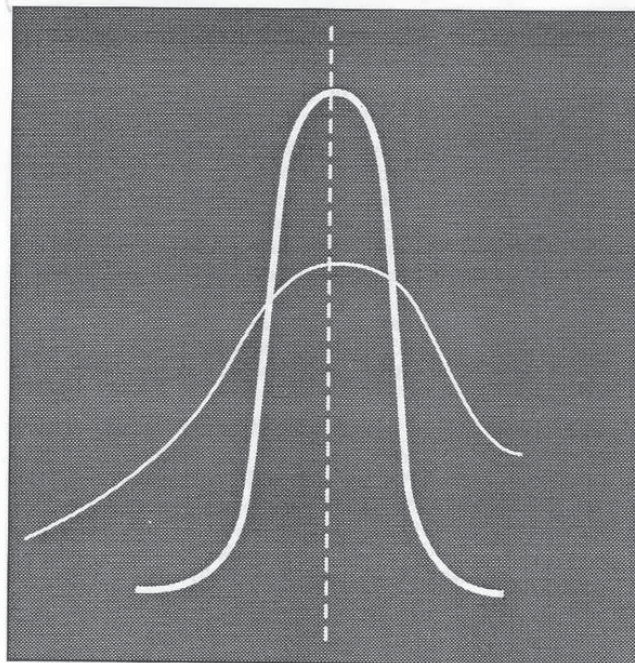


Simulación de corriente inrush con el EMTP



RESUMEN

Los fenómenos transitorios están presentes en todo sistema eléctrico cuando se produce un cambio de condiciones. Dichos fenómenos son, en la mayoría de los casos, de muy corta duración, sin embargo, las magnitudes que involucran, ya sea de voltaje o corriente, hacen que su estudio se vuelva cada vez más importante.

La corriente inrush forma parte de este tipo de fenómenos y se presenta cuando un transformador en vacío es energizado. Su valor puede superar varias veces el valor de corriente nominal; y puede ocasionar fallas en el sistema de protección.

El EMTP (electromagnetic transient program) es un programa diseñado para simular fenómenos transitorios en sistemas eléctricos. La representación de dichos sistemas se desarrolla de acuerdo con el fenómeno transitorio que se desee simular, es decir, de acuerdo con el rango de frecuencia que involucre.

La corriente inrush puede entonces simularse empleando el EMTP, con un modelo adecuado a la frecuencia que involucra este fenómeno.

□ Jairo Palomino de la Cruz
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

□ Carlos Arturo Lozano M.
Asistente de Docencia
Laboratorio de Alta Tensión
Universidad del Valle

□ Edgar Villamarín López, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

□ José Luis Bermúdez A.
Asistente de Docencia
Laboratorio de Alta Tensión
Universidad del Valle

1. INTRODUCCION

El EMTP es un programa de computador de propósitos generales para la simulación de efectos transitorios de alta velocidad en sistemas eléctricos de potencia. El programa posee una amplia variedad de capacidades de modelamiento incluyendo oscilaciones electromagnéticas y electromecánicas en el rango de microsegundos a segundos.

No existen representaciones válidas para el rango completo de frecuencia, desde 0 Hz hasta 50 MHz. Por esta razón, a aquellas características físicas de un elemento de red específico que tiene un efecto decisivo en la porción particular del fenómeno transitorio, que es de interés, se le debe dar consideración detallada; por ejemplo, la característica de saturación de transformadores y reactores puede ser de importancia en el caso de aislar una falla, energizar un transformador (corriente Inrush) y en el caso de que se esperen sobrevoltajes temporales significativos.

La representación de los elementos de red individuales debe por consiguiente corresponder al rango de frecuencia específica del fenómeno transitorio en particular. Este punto es de especial interés para seleccionar el modelo adecuado en la simulación de la corriente inrush que se presentará más adelante.

2. CORRIENTE INRUSH DE MAGNETIZACION

Un efecto transitorio, característico de la corriente de magnetización de un transformador, es el alto valor que se observa cuando se conecta inicialmente en vacío (corriente Inrush). Esto puede causar una caída momentánea en el voltaje si la impedancia de la fuente de excitación es considerable, y puede también accionar las protecciones de sobrecorriente y diferencial si éstas se han ajustado para actuar muy próximas en el tiempo.

2.1. Interpretación física del fenómeno

Quando se elimina la excitación de un transformador, la corriente de magnetización sigue el lazo de histéresis hasta llegar a cero; la densidad de flujo queda en un valor residual B_r . La Fig. 1 muestra la onda de corriente magnetizante I , y la onda de densidad de flujo B , interrumpida en el instante marcado por la primera línea vertical punteada a la izquierda, en la cual la corriente está pasando por cero, con el flujo en el valor residual ($+B_r$). Si el transformador no fuera desenergizado, las

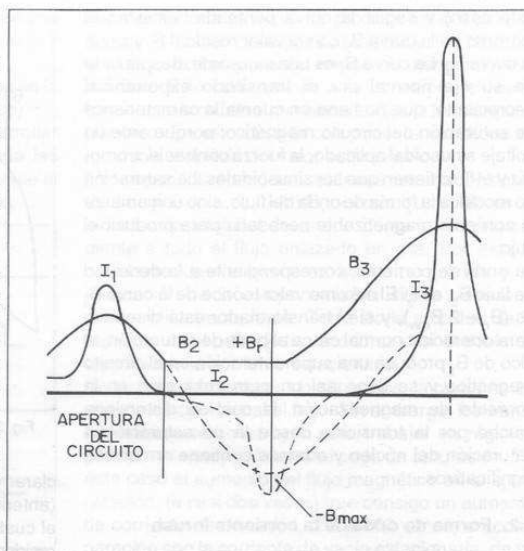


Fig. 1 - Corriente inrush de magnetización

ondas de corriente y flujo seguirían las curvas punteadas; pero, el transformador desenergizado, sigue las líneas sólidas I_2 y B_2 , y corriente en cero y flujo en B_r .

Para ilustrar el fenómeno inrush que origina el máximo transitorio, se asume que el circuito se energiza de nuevo en el instante indicado por la segunda línea vertical, cuando la densidad de flujo estaría normalmente en su máximo valor negativo (Fig. 1). Ya que el flujo no puede ser creado ni destruido, la onda de flujo en lugar de iniciar con su valor normal ($-B_{max}$ en

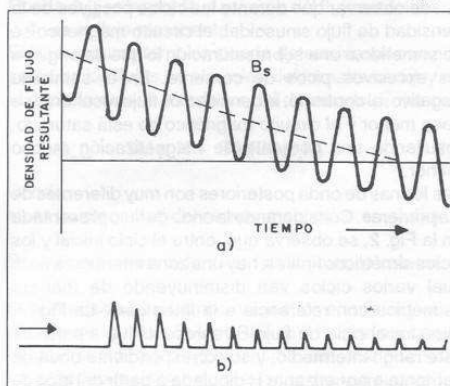


Fig. 2 a) Densidad de flujo resultante b) Forma de la corriente Inrush

este caso) y seguir la curva punteada, inicia en el extremo de la curva B_2 con el valor residual B_r y sigue la curva B_3 . La curva B_3 es una sinusoide; desplazada de su eje normal por el transitorio exponencial decreciente, que no tiene en cuenta la característica de saturación del circuito magnético, porque ante un voltaje sinusoidal aplicado, la fuerza contraelectromotriz y el flujo tienen que ser sinusoidales. La saturación no modifica la forma de onda del flujo, sino únicamente la corriente magnetizante necesaria para producir el flujo.

La onda de corriente, correspondiente a la densidad de flujo B_3 , es I_3 . El máximo valor teórico de la curva B_3 es $(B_r + 2 B_{max})$, y si el transformador está diseñado para operación normal cerca al codo de saturación, el pico de B_3 produce una supersaturación en el circuito magnético y se tiene así un gran valor pico en la corriente de magnetización, la cual se distorsiona mucho por la transición desde la no saturación a saturación del núcleo y además contiene armónicos significativos.

2.2. Forma de onda de la corriente Inrush

La primera característica de la forma de onda de la corriente inrush, que atrae la atención, es su gran complejidad.

Al observar los primeros ciclos, en ellos la onda de corriente es completamente constante. En el momento de la energización, aparecen medios ciclos alternos amortiguándose.

La forma se debe a que I_3 se muestra en una escala más pequeña, y los valores de la corriente para densidades por debajo de la saturación son relativamente bajos.

Refiriéndose a la Fig. 1, donde se tiene la densidad de flujo resultante incluyendo el término transitorio, se puede observar que durante los ciclos positivos de la densidad de flujo sinusoidal, el circuito magnético se ve sometido a una sobresaturación lo que da origen a los excesivos picos de corriente. En el semiciclo negativo, al contrario, la densidad de flujo resultante se hace menor y el circuito magnético no está saturado, resultando una corriente de magnetización mucho menor.

Las formas de onda posteriores son muy diferentes de las primeras. Considerando la onda de flujo presentada en la Fig. 2, se observa que, entre el ciclo inicial y los ciclos simétricos finales, hay una zona intermedia en la cual varios ciclos van disminuyendo de manera asimétrica con referencia a la línea cero. La Fig. 3, muestra el ciclo de flujo B representativo a partir de este rango intermedio, y su correspondiente onda de corriente magnetizante H dibujada a partir del lazo de histéresis.

La situación presentada anteriormente depende

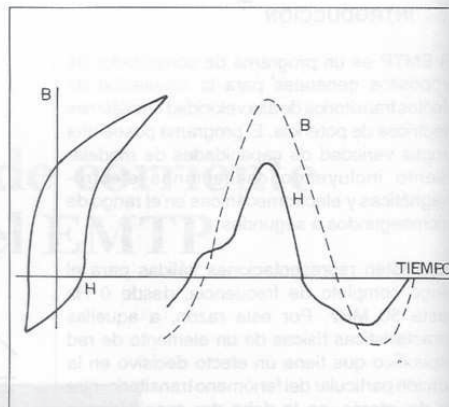


Fig. 3. Ondas de flujo y corriente magnetizante a partir de un lazo de histéresis asimétrico

claramente del magnetismo residual en el núcleo (anterior a la energización) y del instante de la onda, en el cual el interruptor cierra el circuito. El magnetismo residual depende de las condiciones del circuito cuando el transformador se desconecta de la fuente, por ejemplo de la carga conectada al transformador.

La interrupción de corriente mediante un disyuntor normalmente se realiza durante el paso natural por cero de la misma y la referencia al lazo de histéresis indica el magnetismo residual en el núcleo de hierro. Bajo las condiciones más adversas de la conmutación, en el punto sobre la onda de voltaje mínimo y con magnetismo residual, la corriente inrush es de mucho mayor magnitud que la corriente nominal.

La corriente inrush puede limitarse en la energización mediante un resistor serie, en cuyo caso el flujo en el núcleo puede variarse aproximadamente desde el valor cero después de unos pocos ciclos hasta cuando el resistor se ponga en corto, limitando el flujo de corriente excesiva.

3. ENERGIZACION DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO SIN CARGA

La corriente de estado estable en un transformador en vacío, con tensión nominal en sus bornes, no supera el 1 o 2 % del valor de corriente nominal. La corriente de energización, debido a su corta duración, no representa peligro para los devanados, pero debe tenerse en cuenta para el ajuste de las protecciones asociadas, evitando así que ellas operen sin la presencia de una falla verdadera.

Se pretende, en esta parte, determinar la forma de onda de la corriente de magnetización del transformador y qué parámetros influyen en dicha forma.

El circuito equivalente que se emplea para el análisis

se presenta en la Fig. 4; éste puede determinarse con los resultados obtenidos de las pruebas de vacío y corto circuito en el transformador. En este circuito se han despreciado las pérdidas en la chapa magnética del núcleo (circuito magnético). Empleando uno de los métodos para desarrollar ecuaciones diferenciales y teniendo en cuenta las condiciones iniciales del sistema puede obtenerse el valor de la corriente en todo instante de tiempo.

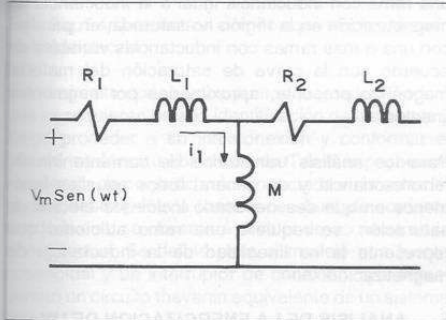


Fig. N° 4. Circuito equivalente del transformador.

Para el transformador en vacío se obtiene que:

$$V_m \text{ Sen } wt = R_1 i_1 + (L_1 + M) \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

Donde,

V_m : valor máximo de la tensión de alimentación
 i_1, ψ : valores instantáneos de corriente y enlaces de flujo.
 R_1, L_1 : resistencia e inductancia del devanado primario.
 M : inductancia del devanado de magnetización (mutua)

El flujo enlazado se relaciona con la corriente de la siguiente forma:

$$\Psi = (L_1 + M) i_1 \quad (2)$$

Para este caso, se asume que la tensión de alimentación es la referencia.

Por tanto, la corriente en todo momento será:

$$i_1(t) = I \text{ Sen } \Phi e^{-\frac{R_1}{(L_1 + M)} t} + I \text{ Sen } (wt - \Phi) \quad (3)$$

Como puede observarse, la magnitud de la componente aperiódica depende del momento en que ocurra la conexión. Si $\Phi = 0$, la componente transitoria no se presenta y el proceso desde su inicio transcurre como estacionario. Esto significa que la conexión del

transformador al sistema se produce en el momento en que la tensión pasa por su máximo valor. Si ahora $\Phi = \pi/2$, la componente transitoria tiene su valor máximo. Esto corresponde a la conexión del transformador a la red en el momento en que la tensión pasa por cero. En este caso la componente transitoria es igual a la amplitud del valor estacionario.

La componente aperiódica se atenúa con una constante de tiempo $\tau = (L_1 + M)/R_1$, donde $(L_1 + M)$ es la inductancia total del devanado primario, correspondiente a todo el flujo enlazado en ella. Por esto la constante de tiempo τ es bastante grande y la atenuación de la componente transitoria transcurre comparativamente lenta. Con esto la amplitud de la corriente en el período transitorio es casi el doble de amplitud de la corriente estacionaria.

En los transformadores no saturados, la corriente en vacío es proporcional al flujo. Sin embargo, los transformadores se construyen para trabajar en régimen permanente muy próximos al codo de saturación. En este caso el aumento del flujo magnético en la energización, (a casi dos veces) trae consigo un aumento de corriente de conexión, (80 a 100 veces) en comparación con la corriente de vacío estacionaria, de tal forma que la corriente de conexión puede llegar a superar la corriente nominal del transformador varias veces.

Suponiendo que la sección correspondiente al diámetro medio del devanado del transformador sea SM y que SA es la superficie activa de la sección del núcleo.

El flujo máximo teniendo en cuenta la condición más adversa, es decir, el magnetismo remanente y la conexión a tensión baja, puede definirse por:

$$\Phi_{\max} = 2 \Phi_{\text{me}} + \Phi_r \quad (4)$$

Donde Φ_{me} es la amplitud máxima del flujo estacionario y Φ_r es el flujo remanente.

El flujo máximo también puede determinarse como la suma de los flujos en el núcleo del transformador y en el espacio de aire alrededor del devanado. Entonces

$$\Phi_{\max} = SM \mu_0 H + SA (B - \mu_0 H) \quad (5)$$

Donde,

H : es la intensidad del campo magnético en el aire

B : es la inducción o densidad de flujo en la columna

Si la intensidad del campo magnético en el aire y en el núcleo son iguales. Entonces $B - \mu_0 H$ representa en sí la intensidad de magnetización del núcleo. Esta magnitud para un transformador normal no supera las 2.2 teslas. Por esta razón, el último miembro de la parte derecha de la ecuación (4) no supera los 2.2 SA .

La intensidad del campo se determina aproximadamente como la relación entre la fuerza magnetomotriz total del devanado y su altura;

$$H = \frac{W_1 I_{omax}}{h} = \frac{2\Phi_{mc} + \Phi_r - 2.2 SA}{\mu_o SM} \quad (6)$$

De aquí se tiene que la amplitud de la corriente de conexión puede ser

$$I_{omax} = \frac{h}{W_1} \frac{2\Phi_{mc} + \Phi_r - 2.2 SA}{\mu_o SM} \quad (7)$$

Simbolizando la amplitud de la densidad de flujo en el núcleo en el proceso estacionario como B_m , la densidad de flujo por el magnetismo remanente como B_r y tomando aproximadamente B_r como $0.6 B_m$, se tiene:

$$I_{omax} = \frac{h SA}{W_1 SM \mu_o} (2.6 B_m - 2.2) \quad (8)$$

Esta ecuación entrega valores de corriente de conexión en las condiciones más desfavorables, ya que se supone en la deducción, que la conexión se produce en el momento en que la tensión pasa por cero.

En realidad la conexión se produce frecuentemente cerca al máximo de tensión, ya que con valores apreciables de tensión aparece un arco entre los conductores del interruptor. Por esto, el valor de la corriente de conexión es menor que el calculado por la fórmula. Se puede mencionar de la fórmula, que la corriente de conexión del devanado interno (BT) en iguales condiciones, es mayor que la del devanado externo (AT), ya que para él la relación SA/SM es mayor.

4. EL EMTP EMPLEADO PARA EL CALCULO DE CORRIENTE INRUSH

Una de las mayores ventajas del EMTP es su gran flexibilidad en el modelamiento de un sistema eléctrico, de tal forma que el usuario experimentado y con buena fundamentación teórica puede aplicar el programa para una gran variedad de estudios.

La representación de cada parte de un sistema en el EMTP está específicamente descrita de tal forma que el fenómeno que se pretenda simular guarde la mayor aproximación a los resultados presentados en la realidad.

4.1. Representación de transformadores

Los transformadores y autotransformadores se modelan en el EMTP como elementos R-L acoplados; las

matrices R y L se calculan a partir de los datos de prueba. Las capacitancias parásitas se desprecian o pueden incluirse en sitios deseados ubicadas como un valor fijo previamente calculado; si esto no se hace, la representación sólo es válida hasta unos pocos kHz.

En los programas de computador digital, los elementos saturables usualmente son modelados mediante una representación lineal que puede ir implementada con una rama con inductancia igual a la inductancia de magnetización en la región no saturada, en paralelo con una o más ramas con inductancias variables de acuerdo con la curva de saturación del material magnético presente, aproximadas por segmentos lineales.

Para los análisis transitorios de corriente inrush, ferresonancia y en general todos aquellos fenómenos en que sea necesario incluir los efectos de saturación, se requiere una rama adicional que represente la no linealidad de la inductancia de magnetización.

5. ANALISIS DE LA ENERGIZACION DE UN TRANSFORMADOS UTILIZANDO EL EMTP

Para el estudio de la corriente inrush que surge en el momento de la energización, uno de los parámetros importantes a tener en cuenta es la saturación del material magnético. El efecto de las capacitancias parásitas en el transformador es muy bajo en este caso por ser un fenómeno que se presenta a bajas frecuencias y por ello no es necesario incluirlas en el modelo a realizar.

Por tanto, para la simulación de dicho fenómeno transitorio se debe construir el modelo de un transformador convencional que incluya los efectos de la saturación magnética. Para desarrollar dicho modelo se pueden emplear las subrutinas XFORMER y SATURATION, que desarrollen respectivamente los requerimientos mencionados.

Utilizando los datos del transformador real se puede proceder a la construcción del modelo.

Por ejemplo, para un transformador de 37.5 KVA, monofásico, 13200/240-120 voltios, 2.84/156.25 amperios; los valores obtenidos en las pruebas fueron:

Vacío: (B.T.) $P_o = 142$ Vatios (potencia de vacío)
 $I_o = 0.8$ Amperios (corriente de vacío)
 Corto: (A.T.) $P_{cc} = 394$ Vatios (potencia de corto circuito)
 $U_{cc} = 382$ Voltios (tensión de corto circuito)

Donde;
A.T. y B.T. : Se refieren a Alta y
Baja Tensión respectivamente

Para este transformador se desarrolló la curva de magnetización necesaria para la subrutina SATURATION y los resultados se presentan en la tabla N° 1., llevados a valores en PU ya que así deben introducirse al computador.

En la Fig. 5 se presenta el circuito equivalente utilizado en la simulación.

Dicho circuito posee unos puntos marcados (nodos) que se requieren para la identificación de las partes y luego proceder a su interconexión y conformar el transformador saturable deseado. También posee una resistencia de pequeño valor conectada en la entrada, la cual desempeña la función de shunt de corriente desde la cual se observará el valor de corriente en la energización. Se define para el modelo una fuente cosenoidal y un interruptor de conexión, que representan un circuito thevenin equivalente de un sistema infinito.

La magnitud de la corriente en este caso presentó un valor pico de 9.2 Amp, el cual es cercano a 3 veces el valor de la corriente nominal del transformador; resultado esperado de acuerdo con la teoría postulada al respecto.

Observando las Figs. 6 y 7, se puede mencionar que el momento de cierre del interruptor se efectuó en 4 mSeg y que la señal de la fuente era del tipo cosenoidal.

En el caso de que el cierre del interruptor se realice en $t=0$, como se muestra en la Fig. N° 8, la forma de onda de corriente de magnetización resultante no debe incluir efecto transitorio. En este caso la forma de onda

Tabla N° 1.
Datos de la curva de magnetización

V_o (pu)	I_o (pu)
0.18	$5.37 \cdot 10^{-4}$
0.46	$6.63 \cdot 10^{-4}$
0.54	$6.92 \cdot 10^{-4}$
0.64	$8.10 \cdot 10^{-4}$
0.71	$9.10 \cdot 10^{-4}$
0.79	$9.53 \cdot 10^{-4}$
0.87	$1.39 \cdot 10^{-3}$
0.93	$2.03 \cdot 10^{-3}$
1.00	$3.62 \cdot 10^{-3}$
1.05	$7.21 \cdot 10^{-3}$
1.16	$6.37 \cdot 10^{-2}$
1.20	$1.23 \cdot 10^{-1}$

de la corriente de energización corresponde a una señal casi senoidal simple.
(Tabla N° 1)

6. CONCLUSIONES

El uso del programa de simulación digital de fenómenos transitorios, EMTP, se ha convertido en una herramienta importante, ya que reduce enormemente el tiempo de cálculo y facilita la obtención de resultados que pueden analizarse más detenidamente. Estos resultados de la simulación dependen del grado de exactitud de los modelos que representan los elementos del sistema eléctrico a analizar y del rango de frecuencia en el que aparece el fenómeno.

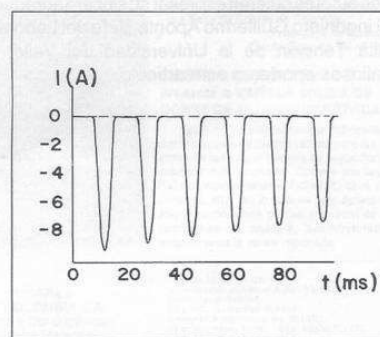
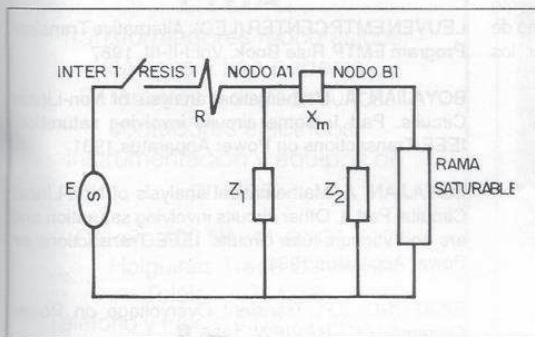


Fig. 6

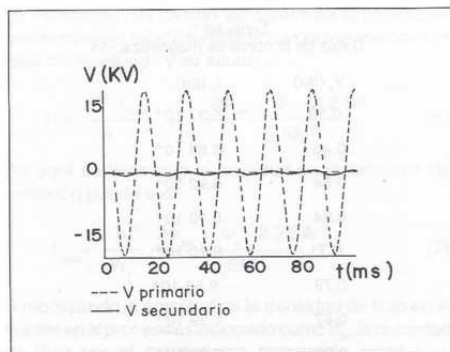


Fig. 7. Ondas de voltaje aplicado e inducido

Como ejemplo se puede observar en el presente artículo que la corriente Inrush obtenida con el EMTP tiene características muy similares a las reales y permite hacer análisis de la influencia de las diferentes variables que tienen que ver con la aparición de este fenómeno tales como el tiempo de cierre, el valor de la tensión en el momento del cierre, etcétera.

Simulaciones similares a ésta se pueden desarrollar empleando el EMTP, cubriendo una multitud de casos, no solo en sistemas de potencia sino en el área de electrónica de potencia, máquinas eléctricas, etcétera. Todo esto limitado a una representación adecuada del sistema en cuestión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su sincero agradecimiento al ingeniero Guillermo Aponte, Jefe del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, por los valiosos aportes a este artículo.

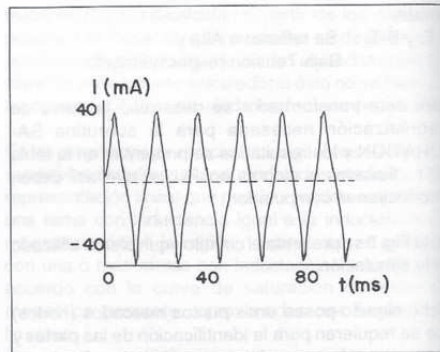


Fig. 8. Corriente de magnetización para cierre en $t=0$.

BIBLIOGRAFIA

- GREENWOOD, Allan. Electrical Transient in Power Systems. U.S.A.: ED. JHON WILEY & SONS, INC. 1971.
- CADAVID, Héctor. Procesos Transitorios en Transformadores. Colombia: Universidad del Valle. 1989.
- DOMMEL, Hermann y Otros. Electromagnetic Transient Program. Reference Manual. EMTP Theory Book. Vol: I - II - III. 1986.
- VANDERSLUIS, L. A Network Independent Computer Program For The Computation Of Electrical Transient. IEEE - Transactions on Power Delivery. 1987.
- BERMUDEZ, JOSE LUIS Y LOZANO, CARLOS. Análisis de fenómenos transitorios en sistemas eléctricos. Tesis de grado. Universidad del Valle. 1992.
- LEUVEN EMTP CENTER (LEC). Alternative Transient Program EMTP Rule Book. Vol: I-II-III. 1987.
- BOYAJIAN, A. Mathematical analysis of Non-Linear Circuits. Part I. Some circuits involving saturation. IEEE Transactions on Power Apparatus. 1931.
- BOYAJIAN, A. Mathematical analysis of Non-Linear Circuits. Part II. Other circuits involving saturation and arc and vacuum-tube circuits. IEEE Transactions on Power Apparatus. 1931.
- BICKFORD, J.P. Transient Overvoltage on Power Systems. IEE - REVIEW. 1986. 