SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO DE VELOCIDAD DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Ing. Víctor Zenteno Clemente
d270021@unmsm.edu.pe

Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima - Perú

Resumen : El presente trabajo permite formular y modelar los sistemas de control de velocidad de generadores eléctricos de potencia bajo un modelo lineal en el dominio de Laplace. También, se evalúa e interpreta varios generadores funcionando en paralelo y determinando el estatismo equivalente del sistema frente a las fluctuaciones de carga.

Abstract : The present work allows to formulate and to model the systems of control of speed of electric generators of power under a lineal model in the domain of Laplace. Also, it is evaluated and interpreted several generator working in parallel determining the equivalent statism of the system in front of the permanent fluctuations of load.

Palabras Claves : Turbina, censador, velocidad angular, variación de la frecuencia, potencia mecánica, potencia eléctrica, estatismo.

I. INTRODUCCION

Un Generador accionado por una Turbina, puede ser representado por un gran masa rotativa con dos torques opuestos; tal como podemos observar en la siguiente fig.1

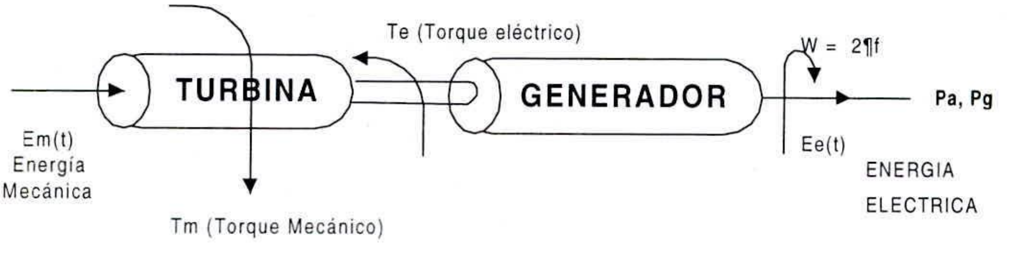

Figura 1. Conversión de la energía mecánica a energía eléctrica.

Cuando la carga eléctrica del sistema crece, es decir:

$$T_{e(t)} > T_{m(t)}$$

Entonces la velocidad mecánica de la máquina rotativa disminuye.

Cuando la carga eléctrica del sistema decrece, es decir:

$$T_{e(t)} < T_{m(t)}$$

Entonces la velocidad mecánica de la máquina rotativa aumenta.

Cuando la carga eléctrica del sistema no varía, es decir.

$$T_{e(t)} = T_{m(t)}$$

Entonces la velocidad mecánica de la máquina permanece constante.

Por lo tanto, esta variabilidad en los cambios de torques en función de las cargas del sistema, es posible controlar usando un sistema de control de velocidad.

II. MODELO MATEMATICO DEL GENERADOR

2.1 Definiciones Básicas

Antes de formular los modelos matemáticos de los elementos rotativos del generador es necesario proponer algunas definiciones importantes, como son:

P_a = Potencia activa
P_g = Potencia generada
ω = Velocidad rotacional de la máquina (rad/seg.)
α = Aceleración rotacional.
δ = Angulo de fase de la máquina rotativa
$T_{ne(t)}$ = Torque acelerante neto de la máquina
$T_{m(t)}$ = Torque mecánico que ejerce la turbina
$T_{e(t)}$ = Torque eléctrico que ejerce el generador
$P_{ne(t)}$ = Potencia acelerante neta
$P_{m(t)}$ = Potencia mecánica de entrada
$P_{e(t)}$ = Potencia eléctrica de salida
I = Momento de inercia de la máquina
M = Momento angular de máquina
Todos los valores de condición iniciales serán descritos con "o"
Por ejemplo: $\omega o, Teo$; etc.

Todas las variaciones de sus valores nominales estarán descritos con "Δ"

Por ejemplo: Δ_{ω}, ΔT_{e}; etc.

2.2. Relaciones matemáticas básicas

$$T_{ne(t)} = \mathrm{I}\alpha \tag{1}$$

$$M = \omega \mathrm{I} \tag{2}$$

$$P_{ne(t)} = \omega\, P_{ne(t)} = \omega(\mathrm{I}\alpha) = M\alpha \tag{3}$$

Asumiendo que la máquina tiene ω_0 y δ_0 entonces se tiene:

$$\omega = \omega_0 + \alpha\ t \tag{4}$$

Entonces

$$\Delta\delta = \underbrace{\int (\omega_0 + \alpha\, t)dt}_{\textit{Angulo absoluto}} \quad - \quad \underbrace{\int \omega_0 dt}_{\textit{Angulo de referencia}}$$

De donde:

$$\Delta\delta = 1/2\alpha\ t^2 \tag{5}$$

La velocidad nominal $\Delta\omega$, puede ser expresada como:

$$\Delta\omega = \alpha\ t = d(\Delta\delta)/dt \tag{6}$$

La relación entre la desviación del ángulo de fase, velocidad y torque acelerante es:

$$T_{net(t)} = \mathrm{I}\alpha = \mathrm{I}d/dt(\Delta\omega) = \mathrm{I}\ d^2(\Delta\delta)/dt \tag{7}$$

La relación entre la potencia neta acelerante, eléctrica y mecánica es:

$$P_{ne(t)} = P_{m(t)} - P_{e(t)} \tag{8}$$

El cual escrito en función de las condiciones iniciales, tenemos:

$$P_{ne(t)} = P_{ne0} + \Delta P_{ne(t)} \tag{9}$$

Donde : $P_{ne0} = P_{m0} - P_{e0}$ y

$$\Delta P_{ne(t)} = \Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}$$

Entonces:

$$P_{ne(t)} = (P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}) \tag{10}$$

Similarmente se obtiene para los torques

$$T_{ne(t)} = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_{m(t)} - \Delta T_{e(t)}) \tag{11}$$

De la ecuación (3) podemos obtener la siguiente relación:

$$P_{ne(t)} = P_{ne0} + \Delta P_{ne(t)} = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{ne0} + \Delta T_{ne}) \tag{12}$$

De las ecuaciones (10) y (11) se obtiene:

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) = (\omega_0 + \Delta_\omega)\left[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e)\right] \tag{13}$$

Asumiendo que en el estado inicial:

$$P_{m0} = P_{e0}$$
$$T_{m0} = T_{e0}$$

Entonces

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) \tag{14}$$

De la ecuación (7) tenemos

$$(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) = \mathrm{I}d/dt(\Delta\omega) \tag{15}$$

Puesto que $T_m = T_e$ podemos combinar las ecuaciones (14) y (15) y conseguir:

$$\boxed{\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 \mathrm{I}d/dt(\Delta\omega) = Md/dt(\Delta\omega)} \tag{16}$$

Transformando en función de Laplace se tiene:

$$\Delta P_{m(s)} - \Delta P_{e(s)} = M_S \Delta\omega(s)$$

$$\Delta\omega(s) = 1/Ms[\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \tag{17}$$

De donde se obtiene la fig. N° 2

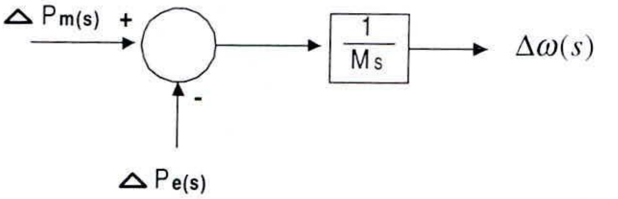

Figura. 2 Relación entre las potencias mecánica y eléctrica y el cambio de velocidad

Para mayor información ver Allen J. Wood/Ogata

III. MODELO MATEMATICO DE LA CARGA

Las cargas de un sistema de potencia depende de la demanda de los equipos eléctricos. Alguna de ellas (conexión y desconexión de las cargas: Industrial, residencial, comercial, etc.) son puramente resistivas, unos son motores con características de frecuencia y potencia y además de otras características. Puesto que la carga de los motores domina gran porcentaje de la carga del sistema eléctrico, hay la necesidad de modelar los efectos de la variación de la frecuencia del sistema.

3.1 Naturaleza de las variaciones de carga

La potencia generada por el conjunto de unidades generadoras variarán en función del tiempo de acuerdo con la acción ejercida sobre los órganos de admisión de las turbinas y por el personal de operaciones de la planta, que tratan de realizar en forma aproximada y posible a un programa de generación. Por otro lado, si no existiese ningún sistema de regulación automática entre la potencia generada, controlada por sola acción de los operadores de la planta y, potencia consumida, habrían ciertas diferencias que se deben a las siguientes causas:

a. A errores inevitables, tanto en la previsión del consumo como en la realización del programa de generación. Si el sistema de previsión del programa de generación están bien elaborados, esta diferencia suele ser inferior al 5% de la potencia consumida.

b. El carácter aleatorio de conexión y desconexión de las cargas individuales.

c. Esta diferencia entre la generación y la carga producirán si no existe ningún medio de regulación automático, variaciones de la frecuencia cuyo valor dependerá del coeficiente de amortiguamiento del sistema.

La relación de estos cambios se dan en la siguiente expresión

$$\Delta P_L(frec) = D\Delta\omega \quad \text{ó} \quad D = \Delta P_L(frec)/\Delta\omega \qquad (18)$$

Donde D es expresado como un cambio porcentual de la carga sobre el cambio porcentual de la frecuencia y se denomina coeficiente de amortiguamiento del sistema.

Por ejemplo: Si la carga cambia en 1.5% frente a un cambio del 1% de la frecuencia, entonces D=1.5.

Sin embargo, el valor de D utilizado en las respuestas dinámicas de sistemas de potencia debe ser cambiado, si el sistema de base MVA es diferente del valor nominal de la carga. Así por ejemplo, D está referido a una carga conectada de 1200 MVA y la base del sistema es de 1000 MVA, por lo tanto el nuevo valor de D será:

$$D_{100} MVA\, base = 1.5x(1200/1000) = 1.8$$

El cambio neto en P_e será el mostrado en la siguiente figura N° 3, donde podemos observar los diagramas de bloques de la masa rotativa y de la carga.

$$\Delta P_e = \underbrace{P_L}_{\text{Sensibilidad al Cambio de carga}} + \underbrace{D\Delta\omega}_{\text{Sensibilidad al cambio de la frecuencia}} \tag{19}$$

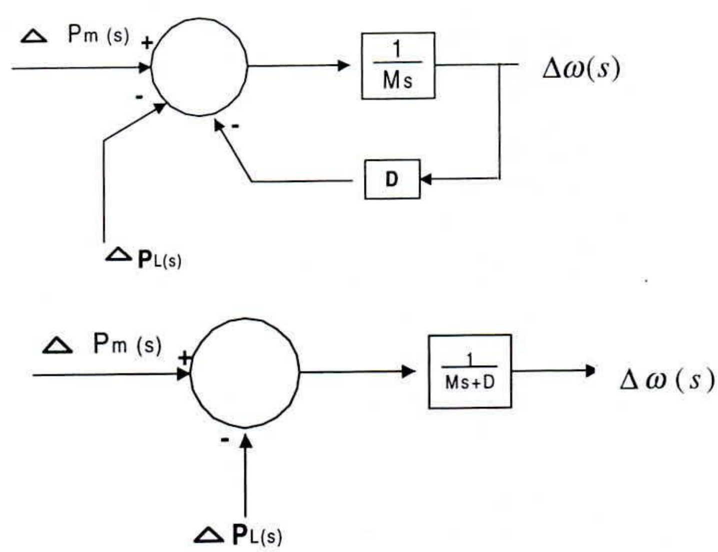

Figura N° 3 Diagrama de Bloques del Sistema

Ver: Jacinto Visquerra Landa

Ejemplo: Dado un sistema que genera 600 MVA, cuenta con un momento M y de 7.6 (pu Mw/pu frecuencia/seg.) y suministra a una carga de 400 MVA. La carga cambia 2% debido a 1% de cambio de frecuencia. La base estará referido a 1000 MVA.

Se pide determinar:

a) El diagrama de bloques equivalente del sistema de generación.
b) El Δ_ω y el equivalente al cambio de frecuencia. La base estará referido a 10 MVA.

Solución:
Cálculo de los parámetros M y D tomando como base los 1000 MVA

M = 7.6 x 600/1000 = 4.56

D = 2 x 400/1000 = 0.8

a) Por lo tanto, el diagrama de bloques del sistema de generación será el mostrado en la siguiente fig. N° 4

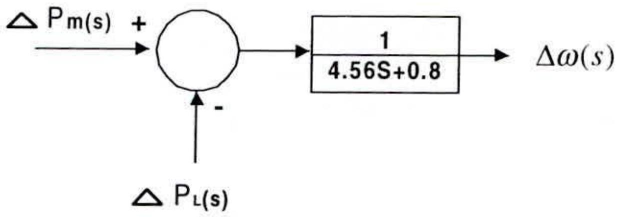

Figura N° 4. Diagrama de bloques del sistema

b) el cambio de los 10 MVA de la carga equivale 0.01 pu y esto expresado en función de Laplace será:

$$\Delta P_L(s) = 0.01/s$$

Deduciendo del diagrama de bloques se tiene lo siguiente:

$$\Delta\omega(s) = -0.01/s(1/(4.56s+0.8)) \rightarrow \Delta\omega(s) = -\frac{0.01}{s}\left(\frac{1}{4.56s+0.8}\right)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace tenemos:

$$\Delta\omega(t) = (0.01/0.8)e^{-0.8/4.56t} - 0.01/0.8$$

El valor final de $\Delta_{\omega(t)}$ será: Δ_{ω} = -0.0125 pu, donde la variación de frecuencia equivale a 0.75 Hz sobre los 60 Hz de frecuencia nominal del sistema.

Para varios sistema de generación conectados en paralelo se puede representar como en la siguiente figura mostrada:

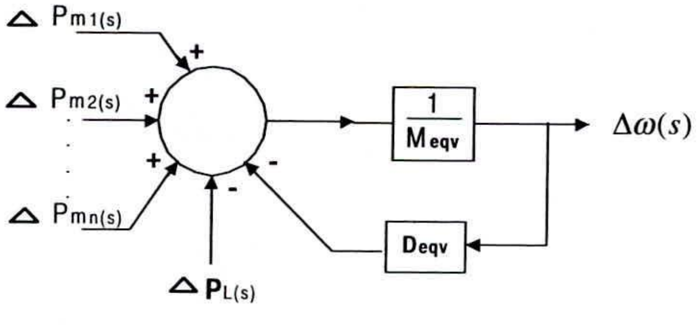

Figura N° 5 Diagrama de bloques de un sistema multi turbo – generador

IV. MODELO DE LA TURBINA O MOTOR PRIMO

Los parámetros y variables considerados en el modelo de una turbina son los siguientes:

T_{ch} = Constante de tiempo o constante de "tiempo de la carga "

ΔP_v = Cambio pu de la posición nominal de la válvula de admisión

Con estos datos tenemos al siguiente diagrama de bloques mostrando en la fig. N° 6

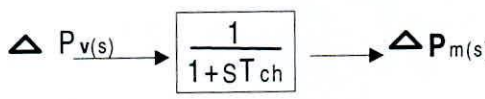

Figura N° 6 modelo del motor Primo

La combinación turbina generador se muestra a continuación en la fig. N° 7

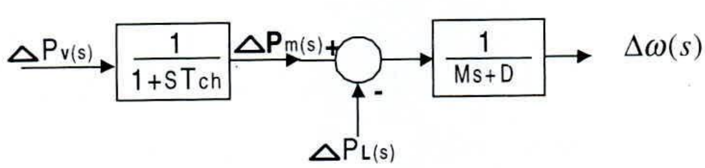

Figura N° 7 Modelo Turbina Generador.

V. MODELO DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

Es un dispositivo formado por equipos modernos, tales como electrónicos, electromecánicos, hidráulicos, etc., y que permiten el control de los dispositivos de entrada y salida de los órganos de admisión del sistema de generación, y que podemos representar el funcionamiento mediante el siguiente diagrama de bloques que se muestra en la fig. N° 8, donde:

Q(t) : Flujo e ingreso

A : Ganancia del amplificador

1/S : un integrador

ω_r : Velocidad de referencia

P_v : Porcentaje de posición de la válvula principal

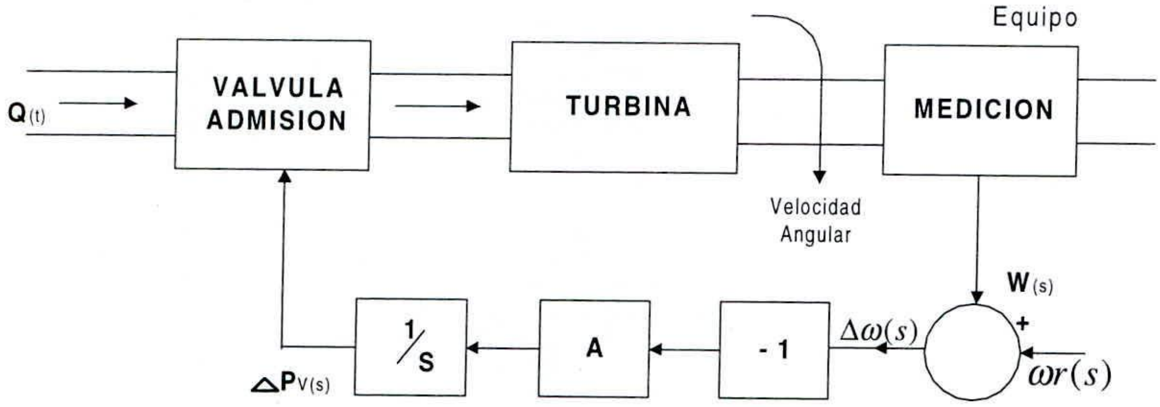

Figura N° 8 Regulador de velocidad con realimentación (Isoncrono)

Ver: Allen Wood/Ogata

5.1. Regulación Primaria

La diferencia entre la potencia generada y la potencia consumida, provocaría, si no hubiese un sistema de regulación automático variaciones de frecuencias prohibidas. Por lo tanto, las turbinas están provistas de reguladores de velocidad automáticos que actúan sobre los órganos de admisión cuando la velocidad de la turbina se aparta de la velocidad de referencia del regulador. A esta acción automática se llama regulación primaria de frecuencia.

5.2 Características del regulador de velocidad

5.2.1. Regulador Astático o Isócrono

El diagrama, representa los reguladores ISOCRONOS ó ASTATICOS (velocidad constante), estos reguladores no pueden ser usados si tenemos dos o mas generadores conectados eléctricamente sobre un mismo sistema, puesto que cada generador tratará de mantener la misma velocidad creando una oscilación del sistema.

5.2.2. Regulador con retroalimentación

Para la operación en paralelo de dos o mas generadores, los reguladores están provistos de señales de realimentación que obtiene el error de la velocidad igual a cero para diferentes salidas de los generadores.

La ganancia R (estatismo) pertenece a la característica de cada regulador es evaluada y medida por la pendiente que se muestra a continuación:

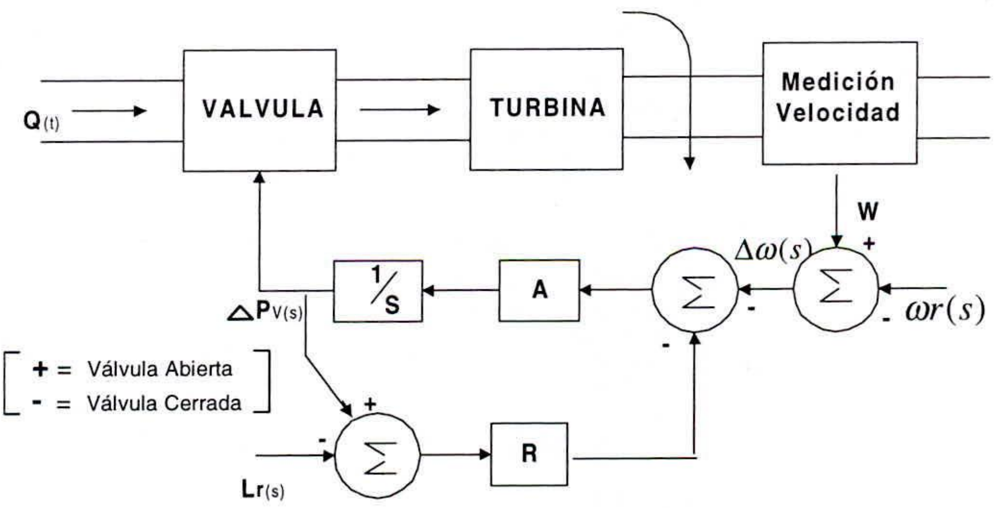

Figura N° 9 Regulador con lazo de realimentación R y la carga de referencia (Lr(s))

5.1.3. Estatismo

Se define el estatismo (speed droop) de un regulador de velocidad como aun cambio de velocidad angular al pasar de una carga cero a 100% de carga, la cual está expresada en tanto por uno de la velocidad nominal, donde.

$$\mathbf{R = (W_0 - W)/W_n} \qquad (20)$$

R = Estatismo del regulador p.u.
W_0 = Velocidd angular con carga cero.
W = Velocidad angular a plena carga
W_n = Velocidad angular nominal.

$$\mathbf{R = (f_0 - f)/f_n} \qquad (21)$$

f_0 = Frecuencia con carga cero
f = Frecuencia a plena carga
f_n = Frecuencia nominal
y también

$$\mathbf{R = (Pn/P) \times (f_0 - f')/f_n} \qquad (22)$$

Donde:
P = Potencia generada
f' = Frecuencia correspondiente a la potencia P.

Ver: Jacinto Visquerra L./Allen Wood/Ogata.

A continuación mostramos el diagrama de bloques del regulador de velocidad en función de la características de un regulador de velocidad. (Fig. N° 10).

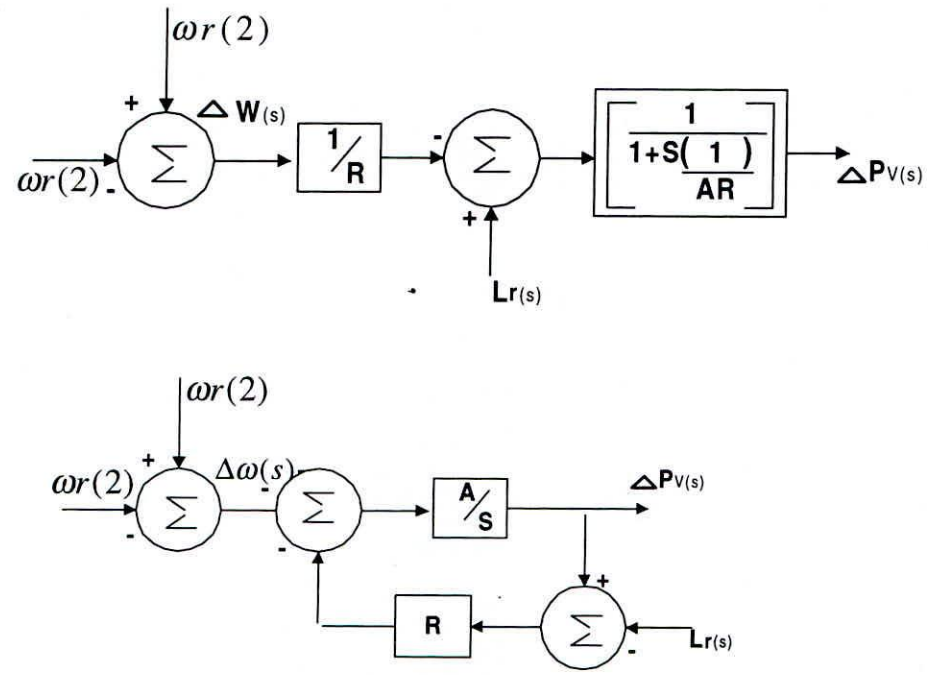

Figura N° 10 Diagrama de bloques de un regulador con estatismo R.

Donde T = 1/AR [constante de tiempo del regulador]

A continuación se muestra la curva características de velocidad de un regulador de velocidad.

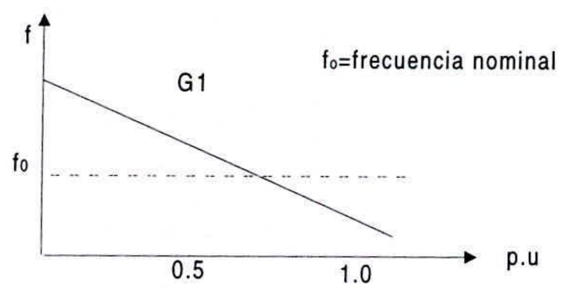

Figura N° 11Características de operación del regulador de velocidad

En la Fig. N° 12 mostramos el comportamiento de dos unidades de generación en paralelo en la que se describe lo siguiente:

a) ΔP_L crece cuando la posición de la frecuencia es f´
b) En el generador G1 la salida se incrementa en $(P_1´- P_1)$
c) En el generador G2 la salida se incrementa en $(P_2´-P_2)$
d) $\Delta P_L = (P_1´- P_1) + (P_2´-P_2)$

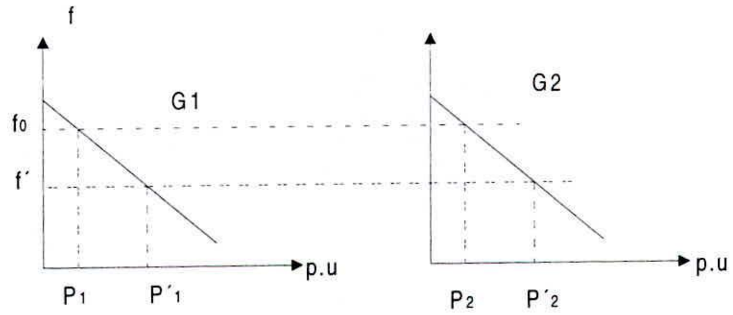

Figura N° 12 Características de operación dos unidades de generación

Si cambiamos el punto de referencia de la carga se convierte las características del regulador como se observa en la fig. N° 13.

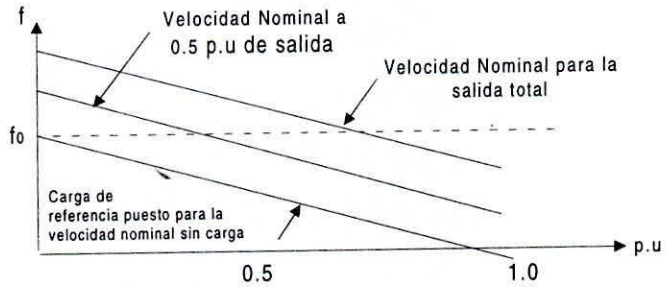

Figura N° 13 Características con cambio del punto de referencia de la carga.

Por lo tanto, el diagrama de bloques del modelo integrado en un solo sistema generación será tal como el que se muestra en la figura N° 14.

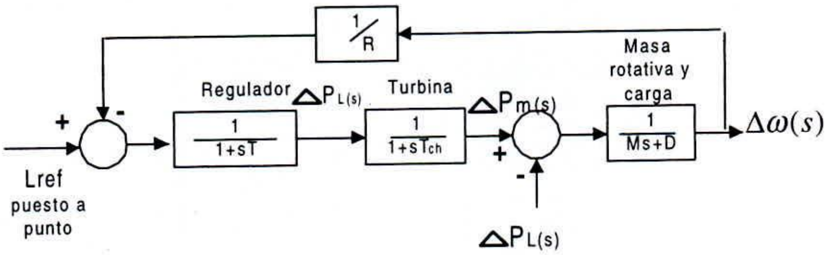

Figura N° 14 Diagrama de bloques del sistema integrado

$$\Delta W(s) = \Delta P_L(s) \left[\frac{-\dfrac{1}{MS + D}}{1 + \dfrac{1}{R}\left(\dfrac{1}{1 + ST}\right)\left(\dfrac{1}{1 + STch}\right)\left(\dfrac{1}{MS + D}\right)} \right]$$

El valor en estado permanente de esta función será considerado que:

$$\Delta P_L = \Delta PL(s) / S$$

Por lo tanto por el teorema del valor final se tiene

$$\Delta\omega(t) = \lim_{S \to 0} [Sx\Delta\omega(s)]$$

$$t \to \infty$$

$$\boxed{\Delta\omega(t) = \frac{-\Delta PL(1/D)}{1+(1/R)(1/D)} = \frac{-\Delta PL}{1/R+D}}$$

Notar que si D = 0

$$\boxed{\Delta\omega(t) = -R\ \Delta PL}$$

Luego para varios generadores en paralelo con sus respectivos reguladores de velocidad y conectados en paralelo al sistema, el cambio de frecuencia esta dado por la siguiente expresión:

$$\boxed{\Delta\omega(t) = \frac{-\Delta PL}{1/R_1 + 1/R_2 + \dots\dots\dots\dots + 1/Rn + D}}$$

Ver: Allen Wood/Ogata.

VI. CONCLUSIONES

1. Nos permite determinar el estatismo equivalente de varios generadores de potencia operando en paralelo (sincronizados) a nivel de sistemas de generación y transmisión interconectados.
2. Permite conocer la rapidez o lentitud la respuesta de los reguladores de velocidad frente a la fluctuaciones de carga del sistema y por lo tanto nos permite diseñar adecuadamente los sistemas de control de velocidad y por ende los sistemas de control de frecuencia del sistema.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Jacinto Visquerra Landa. *"Operación de los Sistemas de Energía Eléctrica"*
Allen J. Wood. *"Power Generation Operation and Control"*
Ogata. *"Ingeniería de Control"*