

INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DE REGULACIÓN EN LOS ENSAYOS DE CORTOCIRCUITO

Arrojo, Carlos D., Scaramutti, José C., Dias, Ricardo

Laboratorios de Ensayos y Mediciones Eléctricas (LEME)
Dto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería (UNLP)
Calle 49 y 116 - (1900) La Plata, Bs. As.
leme@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Se analiza la influencia de la ubicación de las impedancias de regulación para ensayos de cortocircuito, especialmente de interruptores de baja tensión. En la normativa internacional no se especifica si la impedancia de regulación debe estar antes o después del transformador de ensayos. Se pone de manifiesto el problema a través de mediciones reales en laboratorio y se analizan las posibles causas, mediante expresiones analíticas y simulaciones digitales. Se muestra la dependencia del problema en relación con el instante de cierre o establecimiento de la corriente de ensayo, respecto de la tensión en vacío.

Palabras Claves: ensayos de cortocircuito, impedancia de regulación, ensayos de interruptores, normas internacionales.

INTRODUCCIÓN

Las normas de las referencias [1] a [3] establecen requerimientos para ensayos de cortocircuito de interruptores de baja tensión, entre los cuales figuran el factor de potencia y la corriente prevista. Cumplir con las exigencias para tales parámetros, requiere el uso de impedancias de regulación de valores y relaciones X/R adecuados en el circuito de prueba. En general, los laboratorios de ensayo de baja tensión, utilizan transformadores reductores a fin de conseguir los niveles de tensión adecuados y, según los casos, las mencionadas impedancias de regulación pueden colocarse del lado de alta o baja tensión de los mismos. En este sentido, en la norma de la referencia [1], no se dan indicaciones particulares, en tanto que en [2] se admite como válidas, cualquiera de ambas ubicaciones. En el presente trabajo se demuestra que la ubicación de las impedancias de regulación, respecto del transformador de prueba, tiene influencia sobre la forma de onda finalmente obtenida. En II se presenta el problema, luego, en III, a partir de un modelo simplificado, se llega a una expresión analítica y se efectúan simulaciones a fin de favorecer la comprensión del problema. Finalmente, en IV, se detallan algunas conclusiones y se plantean futuras líneas de trabajo sobre el tema.

PLANTEO DEL PROBLEMA

Básicamente, el ensayo para verificar el comportamiento de los interruptores de baja tensión bajo condiciones de cortocircuito, consiste en la realización de secuencias de maniobras de cierre y apertura. Usualmente, estas secuencias son combinaciones de maniobras de apertura (O) o cierre y apertura (CO), habiendo siempre entre ellas un lapso especificado (generalmente de 3 minutos, aunque puede ser mayor en función de lo requerido por un eventual relé térmico).

A.- Condiciones generales de un ensayo de cortocircuito en baja tensión

La Figura 1 muestra el circuito de ensayo típico, donde Z_1 y Z_2 son las impedancias de regulación en los lados de alta y baja tensión del transformador de ensayos de MT/BT, respectivamente (el subíndice 1 está asociado con la alta tensión en tanto que el subíndice 2

con la baja tensión). Estas impedancias pueden o no estar presentes, y pueden tener características resistivas o reactivas o ambas.

Durante el ensayo de cortocircuito, se energiza primero el bobinado primario del transformador de ensayo, dando origen a la corriente de magnetización I_0 , mientras que el bobinado secundario se mantiene en circuito abierto, hasta el momento en que se decida establecer la corriente de cortocircuito, ya sea cerrando el interruptor auxiliar – en el caso de una operación “O” – o cerrando el interruptor bajo ensayo – en el caso de una operación “CO”.

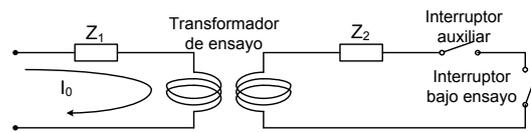


Fig. 1. Circuito de ensayo típico.

B.- Aparece el problema

Con el objetivo de poner en evidencia la influencia que tiene la regulación de la impedancia en uno u otro lado del transformador de ensayo durante una prueba de cortocircuito, se registraron las ondas de tensión y corriente durante la realización de ensayos de cortocircuito de interruptores de baja tensión probados en los rangos de más bajas corrientes, específicamente para corrientes de alrededor de 1500 A (véase Tabla 17 en [1]).

Se tuvieron en cuenta dos casos:

- 1) *El factor de potencia se ajustó usando resistores en el lado de alta tensión del transformador de ensayos, mientras que en el lado de baja tensión se utilizaron inductores:* Para poder conseguir esto, el factor de potencia se reguló utilizando una relación de resistencias tal que $R_1/(R_1+R_2) \approx 0.9$. Entonces, se realizó la operación de cierre sobre cortocircuito bajo dos condiciones: en el instante en que se produce el valor máximo de tensión y en el instante en que la tensión pasa por cero. Los registros de las ondas de tensión y corriente se presentan en la Figura 2, para la primera condición, y en la Figura 3, para la segunda. Como puede apreciarse, no existe diferencia entre los valores cresta positivo y negativo de la onda de corriente en la Figura 2, mientras que en la Figura 3 esa diferencia es apreciablemente clara.
- 2) *El Factor de potencia fue ajustado utilizando resistores e inductores en el lado de baja tensión:* en este caso, el factor de potencia fue regulado usando una relación tal que $R_1/(R_1+R_2) \approx 0$, y como puede verse en la Figura 4 y en la Figura 5, las formas de onda resultantes no muestran signos de diferencia entre los valores cresta positivo y negativo de la onda de corriente, independientemente del instante en que se produce el cierre sobre cortocircuito respecto del valor instantáneo de la onda de tensión.

Para cada ensayo, se midió el valor eficaz de la corriente y el factor de potencia de acuerdo a un método similar al que se indica en el Apéndice F de [2]. Estos valores se resumen en la Tabla I

TABLA I
VALORES DE ENSAYO

Figura N°	Valores eficaces		
	Tensión (V)	Corriente (kA)	Factor de potencia (pu)
2	237	1,44	0,88
3	237	1,33 ^a	----
4	240	1,53	0,90
5	240	1,58	0,90

a. valor cresta positivo: 1,72 kA; valor cresta negativo: 2,03 kA

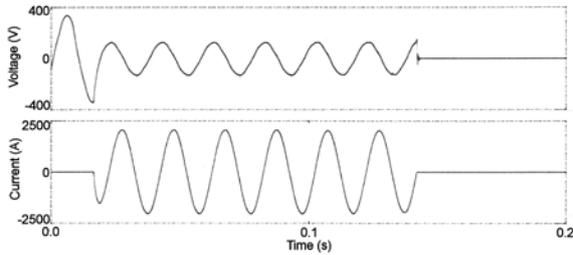


Fig. 2. Formas de onda medidas durante el ensayo de cierre sobre cortocircuito en el instante en que se produce la máxima tensión – El resistor de regulación ubicado en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

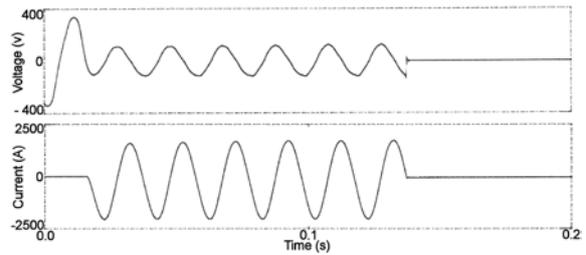


Fig. 3. Formas de onda medidas durante el ensayo de cierre sobre cortocircuito en el instante en que la tensión pasa por cero – El resistor de regulación ubicado en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

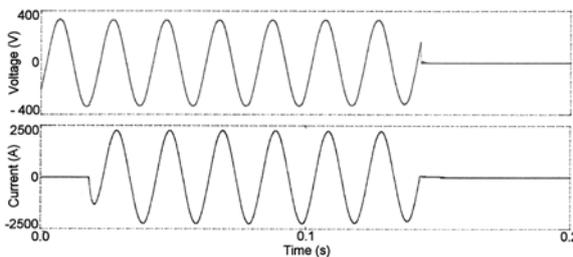


Fig. 4. Formas de onda medidas durante el ensayo de cierre sobre cortocircuito en el instante en que se produce la máxima tensión – El resistor de regulación ubicado en el lado de baja tensión del transformador de ensayo.

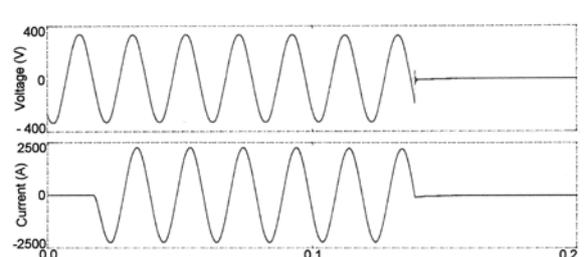


Fig. 5. Measured waveforms for short-circuit making operation performed at zero voltage value – Regulation resistor placed on the low voltage side of step-down transformer.

EN LA BÚSQUEDA DE UNA EXPLICACIÓN

Como primer punto de partida y con el propósito de conseguir algunas pistas sobre las causas de lo observado en II, se concibió el análisis del problema a través de un enfoque muy simple. La expresión analítica de la corriente a través de la muestra bajo ensayo, puede ser obtenida modelando el circuito de ensayo y el interruptor bajo ensayo mediante el simple circuito que se muestra en la Figura 6, donde no se tienen en cuenta las no linealidades.

R_1 , R_2 , L_1 y L_2 , se refieren a los resistores e inductores de regulación en el lado de alta y baja tensión del transformador de ensayo, así como también a la resistencia e inductancia de dispersión de los bobinados del transformador, mientras que L_m tiene en cuenta la inductancia de magnetización.

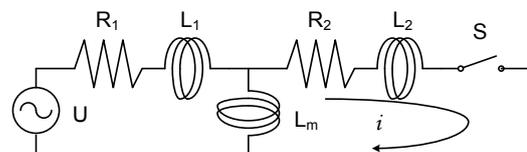


Fig. 6. Modelo de circuito simplificado.

En el caso real, podrían aparecer diferencias en las corrientes medidas, dependiendo del instante en que se cierre “S”, debido a alinealidades propias del circuito de ensayo, respecto de las que se consideran en el caso del modelo simplificado que estamos proponiendo. Sin embargo, este fenómeno no invalida el análisis simplificado propuesto.

A.- Expresión analítica para la Corriente de Cortocircuito

La ecuación (1) ha sido obtenida aplicando las técnicas de análisis transitorio para resolver el modelo circuital de la Figura 6, tomando en consideración que el bobinado primario del transformador de ensayo ya está conectado a la fuente de alta tensión para el instante en que la llave “S” se cierra, de modo tal que la corriente de magnetización que fluye lo hace en régimen estacionario, como se indica en la Figura 1. Además, se asume que $L_m \gg L_1$ y $L_m \gg L_2$.

$$i = \hat{I} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) + \hat{I} \cdot \sin \varphi \cdot e^{-t/\tau} + I_{0i} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot e^{-t/\tau_m} \quad (1)$$

donde:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{|Z|} \quad \text{con} \quad |Z| = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (L_1 + L_2)^2} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$\tau_m = \frac{L_m}{R_1 \cdot R_2} \cdot (R_1 + R_2) \quad (4)$$

$$\varphi = a \tan\left(\frac{\omega \cdot (L_1 + L_2)}{R_1 + R_2}\right) \quad (5)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (6)$$

f : Frecuencia de potencia industrial (50 Hz).

I_{0i} Corriente de magnetización en el instante en que se cierra la llave “S”.

Como se puede ver claramente a partir de la expresión (1), el último término pone en evidencia una componente de corriente con una constante de tiempo grande (τ_m). Esto parece tener sentido si volvemos a considerar las formas de onda que se presentan en las Figuras 2 a 5, en las que se muestra que cuanto mayor es la resistencia de regulación R_1 , tanto mayor es la magnitud de esta componente asimétrica.

Por otro lado, también es claro que el fenómeno bajo estudio puede ser engañoso, ya que para mayores corrientes de cortocircuito, digamos del orden de los 20 kA por ejemplo, y concurrentemente valores de factores de potencia bajos [1], la influencia del último término en (1) puede ser despreciado. Además, si el cortocircuito se establece en el momento en que la corriente de magnetización es nula, el tercer término de (1) estará ausente.

B.- Simulaciones

Si bien (1) es útil para tener una idea general del problema que motiva este artículo, una simulación digital puede ser útil para demostrar la habilidad del simple modelo propuesto, para reproducir el comportamiento del circuito y predecir las condiciones de sollicitación eléctrica, que habrá de soportar el interruptor que se desea ensayar durante las pruebas de cortocircuito, en los rangos más bajos de corriente. Teniendo en cuenta la simplicidad del enfoque a través del modelo propuesto, cualquiera de los bien conocidos software para simulación de transitorios electromagnéticos, podría haber sido usado para las simulaciones (ATP, PSCAD, PSPICE, MATLAB's SIMPOWERSYSTEMS, etc., véase [4] para más información), y si bien es irrelevante, podemos mencionar que las simulaciones se realizaron usando el Alternative Transient Program (ATP) y una versión de demostración del PSPICE. Las formas de onda resultantes que se presentan en las Figuras 7 a 10 de este artículo, corresponden a las salidas obtenidas mediante el software mencionado en último término.

Las simulaciones realizadas apuntaron a:

- Mostrar la influencia de la componente de corriente asimétrica en la forma de onda, y su dependencia respecto de la regulación, particularmente en relación con la razón entre las resistencias de alta y baja tensión.
- Analizar la influencia que el instante de cierre (establecimiento de la corriente de cortocircuito) tiene sobre la componente asimétrica, y verificar si las condiciones que se observan en las mediciones hechas en laboratorio, durante la realización de los ensayos, pueden ser reproducidas mediante simulaciones digitales, usando un modelo simple como el propuesto.
- Concientizar acerca de las precauciones que deben tomarse para medir el factor potencia durante la calibración del circuito de ensayo, y predecir a nivel de orden de magnitud, los valores posibles de tensiones de restablecimiento que el interruptor bajo ensayo puede llegar a tener que soportar, luego de la operación de apertura.

De entre las numerosas simulaciones realizadas, dos casos fueron seleccionados para ser incluidos en este artículo, con el fin de compararlos con las mediciones en laboratorio que fueron previamente presentadas en II, a saber:

Caso a): regulación mediante resistencias conectadas en el lado de alta tensión del transformador de ensayo;

Caso b): regulación mediante resistencias conectadas en el lado de baja tensión del transformador de ensayos.

En cada caso, se simularon dos operaciones de establecimiento: 1) en el instante en el que se produce el valor cresta de la tensión – flujo magnético nulo –, y 2) en el instante en que la tensión instantánea es nula – flujo magnético máximo.

El ajuste del conjunto de parámetros para cada caso se presenta en la Tabla II. Los valores de estos parámetros reflejan las condiciones reales del laboratorio de ensayos de potencia del LEME, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. Como puede verse claramente, comparando los valores de R_1 y R_2 , en el caso a) $R_1 \gg R_2$, mientras que el caso b) $R_1 \ll R_2$.

TABLA II
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Parámetro	Valores	
	Caso a)	Caso b)
U (V)	339 seno(314t)	339 seno(314t)
R_1 (m Ω)	136	0,7
L_1 (μ H)	7	7
R_2 (m Ω)	10	131
L_2 (μ H)	199	277
L_m (mH)	4,1	4,1

Las formas de onda que resultan de las simulaciones se muestran en las Figuras 7 a 10. Evidencian un muy buen grado de concordancia con las formas de onda medidas en el laboratorio. La componente asimétrica, que muestra una gran constante de tiempo de decaimiento, es evidente en la Figura 8 (para el caso a2), mientras que no ocurre lo mismo con las formas de onda en la Figura 10 (para el caso b2), lo que indica que el fenómeno se

manifiesta cuando las resistencias para la regulación del factor de potencia se ubican en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

Como era de esperar, y en un todo de acuerdo con la expresión (1), cuando la operación de establecimiento de la corriente de cortocircuito se realiza en condiciones de flujo magnético nulo, no aparece ninguna componente asimétrica en la forma de onda de corriente, como lo muestran la Figura 7 (para el caso a1) y la Figura 9 (para el caso b1).

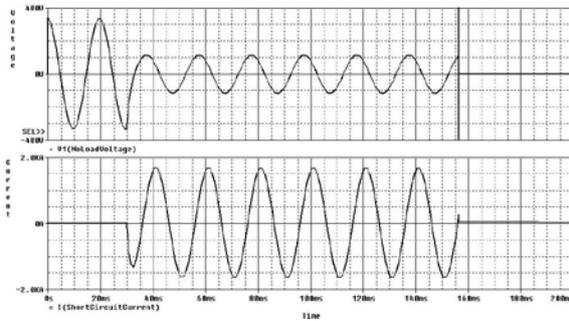


Fig. 7. Formas de onda resultantes de la simulación para la operación de establecimiento de la corriente de cortocircuito en el instante en que se produce el valor máximo de la tensión – Resistencias de regulación colocadas en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

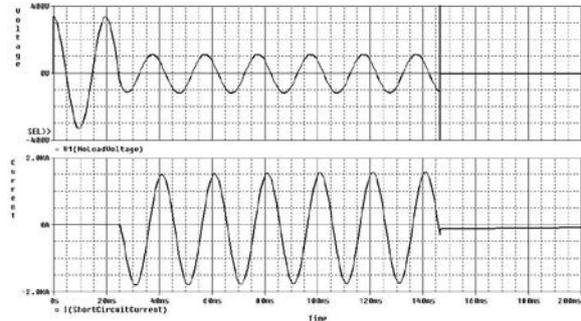


Fig. 8. Formas de onda resultantes de la simulación para la operación de establecimiento de la corriente de cortocircuito en el instante en que la tensión asume el valor nulo – Resistencias de regulación colocadas en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

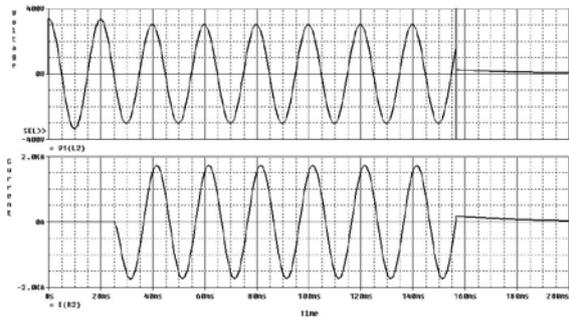


Fig. 9. Formas de onda resultantes de la simulación para la operación de establecimiento de la corriente de cortocircuito en el instante en que se produce el valor máximo de la tensión – Resistencias de regulación colocadas en el lado de baja tensión del transformador de ensayo.

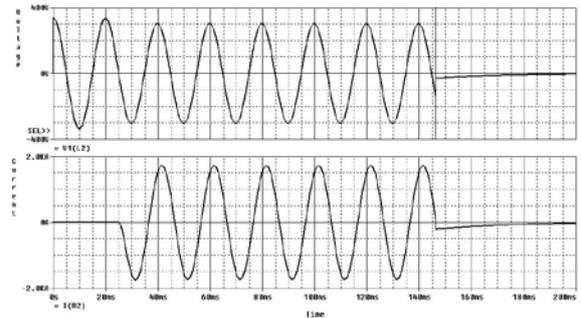


Fig. 10. Formas de onda resultantes de la simulación para la operación de establecimiento de la corriente de cortocircuito en el instante en que la tensión asume el valor nulo – Resistencias de regulación colocadas en el lado de baja tensión del transformador de ensayo.

Adicionalmente, cabe mencionar que en presencia de la componente asimétrica, en caso que el método que se pretenda aplicar para la medición del factor de potencia del circuito de ensayo sea el que se mencionó en II, dicha medición no es tan simple y directa, ya que la componente asimétrica provoca el corrimiento del punto de cruce por cero de la corriente en el eje de tiempo. La presencia de esta componente asimétrica es evidente en la Figura 4, cuya magnitud alcanza en números redondos alrededor de 9% del valor cresta medio, tal como se puede calcular a partir de los valores presentados en la Tabla I.

Las simulaciones realizadas en el medio restringido provisto por el circuito de la Figura 6, muestran que sea que la componente asimétrica esté presente o no, la tensión de restablecimiento es la misma en el instante en que se produce el pasaje por cero de la corriente, pero pocos milisegundos después (digamos 2-3 ms), puede ser diferente (mayor o menor) si se compara con el caso en que la componente asimétrica está ausente. Lo que

deberá ser investigado es si este fenómeno es posible en un ensayo real, ya que la performance del interruptor bajo ensayo podrá ser influenciada por él.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo se ha dedicado a estudiar el problema de la localización de las impedancias de regulación, en el desarrollo de las pruebas de cortocircuito. Se ha llamado la atención sobre el hecho de que los procedimientos que fijan las normas internacionales en [1] y [2], para la realización de este tipo de ensayos, o bien no dan directivas específicas o bien admiten que la localización de las impedancias de regulación en cualquiera de los lados (alta o baja tensión) del transformador de ensayos es equivalente.

El problema con la aplicación de estos procedimientos, se demostró mediante mediciones en laboratorio al realizar ensayos de acuerdo a norma, y fueron analizadas las posibles causas mediante un modelo simple. La expresión analítica deducida y las simulaciones realizadas, mostraron una buena coincidencia con las mediciones reales. Hay fuertes indicios acerca de que las diferencias observadas en las formas de onda entre los casos en que la regulación se hace en el lado de alta tensión o en el lado de baja tensión, se deben a la aparición de una componente asimétrica cuando la regulación se hace en el lado de alta tensión del transformador de ensayo.

Por otro lado, la existencia de esta componente depende del instante de establecimiento de la corriente de cortocircuito en el secundario del transformador de ensayo, en relación con la tensión de vacío (y por lo tanto en directa relación con la corriente de magnetización del transformador de ensayo en ese momento), mientras que por otro lado, depende de la relación entre los valores de la resistencia en los lados de alta y baja tensión del transformador de ensayo, y es independiente de la corriente de cortocircuito, pero, lo más importante: el fenómeno será tanto más notable cuanto menor sea la corriente de cortocircuito. El peor caso ocurre cuando el factor de potencia del circuito se regula mediante resistencias en el lado de alta tensión, de modo tal que $R_1 \gg R_2$. Inclusive, debe tenerse en cuenta, que es justamente esta alternativa la que es preferida por el personal encargado de hacer los ensayos de cortocircuito – dependiendo de las características del laboratorio de ensayos del que se trate – por cuanto esta alternativa requiere de valores de resistencias mayores comparadas con las que se requerirían para realizar la misma regulación en el lado de baja tensión.

Además, se debe resaltar que algunos ensayos de cortocircuito requieren que las operaciones de establecimiento se realicen en forma repetida a distintos ángulos eléctricos respecto de la onda de tensión. Dado que la presencia de la componente asimétrica depende de este ángulo, como se mencionara antes en este artículo, es posible que dicha componente no esté presente durante las pruebas de calibración del circuito, pero sí aparecerá con diferentes valores a medida que el ensayo se vaya realizando, si se usa la regulación en el lado de alta tensión.

Sería interesante que este tipo de problemas sea tenido en cuenta en la normativa internacional, de todos modos, pareciera ser una buena práctica tratar de evitar la regulación en el lado de alta tensión cuando se realizan ensayos de cortocircuito en los rangos más bajos de corriente.

Finalmente, el impacto que la regulación en el lado de alta tensión tiene en la medición del factor de potencia y sobre la tensión de restablecimiento, es probable que merezca una investigación mayor, que lleve a un estudio de las condiciones de interrupción. El desarrollo de un modelo más sofisticado, si se justificara, podría conducir a una predicción más ajustada todavía del comportamiento real del circuito de ensayo, incluyendo el análisis de

las no linealidades, tales como el estado magnético del transformador durante el ensayo, y análisis de eventuales condiciones de saturación.

Referencias

- [1] International Standard IEC 60898-1, "Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation," International Electrotechnical Commission, Edition 1.1, 2002 -08.
- [2] International Standard IEC 60947-1, "Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: General Rules," International Electrotechnical Commission, 1988.
- [3] International Standard IEC 60947-2, "Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers," International Electrotechnical Commission, Edition 3, 2003 -04..
- [4] L. Bam and W. Jewell, "Review: Power System Analysis Software Tools", in Conf. Rec. 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting , 12-16 June 2005, vol. 1, pp 139- 144.