



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DEPARTAMENTO DE CONVERSIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA
CT-3231 SISTEMAS DE POTENCIA I

Preparaduría 5: Modelado de Sistemas de Eléctricos de Potencia

Preparador
Br. Jeffry Andrades

Profesor
Ing. Luis Andrade

2 de marzo de 2019

Tabla de Contenido

1	ELEMENTOS A CONSIDERAR DE UN SISTEMA PARA SU ANÁLISIS POR MEDIO DE FLUJO DE CARGA	1
2	Elementos del Sistema	1
2.1	Cargas	1
2.2	Líneas de Transmisión	2



1. ELEMENTOS A CONSIDERAR DE UN SISTEMA PARA SU ANÁLISIS POR MEDIO DE FLUJO DE CARGA

2. Elementos del Sistema

Para esta sesión de preparaduría es de nuestro interés recordar los modelos planteados para los distintos elementos de un sistema de potencia con la finalidad de realizar el análisis respectivo, determinar el estado del mismo y tomar decisiones sobre el mismo para responder a anomalías en el mismo. Cabe acotar que los modelos planteados aquí para las técnicas de análisis a desarrollar en el curso son para sistemas en por unidad.

Un sistema eléctrico de potencia, como cualquier sistema, tienen distintos componentes. Sin embargo, como se verá en las líneas siguientes, los modelos pueden ser muy variados para cada uno de éstos, cada modelo tendrá un grado de complejidad distinto, y su uso dependerá de que tan preciso se quiera ser en los resultados a obtener. Es por esta razón que es de vital importancia conocer los modelos con lo que se trabajarán a lo largo del curso, con la finalidad de realizar el análisis respectivo del sistema, determinar el estado de éste y tomar decisiones acerca de las anomalías que puedan estar presentes en el mismo. Los elementos a especificar para el análisis de sistemas de eléctricos de potencia son los siguientes:

- Cargas.
- Compensadores.
- Líneas de Transmisión.
- Generadores.
- Transformadores.

2.1. Cargas

Las cargas son el elemento fundamental del sistema, sin ellas no tiene sentido construir o analizar un sistema de potencia. La figura 1 muestra cual es su simbología en un diagrama unifilar.



Figura 1: Representación de una Carga en un Diagrama Unifilar.

Las cargas de un sistema tienen dos modelos principales:

- Modelos Estacionarios. Estos a su vez se dividen en 3 tipos:
 - Impedancia Constante. Planteado para las cargas residenciales e iluminación



- Corriente Constante. Planteado para las cargas industriales y comerciales.
 - Potencia Constante. Planteado para cuando se requiere un modelo exacto del comportamiento de la carga. Es el tipo de modelo que se apega a la realidad del comportamiento de las cargas.
- Modelos Dinámicos.

Los modelos dinámicos de la carga consideran los cambios que pueda tener la potencia con las variaciones en el voltaje y el frecuencia del sistema en cuestión, parte del modelo de potencia constante. Sin embargo, si bien su explicación y planteamientos son bastante simples, el manejo de estas variaciones durante la evaluación de los sistema puede resultar muy engorroso .

Para fines de los objetivos y el contenido programático de este curso, centraremos nuestra atención en modelar la carga como potencia constante. La consideración de este modelo plantea que la carga demanda la misma potencia, sin importar al sistema en que se conecte. En este caso, la relación entre la potencia y la tensión del sistema es constante, y la tensión y corriente del punto donde se conecta varía para satisfacer la demanda de la carga. Asimismo, este modelo no tiene representación circuital. La figura 2 muestra la simbología planteada para este modelo.

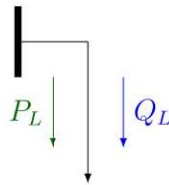


Figura 2: Representación de una Carga Modelada como Potencia Constante.

2.2. Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión son el medio de a través del cual se transmite la potencia a los puntos de consumo. La figura 3 muestra como es la representación de este elemento en un diagrama unifilar.



Figura 3: Representación de una Línea de Transmisión en un Diagrama Unifilar.

Las líneas de transmisión tienen diversos modelos circuitales en función de su longitud (l). A continuación se plantean los distintos modelos según el tipo de línea.

- Líneas Cortas [$l \leq 80$ km]

Para las líneas cortas, la representación planteada es una impedancia que representa la interconexión entre las barras a las que está conectada la línea. Esta impedancia representa los



elementos resistivos e inductivos de la misma. La figura 4 es la representación circuital de este tipo de línea de transmisión.

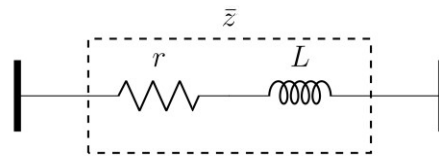


Figura 4: Modelo Circuital para Línea de Transmisión Corta.

Donde:

$$\bar{Z} = \bar{z}l(r + jx_L)l; x_L = \omega L \quad (1)$$

r : Resistencia del conductor de la línea por unidad de longitud. Ω/km o Ω/mi .

x_L : Reactancia del conductor de la línea unidad de longitud. Ω/km o Ω/mi .

l : Longitud de la línea. km o mi.

L : Inductancia del conductor de la línea por unidad de longitud. H/km o H/mi.

\bar{Z} : Impedancia serie total de la línea de transmisión. Ω/km o Ω/mi .

■ Líneas Medias [$80 \text{ km} < l < 240 \text{ km}$]

En el caso de las líneas medias, el modelo circuital que se utilizará para los análisis de flujo de carga es un modelo pi, una impedancia interconectando las dos barras entre las que esta conectada la línea y dos admitancias en derivación a tierra una a cada barra de la línea. En este caso, la impedancia representa los elementos resistivos e inductivos de la línea, mientras que las admitancias en derivación representan los efectos de carga de la línea con respecto al suelo y tienen el mismo valor entres sí; este último fenómeno no se considera en las líneas cortas dada que su extensión no es lo suficiente para hacerlo perceptible, o no despreciable, a fines de modelado de elementos, asimismo este efecto de carga capacitiva se considera como un efecto concentrado y se divide de igual manera para el resto de la línea. La figura 5 es la representación circuital de este tipo de línea de transmisión.

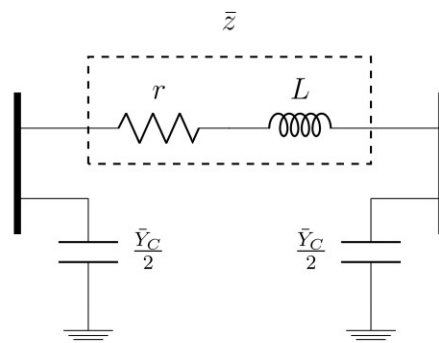


Figura 5: Modelo Circuital para Línea de Transmisión Media.



Donde:

$$\bar{Z} = \bar{z}l(r + jx_L)l; x_L = \omega L \quad (2)$$

$$\bar{Y}_C = j\bar{b}_C l; b_C = \omega C \quad (3)$$

r : Resistencia del conductor de la línea por unidad de longitud. Ω/km o Ω/mi .

x_L : Reactancia del conductor de la línea unidad de longitud. Ω/km o Ω/mi .

l : Longitud de la línea. km o mi.

L : Inductancia del conductor de la línea por unidad de longitud. H/km o H/mi.

b_C : Susceptancia de la línea de transmisión por unidad de longitud. \mathcal{U}/km o \mathcal{U}/mi .

C : Capacitancia de carga de la línea de transmisión por unidad de longitud. F o μF .

\bar{Z} : Impedancia serie total de la línea de transmisión. Ω/km o Ω/mi .

\bar{Y}_C : Admitancia en derivación total de la línea de transmisión. \mathcal{U}/km o \mathcal{U}/mi .

El parámetro de capacitancia de línea, C , es un dato y puede darse como capacitancia por unidad de longitud o como el valor concentrado de este parámetro. Recuerde que si se le da como capacitancia por unidad de longitud debe multiplicarla por la longitud de la línea antes de plantear el modelo circuital tal como se ha mostrado aquí.

■ Líneas Largas [$l \geq 240 \text{ km}$]

Ahora, en lo que respecta a las líneas largas, el efecto de carga de línea con respecto al suelo es mucho más evidente y no puede ser despreciado sino que también están distribuidos en toda la longitud de la línea. Esto también ocurre con los elementos resistivos e inductivos de la línea. Adicionalmente, tanto los elementos resistivos e inductivos de la líneas como los fenómenos capacitivos de carga de la línea son afectados por las ondas viajeras de tensión y corriente de la línea, por lo que complica el modelado, si se quisiera ser lo más preciso posible. Sin embargo, para los análisis que se llevarán a cabo a lo largo del curso, se puede realizar la aproximación de que los elementos resistivos e inductivos de la línea y los elementos capacitivos que modelan el fenómeno de carga de la línea son concentrados y serán dispuestos en un modelo pi igual al de las líneas medias pero la formulación de los elementos del mismo consideran los efectos de ondas viajeras por lo que introducen términos hiperbólicos en las expresiones matemáticas de los elementos de la representación circuital. La figura 6 presenta el modelo circuital para este tipo de líneas.

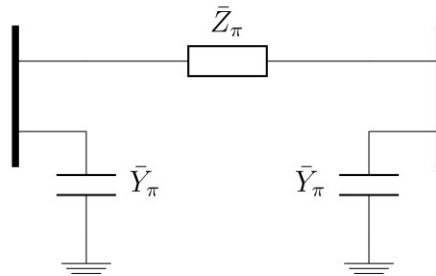


Figura 6: Modelo Circuital para Línea de Transmisión Larga.



Donde:

$$\bar{Z}_\pi = \bar{z}_c \sinh(\bar{\gamma}l) \quad (4)$$

$$\bar{Y}_\pi = \frac{1}{\bar{z}_c} \tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) \quad (5)$$

\bar{z}_c : Impedancia característica de la línea de transmisión. Ω .

$\bar{\gamma}$: Constante de propagación de la onda viajera en la línea de transmisión. rad/km o rad/mi.

l : Longitud de la línea de transmisión. km o mi.

\bar{Z}_π : Impedancia total de la línea de transmisión. Ω/km o Ω/mi .

\bar{Y}_π : Admitancia en derivación total de la línea de transmisión. \mathcal{U}/km o \mathcal{U}/mi .

En líneas generales, el elemento \bar{Z}_π tiene parte resistiva y un componente inductivo desde el punto de vista físico dada la manufactura de los conductores de la línea de transmisión, mas su valor es afectado por la constante de propagación de ondas viajeras.

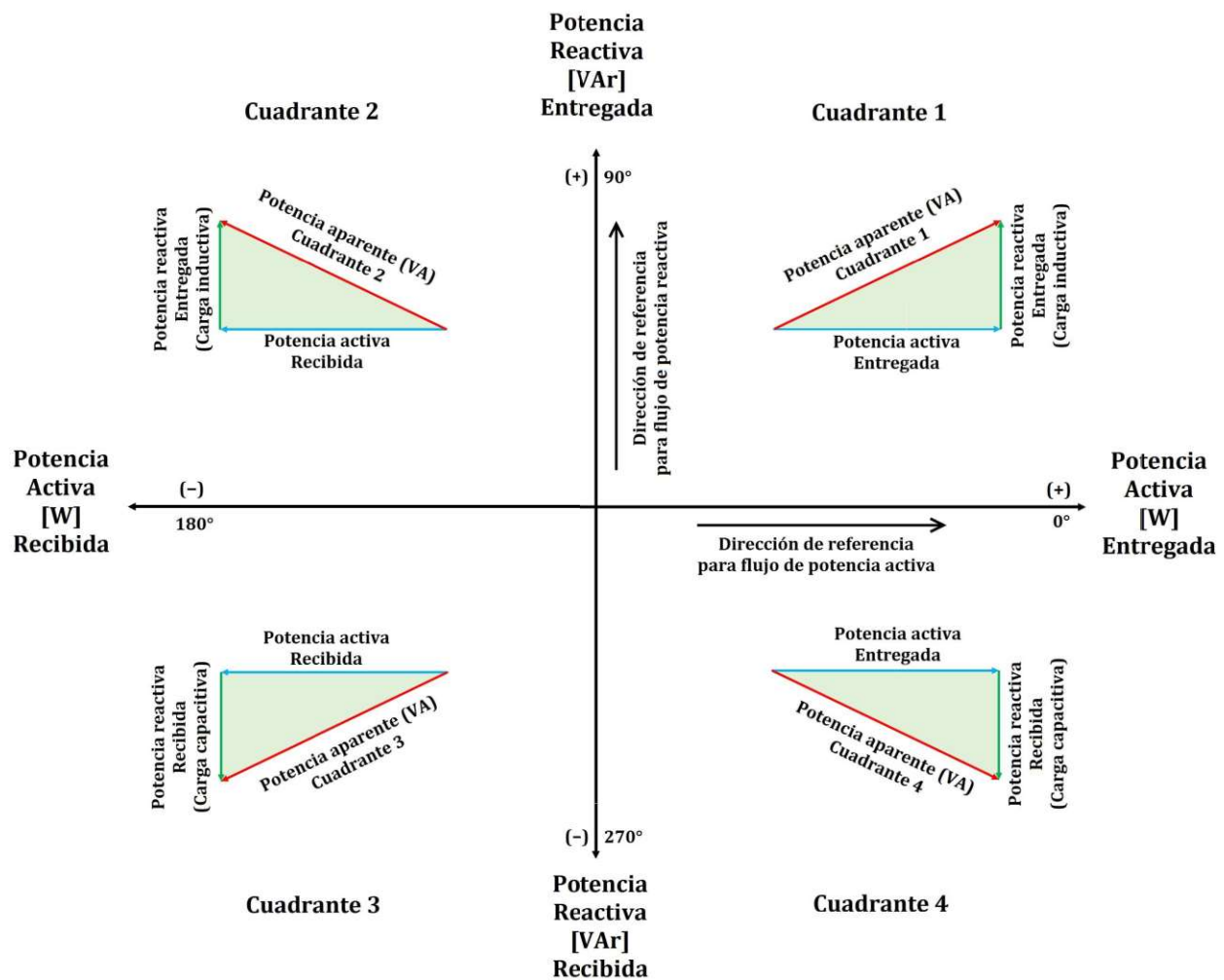


Figura 8: Cuadrantes de Operación de los Generadores en Sistemas de Potencia.

1. **Cuadrante I: Generador Capacitivo.** El generador entrega potencia activa pero demanda potencia reactiva de la red donde está conectado. Esta condición presenta el efecto Ferranti en la operación del generador; también es conocida como "Generador Subexcitado".
2. **Cuadrante II: Motor Capacitivo.** El generador se motoriza, demandando potencia activa y reactiva de la red donde está conectado.
3. **Cuadrante III: Motor Inductivo.** El generador se motoriza, demandando potencia activa pero entregando potencia reactiva a la red donde está conectado.
4. **Cuadrante IV: Generador Inductivo.** El generador entrega potencia activa y potencia reactiva a la red donde está conectado. Esta condición también es conocida como "Generador Sobrexcitado".
5. **Compensador Sincrónico.** El generador en este estado de operación no entrega potencia activa a la red, solo entrega potencia reactiva de manera dinámica según las exigencias de la red.



2.4. Compensadores

En la operación de sistemas de potencias existen condiciones adversas que no afectan la operatividad como conjunto del sistema mas sin embargo afecta la calidad del servicio eléctrico. Una de estas condiciones son el perfil de tensiones y el factor de potencia en una barra en específico.

La primera condición implica que todas las tensiones del sistema tiene que encontrarse dentro de una banda de tolerancia definida por norma de la empresa o legalización del país donde se encuentra el sistema eléctrico; mientras que la segunda implica un control de las corrientes que entran a una barra específico para cumplir con normativas de la empresa de servicio. Para ambas condiciones se utilizar elementos conocidos como compensadores que permiten realizar un manejo de la potencia reactiva para lograr alguno de los dos objetivos listados anteriormente.

- Compensadores Activos: Estos dispositivos se auto-sintonizan con las condiciones de la red, bien sean por problemas de perfiles de tensión o de factor de potencia en el sistema, y los corrigen con alta precisión. La composición de este tipo de compensadores se basan en sistemas de electrónica de potencia y su manejo y diseño escapan del alcance de este curso.
- Compensadores Estáticos (Pasivos): Estos dispositivos, también conocidos como reactores, son dispositivos almacenadores de energía, es decir capacitores o inductores, que se especifican según un nivel de potencia reactiva especificada. Sin embargo, tienen el defecto que para entregar, o absorber, la potencia reactiva especificada, se requiere que operen a una tensión cercana a la de diseño.

2.5. Transformadores y Transformadores con Cambiadores de Tomas

Un elemento indispensable para los sistemas de potencia son los transformadores de potencia. Estos equipos permiten transportar los grandes bloques de potencia que demanda una carga y a su vez son los que permiten la separación de los sistemas de potencia en sus distintos estratos según sus niveles de tensión. Su representación circuital, a fines de análisis de potencia, es una admitancia \bar{Y}_{cc} , también llamada admitancia de cortocircuito, obtenida de invertir el valor de la impedancia de cortocircuito del transformador, que interconecta dos barras. La figura 9 muestra la representación del mismo en diagrama unifilares, mientras que la figura 10 es el modelo circuital del transformador en sistemas en por unidad.

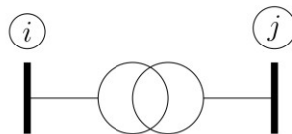


Figura 9: Representación de un Transformador en un Diagrama Unifilar.

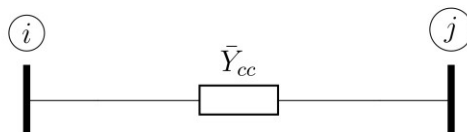


Figura 10: Modelo Circuital de un Transformador.