

Estudio Exploratorio: Maximización En La Explotación De Bancos Paralelos De Transformadores Por Ecuación Activa De Impedancias

Matías G. Krujoski^{a,b*}, Mario O. Oliveira^{a,c}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

^c LIDEE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: krujoskimatias@fio.unam.edu.ar, autor2@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio exploratorio para verificar a nivel conceptual la factibilidad de hacer que la potencia total disponible de un banco paralelo de transformadores coincida con la suma de las nominales de las máquinas que lo componen. Para ello se propone y evalúa una técnica de modificación activa del reparto de cargas mediante la ecuación de impedancias de las máquinas a través de una inductancia variable por control electrónico. Los resultados obtenidos para el ensayo por simulación con dos transformadores monofásicos de distribución demuestran la factibilidad operativa de la técnica propuesta. Además, permiten establecer que la impedancia activa de ecuación debe aplicarse a la máquina de menor potencia.

Palabras Clave – Ecuación de impedancias, Inductancia variable, Maximización, Paralelo de transformadores.

1. Introducción

1.1. Contextualización de la situación de estudio

Cuando se produce un aumento de la potencia de carga en una central transformadora entre una tensión primaria y una secundaria (típicamente para reducción) una forma práctica de atender el crecimiento resulta de la asociación en paralelo de dos o más transformadores. Es decir, conectando simultáneamente sus barras de alta tensión (AT) y de baja de tensión (BT) en paralelo; de modo tal que la potencia total absorbida por la carga sea solventada con el aporte de ambos transformadores. En estas condiciones de operación, la distribución de la carga entre las máquinas del banco quedará determinada por la proporción inversa de sus tensiones porcentuales de corto-circuito según (1). A su vez, esto queda determinado por las impedancias equivalentes de cada una de las máquinas; constituyendo una restricción de origen físico-constructivo.

$$\frac{d_a}{u_{cca}} = \frac{d_b}{u_{ccb}} \quad (1)$$

Donde d_a y d_b son los factores de demanda de los transformadores A y B respectivamente, en tanto que u_{cc} indica sus tensiones porcentuales de corto-circuito.

Estas restricciones de origen constructivo implican (en la práctica) que normalmente no pueda lograrse explotar la máxima potencia del banco de transformadores (o sea, la suma de sus nominales) dado que el reparto de potencias no es proporcional a la nominal de cada una de las máquinas. Dándose una situación operativa en la que generalmente la máquina de menor potencia alcanza su

carga nominal mucho antes que la de mayor potencia lo haga, por lo tanto todo el banco ve limitada su potencia máxima de salida.

En última instancia, esta limitante supone un inconveniente dado que no puede explotarse el arreglo en paralelo de transformadores a su máxima potencia como suma de potencias nominales de las máquinas constituyentes.

1.2. Objetivos

El presente estudio exploratorio aquí presentado se ejecutó con el objeto de verificar a nivel conceptual la factibilidad de maximizar la explotación de un banco en paralelo de transformadores, es decir buscar que la potencia total de carga se iguale a la suma de nominales, sin sobrecargar ninguna de las máquinas. Para ello se propone y evalúa el desempeño de una técnica de modificación en el reparto de cargas del banco mediante la ecualización activa de las impedancias de las máquinas a través de una inductancia variable por control electrónico.

2. Metodología

2.1. Técnica de ecualización activa

Se propone la modificación de la impedancia de salida de los transformadores a partir de adicionar en serie a este una impedancia que pueda ser controlada en forma electrónica. De ésta manera, con la estrategia y/o algoritmo de control apropiado puede lograrse modificar en forma activa (es decir, durante el tiempo de operación y ante condiciones variables) el valor de impedancia de salida del transformador en el contexto de un banco paralelo. Así en última instancia se busca modificar las condiciones de reparto de carga para el arreglo paralelo de transformadores como método de maximización de la explotación del banco. En la Figura 1 se aprecia que Z_e representa la impedancia activa de ecualización, en serie con uno de los transformadores (entre las barras a U_1 y U_2), de forma que la medición de los parámetros operativos (tensiones primaria y secundarias como corrientes de carga y a través de la impedancia activa) permiten al equipo de control producir la corriente de control (I_c) para implementar el principio propuesto.

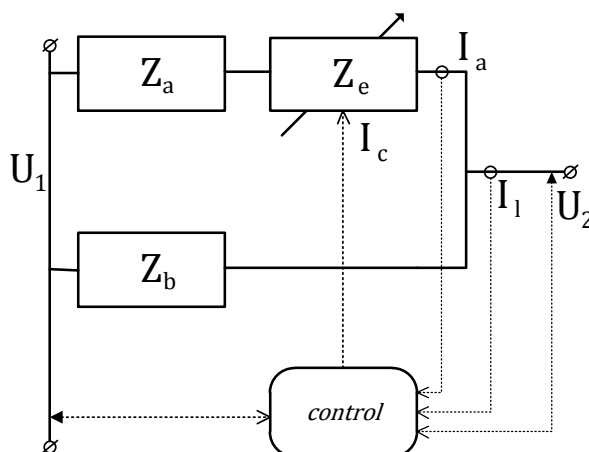


Figura 1. Esquema conceptual de ecualización activa de impedancia

Considerando los niveles de potencia y por tanto la magnitud de las corrientes eléctricas alternas que debe conducir la impedancia propuesta (dado que se trata de un elemento en serie con el circuito) es que se propone una inductancia variable. Para ello, una alternativa constructiva sería la de una bobina de potencia (para la transmisión de la energía) sobre un núcleo magnético saturable con un segundo bobinado de control sobre el cual se inyecta una corriente continua. De esta manera, el sistema de control activo de impedancia podrá modificar el valor de reactancia inductiva de la bobina principal de paso mediante la modificación pertinente de la corriente en segundo bobinado. Cabe destacar que la bobina principal de ecualización deberá construirse con materiales y métodos adecuados de manera de lograr la menor resistencia eléctrica posible, y así reducir las pérdidas conductivas. En la Figura 2 se presenta un esquema conceptual de esta propuesta constructiva, donde la I_p representa la corriente hacia la carga aportada por el transformador para el cual se interpone la impedancia de ecualización e I_c indica la corriente de control producida por el sistema de control activo de impedancia.

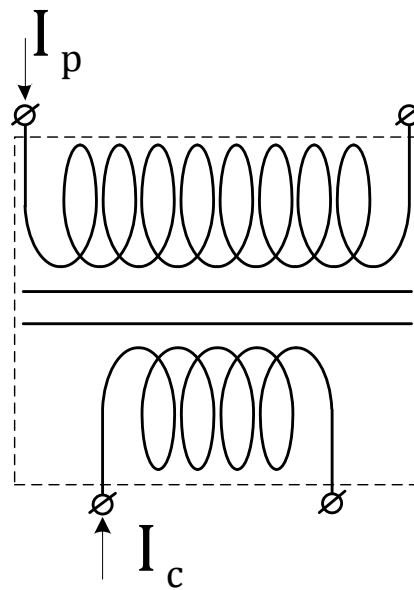


Figura 2. Esquema de la reactancia inductiva variable

En el marco del presente trabajo, para validar esta técnica se realiza una simulación mediante *scripts* de MATLAB® programados *ad hoc* a partir de las ecuaciones circuitales de operación para un banco paralelo de transformadores.

Considerando la ausencia de criterios o elementos de cálculo que permitan definir *a priori* el rango de valores de inductancia que se requiere para atender la propuesta, se implementó un cálculo iterativo de las condiciones operativas del banco para todo un rango entre 0Ω (representativo del caso “sin impedancia”) y el doble del valor máximo de reactancia inductiva de los transformadores como cotas de variación para la impedancia activa. De esta manera, los resultados de ensayo permiten formular un criterio de dimensionamiento para el elemento de ecualización en la técnica propuesta.

2.2. Condiciones de ensayo

A los efectos de este estudio exploratorio se adoptó una configuración de referencia compuesta por el paralelo de dos transformadores monofásicos cuyos parámetros del modelo eléctrico simplificado se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros eléctricos de los transformadores

Parámetro	Transf. A	Transf. B	Unidad
U_{1N}	7620	7620	[V]
U_{2N}	220	220	[V]
S	5	10	[kVA]
U_{CC}	4,57	4,5	[%]
R_1	157,9	61,91	[Ω]
R_{21}	157,9	61,91	[Ω]
X_1	212,35	116,37	[Ω]
X_{21}	212,35	116,37	[Ω]
N_1	33000	34000	[vueltas]
N_2	1000	1000	[vueltas]

Como puede apreciarse en los parámetros de las máquinas, estas son de potencias nominales diferentes. Además, sus impedancias características también son diferentes; esto se ve reflejado por la diferencia en la tensión porcentual de cortocircuito.

2.3. Ensayo de referencia

Con el objeto establecer una comparación entre las condiciones operativas del banco de transformadores con la aplicación de la técnica de equalización activa propuesta, en primera instancia se ha simulado el banco sin la incorporación de la misma. En la Figura 3 se presenta un diagrama de la configuración utilizada para este ensayo de referencia, trabajando siempre a partir del modelo eléctrico equivalente simplificado al primario.

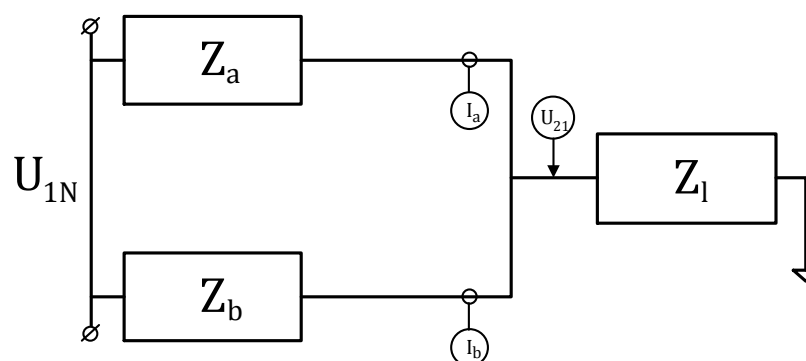


Figura 3. Diagrama del ensayo de referencia

Mediante la simulación se registraron los valores de corrientes aportadas por cada transformador (I_a e I_b) como así también la tensión (U_{21}) sobre la carga para todo el régimen de carga (desde vacío hasta nominal, o sea suma de las potencias nominales de ambas máquinas). Además, se ha simulado el comportamiento para todo el abanico de características de carga (desde inductivo puro hasta capacitivo puro, pasando por resistivo y todos los puntos intermedios).

2.4. Ensayo de ecualización en el Transformador A

En este caso se ha simulado el comportamiento del banco de transformadores al incorporar la impedancia de ecualización en serie con el secundario del transformador A, según la Figura 4.

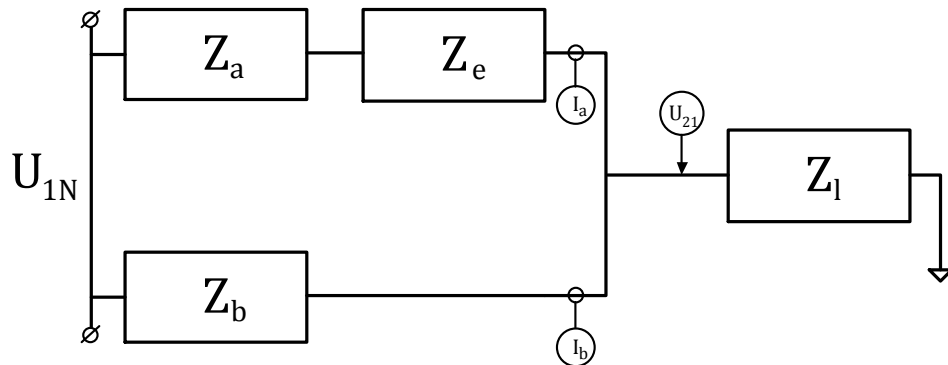


Figura 4. Diagrama del ensayo con impedancia activa en el Transformador A

Como puede apreciarse en la Figura 4 para este ensayo también se han registrado los valores de corrientes aportados por cada una de las máquinas, como así la tensión sobre la carga.

En este caso también se ha simulado las condiciones de carga desde vacío hasta la suma de nominales, con características desde inductivo puro hasta capacitivo. A su vez, se ha simulado las condiciones de operación del banco para todos los valores de impedancia de ecualización. De esta forma, es que los resultados permitirán encontrar las leyes que debe incorporar el sistema de control de impedancia activa para lograr el efecto de ecualización pretendido.

2.5. Ensayo de ecualización en el Transformador B

Finalmente se ha ensayado el comportamiento del banco de transformadores incorporando la impedancia activa de ecualización en la salida del secundario del transformador B, según se muestra en la Figura 5.

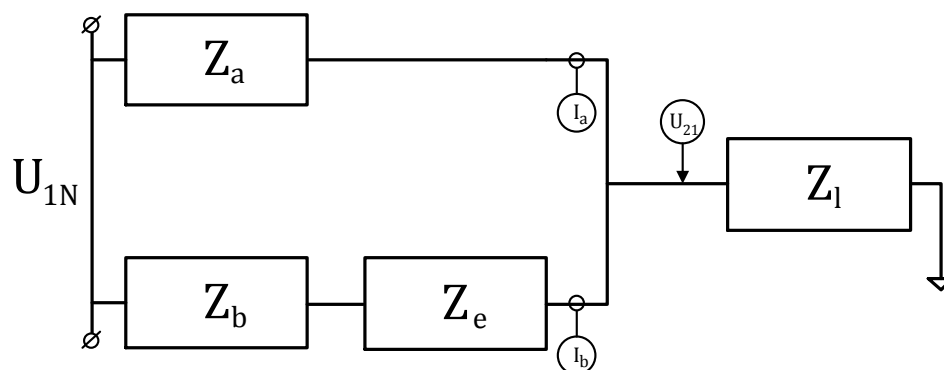


Figura 5. Diagrama del ensayo con impedancia activa en el Transformador B

Para este ensayo fueron simuladas las mismas condiciones de carga (desde vacío hasta la suma de nominales y con característica desde inductiva hasta capacitiva), mientras que la impedancia de ecualización también se modificó en el mismo rango de barrido.

3. Resultados

3.1. Ensayo de referencia

En la Figura 6 se presentan los resultados de factores de demanda de ambos transformadores obtenidos para del ensayo, se ha decidido graficar ésta relación porque resulta en una mejor representación de la condición operativa de las máquinas.

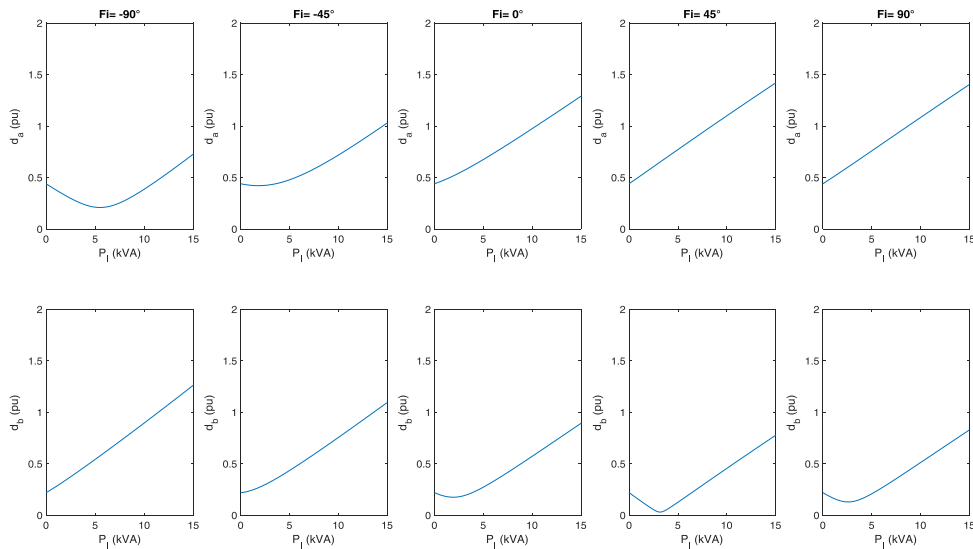


Figura 6. Factores de demanda para el banco operando sin ecualización

Puede apreciarse que el transformador A (de menor potencia) alcanza su carga nominal (factor de demanda mayor a 1) para una característica resistiva pura ($Fi=0^\circ$) cuando la potencia de carga se ubica en torno a los 10kVA. Es decir, la máquina de menor potencia opera sobrecargada para una carga resistiva (y luego para todas las inductivas) cuando la carga es aproximadamente el 60% de la suma de las nominales. Un comportamiento similar sufre el transformador B (de mayor potencia) para cargas capacitivas puras. En definitiva, este ensayo pone en evidencia que (sin importar la característica de carga) al menos una de las máquinas opera en sobrecarga cuando la potencia de carga se ubica en torno a los 15kVA (suma de las nominales de las máquinas).

En la Figura 7 se presentan los valores de tensión sobre la carga para las diversas condiciones de operación simuladas, donde se aprecia que en ningún caso se producen variaciones superiores al 10%.

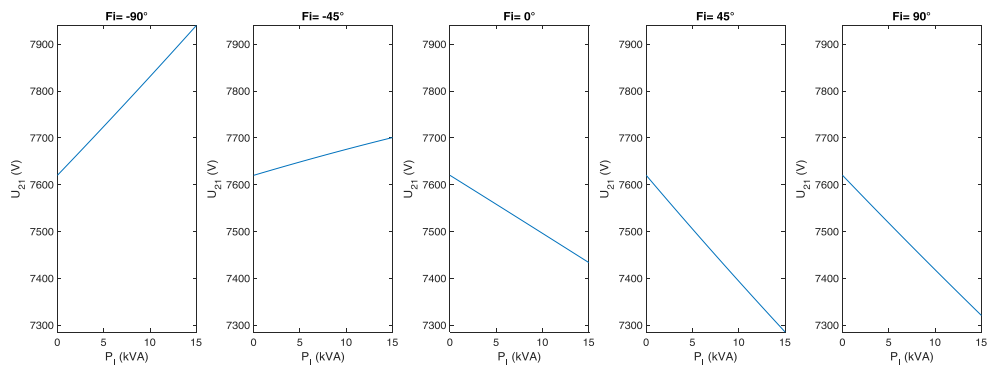


Figura 7. Tensión en la barra BT (referida al primario) para el ensayo de referencia

3.2. Ensayo de ecualización en el Transformador A

En la Figura 8 se presenta los factores de demanda para ambas máquinas, graficados como una función de la potencia de la carga (eje horizontal) y del valor de impedancia de ecualización (eje vertical) para las diversas características de carga (desde capacitivo hasta inductivo).

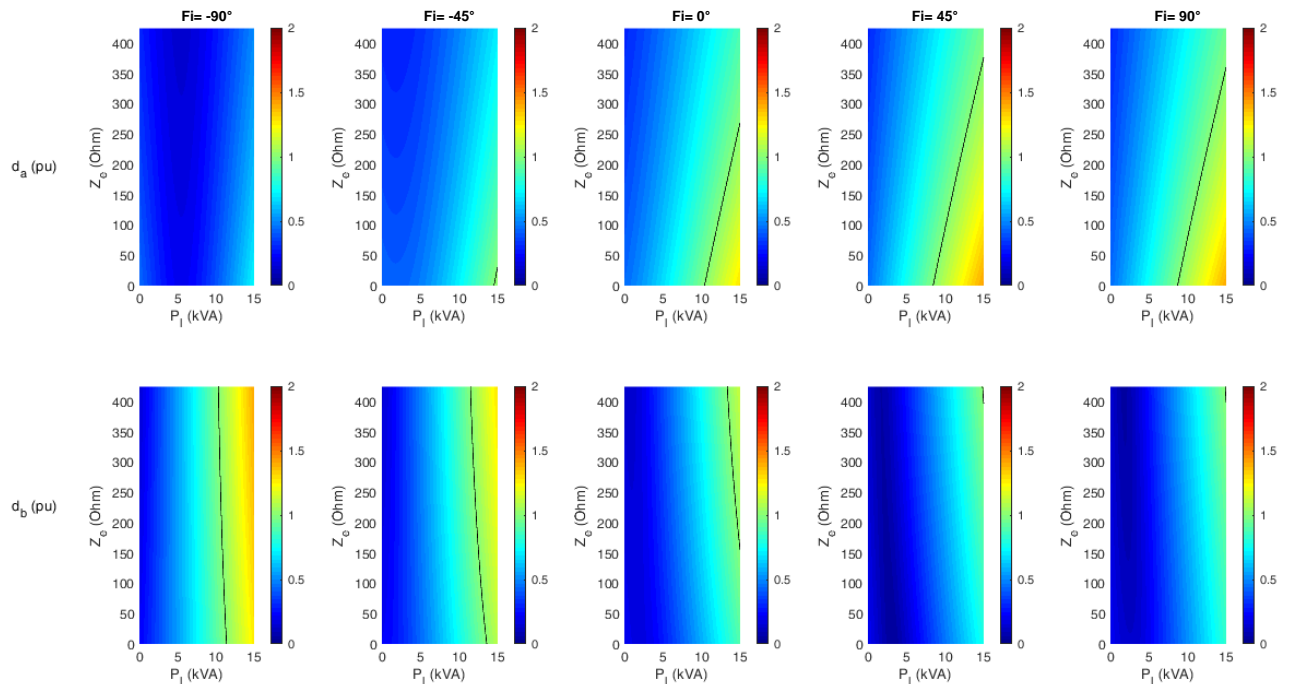


Figura 8. Factor de demanda de las máquinas para ecualización en el Transformador A

En la Figura 8 se han marcado en todos los casos con trazo negro la región a partir de la cual el factor de demanda de hace unitario (carga nominal para la máquina en cuestión). De esta forma se puede apreciar que para una carga resistiva pura al variar la impedancia de ecualización entre 0 y un valor cercano a los 300Ω se puede lograr que la potencia absorbida por la carga supere los 10kVA y alcance aproximadamente la suma de las nominales (15kVA) sin sobrecargar ninguna de las máquinas.

Es menester aclarar que la región de operación definitiva del control electrónico de la impedancia activa quedará determinada por la intersección de los trazos negros en el factor de demanda de la máquina A con la B para una potencia de carga resistiva pura, es decir se debe asegurar que ninguna de las máquinas opere sobrecargada. Esta intersección resulta insignificante para cargas inductivas y capacitivas, de modo que el controlador simplemente puede adoptar como ley la región de menores características de carga e impedancia activa.

En función de estos resultados se evidencia que la incorporación de la impedancia variable definitivamente modifica las condiciones de reparto de cargas en la forma prevista para lograr maximizar la explotación del banco de transformadores en paralelo.

En la Figura 9 se presenta los resultados de tensión en la barra secundaria (BT referido al primario) para este ensayo, donde también se evidencia que no se producen diferencias superiores al 10%.

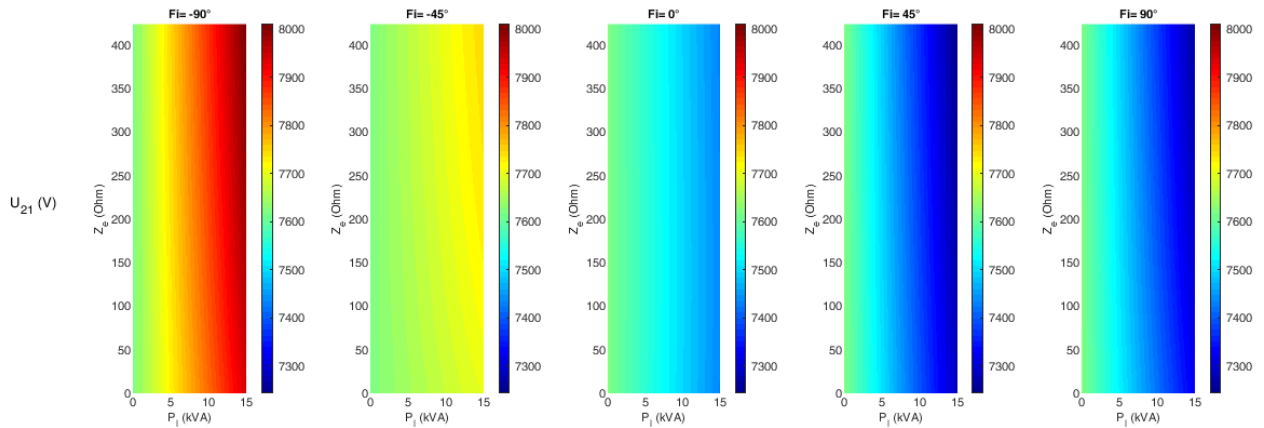


Figura 9. Tensión en la barra BT (referida al primario) para la ecualización en el Transformador A

3.3. Ensayo de ecualización en el Transformador B

En la se exhiben los factores de demanda de ambas máquinas al interponer la impedancia activa de ecualización en la salida del transformador B; al igual que en el ensayo previo, se han resaltado con negro las condiciones de operación a partir de las cuales el factor de demanda se hace unitario.

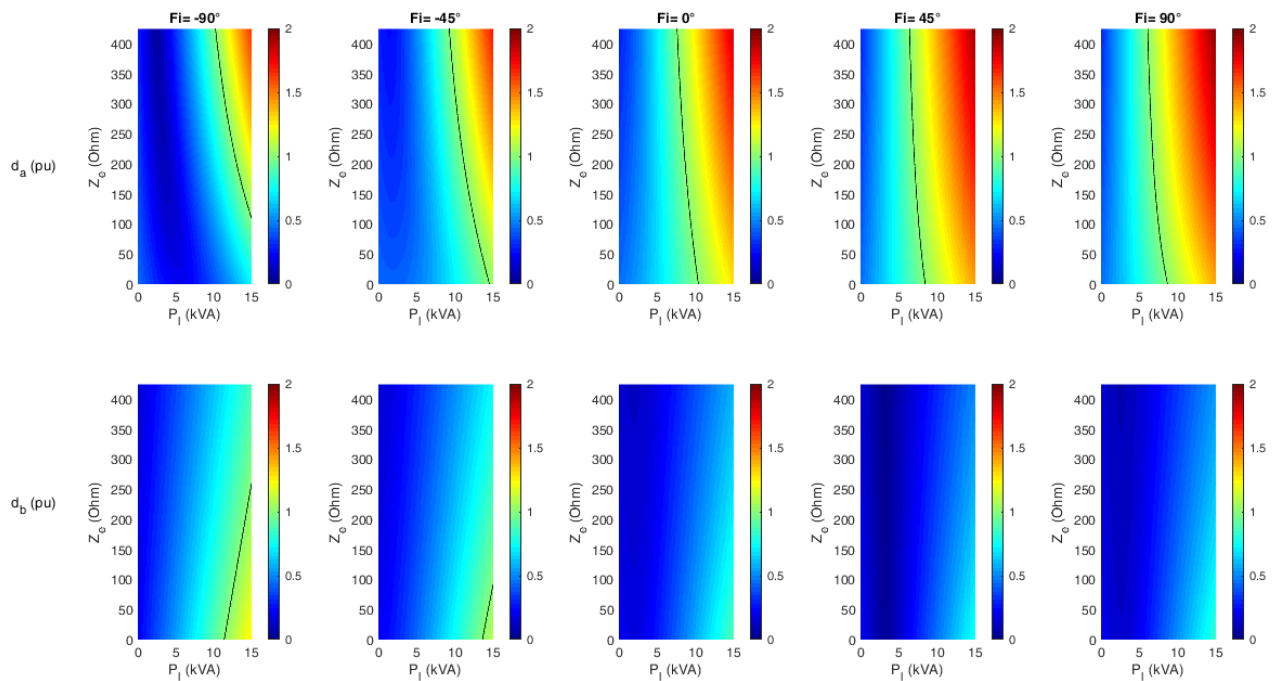


Figura 10. Factores de demanda de las máquinas para ecualización en el Transformador B

Con estos resultados de ensayo se aprecia que para evitar la sobrecarga de la máquina A (de menor potencia) la impedancia activa de ecualización debe actuar con valores mayores de reactancia inductiva ante potencias de carga menores que para el ensayo previo. De modo que resulta evidente la conveniencia de interponer la impedancia activa de ecualización en la salida de la máquina de

menor potencia, en lugar de hacerlo como en este ensayo (donde está asociada al transformador B, de mayor potencia). De esta forma, este ensayo también ha permitido establecer un criterio de ubicación para el diseño del esquema de equalización activa.

En la Figura 11 se exhiben los valores de tensión en la barra BT para las condiciones ensayadas, donde también se evidencia que no se producen variaciones superiores al 10%.

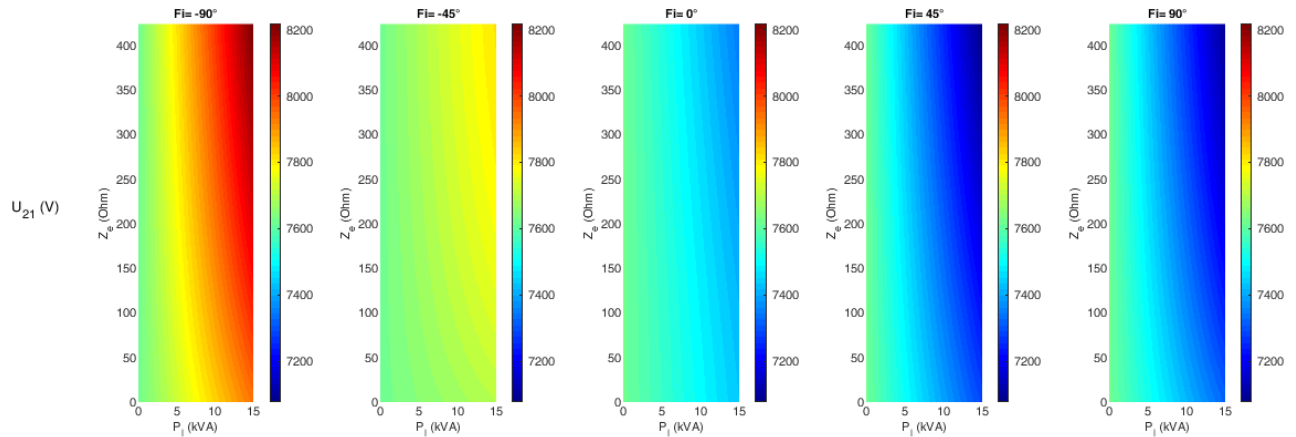


Figura 11. Tensión en la barra BT (referida al primario) para la equalización en el Transformador B

4. Conclusiones

En función de los resultados obtenidos en el presente estudio exploratorio se demuestra conceptualmente la factibilidad de maximizar la explotación de un banco paralelo de transformadores mediante la aplicación de la técnica de equalización activa de impedancia de salida sintetizada mediante una inductancia variable de baja resistencia eléctrica. De esta manera, se propone una estrategia que permite soslayar las restricciones físico-constructivas de la explotación de bancos paralelos de transformadores y así lograr que la potencia total disponible coincida con la suma algebraica de las potencias nominales de las máquinas que componen el banco.

En suma, los resultados de ensayos permiten inferir que la configuración óptima (desde el punto de vista operativo) para la aplicación de esta técnica de equalización consiste en ubicar la impedancia activa a la máquina de menor potencia. Además esto resulta doblemente beneficioso, ya que supone la construcción y control de una inductancia variable diseñada para magnitudes de corrientes relativamente menores con la consecuente simplificación técnica.

A partir de éste estudio se plantean líneas futuras de trabajo relacionadas con la validación mediante ensayos de laboratorio para la estrategia propuesta. Además, resulta de especial interés verificar la factibilidad de la estrategia propuesta en arreglos de transformadores trifásicos (con cargas desequilibradas particularmente) como así también una comparación para dirimir si la impedancia activa debe ubicarse en el lado de baja tensión o en el de alta. Este último aspecto resulta particularmente interesante porque supone diferencias técnicas importantes en la construcción y control de la impedancia de equalización.