Eficiencia
 Energética, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba,
 Cuba
 e-mail:lgarcia@ceefe.uo.edu.cu
 e-mail:lgarcia432003@yahoo.es

Ángel Luis Ricardo Grave de Peralta
 Ingeniero Electricista, Empresa de Hidroenergía,
 Santiago de Cuba, Cuba
 e-mail:mariae@hidroestg.co.cu

Luis Alberto Castañeda Garay
 Ingeniero Hidrotécnico, Empresa de Hidroenergía,
 Santiago de Cuba, Cuba
 e-mail:mariae@hidroestg.co.cu

FÁBRICA DE

