

REGULACION CENTRIFUGA DE TURBINAS EOLICAS

Patricia F. Mendez - Ricardo A. Bastianon

Resumen

En este trabajo se establece una metodología de estudio del proceso de regulación centrífuga de las turbinas de viento aisladas. Esta metodología puede extenderse por su generalidad a otro tipo de proceso de control similar. En este enfoque se tienen en cuenta las alinealidades y discontinuidades debidas a los efectos de la fricción seca, estática y dinámica y a los topes de regulación.

Se ha obtenido finalmente la condición que permite discriminar cuando la regulación de una turbina eólica será estable o inestable aún cuando esta no posea amortiguadores, y se ha resuelto teóricamente el problema de las turbinas que son estables para bajas velocidades de viento e inestables para altas velocidades.

Este trabajo fue desarrollado dentro del Plan de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Buenos Aires (UBACyT) y con el apoyo de la Facultad de Ingeniería.

Presentado en el 4to. Congreso Argentino sobre el Uso Racional de la Energía en Noviembre de 1990.

Patricia Méndez es Becario de Investigación de la UBA.

Ricardo A. Bastianón es Director de Beca - Secretario de Investigación y Doctorado de la Facultad de Ingeniería.

Introducción

En los últimos años, la energía eólica se ha perfilado como una de las más prometedoras fuentes energéticas alternativas, siendo el viento un recurso inagotable y no contaminante.

La producción de la energía a partir del viento se lleva a cabo con generadores y turbinas eólicas, pudiéndose utilizar estas máquinas de dos maneras diferentes:

- 1) Agrupadas en granjas eólicas
- 2) Aisladas, sin conexión a la red

Las dos alternativas revisten enormes diferencias entre sí. Cuando se agrupan los generadores en gran cantidad, se los conecta a la red eléctrica, y de esta manera abastecen de electricidad a las zonas a las que llega el tendido. Tecnológicamente, este tipo de generadores no presenta mayores problemas de control, puesto que si la máquina eléctrica es asincrónica, una vez que se ha acoplado a la red gira a la frecuencia que ésta impone. Lo único que debe ser previsto es un dispositivo de seguridad contra vientos excesivos. Por lo general son de mediana y gran potencia.

Cuando se necesita electricidad, o bombear agua en zonas aisladas a las que no llega el tendido de la red, se utilizan los generadores aislados, cuyo tamaño es pequeño o mediano, pues para grandes consumos se justificaría una extensión de la red eléctrica. Este tipo de generadores debe mantener por sí mismo su velocidad, puesto que no cuentan con el efecto sincrónico de la red. Un sistema de control debe procurar mantener constante la velocidad de

rotación, así haya poco o mucho viento, y se use mucha o poca electricidad, es decir, el sistema de control debe regular la turbina como si fuese su sistema nervioso.

Regulación de una turbina eólica

Regular la turbina significa igualar la potencia entregada por ella con la absorbida por la carga. Hay varias maneras de lograrlo, pero la más usada consiste en orientar cada pala de la turbina sobre su eje longitudinal, para que capte más o menos viento.

Un exceso en la velocidad del viento o una merma en la carga, causan una aceleración de la hélice. Un dispositivo sensor detecta el incremento en la velocidad y ordena a un mecanismo motriz, aumentar el paso de la hélice, de manera que se genere menos potencia; cuando esto sucede, la hélice decelera. Si se llegó al equilibrio, el proceso de detiene y la hélice continuará girando a una velocidad aproximadamente igual a la anterior. Si se sobrepasó la posición de equilibrio, se repite el proceso en forma inversa.

El dispositivo sensor puede ser principalmente

- 1) Electrónico
- 2) Centrífugo

Electrónicamente, se puede medir en forma digital la velocidad de rotación con un disco ranurado y un optoacoplador, también hay otras maneras, digitales y analógicas.

Mecánicamente, se puede medir la velocidad con un taquímetro, que indica la velocidad de giro de acuerdo a la separación del eje de rotación de dos o más centrífugas; esta separación es mayor cuanto mayor es la velocidad.

El dispositivo motor puede ser:

- 1) Eléctrico
- 2) Hidráulico
- 3) Centrífugo

En el primer caso, la fuerza necesaria para variar el paso de la hélice la produce un pequeño motor eléctrico a través de una reducción de engranajes y tornillo. En el segundo caso, la acción la ejercen cilindros hidráulicos, y en el tercero, la fuerza actuante es la centrífuga, y la acción de comando la realizan las masas giratorias del taquímetro al acercarse o separarse del eje de rotación.

Regulación centrífuga de una turbina eólica

En la regulación centrífuga de turbinas eólicas, los dispositivos sensor y motor centrífugos, siendo el taquímetro suficientemente robusto como para ejercer la fuerza de control, y muy sensible, para lograr una regulación de alta calidad. Al taquímetro que actúa simultáneamente como dispositivo motor se lo llama regulador. Los reguladores utilizados en las turbinas eólicas son perfeccionamientos del que Watt instaló en su primera máquina de vapor en 1783, y funcionan bajo el mismo principio.

Un sistema centrífugo de control posee las siguientes características:

- Alta confiabilidad
- Simplicidad y bajo costo
- No necesita mantenimiento

Para pequeños generadores en áreas aisladas, este sistema es el indicado, puesto que deben tener bajo costo para ser accesibles, y también ser simples y confiables pues no cuentan con mano de obra especializada para

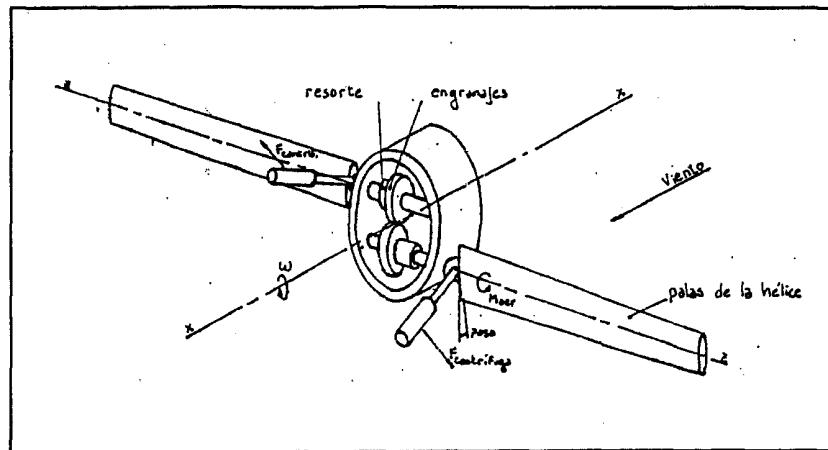


Figura 1 - Sistema centrífugo de control diseñado por el Director de Beca

mantenimiento y reparaciones. Es menos extenso el uso de la regulación centrífuga en turbinas medianas y grandes.

Problema a resolver

Aunque en algunos casos, como los recién mencionados es clara la elección de un sistema centrífugo de control, no siempre este funciona adecuadamente debido a problemas de estabilidad. Este problema se manifiesta en la forma fluctuaciones cíclicas en la velocidad de rotación de la turbina y en la apertura y cierre de los brazos del regulador. Estas últimas fluctuaciones están acotadas por los topes de regulación especialmente dispuestos en el regulador.

También existen turbinas en las cuales la regulación centrífuga funciona satisfactoriamente para bajas velocidades de viento, pero se tornan inestables para velocidades de viento superiores.

A pesar de la importancia del problema, no existe, o no ha sido divulgado hasta ahora, el criterio que permita discriminar en qué casos un sistema centrífugo regulará correctamente y en cuáles no, por lo tanto se recurre en parte a la suerte y en parte a la experimentación para saber si un sistema centrífugo construido será exitoso.

Planteo del problema

El sistema consta de dos partes: el regulador y la turbina. El regulador (Figura 1) está constituido por pesos y resortes, y sus brazos se abren girando alrededor del eje Z. Sobre este eje, actúan la fuerza del resorte, la fuerza centrífuga de los pesos y el momento aerodinámico generado por el perfil aerodinámico de la hélice.

La ecuación correspondiente al regulador es:

$$I_z \ddot{p} + R \operatorname{sg} \dot{p} + k(p - p_0) = M_{\text{aer}}(V, \omega, p) + M_{\text{cp}}(\omega, p)$$

I_z = momento de inercia de la hélice según el eje z

p = paso de la hélice

R = momento de rozamiento seco en el eje z

k = constante del resorte

p_0 = paso para el cual el momento del resorte se anula

M_{aer} = momento aerodinámico

V = velocidad del viento

ω = velocidad angular de rotación

M_{cp} = momento en el eje z debido a la fuerza centrífuga

sg = función signo

Linealizando y adimensionalizando la ecuación (1) se llega a:

$$\ddot{u} + \omega_0^2 \xi sg \dot{u} + \omega_0^2 u = \omega_0^2 S w \quad (2)$$

u = paso de la hélice adimensionalizado

ω_0 = pulsación natural del regulador

ξ = rozamiento adimensionalizado

S = sensibilidad del regulador

w = velocidad de rotación de la turbina adimensionalizada

La ecuación (2) es la correspondiente a un sistema oscilante de masa y resorte, con una excitación proporcional a la velocidad de rotación de la turbina. Se observa en el término que lleva la función signo, la presencia de la amortiguación por fricción seca, que actúa de manera discontinua y no lineal. El valor de la fricción es mayor cuando el sistema está detenido que cuando está en movimiento. También debe tenerse en cuenta el efecto de los topes, que acotan los posibles valores de u .

$$u_{\min} < u < u_{\max}$$

u_{\min} = posición del tope inferior

u_{\max} = posición del tope superior

La acción de estos también es discontinua y alineal, y los parámetros recién definidos varían al variar las condiciones de viento y carga.

La turbina (Figura 2), está constituida por la hélice y el generador, que giran alrededor del eje x . Sobre este eje actúan la cupla motriz de la hélice y la cupla resistente del generador.

La ecuación correspondiente a la turbina es:

$$I_x \dot{\omega} = C_{\text{mot}}(v, \omega, p) - C_{\text{res}}(\omega, \text{carga}) \quad (3)$$

I_x = momento total de inercia en el eje x

ω = velocidad de rotación de la turbina

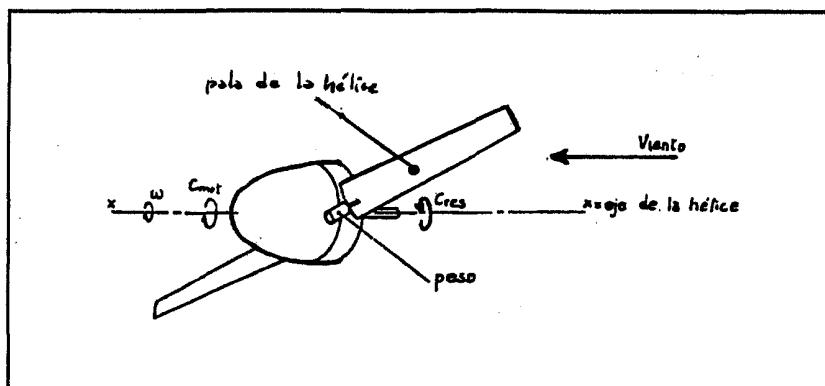


Figura 2

C_{mot} = cupla motriz debida al torque de la hélice

V = velocidad del viento

p = paso de la hélice

C_{res} = cupla resistente debida al generador

carga = factor que depende de la potencia eléctrica consumida a la salida del generador.

Linealizando y adimensionalizando la ecuación (3) se llega a:

$$\dot{w} = \frac{S_x}{T_*} u + \frac{S_v}{T_*} w \quad (4)$$

w = velocidad de rotación de la turbina adimensionalizada

S_x = sensibilidad a la regulación de la turbina

T_* = tiempo de arranque de la turbina bajo cupla máxima

u = paso de la hélice adimensionalizado

S = sensibilidad a la velocidad de la hélice

Los parámetros recién definidos varían al variar las condiciones de viento y carga. La ecuación (4) es la correspondiente a un volante de inercia que se acelera en función del paso de la hélice y de su propia velocidad. El efecto de S en las turbinas de viento es despreciable, y el análisis se hace suponiendo $S = 0$.

Las ecuaciones (2) y (4) están mutuamente vinculadas, por lo que la evolución del sistema se rige por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \ddot{u} + \omega_0^2 \xi sg \dot{u} + \omega_0^2 u = \omega_0^2 S w \\ \dot{w} = \frac{S_x}{T_*} u \end{cases} \quad (5)$$

En la base del sistema (5) se puede hacer un balance de las energías puestas en juego en el regulador, para que el sistema sea estable. Durante la evolución del sistema, la energía disipa por la amortiguación debe ser mayor que la absorbida por la excitación. Esta condición establece un valor mínimo de fricción seca, que se obtiene haciendo el balance energético del sistema. Para las condiciones típicas de funcionamiento de una turbina, el valor de esta fricción mínima es:

$$\xi_d > \frac{\pi}{4} \frac{\ln \frac{u_{\max}}{u_{\min}}}{M_*} \quad (6)$$

ξ_d = fricción seca dinámica adimensionalizada

u_i = posición adimensional del tope más cercano (u_{\min} ó u_{\max})

M_e = número adimensional característico de la regulación.

$$M_e = - \frac{\omega_0 T_s}{S S_x} \quad (7)$$

El significado de M_e puede interpretarse como una relación entre la velocidad de respuesta del regulador y la velocidad de la turbina para embalarse o frenarse.

La fricción estática es generalmente mayor que la fricción dinámica, y por lo tanto el sistema deberá acumular mayor energía para vencer esta mayor fuerza de rozamiento al comenzar cada movimiento. Si la fricción estática supera un determinado valor, la energía acumulada por el sistema será mayor que la que la fricción dinámica puede disipar, y el sistema se tornará inestable. Operando a partir de las ecuaciones (5) se llega a:

$$\xi_e - \xi_d < |u_i| \quad (8)$$

ξ_e = fricción seca estática adimensionada

Las ecuaciones (6) y (8) constituyen las condiciones de estabilidad del sistema centrífugo de control de una turbina eólica. La ecuación (6) es válida para valores de $M_e > 20$ y para valores menores tiene una expresión más complicada pues no es válida para valores de $\xi_d < 3,55$ pues en este caso es posible despreciar en el balance energético la energía puesta en juego en la apertura o cierre del regulador. El punto normal de funcionamiento de una turbina eólica es $M_e = 30$ y $\xi_d = 1,2$, valores que caen dentro del rango indicado.

De esta manera se explica cómo algunas turbinas son estables y otras no, a pesar de no tener amortiguadores especialmente dispuestos. Serán estables las turbinas que tengan la fricción suficiente, e inestables las otras. El fenómeno de las turbinas estables para bajas velocidades de viento e inestables para altas se debe a que el número M_e disminuye fuertemente al aumentar la velocidad del viento. Esta variación hace que los valores de la fricción que eran suficiente para bajas velocidades de viento no sean suficientes para altas.

Conclusiones

A partir de los resultados expuestos, ahora es posible el diseño de turbinas eólicas sabiendo de antemano su condición de estabilidad.

Estos nuevos criterios brindarán al proyectista criterios de diseño del regulador e inclusive orientación en la elección del perfil alar de la hélice.

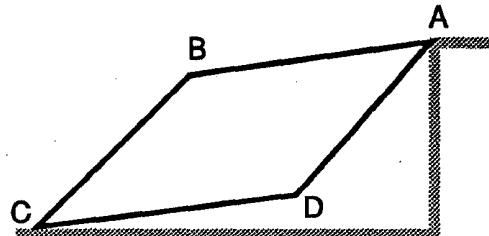
Finalmente, esta teoría puede extenderse a una amplia gama de sistemas de control de tercer orden, no lineales y con discontinuidades similares a los efectos de la fricción estática y dinámica y de los topes.

Referencias

1. Conceptos del funcionamiento de los reguladores centrífugos de velocidad. Patricio Méndez, Dic. 1988.
2. Análisis de los sistemas dinámicos de un grado de libertad que incluyen rozamiento, Patricio Méndez, Jun. 1989.
3. Mechanical Vibrations, Den Hartog, 1947.
4. Regelung der Kraftmaschinen, Tolle, 1909.
5. Apuntes de la Universidad de Delft (Holanda), 1989.

Juegos de Ingenio

- En esta Sección se pretende que el lector agudice su ingenio y sume estos "problemas" a los problemas diarios que se encuentran en la vida, pero con la esperanza de que al menos le sirvan como distracción. Desde ya, nos sería muy placentero recibir sugerencias y posibles "fuentes" para este reto al ingenio que constituyen estos juegos.
- 1) Imagine dos puentes idénticos, salvo por el hecho de que todas las dimensiones de uno son cinco veces más grandes que las de otro; i.e.: el primer puente es cinco veces más largo, las piezas de las estructuras son cinco veces más gruesas, etc.. ¿Cuál de los dos puentes es más fuerte?
- 2) Imagine dos veleros construidos con las mismas proporciones, siendo uno el doble de grande que el otro: los mástiles de uno son el doble de grueso y las velas el doble de largo y el doble de ancho. Si las velas están hechas del mismo material, ¿Cuál de los dos veleros tiene velas más propensas a la rotura por acción del viento?
- 3) Suponga cuatro planos inclinados que forman un rombo (ver Figura). Si se deja caer simultáneamente dos bolitas idénticas desde el punto A, de manera que una caiga por ABC y la otra por ADC, ¿Cuál de las dos bolitas llega primero al suelo?



- 4) Un recipiente contiene el equivalente de treinta vasos de agua. Si se abre la válvula que impide que se vacíe, se tarda 10 segundos en llenar un vaso. ¿Cuánto tardará en vaciarse completamente el recipiente si se deja abierta la válvula?
- 5) Se coloca un balde en la lluvia. ¿Cambiará la velocidad de llenado si comienza a soplar el viento?