



Knowledge to make your life easier

Anatomía de un Blackout

Jorge Cárdenas

Adneli Consultant, Spain

Jorge.cardenas@adneli.com

www.adneli.com

Mayo 2025

Citar: J. PAIME, 2025, 3, 7-10

Síguenos en: <https://www.linkedin.com/company/adneli-consultant/?viewAsMember=true>

Anatomía de un Blackout

Resumen

Aunque es una palabra inglesa, el término blackout se refiere por lo general al colapso total de un sistema eléctrico, coloquialmente conocido como “apagón”, pero siempre existe la inquietud de como algo que se considera estable y seguro, de pronto puede desaparecer e instalarse el caos. En realidad, el sistema eléctrico puede volverse caótico y si bien, por lo general, permanece fuertemente unido por las leyes físicas, ocurren circunstancias en las cuales esas leyes físicas se vuelven en nuestra contra y nuestro sistema “perfecto” de pronto descubre sus debilidades. El presente artículo tiene como propósito ilustrar de modo teórico el cómo una simple maniobra, como es el de desconectar un capacitor de 50 MVAR, maniobra perfectamente normal en la operación diaria en un sistema con varios GW de potencia operando, puede desatar el caos al producirse un fenómeno no amortiguado, el cual, por lo general, es muchas veces poco estudiado. No se pretende insinuar que este fenómeno tenga relación con algún caso real, ya que otra vez, este es un ejercicio teórico donde cualquier parecido con la realidad es meramente pura coincidencia.

Palabras clave: Oscilaciones de potencia, amortiguamiento.

Abstract

The term blackout usually refers to the total collapse of an electrical system. Although in general terms, electrical systems have a high degree of safety in their operation, there is concern that something that is considered stable and safe can suddenly change and chaos is present. The electrical system can become chaotic, and while it usually remains tightly bound together by physical laws, circumstances occur in which those physical laws turn against us and our "perfect" system suddenly shows its weaknesses. The purpose of this article is to illustrate in a theoretical way how a simple maneuver, such as disconnecting a 50 MVAR capacitor, a perfectly normal maneuver in daily operation in a system with several GW of power operating, can unleash chaos when an undamped phenomenon occurs, which generally, it is often little studied. It is not intended to insinuate that this phenomenon has any relation to any of those that occurred around the world, since again, this is a theoretical exercise where any resemblance to reality is merely pure coincidence.

1 Introducción

Cuando se analizan los estados transitorios, en los sistemas eléctricos se pone mucho énfasis en el análisis de fenómenos como la estabilidad transitoria y las corrientes de cortocircuito. Los primeros sirven para examinar los límites de operación segura del sistema eléctrico y los segundos para el dimensionamiento del aparellaje y la definición y ajustes de los equipos de protección principalmente. Por lo general, se pone poco énfasis y a veces ninguno en el efecto causado por las pequeñas oscilaciones provocadas por maniobras u otros eventos de poca entidad, como la conexión y desconexión de cargas. A pesar de que por lo general este tipo de maniobras producen un transitorio que se amortigua y prácticamente no se percibe, no debemos olvidar que un sistema eléctrico en su más simple expresión es un sistema RLC y como tal, está sujeto a todos los fenómenos que implican los transitorios causados por cambios en cualquiera de estos parámetros, sean de la magnitud que sean.

La función de transferencia de un circuito RLC se puede expresar como sigue:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{Cs}}{R + Ls + \frac{1}{Cs}} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (1)$$

El cual en su forma general simplificada puede expresarse como:

$$\frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

Se obtienen las equivalencias:

a) Frecuencia natural no amortiguada:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

b) Factor de amortiguamiento:

$$\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4)$$

El factor de amortiguamiento también se puede definir como:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (5)$$

Donde σ y ω son la parte real e imaginaria de los valores propios, o raíces del polinomio del denominador $[\sigma + j\omega](\text{sec}^{-1})$.

El amortiguamiento es considerado satisfactorio si todos los modos de oscilación tienen valores $\xi \geq 5\%$. Si $\xi = 5\%$, la amplitud de las oscilaciones se reduce a más o menos, 33%

después de 3 periodos completos, siendo la constante de tiempo de caída de la amplitud $1/|\sigma|$.

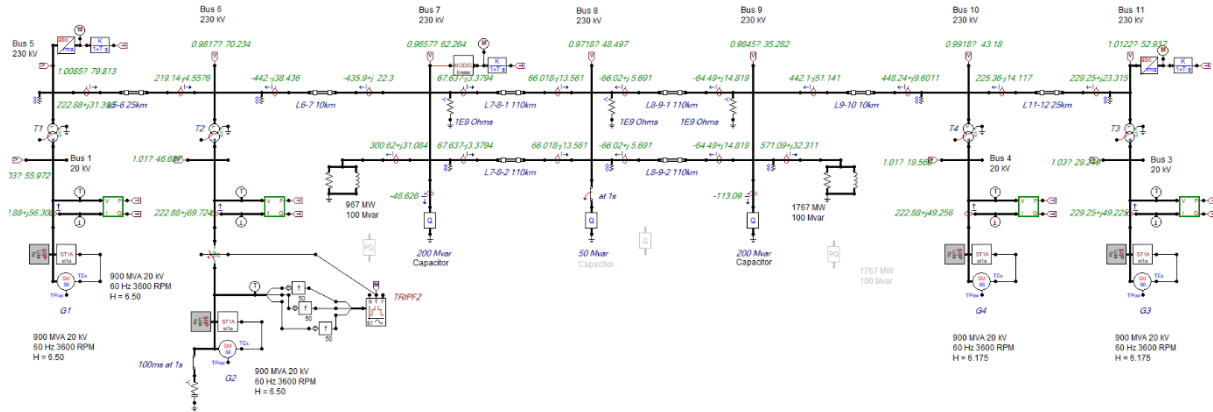


Figura 1 Modelo de red usado en las simulaciones. En la barra 8 se ha colocado el capacitor que va a desconectarse. Los voltajes están en valores unitarios y los flujos de potencia en MVA. En el generador G2 se ha simulado un relé de sobre frecuencia para dispararlo cuando la frecuencia excede los 60.5 Hz por más de un segundo.

2 Simulaciones efectuadas

2.1. Caso1 – Sistema eléctrico operando en estado estable antes de la realización de la maniobra.

Podemos observar que los parámetros básicos como son la tensión, la frecuencia y las potencias generadas por los grupos del 1 al 4 se mantienen estables.

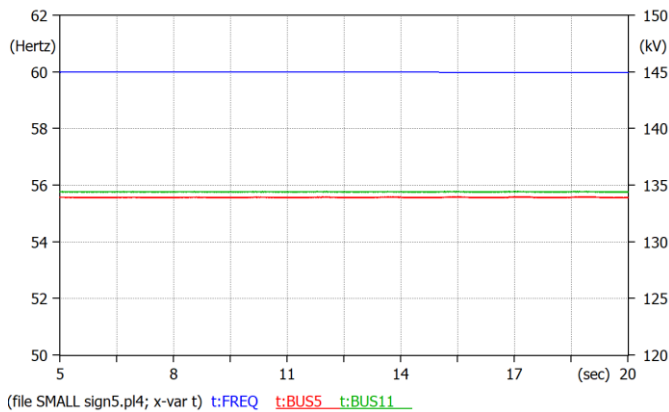


Figura 2 Voltajes en las barras 5 y 11, y frecuencia en la barra 7.

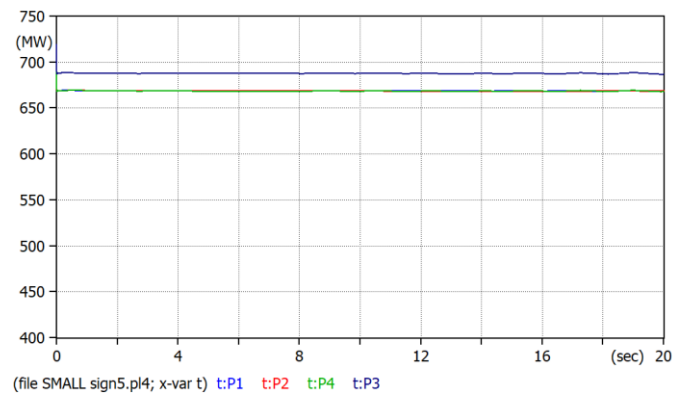


Figura 3 Potencias activas generadas por todos los grupos.

2.2. Caso2 – Maniobra de desconexión en el primer segundo del capacitor de 50 MVAR conectado en la barra 8.

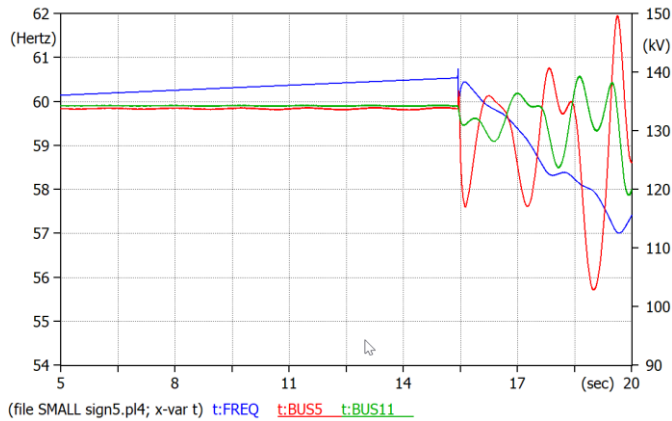


Figura 4 Voltajes en las barras 5 y 11, y frecuencia en la barra 7.

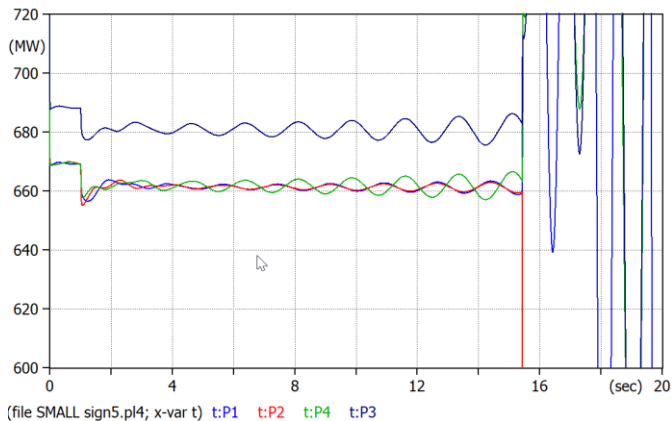


Figura 5 Potencias activas generadas por todos los grupos.

Podemos observar que luego de la desconexión del capacitor de 50 MVAR en la barra 8, se producen oscilaciones de potencia no amortiguadas, mientras la frecuencia sube sin control. Debemos comentar que el modelo no se han simulado dispositivos de control de la velocidad en los generadores, tan solo reguladores de voltaje. Con esto lo que se pretende es el tener una aproximación a un sistema eléctrico donde la mayoría de la generación esté compuesta por generadores a base de energía solar del tipo grid following. Evidentemente, al haberse modelado los generadores como máquinas síncronas, el comportamiento real será diferente, pero al tratarse de un ejercicio teórico para observar cómo podría producirse un colapso de un sistema eléctrico producido por una simple maniobra, creemos haber logrado nuestro objetivo.

Como una comparación con un sistema real, tenemos el de la Figura 6, donde podemos observar el comportamiento de la frecuencia en los sistemas norte (azul) y centro-sur (rojo) del caso chileno. Puede notarse que el sistema norte, al haberse quedado con la mayoría de generación a base de energía solar renovable, fue incapaz de regular la frecuencia, lo que hubiera sido posible si se hubiera dispuesto con máquinas síncronas con regulación secundaria o controles en los inversores que

emularan el comportamiento de las máquinas síncronas en estos aspectos.

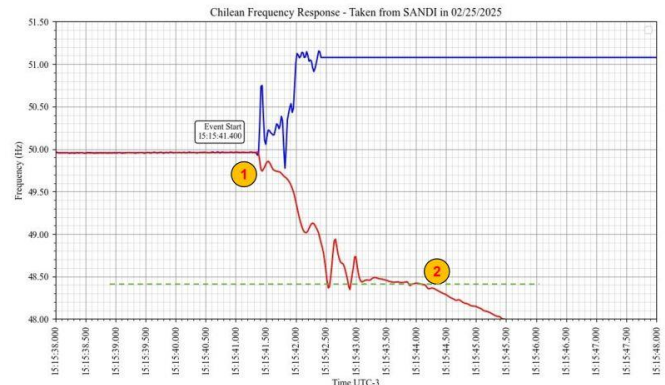


Figura 6 Evolución de la frecuencia en los sistemas norte (azul) y centro-sur (rojo) luego de la desconexión de las dos líneas de 500 kV que conectaban ambos sistemas.

3 Conclusiones

- El artículo muestra la importancia de realizar estudios de modos de frecuencia de oscilación y la respuesta del sistema eléctrico ante oscilaciones no amortiguadas de baja magnitud.
- Deben de proveerse en los sistemas eléctricos de dispositivos que identifiquen esta clase de fenómenos y que sean capaces de tomar acciones automáticas tales como las desconexiones de cargas no críticas o generadores en puntos clave de la red con la finalidad de mantener la integridad de la misma y evitar colapsos completos de la misma o daños en los equipos, principalmente los generadores.

4 Referencias

- [1] Paul M. Anderson, A.A. Fouad. "Power System Control and Stability." IEEE Press.
- [2] Perry Clements. "Kundur Two-Area Small Signal Stability based on Example 12.6 in P. Kundur, Power System Stability and Control, 1994, and Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control, IEEE Technical Report PES-TR18, 2015."
- [3] Jorge Cárdenas. "Implementation of a SIPS in the Interconnection Between the Turkish and ENTSO-E Power Systems to Counteract Propagation of Major Disturbances." GE Digital Energy 2010.
- [4] Jorge Cardenas. "Impact of Network Protection in the prevention of Major Events in the Power System." CIGRÉ Russia, 2013.