

Diseño y construcción de un controlador de potencia para pequeños aerogeneradores

Francisco García Roque

Profesor Asociado TC. Departamento de Física. UNPRG.

Resumen

En el presente trabajo se ha diseñado y construido un controlador de potencia para pequeños aerogeneradores, que se basa en la inclusión de un devanado auxiliar, cuya función es conducir una corriente alterna controlada mediante interruptores electrónicos, en forma proporcional al exceso de frecuencia de rotación del generador. El diseño se basa en un microcontrolador; que se encarga de monitorear la frecuencia de la señal AC del generador, gracias a una etapa que acopla dicha señal a través de un transformador, la cual luego de ser digitalizada, permite al controlador corregir la frecuencia de rotación calculando la diferencia respecto del valor admisible para la operación segura del aerogenerador. El algoritmo de control se basa en la corrección del tiempo de conducción del devanado auxiliar el cual es directamente proporcional al exceso de frecuencia en la señal AC del generador. Los resultados obtenidos en las pruebas en túnel de viento indican un efecto significativo en la curva de potencia en condiciones de control electrónico, en comparación de la curva obtenida con sólo control mecánico. En estas evaluaciones se ha observado una región plana de la curva de potencia entre los 7.9 m/s a 9m/s, que corresponde a la curva ideal de potencia, y disminución del 25 % hasta los 12 m/s, en comparación con los valores obtenidos con el control mecánico. Por tanto se ha logrado diseñar y construir un modelo de controlador que mejora la curva de potencia del aerogenerador; incorporando además funciones avanzadas de control inteligente y flexibilidad para configurar, gracias a la incorporación de un microprograma, los diferentes parámetros de operación que permiten adaptar la función del controlador para diferentes modelos de aerogeneradores

Palabra clave: controlador de potencia, aerogenerador

Abstract

In the present work is designed and built a power controller for small wind turbines, based on the inclusion of an auxiliary winding, whose function is to conduct an alternating current controlled by electronic switches, in proportion to the excess rotation frequency generator. The design is based on a microcontroller, which is responsible for monitoring the frequency of the AC signal generator by a phase coupling said signal through a transformer, which after being digitized, it allows

the controller to correct the rotational frequency by calculating the difference from the permissible value for the safe operation of the wind turbine. The control algorithm is based on the conduction time of auxiliary winding which is directly proportional to the excess frequency of AC signal generator. The results obtained in wind tunnel tests indicate a significant effect on the power curve in terms of electronic control, compared to the curve obtained with only mechanical control. These assessments have seen a flat region of the power curve between 7.9 m / s to 9m / s, which corresponds to the ideal power curve and decrease of 25 % to 12 m / s, compared to the values obtained with mechanical control. Thus it has been possible to implement an electronic controller model improves the response of the power curve. With advanced features, intelligent control and high flexibility, with the addition of a microprogram for configuring the various operating parameters to adapt functionality for different wind turbine models

Keywords: power controller, wind turbine

Introducción

El control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por lo cuál la teoría de control es un tema de interés para muchos científicos e ingenieros que desean dar nuevas ideas para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos. El aspecto más importante de los sistemas de control es la estabilidad y para lograrlo es necesario conocer las características del sistema a través de su función de transferencia. Los sistemas de control generalmente son no lineales, pero es posible aproximarlos, por eso analizar la respuesta transitoria de la planta es el primer paso para implementar acciones de control, pues el análisis de la respuesta transitoria da como resultado la función de transferencia que representará la planta a controlar.

Antecedentes

Practical Action ha diseñado modelos de aerogeneradores de baja potencia (50W, 100W y 500W) con fines de electrificación rural. Habiendo implementado proyectos de electrificación en localidades como el Alumbre, Campo Alegre y Alto Perú en la región Cajamarca. Las experiencias recogidas, en los proyectos mencionados, han demostrado la necesidad de incluir, en el diseño de los aerogeneradores, técnicas de control para mejorar la operación confiable y segura que permita garantizar la integridad de la máquina en eventos extremos, en particular de exceso de velocidad de viento así como exceso de disipación de calor en el generador. La curva ideal de potencia para un aerogenerador en condiciones controladas está comprendida por dos regiones bien definidas (Figura 1). La zona de

carga parcial y la zona de control de potencia. El punto de inflexión de ambas regiones la determina el rango de potencia permisible para el aerogenerador. El límite de operación está acotada por una velocidad de corte, donde el mecanismo de parada de emergencia detiene la máquina para protegerla frente sobrecarga por exceso de velocidad del viento. (Abdulrazek, 2012)

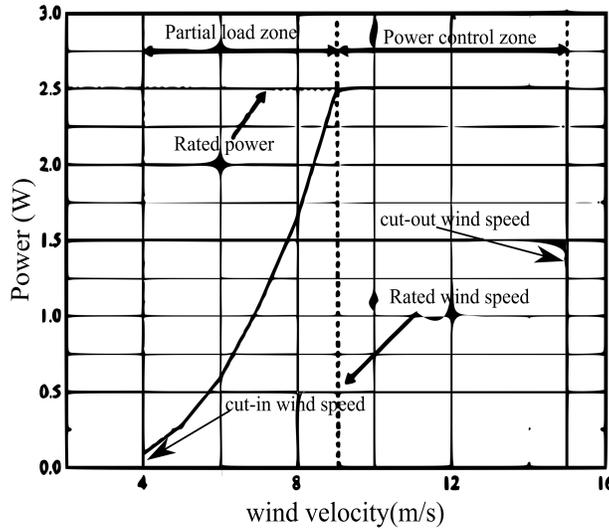


Figura 1. Curva ideal de potencia

Planteamiento Físico El análisis se plantea en condiciones tales que el sistema puede ser enfocado como la superposición de dos generadores, que distribuyen la conversión de energía eólica a energía eléctrica. Se plantea la siguiente ecuación en relación a la potencia:

$$PV = PL + Px \tag{1}$$

donde:

PV : potencia que entrega los álabes

PL : potencia en la carga

Px : potencia disipada a través del devanado auxiliar

Sea U la velocidad del viento, de acuerdo las ecuaciones básicas, la potencia es proporcional al cubo de la velocidad (Samsonov, 2006), por tanto, la ecuación (1) se escribe:

$$\alpha U^3 = PL + \beta U^3 \tag{2}$$

donde α, β son coeficientes de potencia, con la condición de β , no es constante y debe adaptarse para balancear la carga del generador. La condición de control requiere que en la región de control la potencia en la carga se mantenga constante

(condición de regulación):

$$\frac{dPL}{dU} = 0 \quad (3)$$

Por tanto en términos diferenciales, la ecuación (2) quedaría:

$$\frac{dU}{U} = \frac{d\beta}{3\alpha - 3\beta} \quad (4)$$

La solución de esta ecuación diferencial bajo las condiciones iniciales $U = U_o$, $\beta = 0$, donde U_o es la velocidad umbral a partir de la cual se activa la acción de control, conduce a la expresión:

$$\beta = \alpha \left[1 - \left(\frac{U_o}{U} \right) \right] \quad (5)$$

Considerando que en condiciones normales de operación, la velocidad del viento U y la frecuencia están relacionadas, se puede ejercer el control mediante la medición de frecuencia de la tensión AC del devanado principal. Para establecer una relación entre el ciclo de servicio de la señal de control (tiempo de conducción de los interruptores electrónicos), se propone una relación proporcional entre β y Tc , ($\beta = K_B Tc$) así como una relación proporcional entre la velocidad del viento U y la frecuencia F , de la tensión del generador ($U = K_F F$)

Resulta entonces, en la ecuación (5)

$$\frac{K_B}{\alpha} Tc = 1 - \left(\frac{F_o}{F} \right)^3 \quad (6)$$

Al diferenciar esta ecuación se obtiene:

$$dTc = \frac{3 \alpha F_o^3}{K_B} \frac{dF}{F^4} \quad (7)$$

En la operación de la zona de control, se requiere que la frecuencia permanezca aproximadamente constante. En cuyo caso se puede considerar la frecuencia aproximadamente igual a la frecuencia promedio y por tanto y la acción de control se traduce en la corrección del ciclo de servicio para compensar un cambio en la frecuencia. Ello significa que para controlar un cambio en la frecuencia se debe cambiar el ciclo de servicio en una forma proporcional, esto es:

$$\Delta Tc = Kp \Delta F \quad (8)$$

Materiales y Métodos

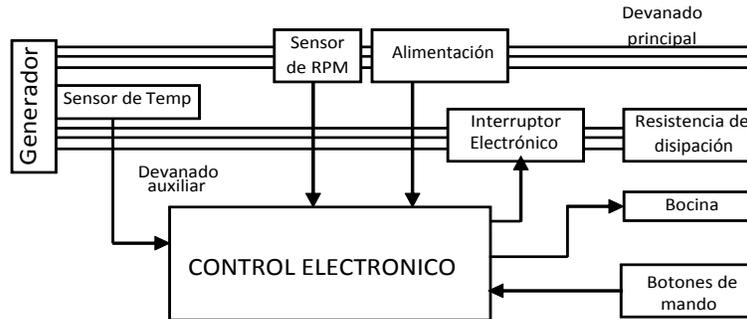


Figura 2. Diagrama de bloques de controlador electrónico

Principio de control: modula la carga del devanado auxiliar, en función del cambio en la frecuencia (ΔF) de la señal del devanado principal

Proceso: medición de la frecuencia de la señal del devanado principal (F_i), cálculo del error (E_r) en relación a la frecuencia nominal de la señal alterna (F_n) y comparación del error respecto del margen admisible.

$$E_r = F_i - F_n \quad (9)$$

Respuesta: aplicación de un pulso de conexión del devanado auxiliar, cuya duración (T_c) será proporcional al error de la frecuencia de rotación (E_r)

$$T_c = Kp \cdot E_r \quad (10)$$

El valor de Kp se ajusta experimentalmente, partiendo de un valor inicial asumido y haciendo varios ensayos para extrapolar al valor adecuado, que garantice la mínima oscilación del sistema. Efecto: la acción de control disminuye la frecuencia de rotación, llevando al rotor al margen admisible de operación, derivando el exceso de potencia a través del devanado auxiliar hacia la resistencia de disipación. Los parámetros de temperatura permiten monitorear, en particular durante la etapa de pruebas, los efectos térmicos de la acción de control y el efecto de la carga en la operación desarrollo del hardware

Devanado auxiliar: Está conformado por un conjunto de bobinas en un arreglo paralelo al devanado principal, en la misma configuración de conexiones internas de las bobinas que el devanado principal. La capacidad en corriente de este devanado se establece en función del espacio disponible en el estator del generador. En el caso del IT-50, IT-100 (modelos de aerogeneradores de 50W y 100W desarrollados por Soluciones Prácticas), luego de una inspección visual, se estima un 40 %

Sensor de RPM: Está conformado por un transformador de acople, garantizando de esta manera la medición aislada de la frecuencia de la tensión alterna

del generador. La señal que proporciona es rectificada en media onda, para luego ser transformada a una señal digital, de la misma frecuencia que la tensión AC del generador y compatible con el procesador de la etapa de control.

Sensor de temperatura: Conformado por un termistor ($2K\Omega$) de coeficiente negativo, incorporado entre los devanados del estator. Para adecuar la señal a los niveles de tensión admisibles por el procesador de la etapa del controlador, se requiere una red de polarización. Una red de polarización conformado un divisor de tensión es suficiente para tener una salida cuasi lineal, en el rango de temperatura de trabajo del generador tapa de alimentación, bocina y mandos manuales. La etapa de alimentación proporciona una tensión regulada a 5VDC para las etapas digitales, la bocina es un buzzer que sirve para emitir una señal sonora en situaciones críticas y los botones de mando permiten dar algunas órdenes directas al controlador.

Unidad Central: La unidad central está basada en un microcontrolador PIC16F876A, que reúne los elementos de hardware integrados en una sola pastilla, necesarios para la operación del controlador.

Es de tecnología RISC, memoria de programa tipo flash, puertos bidireccionales, temporizadores, módulo de conversión análogo digital, interface de comunicaciones, entre otros (Microchip Technology 2006) En este dispositivo es donde se almacena el microprograma, tiene la ventaja de ser reprogramable y por tanto actualizable miles de veces. Es el elemento que mide las variables relacionadas con el control de aerogenerador, las procesa y toma decisiones.

Interruptor electrónico: Está conformado por un TRIAC de potencia, que se encarga de conectar la carga en intervalos de tiempo definidos por la función de control. Mediante un acoplador óptico permite la conexión con la unidad central en condiciones aisladas eléctricamente. Desempeña la función de interruptor electrónico (Ochoa, et al, 1999). El microcontrolador envía la señal de activación al acoplador óptico, quien se encarga de activar al TRIAC de potencia, quien transmite la corriente a la resistencia de disipación.

Desarrollo de la microprograma. La programación de la unidad central (PIC16F876A) se ha realizado en MPLAB versión 8.4. El cual es un entorno integrado que incorpora el editor, compilador, simulador y depurador, para el desarrollo de aplicaciones basadas en microcontroladores PIC. La codificación se ha realizado en forma estructurada, en archivos fuentes separados a fin de mantener la legibilidad del programa. Adquisición de Variables. La adquisición de Temperatura se realiza usando el módulo de conversión AD integrado en el microcontrolador. La variable principal para efectuar la función de control es la frecuencia de la señal AC del generador. Para ello se conjuga el servicio de interrupción del Timer 2 y el conteo del *Timer/counter* 1. El primero provee el control del tiempo (1s), para acotar la cantidad de *ciclos/s*, que corresponde a la definición de frecuencia.

Módulo de control: Es el módulo más importante, debido a que se encarga de hacer uso del devanado auxiliar, permitiendo la conexión de la resistencia de disipación a través de los interruptores electrónicos. Este módulo evalúa la frecuencia de

la tensión AC del generador, segundo a segundo, para calcular el error en relación a la frecuencia de control (definida para el punto de operación segura del generador) y decidir el ciclo de servicio que debe aplicarse para mantener bajo control la potencia generada. Tal como se muestra en el diagrama de flujo (figura 3), se establece una frecuencia de control alrededor de la cual se definen un límite inferior y otro superior. Estos límites permiten disminuir la probabilidad de que el sistema entre en oscilación.

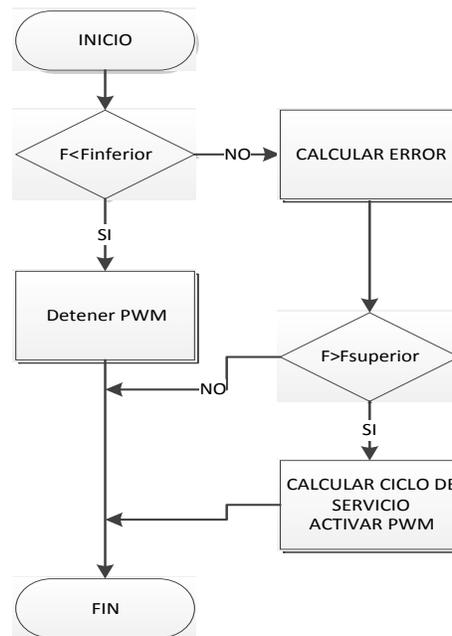


Figura 3. Diagramas de flujo del algoritmo del módulo de control

Metodología

Las pruebas experimentales se realizaron en el túnel de viento del Laboratorio de Energías de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, durante los meses de agosto y setiembre de 2012.

Aerogenerador: modelo IT-50, con devanado auxiliar 40 % de la capacidad nominal del generador, sensor de temperatura incorporado tipo NTC 2K, incorporado en el devanado.

Instrumentación

- Anemómetro NRG #40C, salida de señal alterna con frecuencia proporcional a la velocidad del viento

- Multímetro digital FLUKE 179
- Pinza amperimétrica FLUKE 902
- Pinza amperimétrica PRASEK PR 54
- Tablero de control eléctrico

Pruebas

- a) Medición de parámetros de operación (velocidad del viento, corriente DC, tensión DC, frecuencia de la tensión AC) para la obtención de curva de potencia, en condiciones de control mecánico: $e = 3,5\text{cm}$; $\beta = 10^\circ$; $\delta = 8^\circ$ (González 2011)
- b) Medición de parámetros de operación (velocidad del viento, corriente DC, tensión DC, frecuencia de la tensión AC) para la obtención de curva de potencia, en condiciones de control mecánico: $e = 3,5\text{cm}$; $\beta = 10^\circ$; $\delta = 8^\circ$ y Controlador de Potencia, usando una resistencia de disipación de 60 Wp Nominal ($2,4\Omega/12Vp$)
- c) Evaluación del incremento de temperatura del devanado: manteniendo la velocidad del viento a 12 m/s se midió el incremento de temperatura en un intervalo de tiempo de 5 min

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prueba con sólo control mecánico. En el túnel de viento, se obtuvo los parámetros de la curva de potencia usando sólo control mecánico ($e = 3,5\text{cm}$; $\beta = 10^\circ$; $\delta = 8^\circ$). Estos resultados se muestran en la tabla 1. En donde se observa que la potencia nominal se alcanza un poco más de los 6.3 m/s , lo cual indica que las modificaciones mecánicas no han afectado significativamente los parámetros de operación nominales considerados en el diseño original Prueba con control mecánico y controlador de potencia En las condiciones de superposición de ambos tipos de control, tanto el mecánico como el electrónico en condiciones de una resistencia de disipación de $2,4\Omega$, se obtuvieron los resultados de la tabla 2. En estos resultados se observó que los valores de potencia obtenidos a velocidades cercanas a la diseño, no difieren significativamente de los obtenidos en la curva de potencia con sólo control mecánico, para valores arriba de los 8 m/s , la función del control electrónico contribuye a mantener la potencia generada por debajo de los valores que resultan de sólo usar el control mecánico

Tabla 1. Potencia y frecuencia del generador con control mecánico.
Prueba en túnel de viento: $e = 3,5\text{cm}$; $\beta = 10^\circ$; $\delta = 8^\circ$

U(m/s)	Vdc(V)	Idc(A)	P(W)	F(Hz)
4.8	12.3	0.7	8.6	36.8
5.6	12.4	1.8	22.3	39.3
6	12.1	2.8	33.9	40.9
6.3	12.2	4	48.8	42.8
6.7	12.3	5.1	62.7	45.6
7.5	12.2	7.6	92.7	48.2
7.9	12.2	7.8	95.2	50.2
9	12.2	10.3	125.7	55.8
9.4	12.2	11	134.2	56.8
9.8	12.2	11.5	140.3	58.5
10.5	12.2	13.4	163.5	60.1
10.9	12.3	13.4	164.8	62.6
11.3	12.3	13.7	168.5	63.6
12.1	12.3	14.4	177.1	65.4
12.8	12.2	13.2	161	63
13.2	12.2	12.1	147.6	60
14	12.2	12	146.4	59.1

Fuente: Datos experimentales de Laboratorio de energías UNI 26/09/12

Tabla 2. Potencia y frecuencia del generador superponiendo control mecánico ($e = 3,5cm; \beta = 10^\circ; \delta = 8^\circ$) y control electrónico ($60Wp/2,4\Omega$)

U(m/s)	Vdc(V)	Idc(A)	P(W)	F(Hz)
6.9	12.2	5.1	62.2	46.5
7.5	12.2	6.4	78.1	49.2
7.9	12.3	7.6	93.5	51.1
8.2	12.2	7.8	95.2	50.5
9	12.3	7.7	94.7	51.5
9.4	12.2	9	109.8	53.7
10.2	12.2	9.3	113.5	54.2
10.5	12.2	10.1	123.2	56.5
10.9	12.3	10	123	56.5
11.7	12.2	10.8	131.8	58.7
12.1	12.2	11	134.2	58.8
12.8	12.2	10.3	125.7	58.7
13.2	12.2	11.4	139.1	58.7

Fuente: Datos experimentales de Laboratorio de energías UNI 26/09/12

La representación gráfica de estas curvas de potencia se muestra en las figura 4, donde se observa dos zonas bien diferenciadas en la región de control. Entre 7.9 m/s a 9 m/s, existe una zona plana de la cura de potencia en condiciones de control electrónico, corresponde a la zona ideal de la curva de potencia. Posterior a ello el

efecto del controlador electrónico se traduce en un cambio significativo de la pendiente de la curva de potencia; a 12.1 m/s la potencia disipada por el controlador es de 25 % de la obtenida en las condiciones de sólo control mecánico. Según la figura 4, la curva de potencia del aerogenerador en condiciones de control electrónico disminuye significativamente (25 %) la potencia obtenida en condiciones de control mecánico. También se puede observar que el límite del control mecánico se logra a los 12 m/s, a partir del cual se inicia la zona de convergencia de ambos tipos de control. Por tanto, en función de los resultados obtenidos, resulta adecuado aplicar el control electrónico en velocidades de viento por debajo de los 12 m/s. Esto concuerda con los resultados previstos en la ecuación (5), de la cual se deduce que para velocidades altas, si aplicamos este tipo de control el aerogenerador sería en su mayor parte una máquina para desperdiciar energía, en cuyo caso lo recomendable sería diseñar e generador a una potencia mayor.

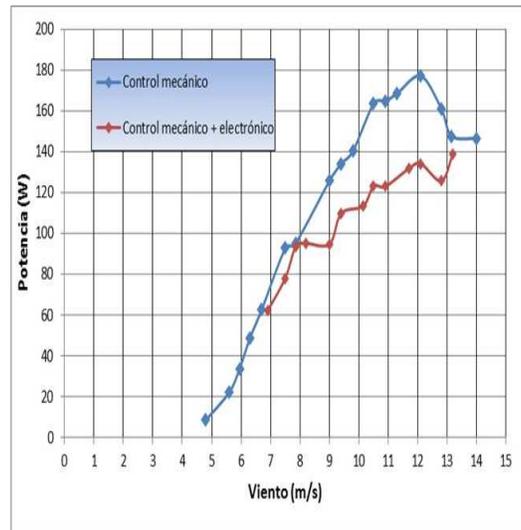


Figura 4. Curva de potencia en condiciones de control mecánico ($e = 3,5\text{cm}$; $\beta = 10^\circ$; $\delta = 8^\circ$) y control mecánico + control electrónico ($60Wp/2,4\Omega$)

Evaluación del incremento de temperatura en el devanado

Durante la prueba de 5 minutos de operación (a 12 m/s), se observó un incremento de 8°C , lo cual corresponde a una tasa de $1.6^\circ\text{C}/\text{min}$ ($96^\circ\text{C}/\text{h}$). Este resultado es importante para establecer las acciones de emergencia por riesgo de sobrecalentamiento del generador y también para futuras modificaciones en pos de la mejora de la refrigeración del devanado.

CONCLUSIONES

Para la velocidad de viento de diseño el aerogenerador, el control de electrónico de potencia mediante devanado auxiliar, resulta efectivo, habiéndose observado en las pruebas realizadas, una disipación del 25 % de potencia en comparación con la operación en condiciones de sólo control mecánico.

La curva de potencia ideal, obtenida con el controlador electrónico, se ha logrado en un margen de velocidad de viento: 7.9 a 9 m/s, para una región totalmente plana (pendiente nula-curva ideal) y hasta los 12 m/s la acción del control resultó en una disminución considerable de la pendiente de la curva de potencia, lo cual favorece el desempeño del aerogenerador en condiciones extremas de operación debido a la presencia de vientos fuertes

SUGERENCIA

Se sugiere en futuros diseños, realizar estudios de caracterización dinámica del aerogenerador a fin de obtener parámetros importantes para mejorar las funciones de control, tales como el momento de inercia, la constantes de tiempo del sistema, tasas medias de aceleración-desaceleración, entre otras. Los cuales permitirán obtener un modelo para mejorar el control del comportamiento transitorio del sistema

Referencias

- [1] Abdulrazek, A.; *Desing and power characterization of a small wind turbine model in partial load region*. Tesis de maestría. Universidad Del Cairo, 2012
- [2] González, S.; *Pruebas en Túnel de viento de un mecanismo de control de potencia en microaerogeneradores sometidos sobrevelocidades de viento*. I simposio de internacional de minieólica, Lima 2011.
- [3] Ochoa, A. Lara, A. Gonzales, G. *Microchip Technology INC. PIC16F87xA data sheet, 2003 Solid State Control, Solutions for three Phase 1HP Motor*. Application Note ON Semiconductor, 1999
- [4] Samsonov V. *Aerodinámica y Control de turbinas Eólicas, Editorial Marketing de Ideas S.R.L., Primera Edición, Perú - Lima, 2006*