

FUNCIONAMIENTO FÍSICO DE UN AEROGENERADOR

1.- Introducción

El funcionamiento físico de un aerogenerador de imanes permanentes responde, como muchos sistemas físicos, a una ecuación diferencial, cuya solución particular es la solución estacionaria o de equilibrio del sistema.

Sobre un generador eléctrico actúan dos grupos de fuerza: las fuerzas que lo aceleran y las fuerzas que lo frenan. Como un generador es un sistema físico que tiene un movimiento circular, en vez de fuerzas, se estudiarán los momentos de las fuerzas que lo hacen girar o lo frenan. La ecuación diferencial que rige el movimiento del aerogenerador es

$$M_a - M_f = I\alpha \quad (1)$$

donde M_a es el momento de las fuerzas que aceleran el generador (momento de aceleración), M_f es el momento de las fuerzas que frenan el generador (momento de frenado), I es el momento de inercia del rotor, y α es la aceleración angular del rotor. Si M_a y M_f fueran constantes, el generador adquiriría un movimiento acelerado y la velocidad angular se haría infinita, pero este comportamiento no es físicamente posible, y gracias a que M_f (momento de frenado) es función lineal de la velocidad angular, el sistema llega a una situación de equilibrio, en la cual la velocidad angular adquiere un valor constante.

A continuación se realizará el estudio del aerogenerador en tres casos

- Aerogenerador desconectado de cualquier carga.
- Aerogenerador conectado a una carga resistiva.
- Aerogenerador conectado a una batería.

En cada uno de estos casos, la velocidad angular de equilibrio cambia sustancialmente de valor en función de las fuerzas de frenado que intervienen.

2.- Aerogenerador desconectado de cualquier carga

La fuerza que mueve el aerogenerador es la fuerza del viento sobre la parte eólica (palas, Savonius, panémona, etc.), la cual depende de la geometría de dicho sistema, y las fuerzas que lo frenan son el rozamiento del sistema eólico con el aire y el rozamiento de las partes móviles del rotor (rodamientos), cumpliéndose que el momento de frenado M_f es proporcional a la velocidad angular

$$M_f = k_R \omega \quad (2)$$

donde k_R es una constante que depende de la geometría de las partes móviles del generador. Introduciendo la expresión (2) en la ecuación (1) se obtiene la ecuación diferencial

$$I \frac{d\omega}{dt} + k_R \omega = M_a \quad (3)$$

cuya solución es

$$\omega = \frac{M_a}{k_R} (1 - e^{-\frac{k_R}{I} t}) \quad (4)$$

Al cabo de un tiempo “suficientemente grande”, el sistema llega al equilibrio y la velocidad angular adquiere un valor constante de valor

$$\omega_{eq} = \frac{M_a}{k_R} \quad (5)$$

3.- Aerogenerador conectado a una carga resistiva

La fuerza de frenado está formada por dos partes, una debida al rozamiento del sistema eólico y los rodamientos y otra a la fuerza entre la corriente inducida en el generador y los imanes de propio generador. Ambas fuerzas de frenado generan momentos de frenado que también son proporcionales a la velocidad angular

$$M_f = M_{Roz} + M_A = k_R \omega + k_A \omega = (k_R + k_A) \omega \quad (6)$$

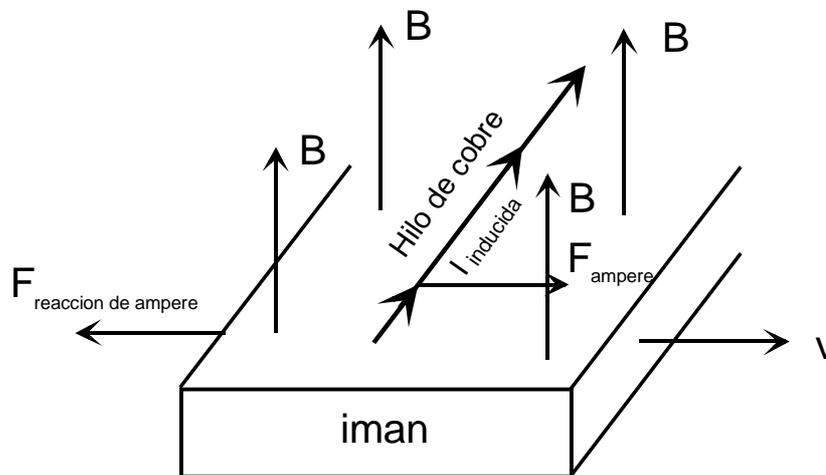
El frenado debido a la corriente inducida constituye el criterio de Lenz: “**la corriente inducida en una bobina es tal que se opone a la variación de flujo magnético exterior**”. Esta variación de flujo magnético se debe al movimiento de los imanes por delante de las bobinas. Una vez que se generan corrientes inducidas en las bobinas del generador, aparece una fuerza entre éstas y los imanes, o entre éstas y las corrientes equivalentes de imanación de los imanes. Estas fuerzas son justamente las fuerzas de Ampère entre corrientes eléctricas o sobre corrientes eléctricas situadas en el interior de campos magnéticos. Como se verá, esta fuerza se opone al movimiento de los imanes, y por ello es una fuerza de frenado cuyo valor es proporcional a la velocidad angular del rotor. Por ello, en (6) se ha llamado k_A a la constante de proporcionalidad entre el momento de frenado debido a la fuerza de Ampère y la velocidad angular. Sustituyendo (6) en (1) y resolviendo la ecuación diferencial, se obtiene la siguiente expresión para la velocidad angular de equilibrio

$$\omega_{eq} = \frac{M_a}{k_R + k_A} \quad (7)$$

La expresión (7) es numéricamente inferior a la expresión (5), esto es, la velocidad de giro de un aerogenerador es menor cuando está conectado a una carga que cuando gira libre. Esto también se puede interpretar como consecuencia de la ley de conservación de la energía: cuando un aerogenerador gira libremente alcanza mayor velocidad que cuando gira después de conectarlo a una carga resistiva, ya que parte de la energía cinética que tenía al girar libremente se transforma en energía eléctrica, y por ello debe disminuir su velocidad de giro (manteniendo constante la fuerza del viento sobre el sistema eólico del aerogenerador). En otras palabras, si un aerogenerador gira libremente, la energía del viento se transforma solo en energía cinética de giro, pero al conectarse a una carga resistiva y generarse corriente eléctrica, esa misma energía del viento se transforma en energía cinética más energía eléctrica.

Obtención de la expresión de la constante k_A : cuando circula corriente por las bobinas de un generador, aparecen inmediatamente fuerzas que actúan sobre ellas debido a los campos magnéticos de los imanes. Como las bobinas donde circulan estas

corrientes son fijas (el estátor), estas fuerzas producen reacciones que actúan sobre los imanes (principio de acción y reacción de Newton). También se puede interpretar estas fuerzas como fuerzas de los campos magnéticos creados por las corrientes inducidas en las bobinas del estátor sobre los imanes de rotor, o sobre las corrientes equivalentes de imanación. Sea cualquier fuere la interpretación, el resultado final es que existe una fuerza que hace frenar los imanes la cual depende de la intensidad de corriente que el generador suministra a una carga externa. Esta fuerza viene dada de forma muy aproximada por la expresión de la fuerza sobre una corriente en un campo magnético (fuerza de Ampère). En el dibujo siguiente se tiene un imán que se mueve por delante de un hilo de cobre con velocidad v . El polo Norte del imán va dirigido hacia arriba.



El sentido de la corriente inducida en el hilo de cobre se obtiene aplicando la fórmula de Lorentz, y se dirige hacia adentro. El imán ejerce una fuerza sobre la corriente inducida que se dirige hacia la derecha, pero como los hilos de cobre son fijos (forman el estator del generador) aparecerá una reacción, que actúa sobre el imán, dirigida hacia la izquierda.

La fuerza de Ampère sobre una corriente es $F_A = I L B$, pero este hilo de cobre forma parte de una de las bobinas del generador, que está formada por N hilos de cobre, que tienen una longitud L , y por tanto se tendrán N corrientes inducidas en cuyo caso la fuerza de Ampère será

$$F_A = INLB \quad (8)$$

En un generador de flujo radial, los N hilos de cobre están colocados en el interior de agujeros del estator. Si el estator tiene N_{ag} agujeros y por todos ellos está circulando corriente, la fuerza de Ampère será finalmente

$$F_A = N_{ag} INLB \quad (9)$$

La corriente suministrada por el generador se obtiene a partir de la ley de Ohm:

$$I_g = \frac{\varepsilon}{R_L + r_g} \quad (10)$$

donde ε es la fuerza electromotriz inducida en el generador, R_L es la resistencia de carga conectada al generador, y r_g es la resistencia del bobinado del generador. Esta intensidad de corriente es la que sale del generador y recorre la carga. Como los generadores reales son trifásicos, la corriente que recorre los N hilos de cobre que están en un agujero del estator no es la misma que sale del generador. En caso que las tres fases estén conectadas en “paralelo”, la corriente que recorre cada agujero es la tercera parte de la que sale del generador, por lo tanto la I de la expresión (9) será:

$$I = \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{R_L + r_g} = \frac{\varepsilon}{3R_L + r_f} \quad (11)$$

donde r_f es la resistencia de una sola fase del generador.

La fuerza electromotriz inducida en el generador depende de la geometría del mismo. Para un generador de imanes permanentes de flujo radial, se puede demostrar que la expresión aproximada de la fuerza electromotriz eficaz inducida en una bobina del estátor es, aplicando la fórmula de Lorentz:

$$\varepsilon = 1.41NLBv = 1.41NLB\omega r_a \quad (12)$$

donde N = número de espiras de la bobina, L = longitud de la bobina (longitud del lado de la bobina perpendicular al movimiento del rotor = longitud del estátor), ω = velocidad angular del rotor, y r_a = radio del estátor.

Si el generador esta bobinado en modo trifásico y posee N_b bobinas en cada fase, el potencial generado en una fase será

$$\varepsilon = 1.41N_bBNL\omega r_a \quad (13)$$

Sustituyendo (13) en (11), y posteriormente en (9) se llega a

$$F_A = \frac{1.41N_{ag}N_b(NLB)^2r_a}{R_T}\omega \quad (14)$$

donde $R_T = 3R_L + r_f$. Puesto que el rotor esta girando, la fuerza de Ampère crea un momento o torque que será $M_A = F_A \cdot r_a$. Por tanto

$$M_A = \frac{1.41N_{ag}N_b(r_aNLB)^2}{R_T}\omega \quad (15)$$

y el valor de k_A será

$$k_A = \frac{1.41N_{ag}N_b(r_aNLB)^2}{R_T} \quad (16)$$

Sustituyendo el valor de k_A en la velocidad angular de equilibrio (7), podemos sacar algunas conclusiones

- Si la resistencia de carga R_L es muy grande, tendiendo a infinito, el valor de k_A es muy pequeño, tendiendo a cero, en cuyo caso el aerogenerador se comporta igual que si no tuviera carga y gira con velocidad angular máxima.

- Si la resistencia de carga R_L es muy pequeña, tendiendo a cero, el valor de k_A es muy grande, y la velocidad angular de equilibrio se hace muy pequeña. Es por ello que para frenar un aerogenerador hay que cortocircuitar sus cables de salida, lo que equivale a conectarle una resistencia de carga $R_L = 0$

4.- Aerogenerador conectado a una batería

En este caso la corriente suministrada en el generador se obtiene a partir de la ley de Ohm:

$$I_g = \frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{R_T} \quad (17)$$

donde ε_b es el potencial de la batería, y R_T es la resistencia total del circuito formada por la suma de la resistencia interna del generador, la de los cables y la de la batería. La ε del generador es la misma que en el caso anterior, y viene dada por (13). Como en el caso anterior, esta intensidad de corriente es la que sale del generador, pero la intensidad de corriente que recorre cada agujero del estator, es la tercera parte de (17), por tanto

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{3R_{ext} + r_f} \quad (18)$$

donde R_{ext} es la resistencia de los cables y la batería y r_f es la resistencia de una fase del generador. Sustituyendo (13) en (18), se obtiene

$$I = \frac{1.41N_b r_a NLB\omega - \varepsilon_b}{R_T} \quad (19)$$

donde $R_T = 3R_{ext} + r_f$

La fuerza de frenado de Ampère es la misma que en el caso anterior y viene dada por (9). Sustituyendo (19) en (9), obtenemos la fuerza de frenado en el caso de cargar al aerogenerador con una batería:

$$F_A = \frac{1.41N_{ag} N_b r_a (NLB)^2 \omega - N_{ag} NLB\varepsilon_b}{R_T} \quad (20)$$

y el momento de frenado será $\mathbf{M}_A = \mathbf{F}_A \cdot \mathbf{r}_a$

$$M_A = \frac{1.41 N_{ag} N_b (r_a NLB)^2 \omega - N_{ag} r_a NLB \epsilon_b}{R_T} \quad (21)$$

En el caso de cargar el aerogenerador con una batería, se obtiene una nueva ecuación diferencial análoga a (1), donde esta vez $\mathbf{M}_f = \mathbf{M}_R + \mathbf{M}_A$

$$M_a - k_R \omega - \frac{1.41 N_{ag} N_b (r_a NLB)^2 \omega - N_{ag} r_a NLB \epsilon_b}{R_T} = I \alpha \quad (22)$$

Reescribiremos (22) en otra forma:

$$M_a + \frac{N_{ag} r_a NLB \epsilon_b}{R_T} - \left(k_R + \frac{1.41 N_{ag} N_b (r_a NLB)^2}{R_T} \right) \omega = I \frac{d\omega}{dt} \quad (23)$$

Al cabo de un tiempo “suficientemente grande”, el sistema llega al equilibrio y la velocidad angular adquiere un valor constante de valor

$$\omega_{eq} = \frac{M_a + \frac{N_{ag} r_a NLB}{R_T} \epsilon_b}{k_R + \frac{1.41 N_{ag} N_b (r_a NLB)^2}{R_T}} \quad (24)$$

Llamando

$$k_A = \frac{1.41 N_{ag} N_b (r_a NLB)^2}{R_T} \quad (25)$$

y

$$k_L = \frac{N_{ag} r_a NLB}{R_T} \quad (26)$$

se obtiene una expresión más simplificada para la velocidad de giro de equilibrio del aerogenerador

$$\omega_{eq} = \frac{M_a + k_L \varepsilon_b}{k_R + k_A} \quad (27)$$

Se ha obtenido una expresión para la velocidad angular del giro del aerogenerador similar a la expresión (7), pero en (27), el valor numérico del numerador es superior al de (7), por lo que cabe esperar que, en general, la velocidad de giro de un aerogenerador conectado a una batería sea superior a la que tendría si se conecta a una resistencia pura

Este documento está en fase de creación