

# CASO DE ESTUDIO: *SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE RE-MAGNIFICACIÓN*

Escrito por Jose Miguel Pizarro Viales, 2025-06-30.

## SINOPSIS

En la industria es común usar bancos de capacitores para diferentes propósitos, generalmente asociados a la corrección del factor de potencia. A pesar de su importante labor, estos elementos acarrearán una serie de problemas de calidad de energía al momento de conectarlos a la red. Uno de estos fenómenos es la re-magnificación, la cual consiste en la amplificación de perturbaciones en la tensión a causa del tanque de resonancia formado por la red y el banco de capacitores. En esta nota técnica se elaborará una simulación mediante la cual se puede comprender en detalle la naturaleza del fenómeno.

## CONMUTACIÓN DE CAPACITORES

En las redes eléctricas, los bancos de capacitores se utilizan comúnmente para compensar el factor de potencia de cargas predominantemente inductivas. No obstante, su incorporación a la red requiere especial atención debido a su comportamiento transitorio durante la conmutación [1].

Una característica fundamental de los capacitores es su incapacidad para soportar cambios instantáneos en la tensión aplicada en sus terminales. Esta propiedad, si bien contribuye a la estabilización de la tensión en condiciones estacionarias, puede generar perturbaciones significativas durante el proceso de conexión al sistema eléctrico [2][3].

Cuando un banco de capacitores descargado se conecta en el instante en que la onda de tensión alcanza su valor máximo o mínimo, se produce un desajuste entre la tensión inicial del capacitor y la tensión de red [4]. Esta diferencia puede provocar una caída abrupta de la tensión, que en casos extremos puede alcanzar valores cercanos a 0 V, constituyendo una distorsión severa desde el punto de vista de la calidad de la energía [3].

De forma análoga, si un banco de capacitores completamente cargado se conecta cuando la onda de tensión se encuentra en su valor máximo, pero desfasado 180°, se genera un produce un cambio repentino en la tensión, que, dependiendo del tamaño del banco, puede alcanzar una magnitud de hasta 2 pu [3][4].

Ambos escenarios inducen perturbaciones transitorias de alta frecuencia en la onda de la tensión [2]. Dichas oscilaciones poseen una frecuencia igual a la frecuencia natural del sistema en ese punto. La duración de la perturbación, por su parte, está

directamente relacionada con la relación X/R del circuito. Valores altos de esta relación indican bajo amortiguamiento, lo que da lugar a oscilaciones de mayor duración; en cambio, valores bajos implican una rápida disipación de energía y, por tanto, una perturbación más breve [5].

## RE-MAGNIFICACIÓN

La resonancia en sistemas eléctricos puede producirse al conectar un banco de capacitores de manera tal que se forme un tanque resonante con la propia impedancia de la red. En consecuencia, existe una frecuencia natural a la cual el sistema puede entrar en resonancia.

La presencia de perturbaciones de alta frecuencia, como las originadas por la conmutación de bancos de capacitores, puede excitar dicha frecuencia natural, generando fenómenos resonantes que amplifican significativamente la magnitud de estas perturbaciones [6].

Este análisis se enfoca en la resonancia paralela inducida por la conmutación de capacitores en redes de distribución [2][7]. En particular, se considera un caso simplificado en el que un banco de capacitores se conecta en paralelo con una carga, como se muestra en la Fig 1 [4][8]. Desde el punto de vista del transformador de distribución, este arreglo equivale a un circuito RLC paralelo, cuya frecuencia natural  $f_0$ , la cual está dada por la ecuación (1) donde  $L$  es la inductancia de la carga,  $C$  es la capacitancia del banco de capacitores,  $f$  es la frecuencia nominal de la red eléctrica y  $Q_l$  y  $Q_c$  son respectivamente las potencias reactivas inductiva y capacitiva consumidas en dicho punto.

$$f_0 = (2\pi\sqrt{LC})^{-1} = f\sqrt{Q_l/Q_c} \quad (1)$$

Bajo ciertas condiciones, las perturbaciones transitorias generadas por la conmutación de un banco de capacitores en un punto de la red pueden coincidir con la frecuencia natural de otro circuito RLC ubicado en un punto distinto. En tales casos, ocurre un fenómeno de resonancia remota o re-magnificación, en el cual una oscilación iniciada en un punto puede amplificarse en otro debido a la coincidencia de sus frecuencias naturales [9].

Para ejemplificar este efecto, nuevamente se recurre al ejemplo de la Fig 1, en la que se instala un segundo banco de capacitores en la subestación [8]. Dado que se consideró el sistema balanceado, se recurre a un modelo monofásico de secuencia positiva para

representar el circuito. A partir de este modelo, la impedancia equivalente  $Z_a$  aguas abajo del banco de la subestación puede calcularse mediante las ecuaciones (2) y (3), donde  $R$  y  $X_l$  son respectivamente la resistencia y reactancia inductiva de la carga RL,  $X_c$  es la reactancia del banco de capacitores conectado a la carga,  $Z_{carga}$  es la impedancia equivalente de la carga RL y el banco de capacitores,  $R_t$  y  $X_t$  son respectivamente la resistencia y reactancia del transformador de distribución y  $R_{li}$  y  $X_{li}$  son respectivamente la resistencia y reactancia de la línea de transmisión.

$$Z_{carga} = (R^{-1} + (jX_l)^{-1} + (-jX_c)^{-1})^{-1} \quad (2)$$

$$Z_a = R_a + jX_a = R_{li} + jX_{li} + R_t + jX_t + Z_{carga} \quad (3)$$

Dado que el nuevo banco de capacitores se conecta en paralelo con la impedancia  $Z_a$ , el sistema presenta una configuración análoga a un circuito RL en paralelo con un capacitor [8].

A partir de tal configuración, mediante las ecuaciones (4) y (5) se dimensiona la capacitancia monofásica  $C_s$  de modo que coincida con la frecuencia de resonancia previamente determinada, donde  $R_a$ ,  $L_a$  y  $X_a$  son respectivamente la resistencia, inductancia y reactancia equivalente aguas abajo del banco de capacitores [6]. Posteriormente, mediante la ecuación (6) se calcula la potencia reactiva trifásica correspondiente al banco de capacitores en la subestación  $Q_s$  garantizando que la configuración contribuya eficazmente al fenómeno de remagnificación.

$$L_a = X_a(2\pi f)^{-1} \quad (4)$$

$$C_s = L_a(R_a^2 + (2\pi f_0 L_a)^2)^{-1} \quad (5)$$

$$Q_s = 6\pi f_0 C_s V_{rms}^2 \quad (6)$$

## SIMULACIÓN

Para comprender este fenómeno se implementó una simulación del sistema de la Fig 1, en el cual se modela una línea de transmisión, la cual comienza en la subestación y alimenta a una carga RL conectada a la red. Además, los parámetros empleados en la simulación se muestran en la Tabla 1 y la Tabla 2. Cabe destacar que se planteó el sistema para que fuese balanceado, lo que permite recurrir al equivalente monofásico de secuencia positiva para llevar a cabo el dimensionamiento de los bancos de capacitores

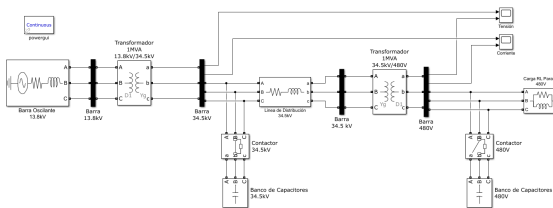


Fig 1. Diagrama de la red eléctrica bajo estudio.

Tabla 1. Potencia trifásica consumida por las cargas conectadas al sistema.

Elemento	Potencia
Carga resistiva	250 kW
Carga inductiva	220 kVAr
Banco de capacitores (Carga)	-4.5 kVAr
Banco de capacitores (Subestación)	-10 kVAr

Tabla 2. Valores del equivalente monofásico del sistema balanceado (Potencia base: 1 MVA, frecuencia base: 60 Hz)

Elemento	Tensión base (kV)	Impedancia (pu)
Carga resistiva	0.48	12.0
Carga inductiva	0.48	j13.6364
Banco de capacitores (Carga)	0.48	-j666.6667
Transformadores	34.5	0.006 + j0.05
Línea de transmisión	34.5	0.00126 + j0.00168
Banco de capacitores (Subestación)	34.5	-j300.5894

Los parámetros especificados fueron seleccionados de manera que la frecuencia natural sea de 424.3 Hz en la barra de la carga y de la subestación. De esta forma estudiaron dos escenarios. En el primero se conmutó el banco de capacitores del lado de la carga mientras que el banco de la subestación se mantuvo conectado en todo momento. En el segundo caso se invirtieron los roles ya que el banco de la carga se mantuvo conectado mientras que se conmutó el banco de la subestación.

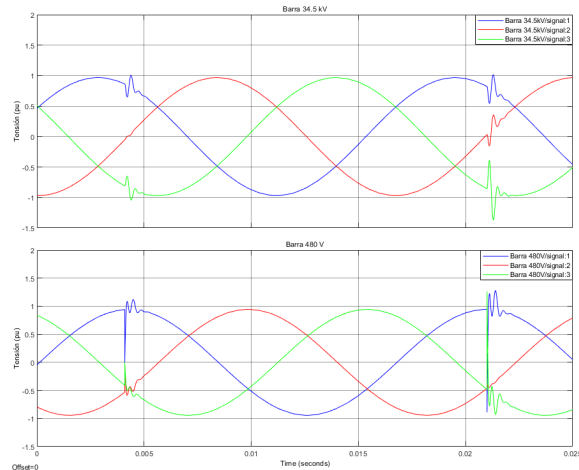
### 1) Conmutación del banco del lado de la carga

A continuación se presentan la tensión y corriente medidas en las barras de 34.5 kV y 480 V, respectivamente, cuando se realiza la conmutación del banco de capacitores ubicado en el lado de la carga.

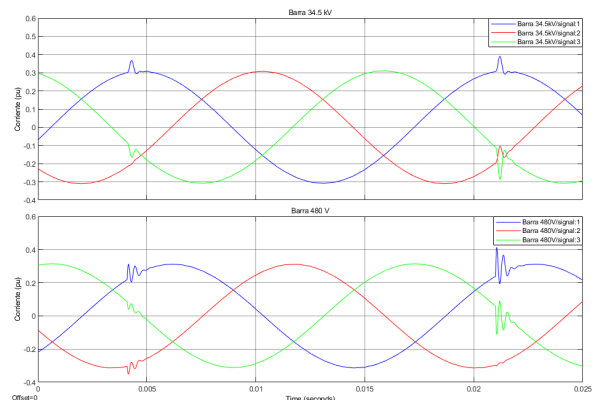
Tal como se observa en la Fig 2, la conexión del banco de capacitores se efectúa a los 4.1 ms, generando una alteración significativa en la tensión de la fase A (curva azul) en la barra de 480 V. Específicamente, se aprecia una caída transitoria a 0 pu, seguida de una sobretensión del 15 % respecto al valor nominal. Esta perturbación local no permanece confinada al punto de conmutación, sino que se propaga hacia niveles superiores del sistema. Como consecuencia, se induce una sobretensión del 13 % en la barra de 34.5 kV, ubicada en la subestación.

En cuanto a las corrientes, tal como se muestra en la Fig 3, se manifiesta un comportamiento análogo, aunque con magnitudes ligeramente inferiores. Si bien el incremento porcentual no es tan marcado como en el caso de la tensión, los efectos siguen siendo

significativos. En particular, se registra una sobrecorriente del 9 % en la barra de 480 V, la cual a su vez genera una sobrecorriente del 6 % en la barra de 34.5 kV.



**Fig 2.. Tensión en las barras al conmutar el banco de capacitores de la carga.**



**Fig 3.. Corriente en las barras al conmutar el banco de capacitores de la carga.**

Adicionalmente, el banco de capacitores ubicado en el lado de la carga se desconecta a los 12 ms y se vuelve a conectar a los 21 ms. Esta secuencia tiene como propósito generar un desfase de  $180^\circ$  entre la tensión de la fase A y la tensión instantánea del banco de capacitores en el momento de la reconexión.

Tal como se observa en la Fig 2, al reconectar el banco de capacitores en ese instante, se produce una caída abrupta en la tensión de la fase A hasta un valor de  $-0.95$  pu, lo cual representa una subtensión del 195 % respecto al valor nominal. A continuación, se presenta una sobretensión de hasta el 28 % en la misma barra de 480 V, la cual se propaga aguas arriba en el sistema, generando una sobretensión del 19 % en la barra de 34.5 kV de la subestación

En cuanto a las corrientes, los resultados también muestran un incremento considerable. Según la Fig 3,

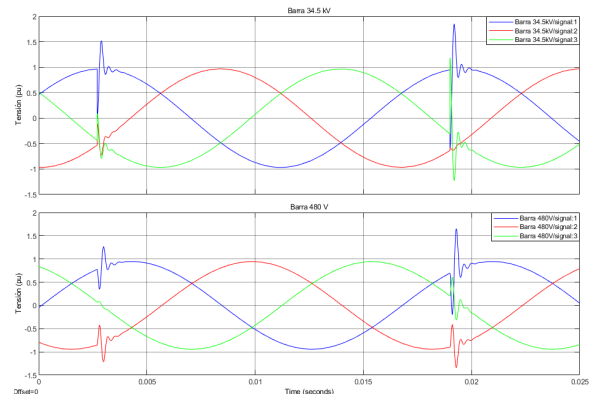
el evento de reconexión provoca una sobrecorriente del 17 % en la barra de 480 V, la cual a su vez induce una sobrecorriente del 8 % en la barra de 34.5 kV. Este comportamiento confirma que las condiciones de carga previa y desfase pueden generar perturbaciones más severas que en el caso de una conexión inicial desde estado descargado.

## 2) Conmutación del banco en la subestación

En las Fig 4 se presentan las fluctuaciones de tensión y corriente observadas en las barras de 34.5 kV y 480 V cuando se conmuta el banco de capacitores ubicado en la subestación.

De acuerdo con la Fig 4, la conexión del banco de capacitores de la subestación a los 2.7 ms, provoca una caída instantánea de la tensión de la fase A en la barra de 34.5 kV hasta un valor de 0 pu, seguida de una marcada sobretensión del 55 %. Esta perturbación se propaga aguas abajo hacia la barra de 480 V, donde se registra una sobretensión del 48 %.

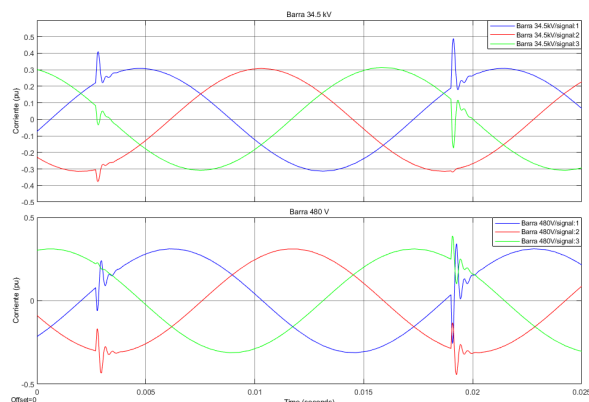
En cuanto a las corrientes, la Fig 5 muestra que, en esta ocasión, el comportamiento es aún más severo. Se observa una sobrecorriente del 18 % en la barra de 34.5 kV, la cual se transmite hacia el lado de baja tensión, generando una subcorriente del 15 % seguida de una sobrecorriente del 16 % en la barra de 480 V.



**Fig 4. Tensión en las barras al conmutar el banco de capacitores de la subestación.**

Posteriormente, el banco de capacitores ubicado en la subestación se desconecta a los 11 ms y se vuelve a conectar a los 19 ms, con el objetivo de provocar un desfase de  $180^\circ$  entre la tensión de la fase A y la tensión del banco de capacitores.

Tal como se observa en la Fig 4, la reconexión del banco cargado genera una caída súbita de la tensión en la barra de 34.5 kV hasta un valor de  $-0.55$  pu, lo que representa una subtensión del 155 % con respecto al valor nominal. Inmediatamente después, se presenta una sobretensión del 88 % en esa misma barra, la cual se propaga aguas abajo, induciendo una sobretensión del 95 % en la barra de 480 V.



**Fig 5. Corriente en las barras al conmutar el banco de capacitores de la subestación.**

En lo relativo al comportamiento de corriente, la Fig 5 evidencia que la conmutación del banco cargado también genera perturbaciones significativas. Se presenta una sobrecorriente del 30 % en la barra de 34.5 kV, la cual induce una subcorriente del 29 %, seguida de una nueva sobrecorriente del 30 % en la barra de 480 V.

## CONCLUSIONES

El fenómeno de re-magnificación puede tener un impacto severo en la calidad de energía, especialmente si no se considera en el diseño y operación del sistema eléctrico. La simulación realizada evidencia que incluso una conmutación realizada en el extremo de carga puede inducir perturbaciones significativas en la subestación, a pesar de que esta se encuentra en un punto eléctricamente fuerte.

Este comportamiento se debe a la formación de un tanque resonante por efecto de la resonancia paralela entre los bancos de capacitores y la red. Esta condición permite que perturbaciones locales se amplifiquen y se propaguen a lo largo del sistema, afectando incluso nodos alejados del punto de origen.

Se comprobó que las perturbaciones resultan particularmente críticas cuando se originan en la subestación, ya que, al tratarse del nodo más robusto del sistema, estas se transmiten con mayor intensidad a otras áreas, donde los equipos pueden ser más susceptibles.

El caso más crítico identificado ocurre al reconectar un banco de capacitores cargado con un desfase de  $180^\circ$  respecto a la tensión de la red, generando fluctuaciones de hasta 200 %, que pueden a su vez re-magnificarse en otros puntos de la red.

Las perturbaciones asociadas a este fenómeno presentan un alto contenido armónico y un régimen altamente transitorio, lo que puede comprometer el funcionamiento de protecciones, convertidores electrónicos, y acelerar el envejecimiento de los componentes aislantes del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] F. C. Baiceanu, F. Munteanu and C. Nemes, "Transient Power Quality Mitigation by Synchronized Capacitor Banks Switching," 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2020, pp. 087-092.
- [2] A. A. Girgis, C. M. Fallon, J. C. P. Rubino and R. C. Catoe, "Harmonics and transient overvoltages due to capacitor switching," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 6, pp. 1184-1188, Nov.-Dec. 1993.
- [3] S. B. Naderi et al., "Investigation on capacitor switching transient limiter with a three phase variable resistance," 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC, Australia, 2017, pp. 1-6.
- [4] Y. Zhong, M. Ma, L. Zhang, B. Hu, W. Zhang and W. Xiao, "Transient Analysis of Capacitor Switching and Breakdown," 2023 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE), Wuhan, China, 2023, pp. 701-711.
- [5] M. M. Saied, "On the analysis of capacitor switching transients," Proceedings. International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002, pp. 134-138 vol.1.
- [6] C. Pongswat and S. Premrudeepreechacham, "Harmonic resonance assessment in low voltage distribution system," 2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004., Singapore, 2004, pp. 264-269 Vol.1.
- [7] Yousin Tang and A. Y. Wu, "Harmonics and system natural frequencies," IEEE-IAS/PCA 2001 Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No.01CH37150), Vancouver, BC, Canada, 2001, pp. 51-58.
- [8] N. D. Rao, S. I. Sporea and A. Sawma, "Analysis of resonance problems and harmonic filter design in power factor correction capacitor applications," Conference Proceedings. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.98TH8341), Waterloo, ON, Canada, 1998, pp. 293-296 vol.1.
- [9] A. Khodabakhshian, R. Hooshmand and G. Isazadeh, "Harmonic resonance and over-voltage assessment during switching of high voltage shunt capacitors in E.R.E.C. network," 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, St. John's, NL, Canada, 2009, pp. 926-930.
- [10] Rodney Tan (2025). Oscillatory Transient Caused by Capacitor Banking Energizing (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51933-oscillatory-transient-caused-by-capacitor-banking-energizing>), MATLAB Central File Exchange. Recuperado 14 junio, 2025.