

ANÁLISIS DE LA CORRIENTE INRUSH DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE LA S.E SAN JOSÉ 500 KV HACIENDO USO DEL RELÉ DE MANDO SINCRONIZADO

1. RESUMEN.

En el presente artículo se analizará los efectos de la energización de un transformador de potencia ubicada en la S.E San José de 500kV, en particular, se mostrará el efecto de la corriente inrush de energización del transformador sobre la onda de tensión en el momento de la energización, con y sin relé de mando sincronizado para el cierre del interruptor. Para las simulaciones de energización del transformador de potencia se utilizará el software de transitorios electromagnéticos ATP Draw V5.6 en el cual se pueden modelar detalladamente los parámetros eléctricos de la red en estudio.

2. INTRODUCCIÓN.

La energización de grandes transformadores de potencia en un sistema eléctrico puede causar efectos negativos tales como: La actuación indebida de la protección diferencial del transformador, deterioro del aislamiento y la estructura mecánica de soporte^[1], activar fenómenos de ferresonancia en determinadas condiciones topológicas de la red^[2] y desconexión de cargas sensibles a las variaciones transitorias de tensión^[3]. Es así que al no haber un equipo que limite la corriente inrush, la energización de un transformador de potencia puede ocurrir en cualquier punto de la onda de tensión, lo cual podría producir grandes corrientes inrush. La corriente inrush es también dependiente del flujo residual en el transformador en el momento de la energización. Existen varios métodos para reducir la corriente inrush de los transformadores durante la energización, en el Perú se tienen implementadas las resistencias de pre-inserción y los relés de mando sincronizado.

3. CONCEPTOS TEÓRICOS.

A. Corriente Inrush en transformadores^[3]

Cuando un transformador es energizado por primera vez, la corriente podría alcanzar valores de hasta 8 veces la corriente nominal. Esta corriente inrush decaerá en forma proporcional a la resistencia serie del devanado del transformador, el tiempo de decaimiento varía de unos pocos ciclos a segundos.

A1. Principales factores que afectan la corriente inrush

a. Punto de la onda de voltaje en el momento de la energización

El punto óptimo para realizar el cierre es cuando la onda de tensión pasa por su punto máximo, en estas condiciones, la corriente inrush será mínima. Si el cierre se realiza cuando la onda de tensión cruza por cero, se tendrá la peor condición y la corriente inrush será máxima.

b. Flujo residual en el núcleo

Los transformadores están hechos de material ferromagnético y tienen el efecto de histéresis, esto significa que tienen flujo residual presente. El tiempo de cierre óptimo, en este caso, es cuando el flujo correspondiente al ángulo de voltaje es igual al flujo residual en el núcleo, tal como se muestra en la Fig. 1.

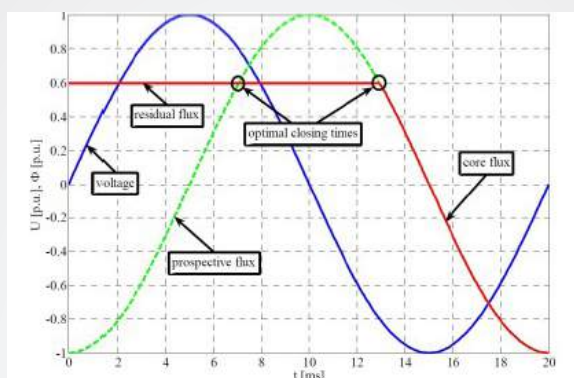


Fig. 1. Tiempo de cierre óptimo para un transformador monofásico

A2. Principales efectos de la corriente inrush

a. Altas corrientes de energización

Cuando un transformador es energizado, la corriente podría alcanzar valores de hasta 8 veces la corriente nominal. Esta corriente decaerá en forma proporcional a la resistencia serie del devanado del transformador, el tiempo de decaimiento varía de unos pocos ciclos a segundos.

b. Inyección de corrientes armónicas

Las corrientes inrush en los transformadores ocasionan la inyección de corrientes armónicas en la red, con predominancia del segundo armónico, ver Fig. 2. Las corrientes inrush también causan caídas de voltaje cuando la impedancia del transformador es más pequeña que la impedancia de la fuente. Esto puede afectar significativamente a clientes industriales.

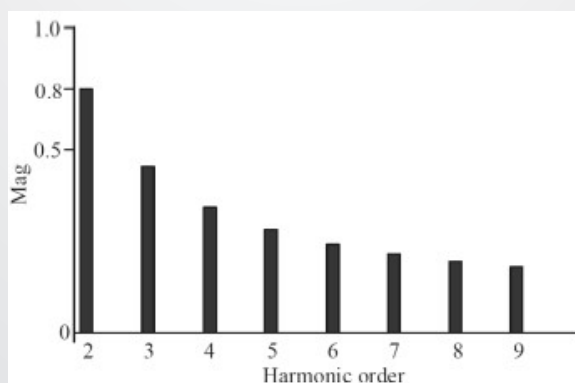


Fig. 2. Espectro de armónicos debido a corrientes inrush

B. Relés de mando sincronizado

El objetivo de los relés de mando sincronizado es desplazar el punto efectivo de establecimiento del cierre o de la apertura de un interruptor para que este ocurra en un punto óptimo de la onda de tensión, fase por fase, buscando disminuir las sobrecorrientes o sobretensiones inherentes a la maniobra. Esta tecnología está ganando adeptos por los siguientes motivos:

- Capacidad, velocidad y precisión de los microprocesadores.
- Desarrollo de mecanismos precisos por parte de los fabricantes de los interruptores.
- Opciones de compensación por temperatura, presión, tensión auxiliar, adaptabilidad a los cambios del interruptor.
- Las principales aplicaciones de los relés de mando sincronizado son:
 - Energización y desenergización de reactores de línea o de barra.
 - Energización de transformadores.
 - Energización de bancos de capacitores.
 - Energización de líneas de transmisión.

4. SIMULACIONES DE ENERGIZACIÓN DEL TRANSFORMADOR S.E SAN JOSÉ 500 KV

A. Características de la red eléctrica en la zona

En nuestro sistema eléctrico, durante la ejecución del proyecto de ampliación de carga de la minera Cerro Verde en la S.E. San José (360 MW), se detectaron problemas de ferresonancia durante la energización de los auto transformadores 500/220/33 kV 600 MVA en la S.E. San José 500kV. De los análisis realizados en [2], se ha verificado que este fenómeno es consecuencia de la topología de la red. El proyecto consta de dos autotransformadores 500/220/33 kV 600 MVA con grupo de conexión YNyn0d1. En la Fig. 3 se muestra el diagrama unifilar de la red eléctrica en estudio.

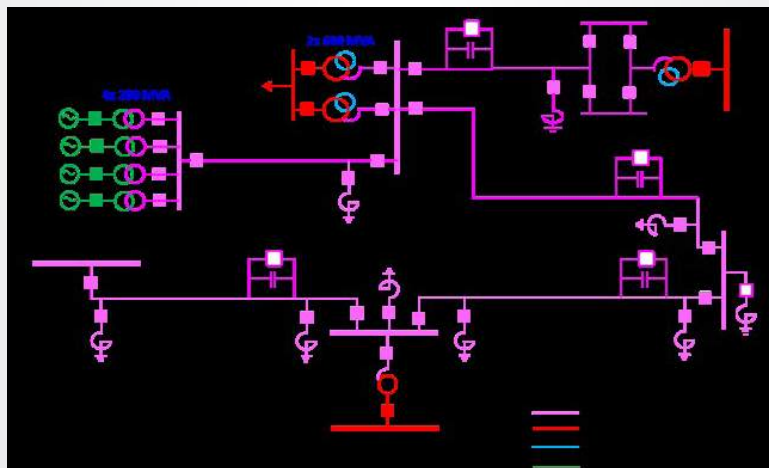


Fig. 3. Diagrama unifilar de la interconexión Centro Sur en 500kV del SEIN

B. Barrido en frecuencia visto desde S.E. San José

Se ha realizado con el software Digsilent el análisis de barrido en frecuencia “visto” desde la barra de 500 kV de la S.E. San José, este análisis se realiza con el fin de determinar la impedancia armónica y su interacción con las corrientes de energización de los transformadores de la C.T Puerto Bravo. Tal como se ha indicado en el ítem II.A, la energización de un transformador de potencia, sin relé de mando sincronizado, ocasiona la inyección de corrientes armónicas con predominancia del armónico de segundo orden (120 Hz). Las simulaciones mostradas en la Fig. 4, en el caso con compensación serie en servicio, muestran que los principales puntos de resonancia son las armónicas de orden 2 (120 Hz) y orden 3 (180 Hz).

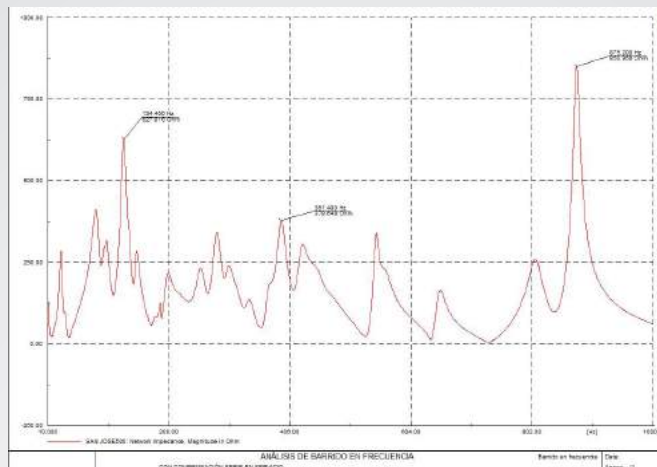


Fig. 4. Barrido en frecuencia considerando en servicio la compensación serie de la línea de 500 kV

Las simulaciones muestran que la compensación serie de la línea de 500 kV Chilca – Poroma – Ocoña – San José – Montalvo, no influye significativamente en la impedancia armónica “vista” desde la barra de 500 kV de la S.E. San José, en la Fig. 5 se muestra el barrido en frecuencia considerando la compensación serie fuera de servicio, nuevamente, se observan puntos de resonancia armónica de orden 2 (120 Hz) y orden 3 (240 Hz). Del análisis de barrido en frecuencia realizado, se observa que existe un riesgo inherente de activar modos resonantes al momento de energizar los transformadores 500/18 kV de la C.T Puerto Bravo sin relés de mando sincronizado.

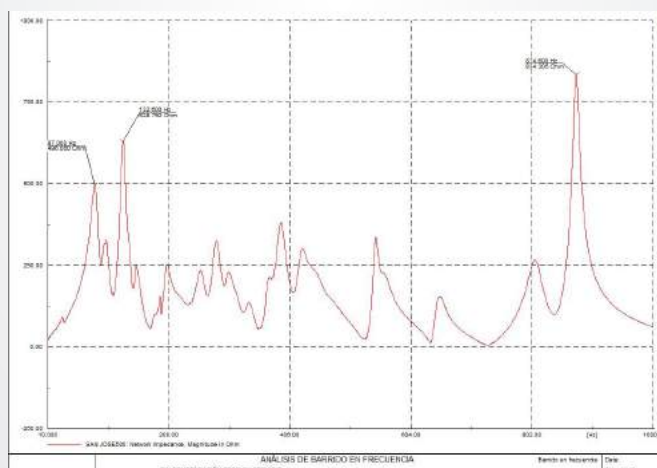


Fig. 5. Barrido en frecuencia considerando fuera de servicio la compensación serie de la línea de 500 kV

C. Modelamiento del transformador en ATP DRAW

Para el análisis transitorio de corrientes inrush o ferroresonancia, es necesario modelar el efecto de la saturación del núcleo magnético [4]. Para modelar la saturación del transformador, se utiliza una rama externa no lineal, la cual utiliza los datos de los ensayos de cortocircuito y de vacío proporcionados por el fabricante, por simplicidad en el modelamiento despreciaremos las pérdidas de excitación. Utilizando la rutina SATURA del ATP, se logra obtener la curva Flujo – Corriente, la cual es ingresada en el software ATP Draw.

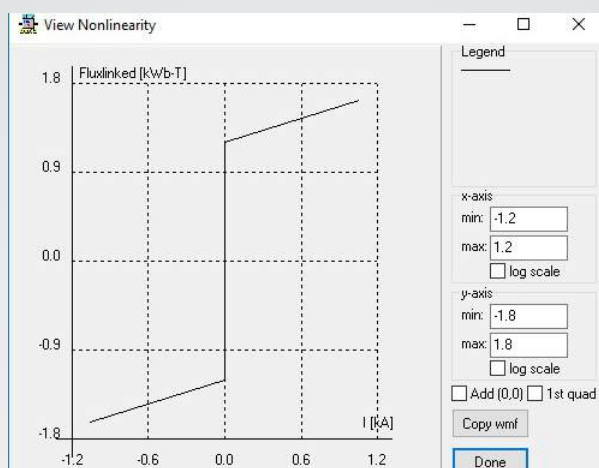


Fig. 6. Curva Flujo – Corriente del transformador ATXF-2

D. Simulaciones con ATP Draw de la energización del transformador de S.E San José 500 kV

En la Fig. 7 se muestra la red eléctrica de 500 kV de la interconexión Centro-Sur, para el análisis se realizaron equivalentes de la red en diferentes puntos de la red (ver Tabla I), el escenario escogido fue la mínima demanda del año 2016 al ser este el escenario más crítico debido a que se tienen menos generadores en servicio en la red.

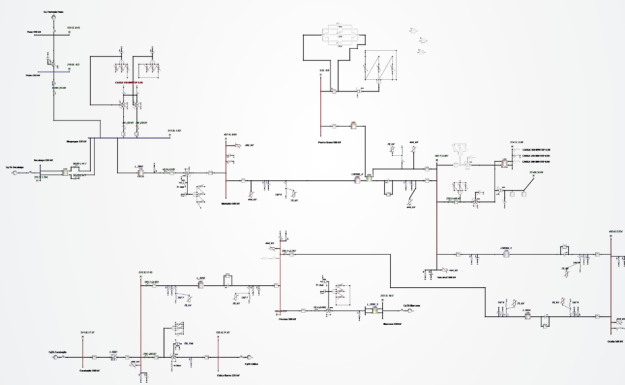


Fig. 7. Red eléctrica del SEIN modelada en ATP Draw

D1. Sin mando sincronizado

En caso no existiese relé de mando sincronizado, el cierre de los polos del interruptor podría realizarse aleatoriamente en cualquier punto de la onda de tensión. Por lo tanto, para determinar la máxima corriente inrush esperada durante la energización del transformador, se realizó una simulación estadística con 200 energizaciones en el programa ATP, determinándose que la máxima corriente inrush esperada ocurre cuando se cierran los polos del interruptor en los siguientes tiempos:

Tabla I.- Tiempos de cierre del interruptor para obtener la máxima corriente inrush del transformador

| | Fase A | Fase B | Fase C |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| Tiempo de cierre (seg.) | 0.087654 | 0.090327 | 0.089089 |

Estos tiempos de cierre de los polos del interruptor fueron ingresados al programa ATP para encontrar la máxima corriente inrush durante la energización del transformador, las máximas corrientes por fase esperadas fueron: fase A (558 A), fase B (242 A) y fase C (534 A), tal como se muestra en la Fig. 8 y Fig. 9.

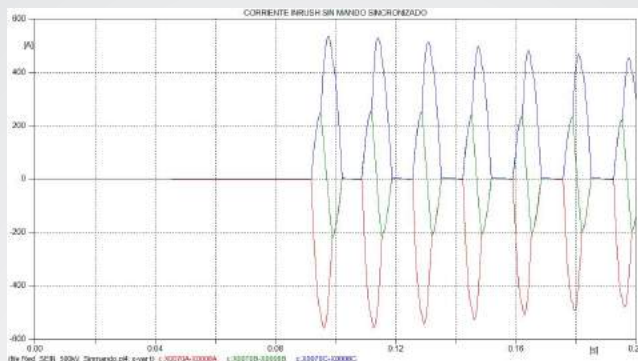


Fig. 8. Corriente inrush del transformador ATXF-2 sin mando sincronizado

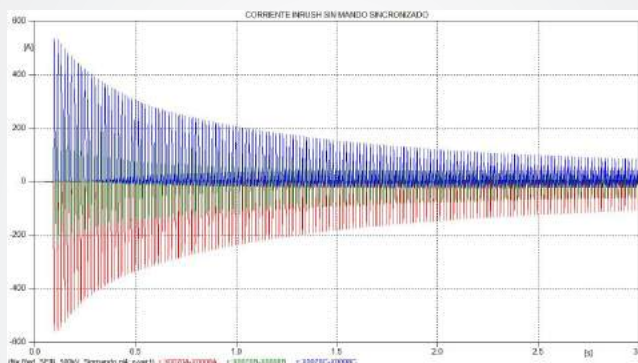


Fig. 9. Corriente inrush del transformador ATX-2 sin mando sincronizado

Esta alta corriente de inserción del transformador, ocasiona la distorsión de la onda de tensión producto de los armónicos producidos por la corriente inrush, tal como se muestra en la Fig. 10. En la S.E. Puerto Bravo, en las fases A y C las tensiones caen a 401,8 kV (0.803 p.u.) y 416,5 kV (0,833 p.u.) respectivamente, mientras que en la fase B la tensión se incrementa hasta 528,5 kV (1.057 p.u.). Las caídas de tensión en las fases A y C ocasionarán la desconexión de carga en la mina Cerro Verde, en esta barra, la tensión mínima por fase en estado transitorio debe ser mayor a 0.85 p.u.

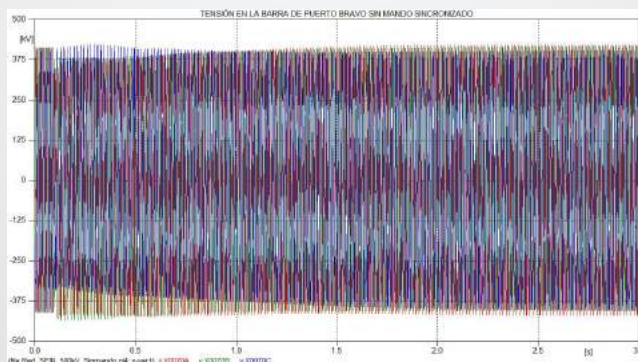


Fig. 10. Tensión en la S.E San José 500 kV

D2. Con mando sincronizado

La determinación de los tiempos óptimos de cierre de los polos para la energización de transformadores con diferentes configuraciones de los devanados se han desarrollado en detalle da en [5], para nuestro caso, los tiempos óptimos de cierre de los polos del interruptor con el fin de minimizar las corrientes inrush son:

Tabla II.- Tiempos óptimos de cierre para obtener la mínima corriente inrush del transformador

| | Fase A | Fase B | Fase C |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Tiempo de cierre (seg.) | 0.075170977 | 0.078811846 | 0.087112206 |

Estos tiempos óptimos encontrados simulan el comportamiento del mando sincronizado, dado que la función de este equipo es minimizar las corrientes inrush durante la energización de los transformadores. Estos tiempos fueron ingresados al programa ATP para encontrar la mínima corriente inrush durante la energización del transformador, las mínimas corrientes por fase esperadas fueron: fase A (23,8 A), fase B (60 A) y fase C (23,4 A), tal como se muestra en la Fig. 11 y Fig. 12.

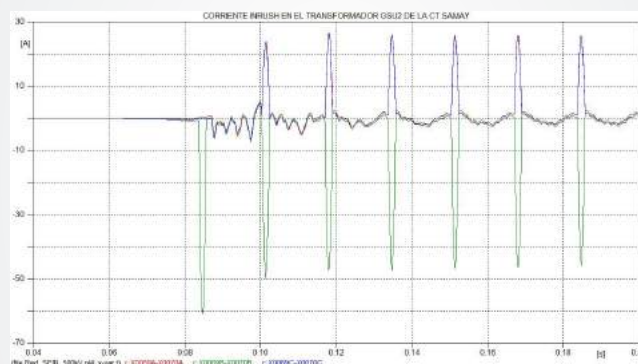


Fig. 11. Corriente inrush del transformador ATX-2 con mando sincronizado

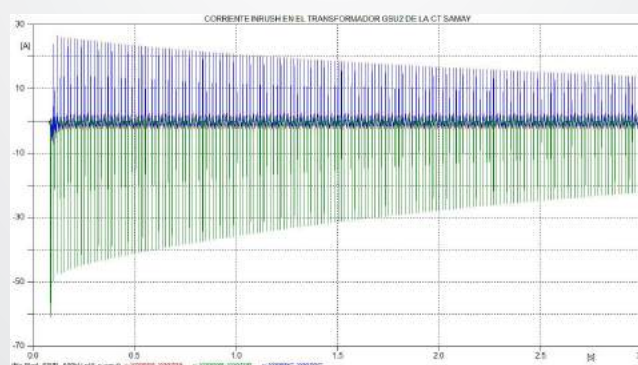


Fig. 12. Corriente inrush del transformador ATXF-2 con mando sincronizado

En la Fig. 13 se muestra la tensión en la S.E San José durante la energización del transformador ATXF-2, se observa que el mando sincronizado minimiza los armónicos durante la inserción, mejorando la calidad de la onda de tensión y evitando la desconexión de las cargas sensibles a las variaciones transitorias de tensión.

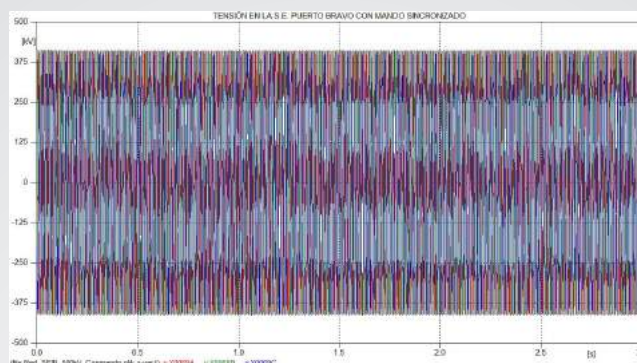


Fig. 13. Tensión en la S.E San José 500kV

5. CONCLUSIONES.

En este trabajo se describe un método para el modelado de la energización de transformadores de potencia teniendo en cuenta que tiene un fuerte impacto en la frecuencia de resonancia de la red y también sobretensiones y corrientes armónicas temporales involucradas, estos parámetros han sido evaluados dentro de sus límites en la red del SEIN zona Sur. Finalmente y después de la determinación de la frecuencia de resonancia y de las condiciones iniciales, luego del análisis se concluye que la corriente Inrush se puede reducir a valores menores de la tercera parte comparada con los cierres sin control.

6. REFERENCIA.

- [1] L. Priker, G. Banfai, G. Ban and P. Becker, Reducing the Magnetizing Inrush current by means of Controlled Energization and de-Energization of Large Power Transformer, International Conference on Power System Transients, IPST 2003.
- [2] EDP Proyectos SAC. Estudio EDP-110-15 “Análisis de Energización de Autotransformadores 500/220/33 kV en la S.E. San José”. Octubre 2015.
- [3] Kunal J. Patel, “Effects of transformer inrush current”, Bachelor of Engineering, University of Southern Queensland, Faculty of Health, Engineering & Science.
- [4] Herman W. Dommel, Electromagnetic Transients Program Theory Book, Portland, Oregon, 1994.
- [5] D. Goldsworth, T. Roseburg, “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits”, 61 st Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 2008.

Autor: Jhonatan Jesús Carbajal García.

Edición: Bach. Denisse Salazar, Responsable de Medios e Imagen Institucional