MODELADO MATRICIAL DE REDES ACTIVAS REALIMENTADAS

L. AVENDAÑO[1], E. DUQUE[1], G. VALENCIA[2]
[1]*Profesor Programa de Tecnología Eléctrica. Facultad de Tecnologías. Universidad Tecnológica de Pereira. A.A. 097-Pereira. Colombia.*
[2]*Ingeniera Electricista. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.*

La realimentación negativa se usa ampliamente en el diseño de amplificadores debido a que produce varios beneficios importantes. Uno de los más significativos es que estabiliza la ganancia del amplificador en los dispositivos activos, contra cambios de los parámetros debido a variación de la fuente de alimentación, cambios de temperatura o envejecimiento de los dispositivos. En este artículo, se consideran algunos beneficios de la realimentación negativa y se utiliza un enfoque matricial en el análisis de las redes.

1. Introducción

En amplificadores realimentados prácticos, la red de realimentación produce carga tanto en la entrada como en la salida del amplificador básico. En tales casos, el circuito puede analizarse escribiendo las ecuaciones para la red total y resolviendo para encontrar la función de transferencia y las impedancias en los puertos. Nótese que cada configuración tendrá un modelo y representación circuital directos por lo cual se debe hacer la construcción adecuada y así facilitar los cálculos.

En general, será necesario incluir el efecto de la carga de la red de realimentación en el amplificador básico; sin embargo, en el método matricial desarrollado aquí esto se hace por inspección directa del circuito construido. Este método se basa en el desarrollo de la representación matricial de las redes de dos puertos y en las operaciones que se pueden realizar en las configuraciones correspondientes.

2. Realimentación en Serie

Considérese la conexión de realimentación que se muestra en la figura 1. En este caso la representación más conveniente para redes de dos puertos es la de parámetros de impedancia en circuito abierto o parámetros z [1], debido a que el amplificador básico y la red de realimentación están conectados en serie, tanto en la entrada como en la salida, por lo cual tienen corrientes idénticas en sus terminales. De la figura 1, aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff [3] alrededor de las dos mallas se obtiene:

$$\begin{bmatrix} v_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_g + z_{11a} + z_{11f} & z_{12a} + z_{12f} \\ z_{21a} + z_{21f} & z_L + z_{22a} + z_{22f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} \tag{1}$$

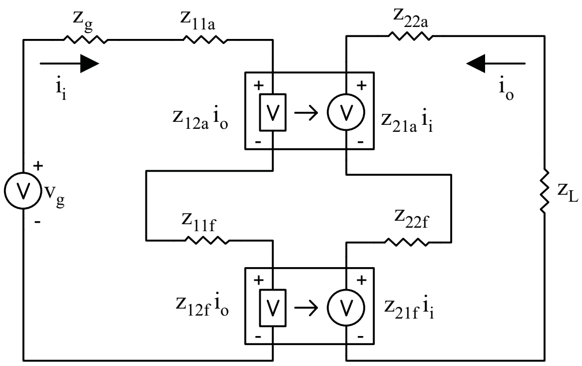

Figura 1: *Modelo de realimentación serie-serie.*

Esta expresión se puede escribir en forma compacta como:

$$\begin{bmatrix} v_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i & z_\beta \\ z_\mu & z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} \tag{2}$$

donde:

$z_i = z_g + z_{11a} + z_{11f}$ $\quad z_\beta = z_{12a} + z_{12f}$

$z_\mu = z_{21a} + z_{21f}$ $\quad z_o = z_L + z_{22a} + z_{22f}$

Invirtiendo la ecuación (2) se llega a:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{z_o}{\Delta_z} v_g \\ -\dfrac{z_\mu}{\Delta_z} v_g \end{bmatrix} \tag{3}$$

donde $\Delta_z = z_i z_o - z_\beta\, z_\mu$.

De la ecuación (3) se obtiene:

$$A_\perp = \frac{i_o}{v_g} = \frac{-z_\mu}{\Delta_z} = \frac{-\dfrac{z_\mu}{z_i z_o}}{1 + z_\beta \left(\dfrac{-z_\mu}{z_i z_o} \right)} = \frac{A_{\perp a}}{1 + \beta_z A_{\perp a}} \tag{4}$$

donde $A_{\perp a} = -\dfrac{z_\mu}{z_i z_o}$ y $\beta_z = z\beta$.

Ganancia de tensión,

$$v_o = -z_L i_o$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -z_L \frac{i_o}{v_s} = -z_L\, A_\perp$$

$$A_v = -\frac{A_{\perp a}}{1 + \beta_z A_{\perp a}} \quad z_L \tag{5}$$

Ganancia de corriente,

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -\frac{z_\mu}{z_o} \tag{6}$$

Ganancia de transimpedancia,

$$A_T = \frac{v_o}{i_i} = \frac{i_o z_L}{i_i} = \frac{i_o}{i_i} z_L \quad \text{o sea} \quad A_T = A_i\, z_L \tag{7}$$

Impedancia de entrada,

$$Z_i = \frac{v_s}{i_i} = \frac{\Delta_z}{z_o} = \frac{z_i z_o - z_\beta\, z_\mu}{z_o}$$

$$Z_i = z_i\left(1 + \beta_z\, A_{\perp a}\right) \tag{8}$$

Para calcular la impedancia de salida Z_o, se anula la fuente de entrada y se aplica a la salida una fuente v_o. De esta conexión se obtiene la expresión:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i & z_\beta \\ z_\mu & z_0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} \tag{9}$$

entonces, procediendo como antes, se llega a:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{z_\beta}{\Delta_z} v_o \\ \dfrac{z_i}{\Delta_z} v_o \end{bmatrix} \tag{10}$$

de aquí se obtiene:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{\Delta_z}{z_i} = z_o\left[1 + z_\beta\left(\frac{-z_\mu}{z_i z_o}\right)\right] \tag{11}$$

$$Z_o = z_o\left(1 + \beta_z\, A_{\perp a}\right) \tag{12}$$

Nótese que en ambos casos (z_i, z_o), la impedancia del circuito básico queda multiplicada por la diferencia de retorno ($1 + \beta_z\, A_{\perp a}$).

2.1 Ejemplo. Amplificador operacional realimentado.
Sea el circuito de la figura 2(a). Encontrar la función de transferencia de transconductancia. El circuito equivalente se muestra en la figura 2(b).

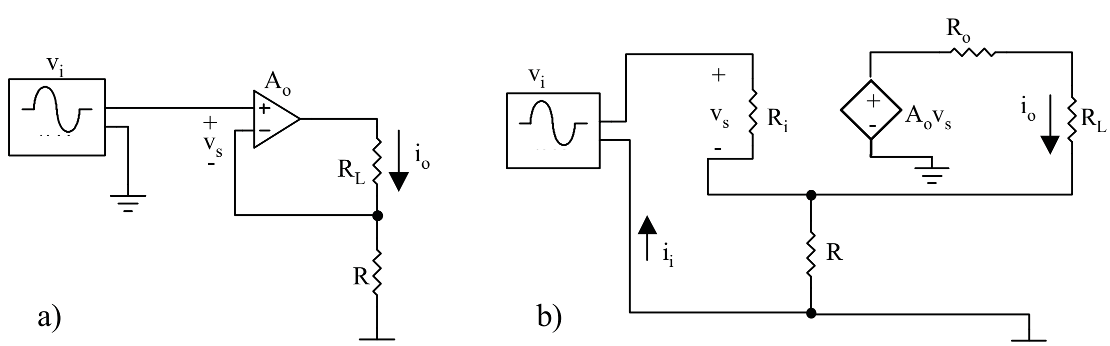

Figura 2: *a) Amplificador operacional con realimentación serie-serie. b) Circuito equivalente.*

Escribiendo las ecuaciones de malla se obtiene:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i & \beta_z \\ -\mu_z & z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_o \end{bmatrix} \tag{13}$$

donde: $z_i = R_i + R$ $\quad \beta_z = R$
$\mu_z = -R_iA_o + R$ $\quad z_o = R_L + R_o + R$

De (13), invirtiendo, para encontrar las corrientes de entrada y de salida:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_z} \begin{bmatrix} z_o & -\beta_z \\ \mu_z & z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

donde:

$$\Delta_z = z_i z_o - \beta_z \, \mu_z = z_i z_o \left(1 + \beta_z \frac{\mu_z}{z_i z_o} \right) \tag{15}$$

o sea

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{z_o}{\Delta_z} & vi \\ \dfrac{\mu_z}{\Delta_z} & vi \end{bmatrix} \tag{16}$$

Entonces de (16):

$$A_\perp = \frac{i_o}{v_i} = \frac{\mu_z}{\Delta_z} = \frac{A_{\perp a}}{1 + \beta_z \, A_{\perp a}}$$

donde $A_{\perp a} = \dfrac{\mu_z}{z_i z_o}$. A este circuito se le conoce como convertidor de tensión a corriente o fuente de corriente controlada por tensión (VCCS).

El mismo procedimiento se puede seguir para analizar los casos de realimentación en paralelo, donde se trabajan con admitancias de corto circuito, para realimentación serie-paralelo, donde se trabaja con parámetros *h*, y para realimentación paralelo-serie, donde se trabaja con parámetros *g*.

3. Conclusiones

- Se debe reconocer la clase de realimentación que se tiene, positiva o negativa.
- Se debe identificar las variables de entrada y de salida y el tipo de realimentación: serie o paralelo a la entrada y a la salida.

Referencias

[1] L. Avendaño. *Sistemas Electrónicos Lineales.* Publicaciones Universidad Tecnológica de Pereira (1995).

[2] P. Gray, y otro. *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. John Wiley (1993).

[3] C. Desoer, y otro. *Basic Circuit Theory*. McGraw Hill (1979).