
BOLETIN ENERGETICO



Organización Latinoamericana
de Energía

OCTUBRE/DICIEMBRE/1980

EL DESARROLLO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS EN LATINOAMERICA Y EL CARIBE *olade* ANEXO I: SINTESIS DEL PROGRAMA REGIONAL DEL P.C.H. *olade* DISEÑO Y ESTANDARIZACION DE TURBINA MICHELL-BANKI *olade* HIDROLOGIA PARA PROYECTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS EN AUSENCIA DE DATOS *olade* REGULADOR DE VELOCIDAD ELECTRICO ELECTRONICO DE TURBINAS HIDRAULICAS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS *olade* METODOLOGIA SINTETICA PARA EL CALCULO Y ESPECIFICACION PRELIMINAR DE MICROCENTRALES HIDROELECTRICAS

REGULADOR DE VELOCIDAD ELECTRICO ELECTRONICO DE TURBINAS HIDRAULICAS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS

Ing. Luis Antonio Suárez Figueroa

1. Problemática del desarrollo de Reguladores de Velocidad

La regulación de velocidad de turbinas hidráulicas representa uno de los problemas esenciales en el desarrollo de P.C.H. El obtener un sistema óptimo de regulación para lograr un equipo seguro y de bajo costo, constituye el principal objetivo de los investigadores. Asimismo dicho sistema de regulación debe abarcar los rangos que se estipulan en el programa de P.C.H. de la región:

- Microcentrales Hidroeléctricas
- Minicentrales Hidroeléctricas
- Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

De aquí se desprende que los sistemas de regulación deben abarcar rangos determinados para su aplicación, lo que equivale a discernir acerca de la estandarización de los mismos.

La controversia del análisis y definición del tipo de central conlleva a que algunos investigadores se inclinen a señalar que los sistemas de regulación de velocidad no son compatibles con las microcentrales debido a que su costo es elevado en comparación al costo de turbina.

Algunos, justifican la regulación manual para las microcentrales hidráulicas, o si no la regulación a través del balanceo de carga (con resistencias). La primera opción determina reducidas inversiones pero es poco confiable, y tiene mayores costos de operación. La segunda solución significa derroche de energía en muchos casos necesaria y no permite la utilización racional del agua, donde sea necesario usarla para otros fines.

Con el fin de encontrar una solución óptima se realizó el estudio de un conjunto de sistemas de regulación, habiéndose encontrado que los reguladores oleo-mecánicos, electro-mecánicos, mecánicos e hidráulicos con mando electrónico, resultaban poco adecuados para P.C.H. por la complejidad de sus componentes, lo que eleva el costo de fabricación.

Los problemas que presentan los reguladores conocidos sirvieron de base para desarrollar un sistema que reúne las características requeridas para los reguladores de velocidad en P.C.H. y que son:

- a) Bajo costo
- b) Confiabilidad

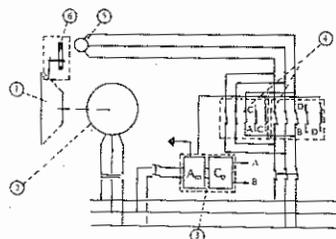
c) Sencillez de operación y mantenimiento

Dicho sistema, es el Regulador de Velocidad Eléctrico-electrónico. En el desarrollo del sistema de regulación que se presenta como alternativa, participó el Ing. Moisés Gutiérrez Chávez. (Perú).

2. El Regulador de Velocidad Electrico electrónico

2.1. Circuito Esquemático

Los cálculos de diseño, complementados con los ensayos a nivel de laboratorio y planta piloto permitieron un primer sistema de regulación.



1. Turbina
2. Generador
3. Sensor de Frecuencia
4. Contacto de los relays
5. Servomotor
6. Reductor acoplado a la válvula de regulación del caudal.

2.2 Funcionamiento

El sensor de frecuencia (3) capta la señal de la línea (en los bornes del generador (2)), la señal es traducida a tensión y amplificada a través de elementos integrados para ser comparada con la señal patrón que se toma de la red con la ayuda de una fuente de alimentación. Si la turbina (1) gira a velocidad normal (correspondiente a una frecuencia de $60H_z$) la tensión en la salida del comparador es igual a 0 voltios. Si se aumenta la carga, la velocidad disminuye ($58H_z$) entonces la señal en el comparador es negativa, se da el mando para que actúe el relé de apertura de válvula de regulación de caudal. Si se quita carga la velocidad aumenta, ($62H_z$), entonces la señal en el comparador se vuelve positiva y activa el relé de cierre de válvula de regulación

de caudal. En ambos casos, actúa el servomotor (5) y acciona el reductor (6) cerrando o abriendo la válvula de regulación de caudal.

Importante señalar: el servomotor actúa cuando la señal es igual a $58H_z$ ó $62H_z$, se detiene cuando la frecuencia es un poco mayor a $58H_z$ y cuando es un poco menor a $62H_z$, según el caso requerido.

2.3 Análisis de estabilidad

Para el análisis de estabilidad se logró simplificar la ecuación característica del sistema y reducirla a una de segundo orden debido a que:

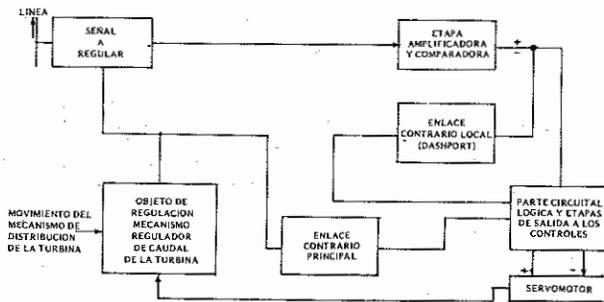


Diagrama funcional del regulador de velocidad electrónico

a) El sistema sensor electrónico tiene un tiempo de inercia casi igual a cero, asimismo el tiempo de inercia del servomotor es mínimo.

b) La franja de insensibilidad es de $4H_z$ ($58H_z$ a $62H_z$) lo que permite una variación de velocidad aproximadamente del 20% con una variación de frecuencia de $\pm 30\%$

c) La ecuación característica se simplifica debido a que incluimos la variación de los fenómenos de golpe de ariete (positivo y negativo) manteniendo una magnitud constante del tiempo de cierre, que es menor al tiempo de cierre requerido para el caso de embalamiento de la turbina. Se tiene en cuenta además que el máximo valor de sobrepresión en la tubería, es no mayor al 30% en el caso de golpe de ariete positivo y no más del 20% en el caso de golpe de ariete negativo.

d) El mínimo número de oscilaciones es igual a uno y el máximo número de oscilaciones en caso de cambio brusco de carga, es igual a dos.

De la ecuación característica obtenemos la ecuación de transferencia:

$$D(s) = \frac{K}{1 + 2\alpha T s + T^2 s^2} = \frac{K}{1 + \frac{2\alpha}{W} s + \frac{s^2}{W^2}}$$

donde:

K = coeficiente de amplificación o ganancia

$W = \frac{1}{T}$ 2 frecuencia angular de oscilaciones libres;

α = coeficiente de apagamiento del proceso transitorio (decrecimiento)

S = Operador de Laplace

Luego del paso a la función transitoria obtenemos:

$$x(t) = K \left[1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t \right) \right]$$

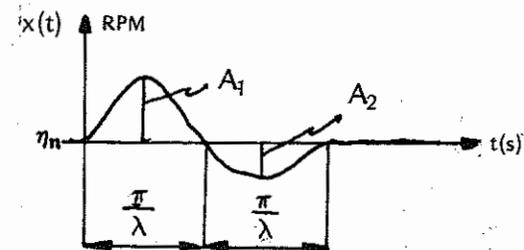
donde:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}$$

donde:

$$\lambda = W \sqrt{1 - \alpha^2}$$

γ = coeficiente que relaciona α con W y limita el periodo de la onda.



Variación de velocidad (cambio brusco de carga)

El análisis de estabilidad se realizó para el caso de variación brusca de carga (se quitó el 60% de la carga), en el caso de aumento de carga, (se aumentó el 60% de la carga), la curva del proceso transitorio se invierte.

3. Ventajas y desventajas del sistema

3.1 Ventajas del sistema

- 3.1.1 Bajo costo y sencillez de operación y mantenimiento.
- 3.1.2 Seguridad en el accionar.
- 3.1.3 Tiene bloqueo mecánico en los relays que permiten el accionamiento de ambos al mismo tiempo.

3.2 Desventajas del sistema

- 3.2.1 El circuito electrónico y eléctrico está sometido a sobretensiones puesto que va conectado a la red de salida del generador.
- 3.2.2 Ante la probabilidad de corto circuito ($V=0$) o falla de la transmisión ($V=0$) el sistema de regulación se queda sin alimentación.
- 3.2.3 No cuenta con el sistema de seguridad contra el embalamiento de la turbina.
- 3.2.4 Necesita de reductor de velocidad entre el servo motor y la válvula de regulación de caudal.

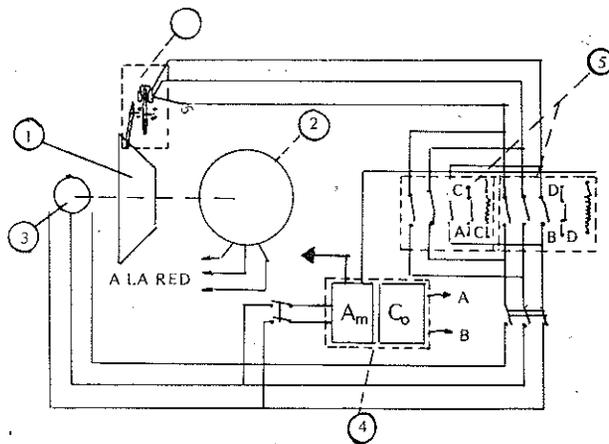
3.3 Balance de ventajas y desventajas

3.3.1 Las principales desventajas del sistema orientaron el desarrollo de un sistema para el Regulador de Velocidad Eléctrico-electrónico y que comprende las siguientes variaciones dentro del circuito anterior:

- a) Un microsistema de generación: como la potencia necesaria para la regulación es pequeña, entonces se optó por un generador asíncrono que entrega la potencia requerida para la regulación.
- b) Para obviar el reductor entre el servomotor y la válvula de regulación se utiliza un motor lineal (motor plano) con el cual se obtienen velocidades lineales necesarias para la regulación.

3.4 Circuito Modificado

En las variaciones propuestas obtenemos el siguiente circuito modificado:



- 1. Turbina
- 2. Generador
- 3. Generador micro sistema
- 4. Sensor de frecuencia
- 5. Contactos de relays
- 6. Servomotor lineal (Motor plano).

3.4.1 Ventajas del nuevo sistema

- 3.4.1.1 El sistema de regulación no está sometido a la tensión de la red, que en el rango de P.C.H. llega a 10 KV, descartando el peligro de que la sobretensión lo deje fuera de servicio.
- 3.4.1.2 El peligro de embalamiento de la turbina es mínimo.
- 3.4.1.3 El sistema es adecuado para la estandarización. Este tema será tratado en un trabajo posterior.

4. Lineamientos generales para el diseño y construcción de un Regulador de Velocidad Eléctrico-electrónico

4.1 Desarrollo del modelo matemático del sistema

- 4.1.1 Se obtiene el modelo matemático del sistema de la P.C.H. tomando en cuenta el embalse, tubería de presión, turbina, generador, regulador y se detalla el diagrama de bloques.

a) Para tener en cuenta los parámetros de la tubería en función al tiempo de cierre de la válvula reguladora de velocidad realizamos el análisis del golpe de ariete.

l) Se halla la velocidad de onda de presión:

$$a = \frac{C}{1 + \frac{E}{E^1} \frac{d_i}{e}}$$

c = Velocidad de propagación del sonido en el agua
1420 m/s a 15°C

E¹ = Módulo de elasticidad a la tensión del material de la tubería en Kg/m²

E = Módulo de elasticidad del agua a la compresión
2x10⁸ Kg/m²

d_i = Diámetro interior de la tubería en cm

e = espesor de la pared de la tubería en cm.

E¹ = 1.2x10⁸ Kg/m² Para tubería de polietileno

E¹ = 2.25x10⁸ Kg/m² Para tubería de P.V.C.

E¹ = 210x10⁸ Kg/m² Para tubería de fierro

II) Se halla la sobrepresión

$$h = \frac{av}{g} \quad \text{Si } K < 1 \text{ y } N < 1$$

$$h = \frac{av}{g N + K (N-1)} \quad \text{Si } K < 1 \text{ y } N > 1$$

$$h = \frac{av}{g (2N-K)} \quad \text{Si } \bar{K} > 1 \text{ y } N > 1$$

donde:

$$K = \frac{av}{ag H} \quad ; \quad N = \frac{aT_c}{2L}$$

donde:

H = Salto en metros (m)

L = Longitud de la tubería en metros (m)

V = Velocidad del agua en la tubería forzada (m/s)

T_c = Tiempo de cierre del control de caudal (Se determinó en el punto 4.1.2.)

Para la caída de presión en caso de golpe de ariete negativo utilizamos la siguiente fórmula:

$$h = \frac{av}{g} \frac{(-K + K^2 + N^2)}{N^2}$$

$$\text{Si: } T_c = 2L/a$$

4.1.2 Para tener en cuenta la sobrevelocidad se encuentra el grado de irregularidad (s) que está comprendido entre 10/o y 60/o y el grado de insensibilidad (e) que está comprendido entre 0.30/o y 0.50/o; luego hallamos la sobrevelocidad no mayor al 250/o

$$N_{\text{máx}} = \frac{N_{\text{máx}} - N_n}{N_n} = \frac{1800 \times 102g \cdot P_n T_c}{2 \cdot GD^2 \cdot N_n^2}$$

P_n = Potencia Nominal (kW)

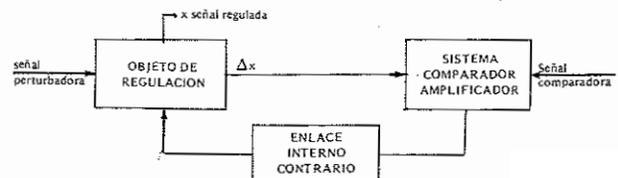
T_c = Tiempo de cierre (s)

GD² = Factor de inercia del grupo (Kgr-m²)

N_n = Velocidad Nominal en R.P.M.

N_{máx} = Velocidad máxima que alcanza la turbina en el tiempo que dura la regulación (T_c)

Con la utilización de estos parámetros obtenemos un modelo matemático simple y se obtiene el siguiente diagrama de bloques:



De donde la ecuación de transferencia

$$D(s) = \frac{K}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2}$$

donde T_1 y T_2 tiempo mecánico del servomotor y constante de tiempo electromecánico del sistema.

Si expresamos la ecuación a través del decremento (α) y la frecuencia de apagamiento de las oscilaciones libres (W), obtenemos:

$$D(s) = \frac{K}{1 + \frac{2\alpha}{W} s + \frac{s^2}{W^2}}$$

Luego se realiza el análisis de estabilidad con cualquiera de los criterios conocidos.

4.2 Diseño funcional matemático del regulador

Luego de obtener el modelo matemático se obtienen los parámetros de diseño del regulador en función del tiempo de cierre y el tiempo en que la turbina alcanza la velocidad de embalamiento.

La magnitud del tiempo requerido fue determinada en el paso 4.1.2.

4.3 Diseño funcional eléctrico y mecánico del Regulador

En esta etapa se definen los tipos de transistores y elementos integrados y comparadores por utilizarse, al igual que las magnitudes físicas de las resistencias y condensadores necesarios para el circuito sensor.

Se hallan los parámetros de selección del servomotor y del generador del microsistema de generación; asimismo se define la forma de transmisión.

4.4 Diseño de detalle

En este paso se dan los cálculos y consideraciones construc-

tivas y de montaje del circuito sensor y consideraciones constructivas del servomecanismo.

El circuito electrónico contará con:

- Un transformador que tome la señal del microsistema con una salida para la alimentación de las bobinas de los relays y una salida para el circuito comparador.
- Una serie de transistores que capten la señal de variación de frecuencia y la amplifiquen en forma de tensión.
- Un conjunto de elementos integradores que capten la señal de tensión y la amplifiquen.
- Un conjunto de transistores que funcionen como inversores para que después de la comparación se entregue la señal a las bobinas de los relays.
- Se seleccionan servomotores que permitan diseñar reductores con una relación de 1-4 como máximo. Se recomienda el uso de engranajes simples porque su costo es bajo.
- Si seleccionamos un servomotor (motor plano) no es necesario el reductor.
- Se diseña el circuito impreso.

4.5 Fabricación

En esta etapa se efectúa el montaje de los componentes electrónicos en el circuito impreso.

Se fabrica el reductor con un acero estructural corriente (ST 24).

Se realiza el montaje de acuerdo con la ubicación del regulador en la turbina.

4.6 Pruebas de funcionamiento

Se realizan las pruebas a nivel de laboratorio para verificar el funcionamiento. Asimismo las pruebas a nivel de planta piloto servirán para poner a punto el sistema.

5. Conclusiones y recomendaciones

- El regulador de velocidad que se presenta está justificado para su uso con turbinas Michell-Banki y Francis.
- Para el caso de la turbina Pelton su uso se limita para accionar el deflector.
- Se recomienda no regular la velocidad de la turbina Pelton usando la aguja de la tobera en forma aislada

ya que la probabilidad de golpe de ariete aumenta en 50%. Sin embargo si fijamos un punto de cierre de la válvula de regulación de caudal, de tal forma que la turbina no llegue a la velocidad de embalamiento (esto se logra si se aumenta el tiempo de inercia), se podrá efectuar la regulación.

- 5.4 Se recomienda tomar la señal de regulación de la red para las microcentrales hidráulicas y para las minicentrales y pequeñas centrales utilizar un microsistema de generación. (Segunda variante).

BIBLIOGRAFIA

- Manual del Ingeniero Mecánico de Marks.
Teoría de los sistemas de regulación Automática. V. A. Biesiekerkii, E. P. Popov.
Métodos Estáticos de Investigación de Proceso Estacionario y Sistemas de Regulación Automática. Vilenkin, S. Y.
Síntesis de Sistemas con Relays Optimas para Accionamiento Instantáneo. Pavlov, A. A.
Linear Systems Theory. Zadeh, L. A., Dosoer, C. A.
Modern Control Theory. Zon, J. T.

