

# Restricción de la Corriente de Entrada Magnetizante al Transformador

Algunos fabricantes de reconectadores trifásicos y controles de interruptores automáticos recientemente han introducido una función de restricción de la corriente de entrada magnetizante al transformador. La restricción de la corriente de entrada magnetizante evita las respuestas a la protección de sobrecorriente cuando ocurre las corrientes de entrada magnetizantes.

Sin embargo, el cierre en el punto de onda de tensión y el uso de la Tecnología PulseClosing® del Interruptor de Fallas IntelliRupter® PulseCloser® mitiga los requerimientos para esta función. Esta publicación explica por qué la restricción de la corriente de entrada magnetizante puede ser requerida para los reconectadores trifásicos y para los interruptores automáticos, pero no para el interruptor de fallas IntelliRupter.

## Antecedentes

La corriente de entrada magnetizante sustancial del transformador ocurre debido a dos condiciones relacionadas del sistema:

- Los transformadores de carga deben contar con un magnetismo residual apreciable o flujo remanente, que ocurre abriendo una fase saludable en o cerca de un sistema de tensión cero sin un deterioro de tensión.
- La misma fase debe cerrarse en o cerca de un sistema de tensión cero con una tensión creciente que corresponda a la polaridad del flujo remanente.

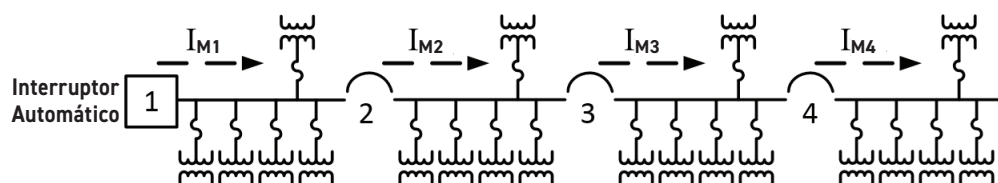
Sin embargo, estas condiciones se producen solamente en los reconectadores e interruptores automáticos que están disparando y reconectando las tres fases. Ya que estos dispositivos reconectan al azar en el punto en onda de tensión, muchas condiciones congruentes del sistema deben converger arbitrariamente para satisfacer estas circunstancias.

También, la corriente de entrada magnetizante se comporta más como una corriente de carga que como una corriente de falla. Refiriéndonos a la **Figura 1**, el Interruptor automático 1 experimenta el acumulado de la corriente de entrada magnetizante en el alimentador, o  $IM1 + IM2 + IM3 + IM4$ .

Sin embargo, cada interruptor de fallas aguas abajo (2, 3 y 4) experimenta menos y menos corriente de entrada magnetizante.

El Boletín de Información 210-110 de S&C “Guía de Selección para Fusible Primarios de Transformador en Media y Alta Tensión en Subestaciones de Compañías Eléctricas y Subestaciones Industriales”, es un excelente recurso para delinear el factor involucrado en la selección de la protección apropiada para los transformadores de media tensión. Pero igualmente importante, explica cómo las corrientes de entrada magnetizante se traducen dentro del transformador en multiplicadores de la corriente a carga completa del transformador o en factores en 0.01 y 0.1 segundos.

El Boletín de Información 210-110 también proporciona tablas que muestran las reducciones de 0.01 y 0.1 segundos en los factores de corriente a toda la carga basados en las proporciones a toda la carga del transformador con las corrientes de falla disponibles. Cuando esta proporción es de 0.00, esto indica que el transformador está cerca de una fuente fuerte, como la subestación. Las proporciones más elevadas indican una fuente más débil o que el transformador está más lejos de la subestación.



**Figura 1.** La corriente de entrada magnetizante es acumulativa. En este ejemplo, el Interruptor Automático 1 experimenta la suma de las corrientes de entrada magnetizante  $IM1$ ,  $IM2$ ,  $IM3$  e  $IM4$ .

Así que, un transformador de 100 kVA con proporciones de una carga completa a una proporción de una corriente de falla de 0.00 generaría corrientes de entrada magnetizante equivalentes a 25 veces su carga total de corriente en 0.01 segundos, y 12 veces su corriente de carga total en 0.01 segundos. Sin embargo, cuando esta proporción de una carga completa a una corriente de falla es de 0.04, los multiplicadores de la corriente de carga completa caen a nueve veces la corriente de carga completa en 0.01 segundos y cinco veces la corriente de carga completa en 0.1 segundos.

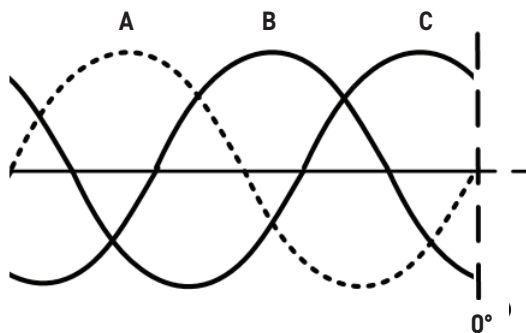
Consecuentemente, los interruptores automáticos y los reconectores cercanos a la subestación tienen posibilidad de beneficiarse de la restricción de la corriente de entrada magnetizante, evitando las respuestas de la protección contra sobrecorriente. Esto es verdadero ya que sienten la corriente de entrada magnetizante del segmento de su alimentador y de todos los segmentos aguas abajo. Es más, la corriente de entrada magnetizante es más elevada en sus segmentos del alimentador debido a las bajas proporciones de carga completa a corriente de falla.

## Creación del Magnetismo Residual del Transformador o Flujo Remanente

El significativo magnetismo residual del transformador o flujo remanente es producido por la apertura de una fase saludable en o cerca una tensión cero del sistema. Pero el flujo remanente más elevado resulta cuando la tensión de fase inmediatamente cae a cero voltios al abrirse.

La polaridad de este flujo remanente será determinada por la polaridad de la tensión que cae antes de abrirse en una tensión cero. Por costumbre, esto significa que el flujo remanente es negativo cuando la tensión cero es de 0 grados y positiva si la tensión cero es de 180 grados.

Por ejemplo, la **Figura 2** muestra las tensiones balanceadas en las fases A, B y C con el guion representando la tensión de la fase A. Todas las tres fases abren simultáneamente, pero la fase A abre a 0 grados con una caída de tensión negativa y sin deterioro de la tensión. Por lo tanto, el flujo remanente producido por la tensión de la fase A será negativo debido a que la tensión en caída fue negativa antes de que la fase A abriera a 0 grados.

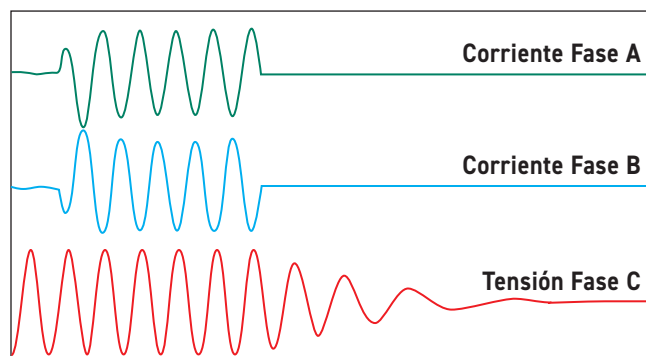


**Figura 2.** La tensión de la fase A (guion) produce flujo remanente negativo en la carga de la fase A del transformador debido a que abre a 0 grados con una tensión negativa en caída.

La probabilidad mayor de apertura de una línea sana o sin falla, la fase en o cerca de la tensión cero es debido a los disparos trifásicos o la apertura. Por ejemplo, la falla de fase a tierra ocurre más a menudo que cualquier otro tipo de falla. Esto significa que cuando una falla de fase a tierra es despejada, una de las dos fases sin falla tiene una mayor oportunidad de abrirse en o cerca de una tensión cero.

Sin embargo, a diferencia de las fases con falla, una vez que una fase sana se abre (aun durante eventos sin falla), la tensión decae y ocurren las frecuencias subfundamentales que reducen enormemente el flujo remanente. Estas condiciones duran solo unos cuantos ciclos o un poco más y resultan de los componentes del alimentador, como las cargas del motor y los capacitores que permanecen conectados después de la apertura de la fase.

Por ejemplo, la **Figura 3** muestra que una falla que ocurre en una fase A a B y es despejada en aproximadamente 5.5 ciclos. La fase C se abre al mismo tiempo que la fase A y la fase B, pero su tensión continúa decayendo por aproximadamente 170 milisegundos, o a grosso modo en 10 ciclos en base a 60 Hz. Adicionalmente la forma de onda de la tensión de la fase C también refleja frecuencias de sub-armónicos durante los periodos de detrimento de la tensión. Consecuentemente, existe una pequeña probabilidad de que los transformadores de carga de la fase C aguas abajo tengan un flujo remanente apreciable.



**Figura 3.** Después que una falla de una fase A a B es despejada, la tensión de la fase C decae con las frecuencias subfundamentales reduciendo grandemente el flujo remanente en la carga de la fase C de los transformadores.

## Producción de la Corriente de Entrada Magnetizante en el Transformador

La sobrecorriente de entrada magnetizantes de preocupación para la protección de sobrecorriente de fase se produce cuando la polaridad del flujo remanente sustancial corresponde con una subida de la tensión de la misma polaridad. Esto significa que si una fase saludable se abre una fase en o cerca de los 0 grados sin decremento de la tensión, deberá cerrarse en o cerca de los 180 grados y viceversa.

Como un ejemplo, la **Figura 4** muestra las tensiones balanceadas de las fases A, B y C de la **Figura 2** con el guion nuevamente representando la tensión de la fase A.

Como antes, la apertura de la fase A en 0 grados produce un flujo remanente negativo máximo en la carga aguas abajo en la carga de la fase A del transformador. Pero conforme las fases B y C se abren cerca de un pico de tensión (240 y 120 grados respectivamente), su carga del transformador aguas abajo tendrá mucho menos flujo remanente.

La Figura 4 también indica que todas las tres fases subsecuentemente cierran simultáneamente, pero la fase A cierra a 180 grados con una tensión negativa en aumento. Debido a que esta tensión negativa en aumento de la fase A corresponde al flujo remanente negativo en la carga de la fase A aguas abajo del transformador, esta acción de cerrado generará lo máximo posible la corriente de entrada magnetizante basándose en las proporciones de la carga completa a la corriente de falla disponible del transformador.

Por el contrario, el cierre con una polaridad de la tensión contraria a aquella del flujo remanente elimina totalmente la corriente de entrada magnetizante. Por lo tanto, si la fase A en la Figura 4 fuera a abrirse y cerrarse en o cerca de los 0 grados (o 180 grados), no ocurriría ninguna corriente de entrada magnetizante.

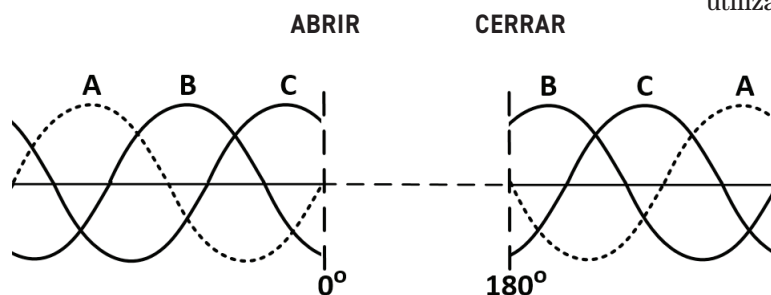


Figura 4. La tensión de la fase A (guión) produce un flujo remanente negativo al abrirse y una corriente de entrada magnetizante al cerrarse.

El cierre en la tensión pico del sistema aminora significativamente la corriente de entrada magnetizante. Y el cierre en la tensión pico opuesta a la polaridad del flujo remanente reduce de forma apreciable, la corriente de entrada magnetizante.

Así que, debido a que los reconectores y los interruptores automáticos trifásicos se cierran en ángulos de tensión del sistema al azar, muchas condiciones congruentes del sistema deben converger arbitrariamente para producir las corrientes de entrada magnetizante al nivel de protección.

## Cierre Controlado en el Punto de Onda de la Tensión

El cierre controlado de la tensión en el punto de onda y las operaciones de PulseClosing del interruptor de fallas IntelliRupter siempre ocurren en o cerca de un pico de tensión del sistema. Consecuentemente, la corriente de entrada magnetizante siempre es sustancialmente menor que la que es producida por las tres fases al azar, el cierre en ángulo de tensión de un reconector o interruptor automático.

Como un recordatorio, la Tecnología PulseClosing reduce la energía mecánica ( $I^2t$ ) utilizada para probar la presencia continua de fallas a aproximadamente el 5% de lo que un reconector produce cuando reconecta repetidamente dentro de una falla. Y las operaciones de PulseClosing son llevadas a cabo en una base de fase por fase empezando con la fase que registró el más alto grado de corriente.

Las fases son probadas para la presencia de falla iniciando con una fase única, con operaciones de cierre-apertura rápida en ángulos de tensión pico del sistema. Utilizando contactos convencionales de termo, esta operación rápida de cierre-apertura es iniciada después de un pico de tensión del sistema como la duración del resultante del circuito de corriente menor en anillo, es de aproximadamente entre 0.25 y 0.5 ciclos.

Esta resultante de circuito de corriente menor en anillo es entonces analizada para determinar si representa una condición de falla. Si el análisis regresa un resultado de falla, una segunda operación de PulseClosing es ejecutada inmediatamente utilizando la polaridad opuesta de tensión a la que fue utilizada para la primera operación de PulseClosing.

Una vez que la operación de PulseClosing ha determinado que no existe falla en una fase dada, esa fase se cierra en o cerca de un pico de tensión del sistema. Este proceso controlado de punto de tensión en onda mitiga más cualquier consecuencia desconocida o en evolución involucrada en la re-energización de una fase.

Adicionalmente, el cierre convencional de las tres fases también se adhiere a esta práctica. Así que aun si una operación de PulseClosing no precede a un cierre de fase, cada fase se cierra secuencialmente en o cerca de un pico de tensión del sistema.

## El Cierre en el Punto de Onda de Tensión Mitiga Corriente de Entrada Magnetizante

Presumiendo que un interruptor de fallas IntelliRupter disparó tres fases debido a una falla transitoria en la fase A a tierra, la presencia continua de una falla es probada utilizando una operación de PulseClosing. Debido a que este es un proceso controlado de punto de onda de tensión, cada fase es secuencialmente probada, empezando con la fase que registró la corriente más elevada.

La fase A registró la corriente más alta debido a que estaba en falla, así que es probada primero. Sin embargo, utilizando un pulso para probar la fase A no resultará en una falla declarada debido a que la falla fue transitoria y que ya no está presente, y que no hay flujo remanente apreciable en la carga de la fase A de los transformadores aguas abajo.

La razón de que no haya apreciable flujo remanente en la carga de la fase A de los transformadores aguas abajo es que la falla deprimió la tensión de la fase A. Y debido a que la tensión de la fase A fue deprimida, no puede ser producido un flujo remanente apreciable en los transformadores de carga conectados a la fase A.

Debido a que la operación de PulseClosing en la fase A resultó en una declaración de sin falla, la fase A se cierra en o cerca de un pico de tensión, y la prueba utilizando un pulso avanza a la fase siguiente con el registro de corriente más alta registrada.

Sin embargo, la fase B o la fase C pueden haberse abierto en una tensión cero, y una de estas fases puede tener transformadores de carga aguas abajo con flujo remanente. Por lo tanto, si la operación de PulseClosing en la primera fase B o en la primera fase C es ejecutada con la polaridad de la tensión que corresponda a la polaridad del flujo remanente del transformador aguas abajo, una declaración de falla causada por la corriente de entrada magnetizante es posible.

Consecuentemente, si el primer pulso es señalado con falla, se ejecuta una segunda operación de PulseClosing utilizando la tensión de una polaridad opuesta a la primera. Como se indicó previamente, la aplicación de la polaridad de la tensión opuesta a aquella del flujo remanente, reduce sustancialmente la corriente de entrada magnetizante.

Así, la corriente resultante de la segunda operación de PulseClosing ya no refleja una condición de falla, y la fase es cerrada en o cerca de un pico de tensión.

## Consideraciones de Coordinación de la Corriente de Entrada Magnetizante

Si un interruptor de fallas IntelliRupter se dispara o abre las tres fases (por cualquier razón), y una operación de PulseClosing precede su reconexión, nunca ocurre una corriente de entrada magnetizante a nivel de protección. Y si el interruptor de fallas IntelliRupter se cierra sin primero llevar a cabo una operación de PulseClosing, cerrando cada fase secuencialmente en o cerca de un pico de tensión del sistema reduce sustancialmente a nivel de protección las corrientes de entrada magnetizantes.

Consecuentemente, cualquier preocupación remanente relacionada con la corriente de entrada magnetizante, son eventos trifásicos aguas arriba y aguas abajo en los que el interruptor de fallas IntelliRupter permanece cerrado. Estos eventos de tres fases es posible que involucren:

- El disparo y la reconexión trifásica del interruptor automático o del reconectador aguas arriba
- El disparo trifásico del reconectador y la reconexión aguas abajo
- Pérdida extendida del abastecimiento del alimentador

## Disparo trifásico y reconexión del interruptor automático o del reconectador aguas arriba

Un evento en el que un reconectador aguas arriba o un interruptor automático se dispara y el interruptor de fallas IntelliRupter permanece cerrado puede ser debido a una falla transitoria entre ellos. Presumiendo que el dispositivo aguas arriba utiliza la restricción de la corriente de entrada magnetizante para evitar el disparo para estas corrientes, existe una remota posibilidad de que el interruptor de fallas IntelliRupter se pueda disparar cuando el dispositivo aguas arriba reconecte.

Como se indicó previamente, muchas condiciones del sistema trifásico aguas arriba deben converger arbitrariamente para producir corrientes de entrada magnetizante a nivel de protección. Y ya que el interruptor de fallas IntelliRupter está aguas abajo del reconectador o de los interruptores automáticos, éste experimenta menos corriente de entrada magnetizante que los dispositivos aguas arriba. Sin embargo, si el interruptor de fallas IntelliRupter de alguna manera se disparó debido a la reconexión del dispositivo aguas arriba, simplemente llevaría a cabo una operación de PulseClosing (mitigando cualquier efecto de la corriente de entrada magnetizante) y después se cerrará.

Es más, el disparo del dispositivo aguas arriba ya ha creado un evento MAIFI causado por la falla transitoria. Consecuentemente, la poca probabilidad del disparo y de la operación de PulseClosing del interruptor de fallas IntelliRupter no se agrega a este índice, y su carga es rápida y automáticamente restaurada.

## Disparo y reconexión trifásica del reconectador aguas abajo

Un evento de reconexión y disparo de un reconectador aguas abajo donde el interruptor de fallas IntelliRupter permanece cerrado es muy posible que sea causado por fallas aguas abajo del reconectador. Sin embargo, la posibilidad de que este cierre del reconectador aguas abajo haya causado que el interruptor de fallas IntelliRupter aguas arriba se disparara debido a corriente de entrada magnetizante del reconectador es improbable.

Muchas condiciones del sistema trifásico deben converger al azar para producir la corriente de entrada magnetizante a nivel de protección del reconectador. También, la curva coordinación del tiempo corriente del interruptor de fallas IntelliRupter aguas arriba más lento y el reconectador aguas abajo más rápido deberán siempre evitar que el interruptor de fallas IntelliRupter responda a estas corrientes.

Esto es especialmente verdadero si el reconectador aguas abajo está equipado con la restricción de corriente magnetizante. La razón de esto es que la restricción de entrada de la corriente de entrada magnetizante habilitaría al reconectador para responder más rápido a las corrientes de falla más bajas. Consecuentemente, si este es el caso, la restricción de la corriente de entrada magnetizante en el dispositivo aguas abajo realmente mejora la curva coordinación del tiempo corriente con los dispositivos aguas arriba.

### Pérdida extendida del suministro del alimentador

Si se pierde el suministro de tensión del alimentador por un periodo extenso y el interruptor de fallas IntelliRupter permanece cerrado, el arranque de carga en frío es generalmente de mayor preocupación que la corriente de entrada magnetizante. Adicionalmente, el detrimento de la tensión asociado con la pérdida de suministro del alimentador sustancialmente reducirá el flujo remanente para todos los transformadores de carga del alimentador. Esto es debido a que no existen más componentes del alimentador que contribuyan al deterioro de la tensión, lo cual incrementa el periodo de deterioro y más adelante reduce el flujo remanente.

Por lo tanto, la pérdida extendida del suministro del alimentador no represente ninguna preocupación por la corriente de entrada magnetizante.

### Conclusiones

Las causas de la corriente de entrada magnetizante apreciables descritas en esta publicación indican que la ocurrencia de este fenómeno es realmente rara. Esto es verdadero ya que la producción a nivel de protección de la corriente de entrada magnetizante requiere de estas secuencias específicas de disparo trifásico y reconexión para alinearse al azar:

- Una fase sana debe abrirse en o cerca de la tensión cero del sistema.
- No debe haber deterioro de la tensión asociado con la apertura de esta fase. Por lo tanto, tenga esto en mente que:
  - > Unos pocos ciclos de deterioro de la tensión reducen apreciablemente el flujo remanente.
  - > Los componentes del alimentador virtualmente aseguran que ocurre el deterioro de la tensión.
- La misma fase sana que se abrió en o cerca de los 0 grados (sin deterioro de la tensión) debe cerrarse en o cerca de los 180 grados y viceversa.
- La apertura y el cierre de una fase sana en o cerca de la tensión cero del mismo sistema no produce corriente de entrada magnetizante.
- La apertura de una fase sana en o cerca de la tensión cero del sistema y el cierre en el pico de tensión reduce sustancialmente a nivel de protección la corriente de entrada magnetizante.

Es más, la restricción de la corriente de entrada magnetizante fue probada para posiblemente beneficiar a los interruptores automáticos de la subestación y a los reconectores trifásicos cerca de la barra de la subestación. Como recordatorio, la corriente de entrada magnetizante es más alta mientras más cerca se encuentre de la subestación porque:

- Los transformadores de carga producen más corriente de entrada magnetizante debido a las proporciones de carga completa a corriente de falla disponible más baja del transformador.

- Los interruptores automáticos y los reconectores aguas arriba detectan la corriente de entrada magnetizante acumulativa de sus segmentos del alimentador, además de todos los segmentos aguas abajo.

Contrariamente, la operación PulseClosing del punto de onda de la tensión controlado del interruptor de fallas IntelliRupter y las acciones de cierre mitigan a nivel de protección, las corrientes de entrada magnetizante. Consecuentemente, una función de restricción de la corriente de entrada magnetizante es de poco o de ningún valor porque:

- Una operación de PulseClosing identifica las condiciones potenciales de la corriente de entrada magnetizante.
- Una vez identificada, una operación de PulseClosing con una tensión de polaridad opuesta mitiga la corriente de entrada magnetizante.
- El cierre secuencial (convencional) en o cerca del pico de tensión del sistema reduce sustancialmente a nivel de protección la corriente de entrada magnetizante.

Finalmente, si el interruptor de fallas IntelliRupter es instalado entre interruptores automáticos y reconectores con elementos de una restricción activa de corriente de entrada magnetizante, no hay consecuencias adversas porque:

- El disparo o la apertura de un interruptor de fallas IntelliRupter automáticamente invoca la mitigación de la corriente de entrada magnetizante.
- Las corrientes de entrada magnetizante causadas por el disparo y la reconexión trifásica aguas arriba no produce resultados desfavorables.
- La coordinación con los reconectores aguas abajo, y las bajas corrientes de entrada magnetizante que producen, aseguran que el interruptor de fallas IntelliRupter no se disparará cuando ocurran estas corrientes.
- La pérdida prolongada de la tensión del suministro del alimentador resulta en un deterioro extendido de la tensión debido a los componentes conectados del alimentador, eliminando la preocupación por la corriente de entrada magnetizante.

*Por Michael Meisinger, © 2017 S&C Electric Company*

# Notas

# Notas

Conéctese con nosotros:



**S&C Electric Company**