

Evaluación de Sobre Voltajes en Sistemas Industriales

Funken Ingenieros SA de CV

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es determinar la diferencia que existe al evaluar la respuesta debida a los sobre voltajes que se desarrollan en un sistema aterrizado mediante una resistencia, un reactor o la conexión solidamente aterrizada y flotante de un transformador. Asimismo, plantear los criterios que deberían seguirse al seleccionar el tipo de aterrizamiento del neutro en los sistemas industriales.

I. Introducción

Los sistemas aterrizados o la conexión de una fase o el conductor de neutro a tierra, es con el propósito de controlar el voltaje a tierra a un limite deseable. Esto también es propuesto para un flujo de corriente que puede proporcionar una detección de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra, la cual puede instigar la operación automática de los dispositivos de protección o remota de las fuentes de voltaje.

El control de voltaje a tierra limita el estrés en el aislamiento de los conductores, así como también permite la reducción de fuertes choques a personas que pueden tener contacto con el conductor a línea viva.

La mayoría de los sistemas de aterrizamiento emplean algunos métodos para aterrizarse el neutro del sistema en uno o más puntos. Estos métodos pueden ser divididos en dos categorías generales:

- Solidamente aterrizado.
- A través de una Impedancia.

La impedancia de aterrizamiento puede ser dividida en varias subcategorías:

- Con Reactancia
- Con Resistencia

II. Configuración del Sistema de Prueba

El sistema modelado está compuesto básicamente por la acometida de la compañía suministradora en 115 kV, la cual proporciona una potencia de cortocircuito de fase a tierra de 632.60 MVA y una relación X/R de 16.31. La subestación está integrada por un transformador de 9.375 MVA (TR-1), el cual trabaja con un nivel de tensión del orden de 115 / 13.2 kV, con una impedancia 10 % y una conexión Delta – Estrella. En el lado secundario del transformador se tiene un cable de 1 km de longitud, calibre 500 AWG, un conductor por fase.

En la figura siguiente se muestra el diagrama del sistema a estudiar.

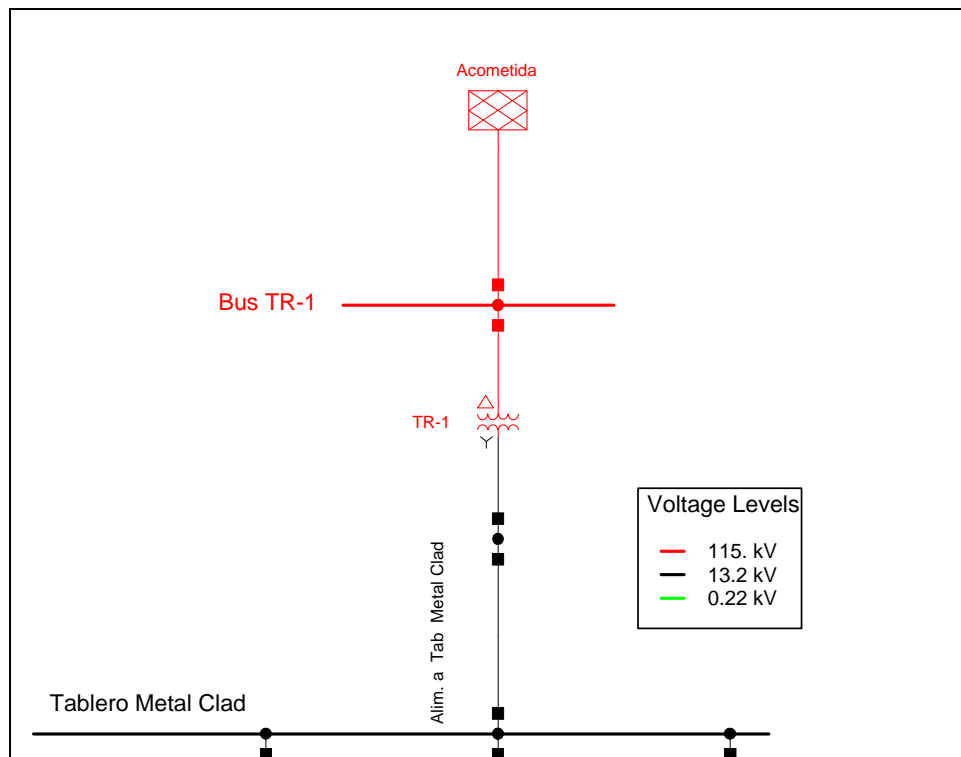


Figura No.1. Diagrama Unifilar del Sistema de Prueba

III. Desarrollo

De acuerdo a la configuración del sistema, en condiciones normales este opera de forma balanceada tal como lo muestra el diagrama vectorial siguiente.

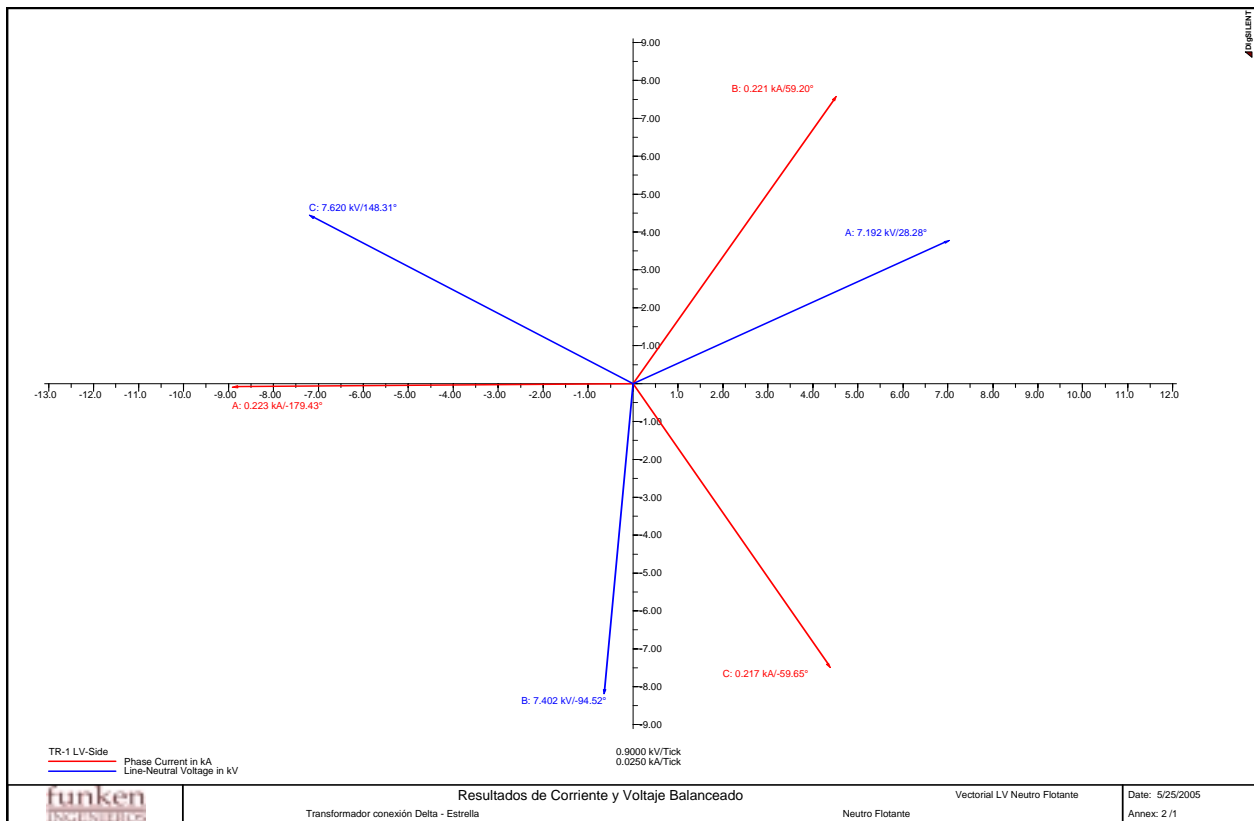


Figura No. 2. Diagrama Vectorial Durante la Operación Nominal del Sistema¹.

Como puede verse, el sistema trifásico opera conforme a lo esperado, los voltajes mantienen un defasamiento de 120° entre ellas y su magnitud balanceada se mantiene dentro del margen de $\pm 5\%$. Lo mismo ocurre con las corrientes.

Para la realización de este trabajo se analizaron cuatro casos de aterrizamiento del neutro del transformador, con la finalidad de obtener el efecto tanto en corriente como en voltaje. Se evaluó la falla de una fase a tierra, tanto en estado estable como dinámico.

¹. Los voltajes obtenidos son de fase a tierra.

Caso Número 1. Neutro Flotante

Para este caso se evaluó la falla con el devanado secundario del transformador conectado en estrella flotante y operando a un nivel de voltaje de 13.2 kV, es decir, se está abriendo el camino para la circulación de corrientes de secuencia cero.

Se simuló la condición de la ocurrencia de una falla de fase a tierra en una de las boquillas del devanado secundario del transformador (Fase a), esto con la finalidad de saber las condiciones a las que se someterá el sistema ante la presencia de dicha falla.

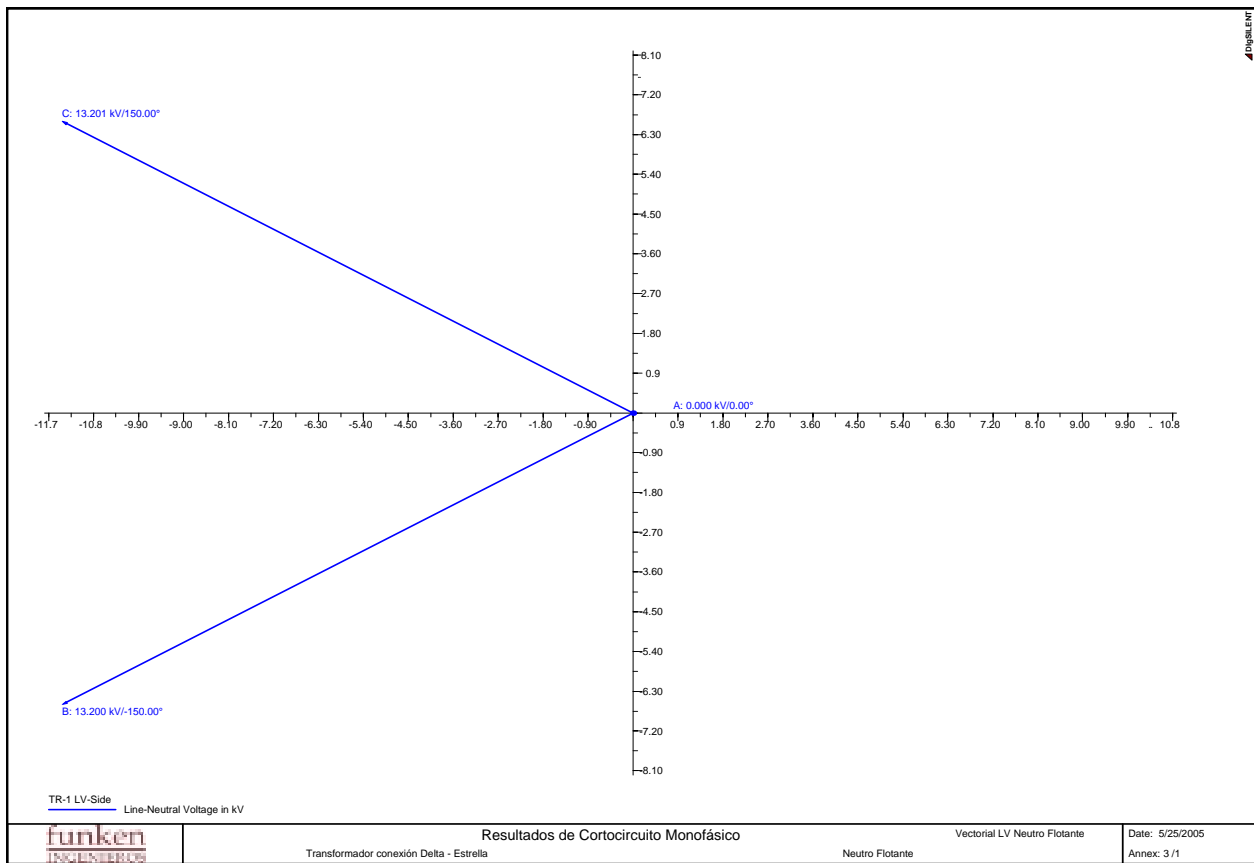


Figura No. 3. Diagrama Vectorial ante una Condición de Cortocircuito Monofásico en el Devanado Secundario del Transformador con el Neutro Flotante².

². Los voltajes obtenidos son de fase a tierra.

El diagrama vectorial muestra los voltajes que se presentan en el sistema después de haber ocurrido la falla. Como podemos observar, al no tener referencia de secuencia cero, la corriente de falla no tiene camino por donde circular, por lo que su valor es cero (0) y en el sistema no se tendrán corrientes circulantes de este tipo.

Sin embargo, como puede verse se presentan sobretensiones de magnitud considerable. En el diagrama vectorial pudo verse que la magnitud de los voltajes de línea a tierra es de 13.2 kV para las fases “sanas”.

Debido a que la tensión nominal del sistema es de 13.2 kV entre fases, al presentarse una condición de falla como la previamente simulada las sobretensiones pueden ser bastante altas (22.8 kV entre fases) y los equipos conectados entre las fases “sanas” podrían sufrir esfuerzos temporales en su aislamiento.

En caso de que estas fallas no sean liberadas rápidamente por algún dispositivo de protección (de corriente o voltaje) el esfuerzo en los equipos puede degradar su vida útil.

Como puede verse, en algunos casos no es recomendable el empleo de sistemas “flotantes” que no cuenten con referencia a tierra debido a que pueden presentarse sobretensiones de magnitud considerable y al no contar con una conexión a tierra es casi imposible detectar la presencia de la corriente de falla, lo que podría dar origen a que dispositivos de protección remotos tuvieran que liberar esta falla, lo que implicaría mayor tiempo de permanencia de la condición de falla con sus correspondientes efectos en el aislamiento de los equipos.

Caso Número 2. Neutro Solidamente Aterrizado

Para la evaluación de este caso se modificó la conexión del devanado secundario del transformador, esto es, se conectó el neutro del transformador solidamente a tierra.

Con la evaluación del caso anterior, se observó que la corriente de secuencia cero es prácticamente nula, por lo que ahora se aplicó una falla de fase a tierra (fase a), pero tomando en cuenta que el devanado secundario se encuentra conectado solidamente a tierra. En el diagrama vectorial siguiente se muestran las corrientes que fluyen y los voltajes ante la presencia de la falla.

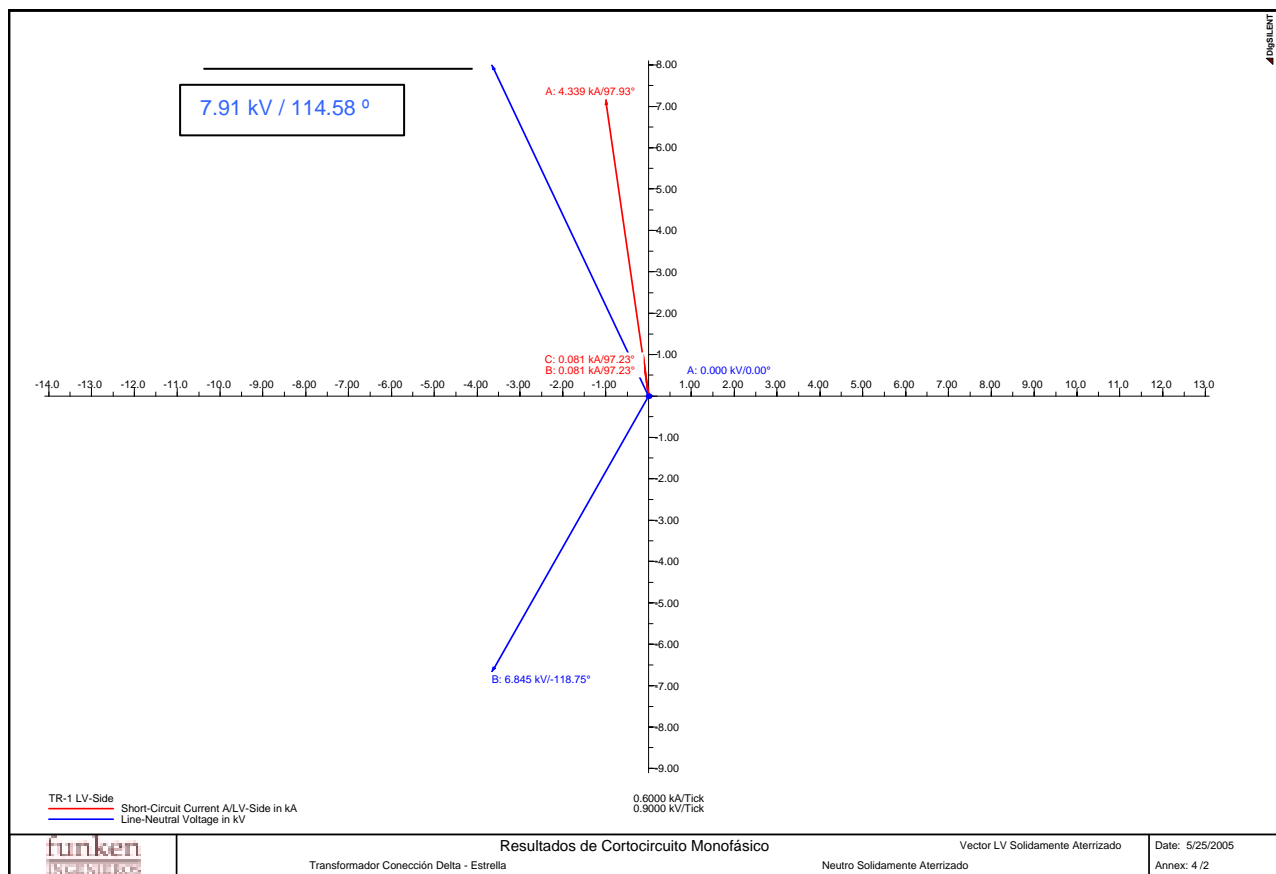


Figura No. 4. Diagrama Vectorial ante una Condición de Cortocircuito Monofásico en el Devanado Secundario del Transformador con el Neutro Solidamente conectado a tierra³.

³ Los voltajes obtenidos son de fase a tierra

Para este caso, puede notarse que al tener el neutro del transformador conectado solidamente a tierra, se creó un camino por donde la corriente de falla fluiría, por lo que la magnitud de la corriente ante la falla se presenta en el valor máximo (4339 A). Así mismo podemos observar que el voltaje de la fase fallada es cero (0).

En este caso, los voltajes de las fases sanas se mantienen casi sin variación, es decir, en condiciones normales, los voltajes tenían una magnitud de 7.6 kV de fase a tierra (en promedio) y durante la condición de falla las magnitudes son de 7.9 y 6.8 kV. Lo que no impone esfuerzos en el aislamiento de los equipos ya que la variación es de 4 % con respecto al valor nominal.

Sin embargo, como se mencionó previamente la magnitud de la corriente es muy alta, dicha corriente circulará a través de los conductores de la fase fallada y del neutro. Por tal motivo, es importante que los conductores sean dimensionados adecuadamente para soportar dichos esfuerzos ya que la circulación de una corriente de gran magnitud ocasiona un calentamiento sustancial lo que afecta en forma indirecta el aislamiento de los mismos.

Como puede verse, después de haber evaluado los dos primeros casos, las situaciones que pudieran presentarse al ocurrir una falla de fase a tierra son: voltajes de magnitud considerable o bien, corrientes de gran magnitud.

Para cualquiera de los dos casos, es importante que se realice un análisis previo para determinar los posibles efectos que pudieran tenerse en el sistema, así como, dimensionar los equipos adecuadamente y decidir si el tipo de aterrizamiento propuesto es el más adecuado para los fines que se buscan.

Caso Número 3. Neutro conectado a través de una Resistencia.

Al tener niveles de corriente de cortocircuito de fase a tierra altos, se busca limitar la corriente a valores donde el sistema no sufra esfuerzos ante la presencia de la falla, una de las alternativas es emplear una resistencia de puesta a tierra.

El valor empleado de la resistencia de puesta a tierra es, regularmente, una referencia directa a la corriente que fluye en cada una de las fases. Este valor es calculado mediante las ecuaciones de la ley de Ohm.

Para la evaluación de este caso, al neutro del devanado secundario se le adicionó una resistencia de puesta a tierra con un valor de 20 Ohms, 10 s, 400 A, que corresponde a un valor típico para casos similares.

Al ocurrir una falla de fase a tierra (fase a) en el devanado secundario del transformador, que opera en un nivel de voltaje de 13.2 kV, se puede observar los cambios en la corriente y voltaje.

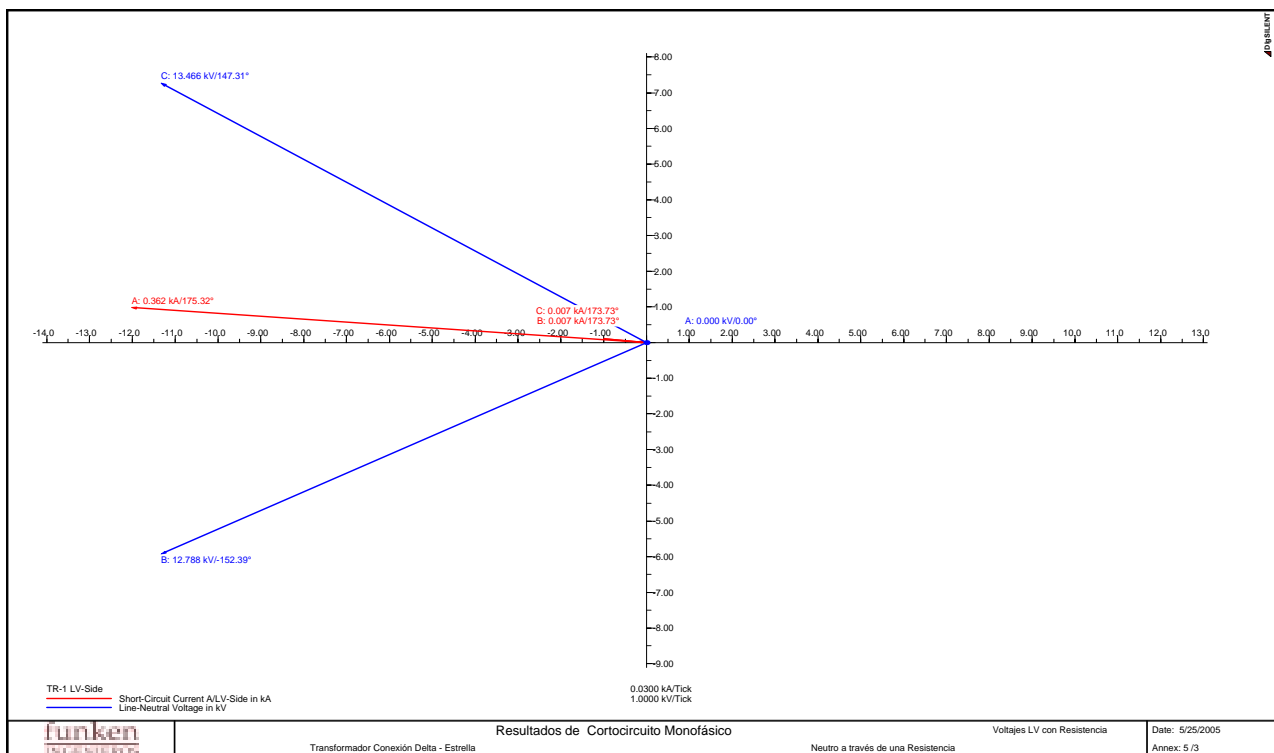


Figura No. 5. Diagrama Vectorial ante una Condición de Cortocircuito Monofásico en el Devanado Secundario del Transformador con el Neutro conectado a través de una Resistencia⁴.

⁴ Los voltajes obtenidos son de fase a tierra

Al ocurrir la falla de fase a tierra y considerando que se incluyó la resistencia en el neutro del transformador, se puede notar que la corriente de la fase fallada tiene un valor de 362 A que representa una disminución considerable con respecto al caso número 2 (4339 A), la disminución obtenida es aproximadamente de un 90 %, por lo que se demuestra el efecto que tiene la resistencia ante la ocurrencia de una falla de una fase a tierra.

Sin embargo, también se experimentan sobretensiones en los voltajes de fase a tierra para las fases no falladas, que como puede verse se incrementan a valores cercanos a los 13 kV, lo que implica un incremento temporal en la magnitud de casi 1.73 veces la magnitud que tenía previa a la falla.

Esta condición nuevamente pone la atención sobre el efecto en el aislamiento de los conductores y equipo conectado en las fases “sanas”, lo que es bastante similar a la condición evaluada del neutro flotante.

La gran ventaja de este esquema sobre el de neutro flotante es la circulación de una corriente de falla que permite habilitar los dispositivos de protección a tierra para que liberen la falla en el menor tiempo posible. Adicionalmente, la magnitud de la corriente de falla (362 A) no es de una magnitud mucho mayor a la nominal (221 A), lo que no requiere un “posible refuerzo” en el área de los conductores.

Caso Número 4. Neutro conectado a través de un Reactor.

Para la evaluación de este caso, al neutro del devanado secundario del transformador se le agregó un reactor de puesta a tierra con un valor de 20 Ohms, 10 s, 400 A.

Al ocurrir una falla de fase a tierra (fase a) en el devanado secundario del transformador, que opera en un nivel de voltaje de 13.2 kV, se puede observar los cambios en la corriente y voltaje.

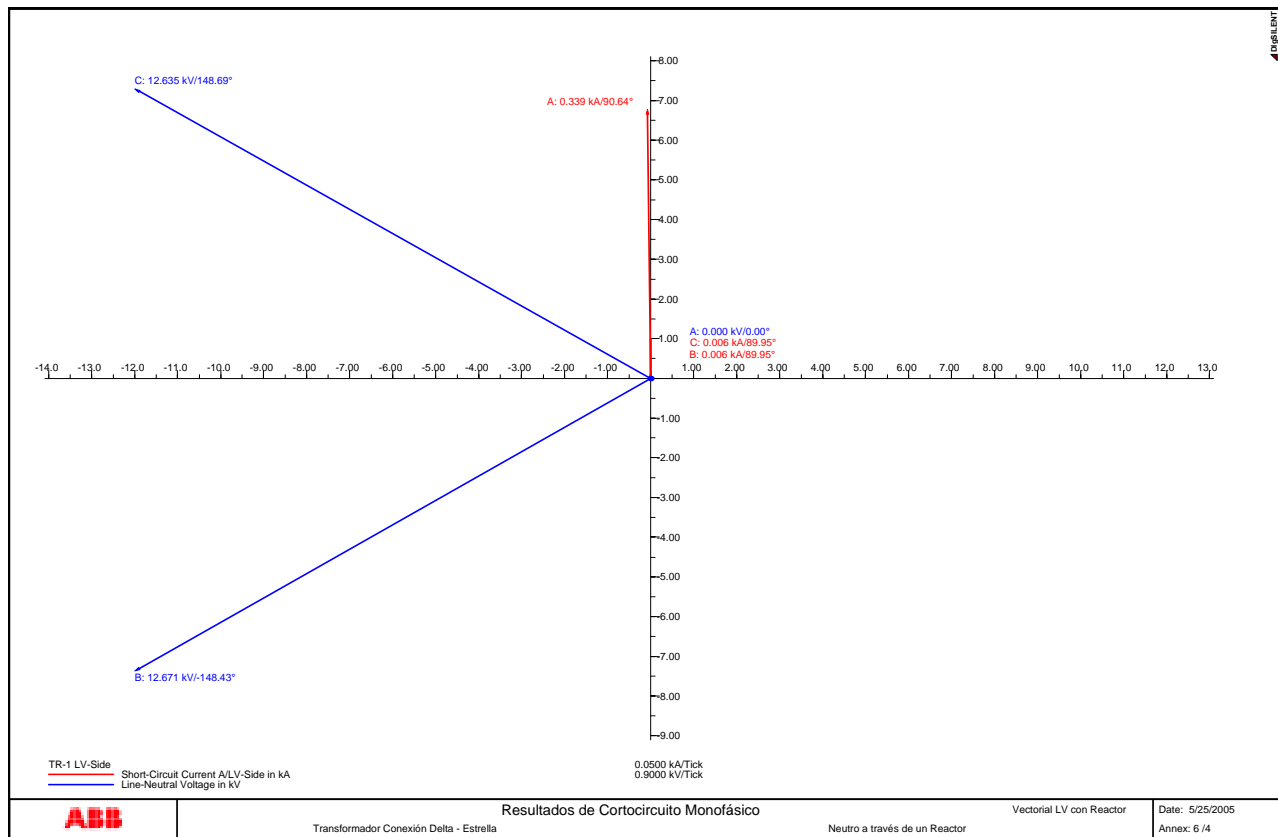


Figura No. 6 Diagrama Vectorial ante una Condición de Cortocircuito Monofásico en el Devanado Secundario del Transformador con el Neutro conectado a través de un Reactor.

Con la simulación realizada y con el reactor en el neutro del transformador, se puede notar que la corriente de falla tiene una magnitud de 339 A, que no representa una variación considerable con respecto al aterrizamiento a través de una resistencia (362 A), pero si en el ángulo.

Nuevamente, experimentan sobretensiones en los voltajes de fase a tierra para las fases no falladas, que como puede verse se incrementan a valores cercanos a los 13 kV, lo que implica un incremento temporal en la magnitud de casi 1.65 veces la magnitud que tenía previa a la falla.

Esta condición nuevamente pone la atención sobre el efecto en el aislamiento de los conductores y equipo conectado en las fases “sanas”, lo que es bastante similar a la condición evaluada del neutro flotante.

Como pudo verse, al aplicar una resistencia o reactor para aterrizar el neutro del transformador se encontró que la magnitud de la corriente de falla se reduce considerablemente y solamente se presentan problemas de sobretensiones temporales en las fases no falladas.

Tal y como se mencionó previamente, el contar con una magnitud de corriente de falla a tierra permite la habilitación de los dispositivos de falla a tierra que ajustados con un tiempo de liberación adecuado permitirá liberar la falla y reducir los sobretensiones y sus efectos en los equipos conectados en las fases “sanas”.

A pesar de que los voltajes de fase a tierra tienen incrementos sustanciales en su magnitud, en ningún caso, exceden de 1.73 veces la tensión nominal entre fase y tierra, lo que permite concluir que en caso de tener sistemas aterrizados a través de una resistencia o un reactor, los conductores del neutro deben tener un aislamiento nominal al menos igual a los conductores de fase, es decir, si los conductores de fase tienen un aislamiento de 15 kV, el conductor del neutro debe ser igual, ya que solamente de esta forma podrá soportar sin problema las posibles sobretensiones temporales que se desarrollen durante la ocurrencia de una falla.

Análisis de la Respuesta Dinámica del Sistema Bajo Prueba ante las Fallas Simuladas

Con la finalidad de mostrar comparativamente el efecto en los voltajes que como pudo verse en los casos de estudio es el problema más recurrente, se realizaron simulaciones dinámicas.

En cada una de las simulaciones se consideró lo siguiente:

- El sistema opera en condiciones normales.
- En 0.1 segundos después de iniciada la simulación se aplica una falla en la boquilla de la fase a del devanado secundario del transformador.
- No hay dispositivos que liberen la falla por lo que la magnitud de la corriente de falla y su correspondiente efecto en los voltajes de las fases no falladas se mantendrá durante el tiempo de la simulación

Se simularon cuatro casos que corresponden a cada uno de los métodos de aterrizamiento previamente descritos en este trabajo. La tabla siguiente muestra un comparativo entre las corrientes y voltajes que se presentan en los diferentes casos evaluados.

| Caso | Corriente de Falla de Una Fase a Tierra A | Voltaje de Línea a Neutro kV |
|-------------|--|-------------------------------------|
| 1 | 0.00 | 13.20 |
| 2 | 4339.00 | 7.91 |
| 3 | 362.00 | 13.46 |
| 4 | 339.00 | 12.67 |

Tabla No1. Resultados de las Simulaciones

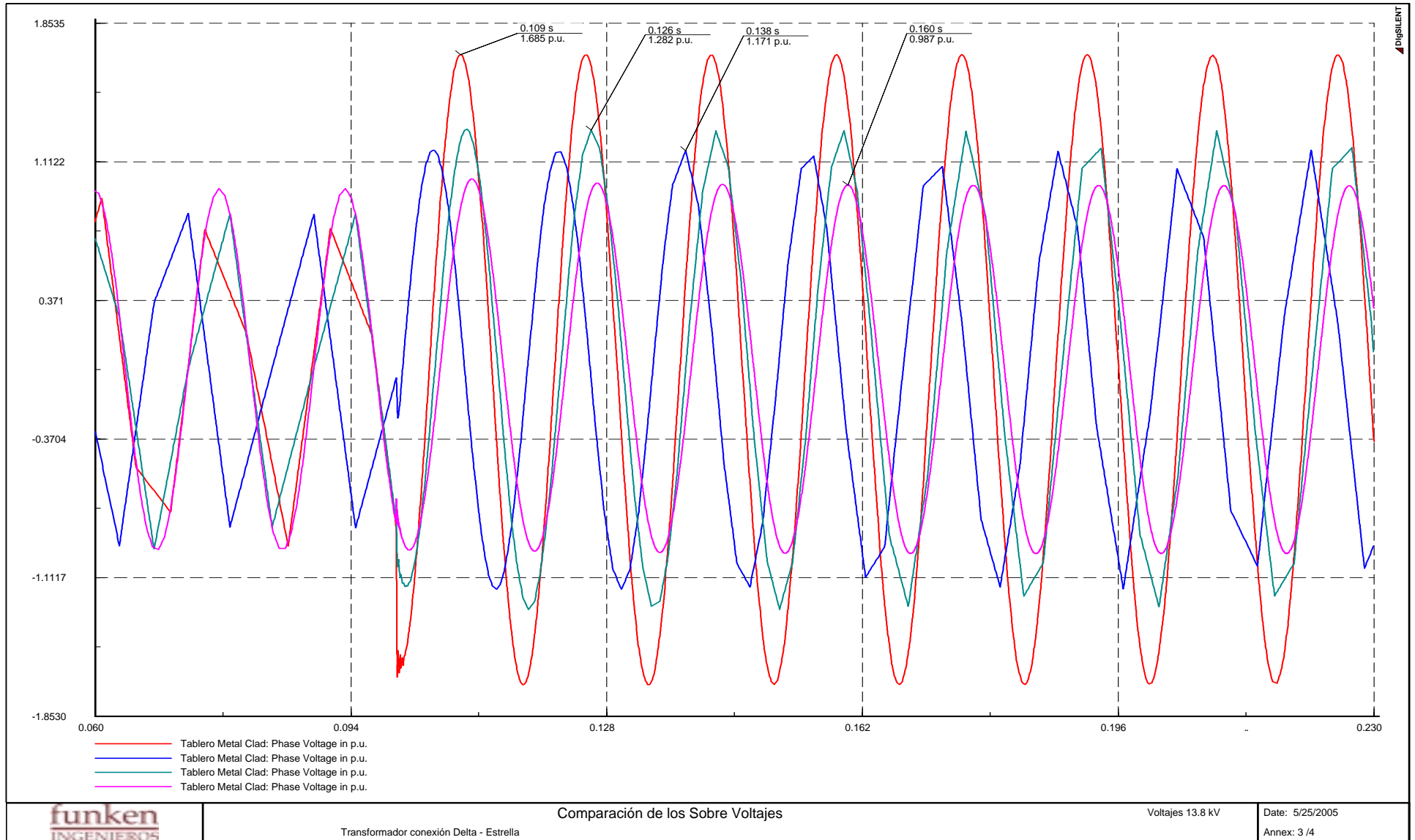
Los resultados se muestran en forma gráfica en la siguiente figura y su interpretación es:

La curva en color Rojo, corresponde al transformador con neutro flotante

La curva en color Rosa corresponde al transformador con el neutro sólidamente aterrizado

La curva en color Azul muestra la evaluación en la que el neutro del transformador se encuentra aterrizado a través de una resistencia

La curva en color Verde muestra la condición en que el neutro del transformador está aterrizado a través del reactor



IV. Conclusiones

Con la evaluación de los diversos casos de aterrizamiento y la ocurrencia de la falla de Una Fase a Tierra, se puede concluir lo siguiente:

- En los sistemas con el neutro del transformador flotante, se puede observar que no es muy recomendable su empleo, ya que al no contar con una conexión a tierra pueden presentarse sobretensiones de magnitud considerable, asimismo, debido a la falta de una trayectoria para las corrientes de falla de secuencia cero hace que su detección casi sea imposible, lo que podría dar origen a que dispositivos de protección remotos tuvieran que liberar esta falla, lo que implicaría mayor tiempo de permanencia de la condición de falla con sus correspondientes efectos en el aislamiento de los equipos.
- En el caso, en que se tiene el neutro del transformador conectado sólidamente a tierra, se creó un camino por donde la corriente de falla fluirá, por lo que la magnitud de la corriente ante la falla se presenta el valor máximo de los cuatro evaluados Sin embargo, como se mencionó previamente la magnitud de la corriente es muy alta, dicha corriente circulará a través de los conductores de la fase fallada y del neutro. Por tal motivo, es importante que los conductores sean dimensionados adecuadamente para soportar dichos esfuerzos ya que la circulación de una corriente de gran magnitud ocasiona un calentamiento sustancial lo que afecta en forma indirecta el aislamiento de los mismos.
- Con la configuración en la que el neutro del transformador es aterrizado a través de una resistencia, se puede notar que la corriente de la fase fallada tiene un valor mucho menor con respecto al caso donde el aterrizamiento es sólido, la disminución obtenida es aproximadamente de un 90 %, por lo que se demuestra el efecto que tiene la resistencia ante la ocurrencia de una falla de una fase a tierra.

- Con la simulación en la que el neutro del transformador se encuentra a través de un reactor, se puede notar que la corriente de falla tiene una magnitud muy similar al del aterrizamiento con resistencia, la cual no representa una variación considerable, la diferencia es notoria únicamente en el ángulo.

En general, se puede concluir lo siguiente:

La gran ventaja del esquema de aterrizamiento ya sea sólido, a través de una resistencia o de un reactor, es que existe un camino por donde la corriente de falla circulará y que permitirá habilitar los dispositivos de protección a tierra para que liberen la falla en el menor tiempo posible.

El uso de resistencia o reactor de puesta a tierra permite reducir la magnitud de la corriente de falla a tierra sustancialmente, sin embargo, se recomienda evaluar detalladamente esta opción al menos desde dos perspectivas:

- Comparar la magnitud de la corriente de falla a tierra contra la corriente de falla trifásica. Regularmente esta última es mucho mayor y sirve como base para el dimensionamiento de los equipos, solo en casos en que la corriente de falla de una fase a tierra tenga una magnitud similar o superior a la corriente trifásica se recomienda emplear la resistencia de puesta a tierra.
- El efecto que los sobrevoltajes temporales tendrán en los equipos en las fases no falladas.

En cualquiera de estos casos se experimentan sobretensiones temporales en los voltajes de fase a tierra para las fases no falladas, aunque estos incrementos son sustanciales en su magnitud, en ningún caso, exceden de 1.73 veces la tensión nominal entre fase y tierra

En base a lo anterior, se puede concluir que en caso de tener sistemas aterrizados ya sea sólidamente o bien, a través de una resistencia o un reactor, los conductores del neutro deben tener un aislamiento nominal al menos igual a los conductores de fase, es decir, si los conductores de fase tienen un aislamiento de 15 kV, el conductor del neutro debe ser igual, ya que solamente de esta forma podrá soportar sin problema las posibles sobretensiones temporales que se desarrollen durante la ocurrencia de una falla a tierra.

V. Referencias

Green Book, **IEEE Std 141-1993 Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants**

DlgSILENT, **Manual de Operación del Software PowerFactory, 2002**