

Congreso Internacional de Distribución Eléctrica CIDEL 2014

Mitigación de Campo Magnético en empalmes de cables de AT empleando técnicas pasivas

Carlos A. Wall
caw@iitree-unlp.org.ar

Patricia L. Arnera
pla@iitree-unlp.org.ar

Beatriz Barbieri
bbarbieri@iitree-unlp.org.ar

IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

1. PALABRAS CLAVE

Campo Magnético (B). Mitigación. Lazos pasivos.

2. RESUMEN

El crecimiento de los centros urbanos y el aumento de la demanda de energía eléctrica hace que cada vez se requieran más tendidos de Cables Subterráneos (CS) de Alta Tensión (AT). Asociados a los mismos se encuentran la generación de campos magnéticos, que desde ya hace varios años han despertado preocupación en la población por la asociación de estos con posibles efectos sobre la salud.

En el tendido de cables se identifican dos zonas, una en donde se realiza el tendido regular de los conductores de fase, y estos se encuentran próximos entre sí, y las zonas en donde se llevan a cabo los empalmes, allí las distancias entre las fases son mayores. En esta última, los valores de campo magnético son más elevados, debido al incremento de dicha separación.

En algunas circunstancias es necesario disminuir los niveles de campo generados en la zona de empalmes, para lograr dicho objetivo existen diferentes técnicas, como ser el incremento de la distancia a los mismos del punto de interés o la aplicación de técnicas de mitigación más desarrolladas.

Desde el punto de vista técnico económico, los lazos pasivos constituyen una solución efectiva, su costo no representa valores muy elevados y no se requiere de adiestramiento especial de los operarios para realizar el montaje. Estas ventajas requieren que la determinación de la mejor solución a cada caso en particular sea analizada mediante herramientas adecuadas. Se pretende estimar las principales características de las instalaciones, de la forma más precisa posible, con el objetivo de lograr valores de campo tan bajos como sean razonablemente alcanzables.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante cálculos de campo magnético, producido por cables subterráneos y la aplicación de técnicas de mitigación empleando lazos pasivos. Se estudian los niveles generados por las alternativas analizadas y se evalúa el efecto de

introducir lazos pasivos con diferentes características.

Se comparan los diferentes resultados obtenidos en cada caso, destacando las soluciones más efectivas para los casos analizados.

3. CAMPO MAGNÉTICO Y CS AT

A continuación se presentan algunas de las principales características de instalación de CS de AT y los perfiles de B generados. Para dichos cálculos se utilizaron herramientas de cálculo desarrolladas en el IITREE-LAT-FI-UNLP, que permiten estimar valores de B generados por instalaciones e implementar estrategias de mitigación empleando lazos pasivos [2] [3].

En la República Argentina, en áreas urbanas es común emplear CS AT en tensiones 132 kV y 220 kV.

Un ejemplo para CS de 220 kV se presenta en la Fig. 1, en donde se observan profundidades y separación entre las fase en ductos y en la zona de empalmes.

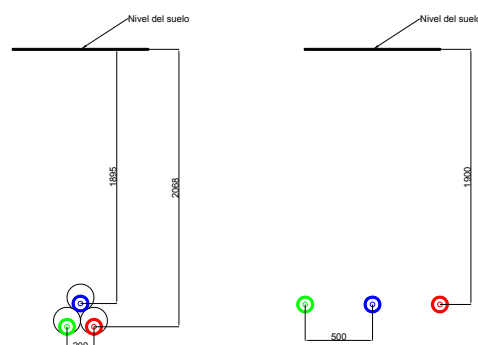


Fig. 1 – Profundidades y separación de CS en ductos y empalmes.

Analizando los valores de B generados por CS de 220 kV (Fig. 2) se observa un incremento en dichos niveles en las zonas de empalmes, en donde los valores de campo cuadruplican a los de la zona de ductos.

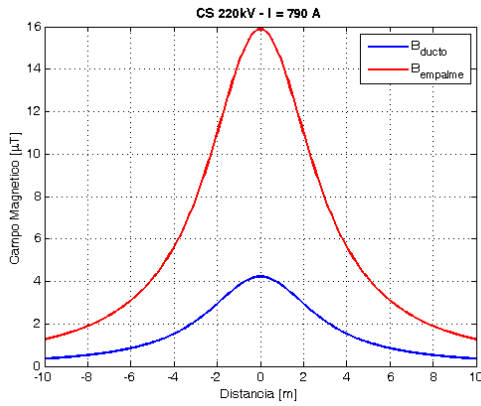


Fig. 2. Perfiles de campo magnético de CS de 220 kV I=790 A, en ductos y empalmes.

4. CAMPO MAGNÉTICO - MITIGACIÓN

Ante el incremento en los valores de B en la zona de empalmes, en algunas circunstancias es necesario aplicar alguna técnica de mitigación. El empleo de lazos pasivos constituye [1] una herramienta económicamente muy atractiva por su bajo costo y simple instalación. Sin embargo es necesario conocer cuál es arreglo más ventajoso para cada caso en particular.

Por lo tanto es de interés conocer el comportamiento de dichos lazos cuando se emplean diferentes arreglos o se emplean diferentes conductores.

5. LAZOS PASIVOS

La compensación por medio de lazos pasivos consiste en disponer un conductor en forma de espira o lazo, en una posición tal que se induzca una tensión, como consecuencia del concatenamiento del flujo de campo magnético, generado por los conductores de fase de una línea de transmisión. Como resultado de esta tensión inducida y considerando la impedancia del lazo, se produce una circulación de corriente en dicho lazo.

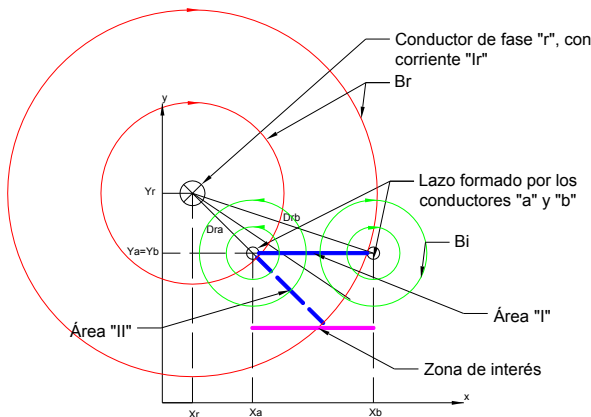


Fig. 3. Campo Magnético “Br” generado por un conductor “r”, que concatena a un lazo pasivo “a-b”, que genera un campo magnético “Bi”.

Esta corriente crea un campo magnético “Bi” que presumiblemente se opone al campo generado por los conductores de fase de la línea, “Br”. Esta situación puede apreciarse en la Fig. 3.

El proceso hasta aquí descrito puede aplicarse para un sistema trifásico como el de la Fig. 4, en donde se aprecian en un mismo plano los tres conductores de fase y un lazo pasivo.

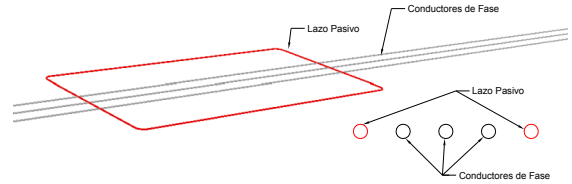


Fig. 4. Arreglo de sistema trifásico (gris) con un lazo pasivo (rojo).

La ubicación de los lazos puede variar, así como la sección utilizada para la implementación y el número de lazos empleados.

La sección de los conductores y el número de lazos pasivos van a ser evaluados con el propósito de estudiar el comportamiento y la alternativa más efectiva para un caso.

6. FACTOR DE APANTALLAMIENTO

La efectividad de los lazos pasivos puede ser evaluada por el grado de reducción de campo magnético en un punto o área de interés. Esto se logra con la relación entre el campo magnético sin mitigación y con mitigación.

El grado de reducción de campo magnético está determinado por la inductancia mutua entre el (o los lazos) y los conductores de fase, la inductancia del lazo y la resistencia del lazo.

Para cuantificar el grado de reducción de B y comparar entre las diferentes alternativas se utiliza el Factor de Apantallamiento (FA), que se define en (1).

$$FA = \frac{B_0(P)}{B_S(P)} \quad (1)$$

FA es la relación entre la densidad de flujo magnético en un punto dado (P) en ausencia (B0) y en presencia (BS) de mitigación [1].

7. SECCIONES CONSIDERADAS

Se evalúan diferentes alternativas, considerando secciones de conductores de baja tensión disponibles en el mercado. A continuación se presentan las principales características de los conductores considerados son:

- Sección: 185 mm², R: 0,129 Ω/km
- Sección: 240 mm², R: 0,0987 Ω/km
- Sección: 300 mm², R: 0,0754 Ω/km

8. POSICIÓN DE LOS LAZOS

Las alternativas consideradas contemplan la disposición de lazos pasivos ubicados en un plano a 0,4 m por encima del plano de los empalmes, esto se aprecia en el corte transversal de la Fig. 5, en donde se aprecian los tres conductores de fase en la zona de empalmes y los conductores de los lazos pasivos.

En la Fig. 6 se presenta una vista en planta del sistema estudiado, la longitud considerada para el lazo interno fue de 12 m, la longitud total de los conductores de los lazos fue de 26 m.

La cantidad de conductores en estas figuras es genérica, ya que una de las variables de estudio es la cantidad de lazos.

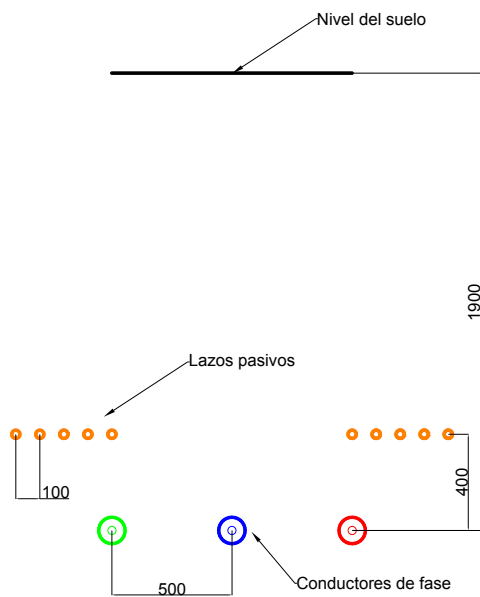


Fig. 5. Ubicación de lazos pasivos en la zona de empalmes, corte transversal.

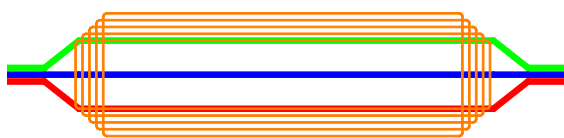


Fig. 6. Ubicación de lazos pasivos en la zona de empalmes, vista superior.

9. CASOS ANALIZADOS

Como se mencionó anteriormente se analizan diferentes alternativas de implementación de lazos pasivos contemplando tres secciones de conductores que los conforman. A su vez, se contemplan diferentes números de lazos, de acuerdo a los siguientes casos.

1. Un lazo
2. Dos lazos
3. Tres lazos
4. Cuatro lazos

Para el Caso 1 se dispone el lazo interno y para los siguientes se adicionan lazos externos.

10. RESULTADOS OBTENIDOS

En este punto se presentan perfiles de Campo Magnético para los casos propuestos.

Se trazan los perfiles de campo magnético a 1 m sobre el nivel del suelo y a 10 m a cada lado del centro del empalme.

Se presentan en todas las figuras el perfil de campo magnético sin la implementación mitigación.

En la Fig. 7 se presentan los perfiles obtenidos para las diferentes secciones utilizando un solo lazo, Caso 1.

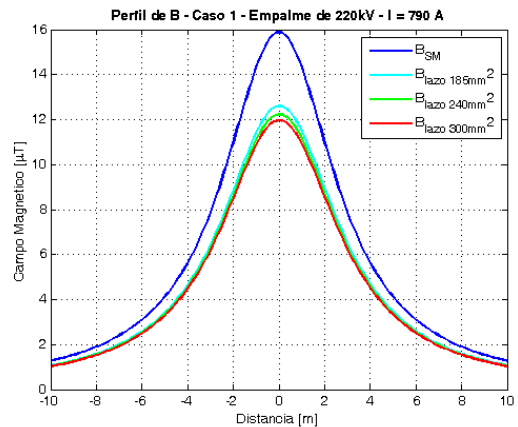


Fig. 7. Perfiles de B, sin lazo y Caso 1, para diferentes secciones.

En la Fig. 8 se presentan los perfiles obtenidos para las diferentes secciones utilizando dos lazos, Caso 2.

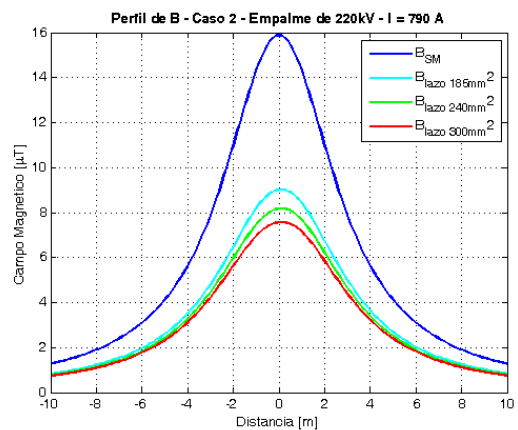


Fig. 8. Perfiles de B, sin lazo y Caso 2, para diferentes secciones.

En la Fig. 9 se presentan los perfiles obtenidos para las diferentes secciones utilizando tres lazos, Caso 3.

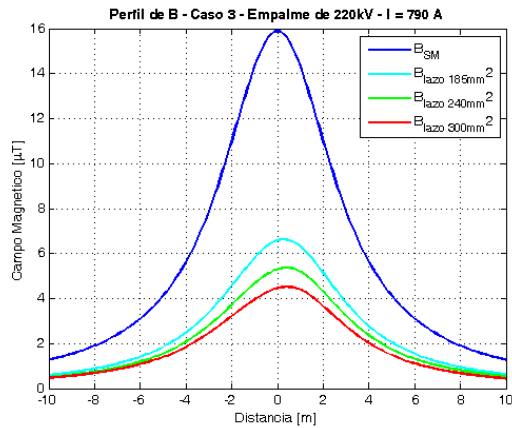


Fig. 9. Perfiles de B, sin lazo y Caso 3, para diferentes secciones.

En la Fig. 10 se presentan los perfiles obtenidos para las diferentes secciones utilizando cuatro lazos, Caso 4.

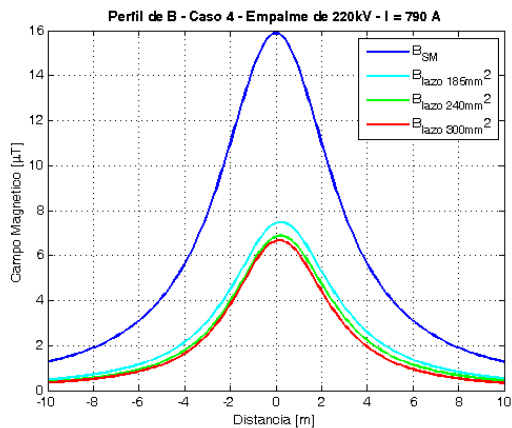


Fig. 10. Perfiles de B, sin lazo y Caso 4, para diferentes secciones.

11. ANALISIS DE RESULTADOS

En las Fig. 7 a 10 se aprecian los valores de campo obtenidos para las diferentes situaciones consideradas.

Si se considera el FA definido en el inciso 6, y se calcula dicho factor para cada uno de los puntos, en donde se obtuvo el B, es posible obtener un parámetro de cómo se va modificando el campo ante la presencia de los lazos pasivos.

En las Fig. 11 a 14 se traza el FA correspondiente para cada uno de los perfiles de las Fig. 7 a 10.

En la Fig. 11 se trazan los perfiles de FA correspondientes al Caso 1, se observa que cuando se evalúa el comportamiento de los conductores de 300 mm², se obtienen valores de FA más altos, en el centro del empalme. Los valores son superiores a 1,3.

Para el Caso 2, Fig. 12, se aprecia una tendencia similar, pero como se contemplan dos lazos pasivos, los perfiles del FA tienen mayor valor. Para conductores de 300 mm², se obtienen valores próximos a 2,1 en la zona central.

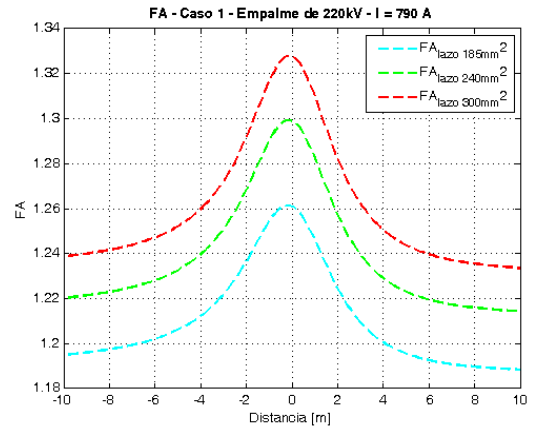


Fig. 11. Perfiles de FA, Caso 1, para diferentes secciones.

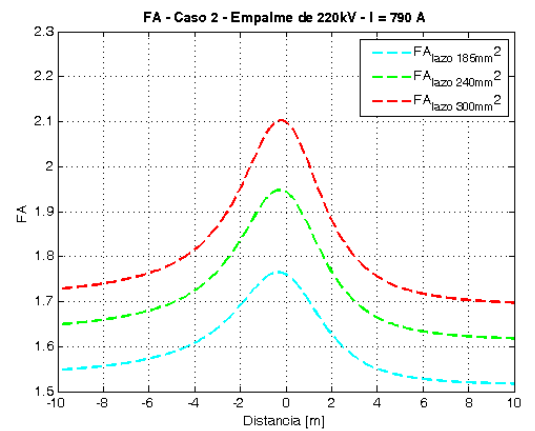


Fig. 12. Perfiles de FA, Caso 2, para diferentes secciones.

En el Caso 3, Fig. 13, que considera la presencia de tres lazos, se aprecia que el apantallamiento es más efectivo, lográndose un máximo de 3,65, para conductores de 300mm², de 3,1, para conductores de 240mm² y 2,45, para los de 185mm².

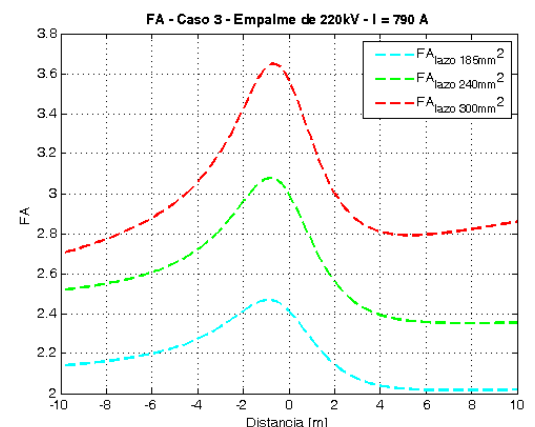


Fig. 13. Perfiles de FA, Caso 3, para diferentes secciones.

Para el Caso 4, en donde se disponen 4 lazos, Fig. 14, se observa que el FA aumenta en las zonas alejadas del centro, pero con respecto al Caso 3, el FA disminuye en la zona central.

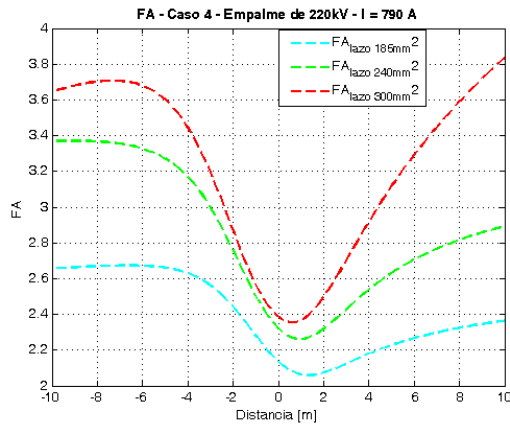


Fig. 14. Perfiles de FA, Caso 4, para diferentes secciones.

Para comprender lo que sucede se puede considerar la relación entre la componente B_x y B_y de B , en un punto determinado del espacio, que se conoce como polarización.

En la Fig. 15, se observa que en $x=0$ los valores de B_y del campo mitigante (rojo) superan a las del campo a mitigar (azul), Caso 4. En este caso el campo magnético generado por los lazos pasivos supera al generado por los conductores de fase en $x=0$.

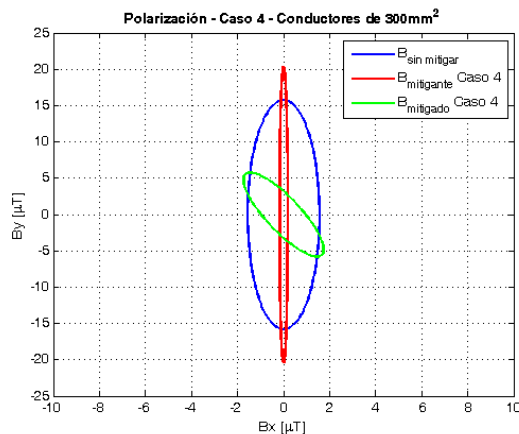


Fig. 15. Caso 4. Polarización de B sin mitigar (azul), mitigante (rojo) y mitigado (verde).

Si se considera el Caso 3, Fig. 16, se observa que B_y del campo mitigante (rojo) es inferior al del campo a mitigar (azul) en $x=0$.

Se puede decir que en la zona central, se ha saturado el efecto de mitigación, con lo cual disponer más lazos no resulta beneficioso.

En la Fig. 17 se realiza una comparación de los perfiles de FA para todos los casos, considerando únicamente conductores de 300 mm^2 . En la misma se aprecia la evolución del FA en función de la cantidad de lazos pasivos considerados.

Comparando el Caso 3 y Caso 4, se aprecian dos zonas de interés. En primer lugar la zona central, en donde el empleo de 3 lazos sería la opción más conveniente, desde (-3 a 3). Si se evalúa la atenuación a distancias mayores a 3m desde el

centro del empalme, el empleo de 4 lazos presenta un mejor desempeño.

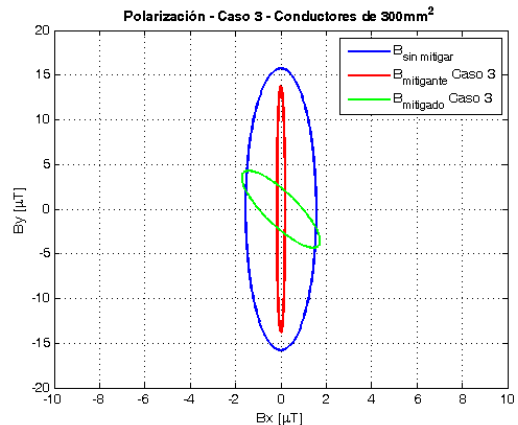


Fig. 16. Caso 3. Polarización de B sin mitigar (azul), mitigante (rojo) y mitigado (verde).

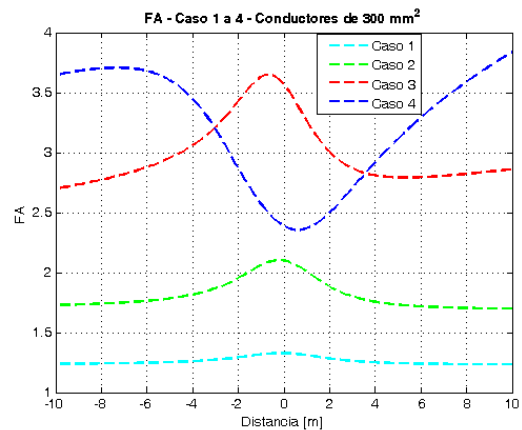


Fig. 17. Perfiles de FA, Casos 1 a 4, conductores de lazo de 300 mm^2 .

En la Tabla I se presenta un resumen de los valores máximos de campo magnético obtenidos en la zona de empalmes considerando la presencia de compensación. El valor máximo de campo magnético en la zona de empalmes sin la utilización de mitigación fue de $16 \mu\text{T}$, esto se aprecia en la Fig. 2.

Tabla I. Valores de CM para cada caso y sección.

Caso	CM máximo [μT]		
	Sección de lazos [mm^2]		
	185	240	300
1	12,6	12,2	12
2	9	8,2	7,5
3	6,6	5,4	4,5
4	7,5	6,8	6,6

En la Tabla II se presenta un resumen con los valores más altos de FA para cada caso y sección considerado.

Si se comparan los gráficos obtenidos para el FA, se aprecia que este no es constante a lo largo de

todo el perfil, ya que los valores de campo magnético varían en función de la posición.

Tabla II. Valores máximos de FA para cada caso y sección.

Caso	FA máximo		
	Sección de lazos [mm ²]		
	185	240	300
1	1,26	1,3	1,33
2	1,75	1,95	2,1
3	2,45	3,1	3,65
4	2,7	3,35	3,85

Si se analiza lo que ocurre en la zona de mayor campo magnético, sin la implementación de mitigación(x=0), se encontrará que allí no siempre se obtienen los mayores valores de FA. Esto se aprecia en la Tabla III.

Tabla III. Valores de FA en x=0 para cada caso y sección.

Caso	FA en x=0		
	Sección de lazos [mm ²]		
	185	240	300
1	1,26	1,3	1,3
2	1,75	1,95	2,1
3	2,4	3,0	3,55
4	2,1	2,3	2,4

Dependiendo del caso, la sección considerada y la zona de interés, variará la efectividad de los lazos.

En los Casos 1 a 3 se observa que los mayores valores de FA se obtienen en la zona central. Cuando se disponen 4 lazos hay una variación en la tendencia del perfil de FA, en la misma región se obtienen los valores más bajos. Encontrándose para el Caso 4 valores de FA inferiores a los del Caso 3. Esto se debe a la saturación del efecto mitigante y consecuentemente una reducción del FA.

En la Fig. 18 se trazan los valores del FA en función de la sección de los conductores de lazo, en el centro del empalme (x=0), para todos los casos considerados.

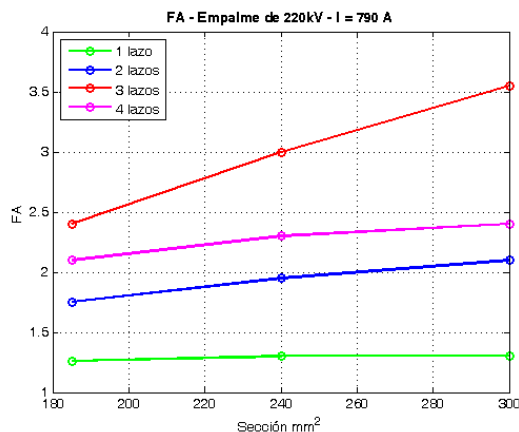


Fig. 18. Valores de FA en x=0, Casos 1 a 4, considerando todas las secciones.

12. CONCLUSIONES

El valor de la resistencia del lazo afecta principalmente al ángulo de fase de la corriente inducida. Este efecto se aprecia cuando se consideran conductores de mayor sección.

El incremento indiscriminado en el número de lazos pasivos no se refleja en una estrategia de mitigación más efectiva. Cada caso requiere de un análisis exhaustivo que determinará cuál es la estrategia de mitigación que mejor se adapta.

Para el caso particular presentado en este estudio la alternativa más eficiente resultó ser el empleo de conductores de 300 mm² y tres lazos pasivos.

Con esta solución se logra una reducción máxima de 3,65 veces.

- El efecto mitigante de los lazos pasivos depende de las características del lazo y de la instalación a la que se le desea aplicar una estrategia de mitigación.
- Aumenta el efecto de mitigación al disminuir la resistencia del conductor, lo cual se logra aumentando su sección. La sección a adoptar es un problema económico ya que a medida que esta aumenta, también lo hacen los costos de la instalación.
- La cantidad de lazos que maximiza la mitigación, deberá definirse para cada tipo de instalación

13. REFERENCIAS

- [1] Cigré Technical Brochure 373 “Mitigation Techniques of power-frequency magnetic fields originated from electricpower systems”. WG C4.204, February 2009.
- [2] “Implementation of a tool for magnetic field mitigation using passive loops”. C. A. Wall, P. L. Arnera, M. B. Barbieri. IEEE T&D LA Sixth IEEE/PES, 3-5 September 2012, Montevideo, Uruguay.
- [3] “Development of software for magnetic field calculation and mitigation using passive loops”. 3rdCigré International Colloquium on Electric and Magnetic Fields at Extremely Low Frequencies(EMF-ELF 2013), 15-16October 2013, Nara, Japan.C. A. Wall, P. L. Arnera, M. B. Barbieri.