

DETECCIÓN DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

David Martínez Martínez

Universidad Autónoma del Estado de México

<https://orcid.org/0000-0002-1450-8310>

José Francisco Solís Villarreal

Universidad Autónoma del Estado de México

Oscar Espinoza Ortega

Universidad Autónoma del Estado de México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: El funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia es una situación compleja debido a la diversidad de fenómenos presentes durante la operación de este. Uno de estos fenómenos es el conocido en términos generales, como resonancia. Éste fenómeno ocurre cuando las reactancias inductivas y capacitivas presentes en el sistema, se igualan a un cierto valor de frecuencia conocido como frecuencia de resonancia. Las consecuencias del fenómeno de resonancia pueden ser útiles en ciertas aplicaciones o indeseables y destructivas en otros casos. Para el caso de la operación de un sistema eléctrico es importante conocer sus frecuencias resonantes para prevenir daños en los equipos ante la ocurrencia de este fenómeno.

Palabras clave: Resonancia, sistemas de potencia, modelado, atp.

INTRODUCCIÓN

La resonancia es un fenómeno importante para considerar durante el funcionamiento de cualquier sistema eléctrico de potencia, ya que puede producir fuertes sobretensiones y sobrecorrientes que pueden dañar los equipos de la red. En algunas condiciones, la resonancia puede ser un fenómeno útil, por ejemplo, en osciladores electrónicos la resonancia paralela se puede utilizar en un circuito tanque para evitar señales de frecuencias específicas (Wilcox,1976). La resonancia en serie es útil en el diseño de filtros de armónicos, ya que correctamente sintonizados absorben señales de la frecuencia especificada (Luo,2009) (Liu,2017), evitando su circulación en el circuito.

Por otro lado, la resonancia no controlada puede ser un fenómeno muy peligroso que debe preverse para evitar daños en el equipo del sistema. En este sentido es importante simular la respuesta del sistema a una amplia gama de frecuencias que pueden

ser introducidas por cierto tipo de equipos complementarios, como los controladores de estado sólido (Subjak,1990).

Para detectar frecuencias resonantes se puede realizar un análisis de barrido de frecuencia. Un barrido o escaneo de frecuencia es simplemente una aplicación repetida de señales en pasos de frecuencia, desde un valor inicial hasta un valor final que abarque el rango de armónicos a ser considerados (Das,2012). Variando la frecuencia es posible obtener diferentes impedancias que pueden graficarse para obtener una indicación de las condiciones de resonancia en la red. La figura 1 muestra un escaneo de frecuencia del módulo de impedancia contra la frecuencia. La resonancia paralela ocurre en los picos, lo que da las impedancias máximas y la resonancia en serie en los puntos más bajos de las gráficas de impedancia. La figura 1 muestra resonancias en paralelo a dos frecuencias $fp1$ y $fp2$ y resonancias en serie en $fs1$ y $fs2$.

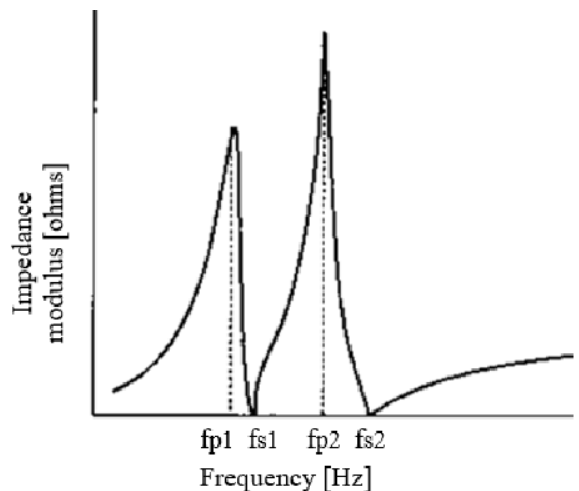


Fig. 1. Escaneo de frecuencia mostrando resonancias en serie y en paralelo [4].

Ambos tipos de resonancia, serie y paralelo, ocurren cuando las reactancias inductiva y capacitiva se igualan a un cierto valor de frecuencia, debido a que ambas dependen en forma contraria de dicha frecuencia. Esto se expresa como $X_L = X_C$.

La figura 2 muestra la resonancia en paralelo, donde la inductancia y la capacitancia forman una impedancia infinita, evitando la circulación de corriente a través de ellas. Como consecuencia de lo anterior, solo la resistencia permanece como elemento opositor a la circulación de corriente, generándose por tanto una sobrecorriente en el circuito.

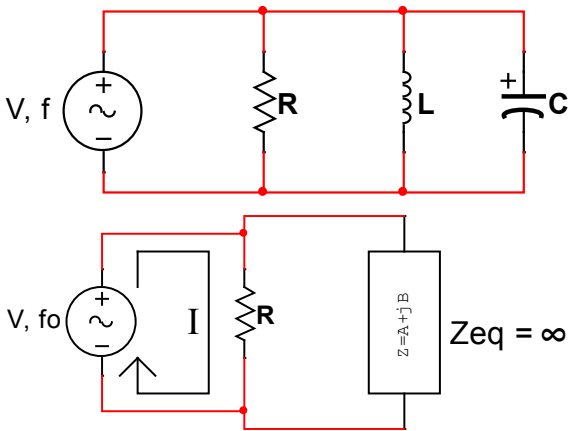


Figura 2. Resonancia en paralelo.

Por otro lado, la figura 3 muestra que en la resonancia serie las reactancias inductiva y capacitiva forman una impedancia de cero ohms, permaneciendo nuevamente la resistencia como el único elemento pasivo para oponerse a la circulación de corriente, produciéndose nuevamente altas corrientes que ocasionarán altos voltajes en el sistema.

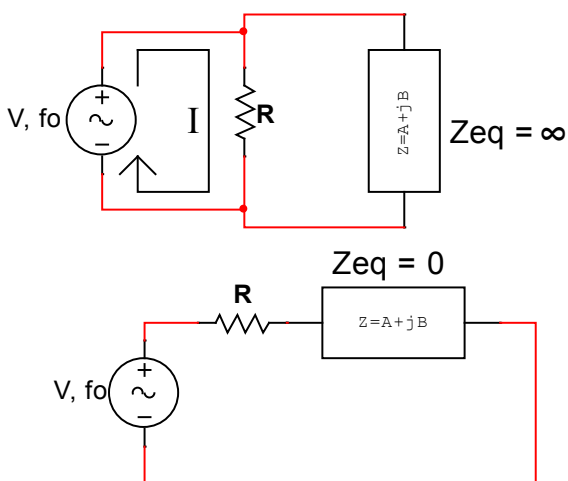


Figura 3. Resonancia serie.

Como ya se ha mencionado, ambos fenómenos de resonancia pueden ocasionar daños severos en el sistema y por esa razón es importante detectarlos. En este sentido es muy importante realizar un modelado adecuado de los elementos que componen el circuito, a fin de que los resultados obtenidos puedan ser confiables.

Se utiliza el *Alternative Transient Program* (ATP) para realizar este análisis debido a ser un software ampliamente usado históricamente para la simulación de transitorios electromagnéticos. Todos los parámetros de los elementos del circuito deben ser introducidos en unidades físicas al ATP. Considerando que generalmente se tiene disponibles valores en por unidad de los parámetros de los elementos de un sistema eléctrico, puede ser necesario convertir estos valores en por unidad a valores físicos de los elementos.

Este trabajo presenta el modelado de los elementos de un sistema de eléctrico de potencia y su integración en un archivo de datos de entrada al ATP para realizar un barrido de frecuencia que muestra los valores de frecuencia en los cuales existan fenómenos de resonancia serie o paralelo. Estas frecuencias resonantes deben tenerse en cuenta siempre que se requiera instalar nuevos equipos que pudieran introducir señales con esas mismas frecuencias, lo que ocasionaría los efectos indeseables de sobrevoltaje y sobrecorriente.

CASO DE ESTUDIO SISTEMA POR MODELAR

El escaneo de frecuencia se realizará sobre un sistema de prueba de 400 kV, el cual se muestra en la figura 4. El nodo de interés es el denominado como LAP400, una subestación eléctrica en un nivel de voltaje de 400 kV. Existen dos subestaciones adyacentes denominadas TEX400 y LAP400, ambas interconectadas a la subestación LAP400

mediante dos líneas de transmisión de 400 kV (A3Z10, A3Z20, A3850, A3950). Se modelan tres bancos de potencia de 400/230 kV, adicionando un nodo en 230 kV denominado LAP230 en el cual, además, se modela una carga. Este circuito de interés se ilustra en la figura 4.

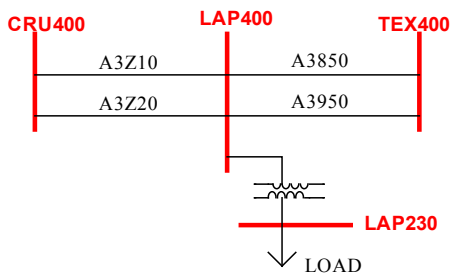


Figura 4. Circuito de interés.

DATOS NECESARIOS PARA EL MODELADO DE ELEMENTOS

De acuerdo con el sistema que se desea modelar, los datos necesarios son los siguientes:

- Equivalentes de Thevenin en subestaciones adyacentes, para representar el efecto de todo el sistema.
- Parámetros de líneas de transmisión: impedancia serie y admitancia en derivación.
- Reactancias de transformadores
- Potencia activa y reactiva en la carga

El circuito preparado para la simulación en ATP se muestra en la figura 5.

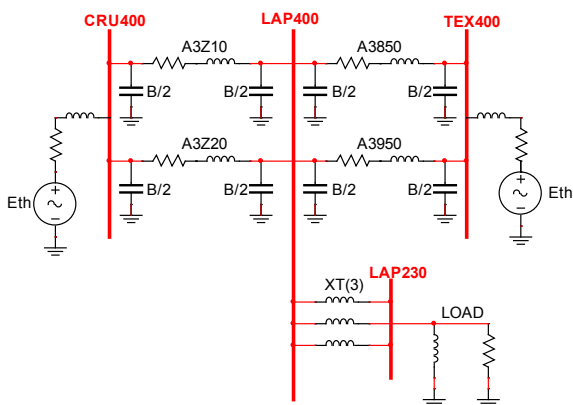


Figura 5. Sistema de prueba para la simulación en ATP.

Todos los parámetros del circuito anterior deben estar en unidades físicas, por ejemplo, ohms para resistencias y reactancias. En caso de disponer de valores en por unidad de los elementos del circuito, será necesario convertirlos a valores físicos considerando una potencia base de 100 MVA.

CÁLCULO DE PARÁMETROS

a. Equivalentes de Thevenin.

Los equivalentes de Thevenin usualmente se encuentran disponibles en las bases de datos de las empresas eléctricas, aunque generalmente se encuentran dados en valores de por unidad. Para el sistema de prueba se consideran los siguientes valores en por unidad de los equivalentes de Thevenin.

Node	Thevenin impedance (p.u.)		
	R (p.u.)	X (p.u.)	Z (p.u.)
TEX400	0.00093	0.00505	0.00093 + j0.00505

Tabla i. Equivalente de thevenin en el nodo tex400.

Como el ATP utiliza unidades físicas en vez de valores en por unidad, es necesario realizar la conversión adecuada sobre un voltaje base de 100 MVA y voltajes base acorde a los voltajes del sistema. Los valores físicos para la impedancia de Thevenin en el nodo TEX400 se muestran en la tabla II.

Nodo	R (ohms)	L (mH)
TEX400	1.488	21.43
CRU400	3.12	35.23

Tabla II. Parámetros de los equivalentes de thevenin para el archivo de entrada al ATP.

b. Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión se modelan mediante su equivalente pi, el cual considera la impedancia serie de la línea de transmisión y la capacitancia repartida por la mitad en

cada extremo de la línea. La tabla III muestra parámetros de muestra en por unidad para las líneas de transmisión del sistema de prueba.

L.T.	Parameters		
	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
A3850 A3950	0.0005	0.00612	0.18683
A3Z10 A3Z20	0.00021	0.00255	0.07798

Tabla III. Parámetros de líneas de transmisión.

Estos valores en por unidad se convierten a unidades físicas sobre una potencia base de 100 MVA y voltajes base acordes a los voltajes del sistema. Los valores físicos obtenidos para las líneas de transmisión se muestran en la tabla IV.

Node	Transmission line parameters		
	R (ohms)	L (mH)	$C/2$ (mF)
A3850	0.8	25.97	0.1548
A3950	0.8	25.97	0.1548
A3Z10	0.336	10.82	0.0646
A3Z20	0.336	10.82	0.0646

Tabla IV. Parámetros de líneas de transmisión para el archivo de entrada del ATP.

Es posible colocar nodos intermedios fraccionando proporcionalmente los parámetros anteriores si se requiere mayor exactitud.

c. Transformadores.

Los transformadores se modelan con su impedancia de secuencia positiva de primario a secundario. El sistema de prueba indica el siguiente valor para la impedancia de secuencia positiva del banco de transformadores en el nodo LAP400:

$$X_{ps} = 0.3369 \text{ p.u.}$$

Este valor en por unidad se convierte a unidades físicas a la frecuencia fundamental, obteniendo el siguiente valor para el archivo de entrada al ATP:

$$X_{ps} = 142.97 \text{ mH}$$

d. Carga

La carga se modela como una impedancia pasiva constante (Anderson,1977). La información necesaria para el modelado de la carga es la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q), las cuales serán convertidas a resistencia e inductancia para poder introducirlas al ATP, como se muestra a continuación:

$$P = 550 \text{ MW}$$

$$Q = 130 \text{ MVar}$$

$$R = V^2 / P = 400^2 / 550 = 290 \text{ ohms}$$

$$X = V^2 / Q = 400^2 / 130 = 1230.8 \text{ ohms}$$

A partir de la reactancia anterior, se calcula el valor físico de la inductancia correspondiente, teniendo entonces la información necesaria en lo que a carga se refiere, para el archivo de datos de entrada del ATP. Esta información se muestra en la tabla V.

Elemento	R (ohms)	L (mH)
	CARGA	290

Tabla V. Parámetros de la carga para el ATP.

ARCHIVO DE ENTRADA PARA EL ATP

Una vez que se tienen todos los parámetros físicos, se puede armar el archivo de datos de entrada del ATP de acuerdo con las reglas establecidas en (Leuven EMTP Center,1977). Se puede proceder entonces a realizar las simulaciones necesarias.

RESULTADOS

La figura 6 muestra resultados de las simulaciones para diferentes condiciones operativas del sistema. Se marcan las frecuencias resonantes en serie y paralelo, cuya identificación es el objetivo del presente análisis.

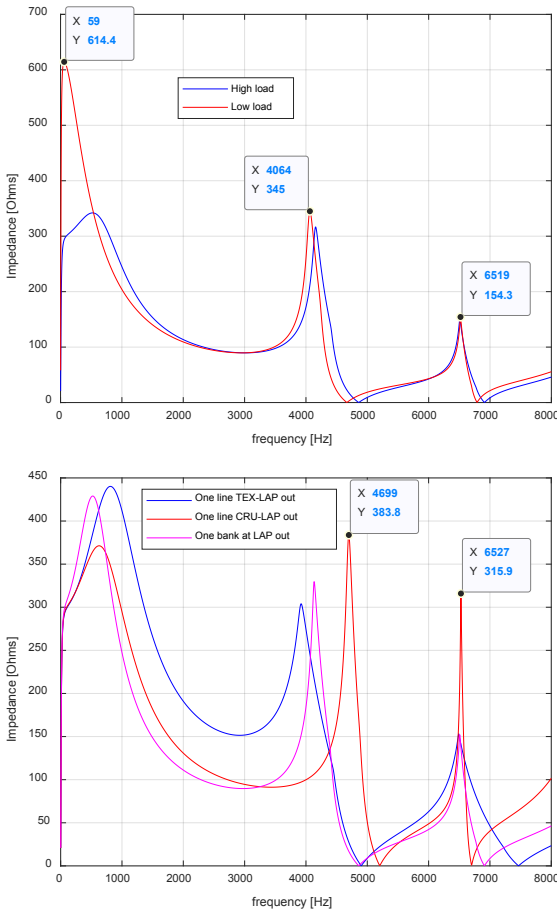


Figura 6. Simulaciones para dos condiciones de operación diferentes.

La primera gráfica muestra la simulación de la red completa con dos condiciones de demanda, la curva azul en demanda máxima y la curva roja en demanda mínima. Se visualizan rápidamente algunas frecuencias resonantes en serie y en paralelo en los puntos donde existen picos de las gráficas. Un resultado interesante a notar es que se presenta una resonancia en paralelo a casi la frecuencia fundamental de 60 Hz. Esto indica

que se pudieran presentar sobrevoltajes y/o sobrecorrientes en condiciones normales de operación, por lo que sería conveniente considerar la implementación de algún medio limitador de corriente. En este caso no sería recomendable un filtro de armónicas, ya que afectaría también a la señal fundamental.

La segunda gráfica muestra simulaciones en condición de demanda máxima y tres casos diferentes de red incompleta. En azul se muestra una línea del nodo TEX al nodo LAP desconectada, en rojo una línea del nodo CRU al nodo LAP desconectada y en rosa un banco de transformadores en el nodo LAP desconectado. Se observa que la topología de la red tiene impacto en las frecuencias de resonancia, por lo que se sugiere realizar diversas simulaciones en función de las condiciones operativas esperadas.

COMENTARIOS FINALES

Se ha mostrado el procedimiento para modelar elementos de un sistema eléctrico de potencia a fin de poder integrarlos en un archivo de datos de entrada para el programa *Alternative Transient Program* (ATP). Se han realizado las simulaciones correspondientes obteniendo resultados congruentes de acuerdo con lo esperado.

RESUMEN DE RESULTADOS

Las simulaciones realizadas muestran los valores de frecuencia a las cuales se presentan fenómenos de resonancia en el sistema eléctrico de muestra. También se puede notar que la topología del sistema impacta en las frecuencias resonantes, corriéndolas hacia uno u otro lado, pero dentro de un cierto rango de valores. Se detectó además una frecuencia resonante a un valor cercano a la frecuencia fundamental, situación que pudiera ocasionar sobrevoltajes y/o sobrecorrientes en condiciones normales de operación.

CONCLUSIONES

Se debe realizar un modelado apropiado de los elementos de un sistema eléctrico a fin de obtener resultados congruentes al realizar un barrido de frecuencia con cualquier programa apropiado para ello. El software *Alternative Transient Program* (ATP) es una herramienta muy útil para realizar este tipo de estudios. Los resultados obtenidos pueden ser de gran utilidad en una situación real, ya que se detectan frecuencias resonantes que deben evitarse al introducir nuevos equipos, es decir, se debe analizar si los nuevos equipos a instalar en el sistema, sobre todo dispositivos de estado sólido y con componentes electrónicas de potencia, pueden inyectar señales con frecuencias iguales o cercanas a las frecuencias resonantes, en cuyo caso sería necesaria la implementación de filtros apropiados para su mitigación.

RECOMENDACIONES

Un trabajo posterior al presente implicaría el diseño de filtros de señales armónicas que permitan mitigar los efectos adversos de las frecuencias resonantes. Se recomienda nuevamente utilizar el *Alternative Transient Program* (ATP) para realizar esta parte del trabajo, ya que es un software ampliamente usado y probado para este tipo de estudios.

REFERENCIAS

Anderson, P.M., "Power system control and stability", 1st Ed., 1977, The Iowa State University Press.

Cong Liu, Yuqing He, Ke Dai, Yong Kang, "Industrial power distribution system harmonic resonance problem and solution with shunt active power filter". IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Das, J.C., "Power system analysis. Short-circuit, load flow and harmonics", 1st Ed., 2012, CRC Press.

Leuven EMTP Center. *Alternative Transient Program Rule Book*, 1987.

Leuven EMTP Center. *Alternative Transient Program Theory Book*, 1987.

Luo, An, et.al, "A Novel Three-Phase Hybrid Active Power Filter With a Series Resonance Circuit Tuned at the Fundamental Frequency", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, Vol 56, Issue 7, pp. 2431–2440.

Subjak, J.S., McQuilkin, J.S., "Harmonics-causes, effects, measurements, and analysis: an update," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1990, Vol 26, Issue 6, pp. 1034–1042.

Wilcox, M., 1976. "Differential Transistor Pair Integrated Circuit Oscillator With L-C Tank Circuit". Patent No. US4063193A