

Capítulo 6

Líneas de transmisión

INTRODUCCIÓN

Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio libre a 3×10^8 metros/s o 186 000 millas/s. En otro espacio, diferente del libre, viajan a una velocidad un poco menor; sin embargo, como una primera aproximación se puede suponer que la velocidad en el espacio libre es la velocidad sobre una línea de transmisión. Si una señal varía en forma muy rápida o la línea es tan larga que antes de que el borde anterior de la señal alcance el extremo de la línea de transmisión la señal que llega experimenta un cambio apreciable, debe tomarse en consideración cómo afecta a la señal la línea de transmisión.

UN PULSO SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Considérese un pulso que se envía sobre una línea de transmisión de 100 metros. El pulso es de duración tan corta que el borde anterior no llega al extremo de carga antes de que el borde posterior del mismo haya abandonado el generador. El tiempo para que la señal recorra la longitud de la línea de transmisión se puede calcular como sigue:

$$\frac{100 \text{ metros}}{3 \times 10^8 \text{ metros/s}} = 33.3 \times 10^{-8} \text{ s} \quad \text{o} \quad 333 \text{ ns}$$

Si el ancho del pulso es de una duración menor de 333 ns, el voltaje en el generador habrá regresado a cero antes que el borde anterior del pulso llegue a la carga. En la figura 6-1 se describe esta situación.

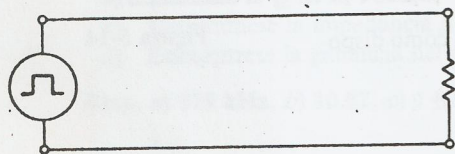


Fig. 6-1

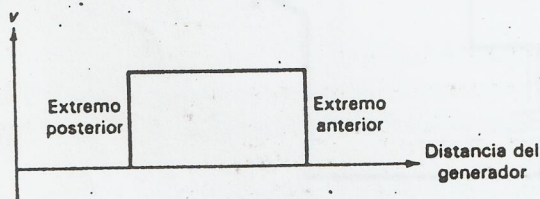


Figura 6-1

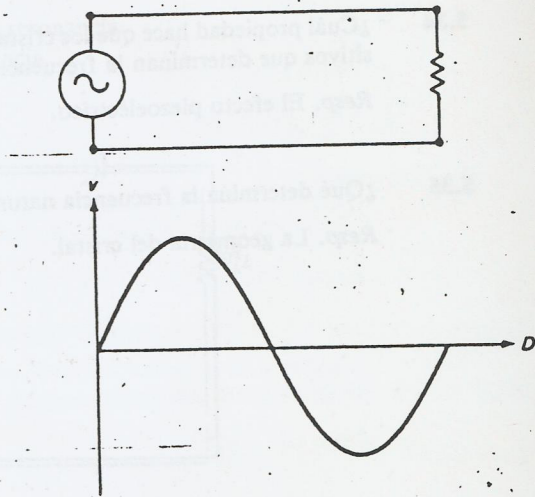


Figura 6-2

UNA ONDA SENOIDAL SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Ahora considérese una *onda senoidal* que viaja sobre una línea de transmisión cuya longitud es apreciable en comparación con la longitud de onda de ella. La longitud de onda de la onda senoidal se define como la distancia recorrida por una señal electromagnética durante un ciclo de la onda senoidal. La figura 6-2 muestra una onda senoidal sobre una línea de transmisión. La onda tiene en este caso una longitud de onda igual a la longitud física de la línea.

Puesto que el valor instantáneo de una onda senoidal cambia constantemente, se pueden imaginar las ramificaciones involucradas cuando la longitud de la línea de transmisión es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la señal que viaja sobre ella. El voltaje instantáneo en cualquier punto de la línea será diferente del de cualquier otro.

La razón de que esta situación no se encuentre en líneas de transmisión mucho más cortas que una longitud de onda obedece a que aunque el voltaje en cualquier punto de la línea es diferente, la diferencia es muy pequeña puesto que la velocidad de propagación es mucho mayor que la velocidad de cambio de la señal. Considérese la longitud de onda de una onda senoidal de 60 Hz:

$$f\lambda = 3 \times 10^8 \text{ metros/s}$$

$$60\lambda = 3 \times 10^8 \text{ metros/s}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{60} = 0.05 \times 10^8$$

$$\lambda = 5 \times 10^6 \text{ metros}$$

$$f\lambda = 186\,000 \text{ millas/s}$$

$$60\lambda = 186\,000$$

$$\lambda = \frac{186\,000}{60}$$

$$\lambda = 3100 \text{ millas}$$

Así se ve que la longitud de onda de una señal de 60 Hz es de 5 millones de metros o de 3 100 millas. A menos que la línea de transmisión que conduce la señal de 60 Hz sea una parte apreciable de esta distancia, no se debe considerar la teoría de línea de transmisión.

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA

Las líneas de transmisión cuyas longitudes son una parte apreciable o un múltiplo de una longitud de onda de la señal que se transmite por ella se describen por medio de un parámetro al que se denomina impedancia característica Z_0 . Ésta es la impedancia que presentaría en su extremo de entrada una línea teóricamente infinita.

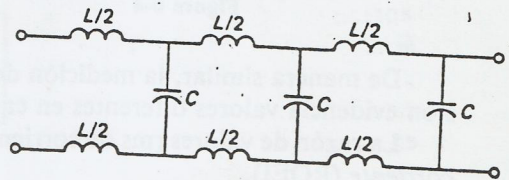


Figura 6-3

Tabla 6-1

Tipo	Descripción	Impedancia característica (Ω)
RG 8/U	Cable coaxil	52
RG11 A/U	Cable coaxil	75
214-056	Conductor bifilar (empleado comúnmente como conductor de entrada en TV)	300
	Líneas aéreas de conductores paralelos con espaciadores de cerámica	200-600

Puesto que cada sección de la línea tiene una capacidad y una inductancia, una línea de longitud infinita se puede considerar como una red infinita de inductores y capacitores. Véase la figura 6-3.

La relación entre capacidad e inductancia por unidad de longitud e impedancia característica es $Z_0 = \sqrt{L/C}$.

En la tabla 6-1 se explica la impedancia característica de un número de cables comunes empleados como líneas de transmisión.

ONDAS REFLEJADAS Y RAZÓN DE ONDAS ESTACIONARIAS (ROE)

Debido a consideraciones de potencia y energía en el extremo de carga de una línea de transmisión en cortocircuito o a circuito abierto, se puede expresar una hipótesis para la existencia de ondas reflejadas desde la carga.

Cuando una línea de transmisión está terminada en cualquier carga diferente de la resistencia que es igual a la impedancia característica de la línea, están presentes en ella tanto una onda reflejada como una onda incidente. La suma de la onda incidente y de la reflejada en cada punto de la línea hace que aparezcan diferentes valores rms de voltaje en los diferentes puntos de la línea.

Si se conecta un voltímetro en cada punto de la línea de transmisión indicará un voltaje rms en cada punto, el cual varía de punto a punto sobre la línea como se muestra en la figura 6-4.

La razón del valor rms de voltaje mayor al menor sobre la línea se denomina *razón de ondas estacionarias de voltaje* (ROEV). Los valores mayor y menor rms se miden en puntos diferentes sobre la línea, separados una distancia igual a un cuarto de longitud de onda.

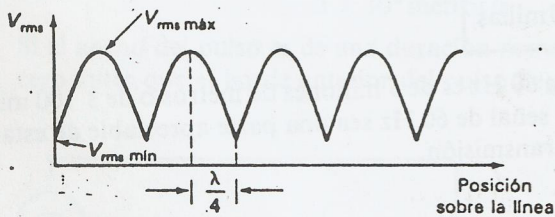


Figura 6-4

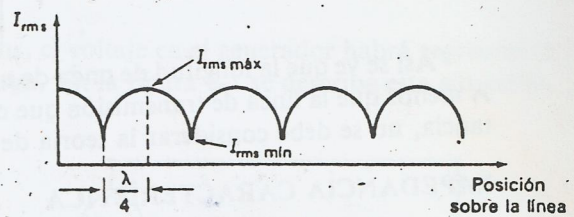


Figura 6-5

De manera similar, la medición del valor rms de corriente en cada punto de una línea de transmisión evidencia valores diferentes en cada punto de la línea, como se muestra en la figura 6-5.

La razón de valores rms de corriente, mayor a menor, se denomina *razón de ondas estacionarias de corriente* (ROEI).

La ROEV y la ROEI son iguales. Con frecuencia se emplea ROE en lugar de ROEV o de ROEI.

RAZÓN DE ONDAS ESTACIONARIAS

La condición óptima para la transmisión de potencia a una carga sobre una línea de transmisión es aquella en la cual los valores rms máximos de voltaje y corriente son iguales a los mínimos correspondientes.

La ROE es una indicación de a qué distancia se está de la condición óptima para la transmisión de potencia a una carga. La ROE más cercana es la de 1:1, y es la condición más cercana a la mejor o la óptima que se cumple. Para determinar la ROE se establece una razón con la cantidad mayor tomada primero:

$$ROE = V_{rms \text{ máx}} : V_{rms \text{ mín}} = I_{rms \text{ máx}} : I_{rms \text{ mín}}$$

Las investigaciones de laboratorio y de campo demuestran que

$$ROE = Z_L : Z_0$$

Así, la ROE es una medida del desajuste entre la línea y la carga. Como sucede con todas las razones, la ROE se puede representar también como una fracción.

$$\text{ROE} = \frac{V_{\text{rms máx}}}{V_{\text{rms mín}}} = \frac{I_{\text{rms máx}}}{I_{\text{rms mín}}}$$

$$\text{ROE} = \frac{Z_L}{Z_0}$$

EL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN K_r

Otro factor a considerar cuando se trata con cargas y líneas de transmisión desajustadas es el coeficiente de reflexión K_r , el cual es definido como el voltaje reflejado dividido entre el voltaje incidente, o como la corriente reflejada dividida entre la corriente incidente.

Puesto que en la condición óptima la onda reflejada se convierte en cero, el valor óptimo para K_r es cero.

$$K_r = \frac{V_{\text{refl}}}{V_{\text{inc}}}$$

$$K_r = \frac{I_{\text{refl}}}{I_{\text{inc}}}$$

Ya que tanto ROE como K_r son indicaciones de la calidad en la adaptación existente, debe haber una relación entre ellos. Tal relación existe:

$$\text{ROE} = \frac{K_r + 1}{1 - K_r}$$

También debe ser posible expresar el coeficiente de reflexión en términos de la resistencia de carga y de la impedancia característica, siendo la desigualdad entre ellas la causa principal de que K_r sea diferente de cero. Esta relación existe también,

$$K_r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_0 + Z_L}$$

POTENCIA REFLEJADA

Puesto que la razón primordial para enviar una onda sobre una línea de transmisión es la de transferir potencia de una fuente a una carga es importante saber con qué efectividad se ha inyectado la potencia en la carga. Puesto que la potencia es igual al cuadrado del voltaje dividido entre la resistencia de la carga y que el coeficiente de reflexión es igual al voltaje reflejado dividido entre el voltaje incidente, se puede escribir lo siguiente:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{\text{refl}} = \frac{V_{\text{refl}}^2}{R_L}$$

$$P_{\text{inc}} = \frac{V_{\text{inc}}^2}{R_L}$$

$$\begin{aligned}\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{inc}}} &= \frac{V_{\text{refl}}^2/R_L}{V_{\text{inc}}^2/R_L} \\ &= \frac{V_{\text{refl}}^2}{V_{\text{inc}}^2} \\ K_r &= \frac{V_{\text{refl}}}{V_{\text{inc}}}\end{aligned}$$

$$\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{inc}}} = K_r^2$$

FACTOR DE VELOCIDAD

Hasta aquí, en este capítulo, la velocidad de las ondas electromagnéticas sobre una línea de transmisión se ha aproximado considerándola igual a la velocidad de las ondas en el espacio libre: 3×10^8 metros/s. Esto no es exactamente cierto. En efecto, la razón de la velocidad de las ondas electromagnéticas sobre una línea de transmisión particular a la que se tiene en el espacio libre se la conoce como el factor de velocidad k . El factor de velocidad para muchas líneas de transmisión comunes varía desde un valor bajo de 0.55 para ciertos pares torcidos, a 0.98 para conductores pequeños ampliamente espaciados, como es el caso de las líneas aéreas.

TRANSFORMADORES DE ADAPTACIÓN DE UN CUARTO DE ONDA

Se pueden emplear secciones de líneas de transmisión de un cuarto de longitud de onda para adaptar una carga a una línea de transmisión cuando la resistencia de la carga no es igual a la impedancia característica de la línea de transmisión. Puesto que la sección de un cuarto de longitud de onda de una línea funciona como un transformador de adaptación, se la considera como un transformador de adaptación de un cuarto de onda. El valor apropiado de impedancia característica para la sección de línea de transmisión de cuarto de onda se puede encontrar de

$$Z_T = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

en donde Z_T es la impedancia observada dentro de la sección de adaptación de cuarto de onda cuando se la conecta a la carga Z_L , y Z_0 es la impedancia característica de la sección de adaptación de cuarto de onda que se necesita para asegurar la adaptación. Véase la figura 6-6.

IGUALACIÓN POR BRAZO DE REACTANCIA (STUB MATCHING)

Ya sea porque una carga tenga una componente reactiva o porque una carga resistiva no esté adaptada a la impedancia característica de la línea, la impedancia vista desde la entrada de una línea de transmisión puede tener una componente reactiva. A fin de eliminar las ondas estacionarias de tal línea de transmisión es necesario eliminar la componente reactiva de la impedancia conforme se va observando dentro de la línea desde la entrada. Una forma de hacer esto es colocar una corta sección de la línea de transmisión a circuito abierto o en cortocircuito en paralelo con la línea de transmisión en un lugar cercano al extremo de carga de la línea. A esta sección corta de línea se la denomina brazo de reactancia (*stub*).

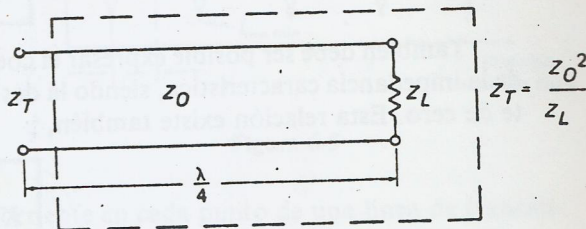


Figura 6-6

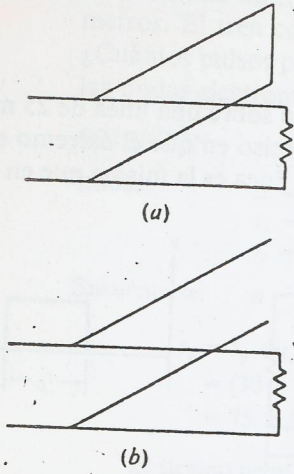


Figura 6-7

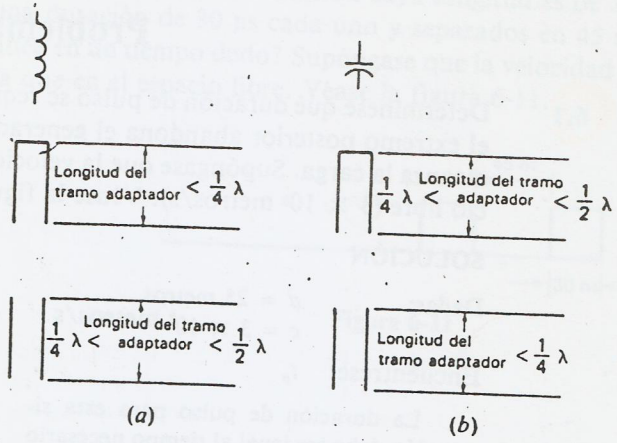


Figura 6-8

(Véase la figura 6-7.) Dependiendo de la longitud de la sección corta de la línea, ya sea terminada en cortocircuito o a circuito abierto, se comportará como una reactancia capacitiva o como una reactancia inductiva (véase la figura 6-8). La elección apropiada de la longitud del brazo de reactancia y su colocación en una posición correcta sobre la línea de transmisión dará lugar a que la entrada de la línea se vea bajo una condición resistiva, y a la frecuencia de diseño (o a una armónica de ella) no existirán ondas estacionarias de la entrada de la línea al lugar, sobre ella, en donde se localice el brazo de reactancia. Si cambia la frecuencia de la señal, entonces la condición de adaptación que cumple el brazo no prevalecerá mucho y de nuevo existirá una condición de desadaptación y, en consecuencia, ondas estacionarias.

Por lo general los brazos de reactancia son de una longitud menor de media longitud de onda. Un brazo de reactancia terminado en cortocircuito de menos de un cuarto de longitud de onda se comportará como una inductancia, al igual que un brazo de reactancia terminado en circuito abierto de más de un cuarto de longitud de onda pero menor que media longitud de onda. Un brazo de reactancia terminado en circuito abierto de longitud menor que un cuarto de longitud de onda se comporta como una capacitancia, al igual que un brazo de reactancia terminado en cortocircuito cuya longitud es mayor de un cuarto de longitud de onda pero de longitud menor de media longitud de onda (véase la figura 6-8).

Aunque para determinar la longitud y colocación del brazo de reactancia por lo general se requiere del empleo de la carta de Smith o de soluciones algebraicas complejas, es posible una aproximación simplificada para lo cual existen gráficas como la que se muestra en la figura 6-9.

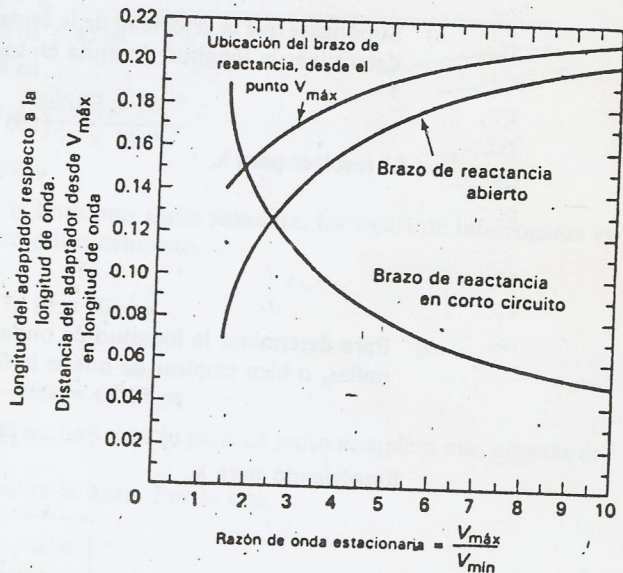


Figura 6-9