

Análisis con ATP de la respuesta dinámica del motor de inducción a los sags de voltaje

Induction Motor Dynamic Response to Voltage SAGs with ATP

JAMES PAUL VALENCIA QUINTERO

Ingeniero electricista Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Eléctrica Alta Tensión, Universidad Nacional de Colombia. Director de la unidad para el desarrollo de la ciencia y la investigación, director del grupo de Investigación REM (Research in Energy and Materials) y profesor asistente de la Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electromecánica y de Automatización Industrial. james.valencia@uan.edu.co

Fecha de recepción: 8 de agosto de 2007

Clasificación del artículo: reflexión

Fecha de aceptación: 17 de marzo de 2008

Palabras clave: motor de inducción, transitorio, SAG de voltaje, protección de motores de inducción.

Key words: induction motor, transient, voltage SAGs, protection of induction motors.

RESUMEN

Se presenta un análisis que usa el EMTP/ATP para indagar acerca de la respuesta dinámica de motores de inducción ante un transitorio de voltaje tipo SAG. La respuesta de la máquina se relaciona con la magnitud del SAG y su duración. Los SAG representados incluyen SAG monofásicos y trifásicos, así como SAG secuenciales, debido a operaciones de re-cierres. El funcionamiento del motor se evalúa con respecto a la configuración de las protecciones en una máquina de inducción típica. Se demuestra que la configuración de las protecciones se puede ajustar para mejorar el funcionamiento del motor ante SAG de voltaje sin poner en riesgo la seguridad del motor.

ABSTRACT

This paper presents an analysis using the EMTP/ATP¹ to investigate the dynamic response of induction motors to voltage SAGs. The machine response is related to the voltage SAG magnitude and duration. SAGs represented include single and three phase SAGs as well as sequential SAGs due to re-closing operations. **The motor operation is assessed against typical induction machine protection settings.** It is demonstrated that protection settings can be adjusted to improve the motor operation of voltage SAGs without endangering the safety of the motor.

¹ Electro Magnetic Transient Program.

1. Introducción

Los SAG de voltaje y su impacto sobre las cargas de los clientes, constituye el problema más predominante de calidad de energía en sistemas de distribución [1]. Los SAG son transitorios de corta duración y consisten en la disminución de la magnitud del voltaje y corriente. Las definiciones acerca de los SAG de voltaje han evolucionado durante los últimos quince años, debido al avance en los



Gráfica 1. SAG de voltaje.

Los SAG de voltaje pueden producir mal funcionamiento de los equipos, interrumpir el funcionamiento de líneas de producción llevando a la pérdida de la producción y a un costoso reinicio de los procesos [2]. Entre los equipos sensibles a los SAG de voltaje se encuentran: computadores para control de procesos, tarjetas variadoras de velocidad y motores de inducción [3].

Se pueden llevar a cabo modificaciones al sistema para minimizar la magnitud y duración de los SAG de voltaje. Se pueden implementar medidas especiales del lado de la carga para reducir la sensibilidad de equipos a los SAG de voltaje. Entre los diferentes tipos de equipo que son susceptibles a los SAG de voltaje, los motores de inducción son los que más se utilizan, lo que justifica el estudio de su comportamiento ante la presencia de SAG de voltaje.

2. Efecto de los SAG de voltaje en los motores de inducción

Los SAG de voltaje son ocasionados principalmente por corto circuitos del sistema, sus magnitudes dependen del nivel del corto circuito, de la tensión de alimentación de la red y de la proximidad de la falla al barraje afectado. Sus duraciones dependen del tiempo de despeje de la falla. Después de que

instrumentos que permiten medirlos. Inicialmente, los SAG eran inicialmente cualquier reducción en el voltaje por debajo del nominal. Se definió el límite bajo entre un ciclo y 2,55 segundos.

La IEEE 1159-1995 ha definido los SAG como sigue: “Disminución de la magnitud entre 0,1 y 0,9 pu del voltaje rms o corriente a la frecuencia nominal para las duraciones de 0,5 ciclos a 1 minuto”.

la falla está despejada, el sistema puede recuperar su valor de voltaje nominal [4].

Como el voltaje del suministro del motor de inducción se disminuye, la velocidad del motor también se disminuye. Dependiendo del tamaño y la duración del SAG de voltaje, la velocidad del motor puede recuperar su valor normal, según se recobre la amplitud del voltaje. Si la magnitud del SAG de voltaje la duración exceden ciertos límites que mantienen al motor estable, lo sacarían del sistema por la protección del rotor bloqueado.

La magnitud máxima del SAG de voltaje o su duración determinan el funcionamiento del motor y su vida útil, dependiendo de los parámetros del motor, de la característica de torque-velocidad y de la carga manejada [5]. Un motor que se recupera del proceso después de un SAG de voltaje se acompaña se pueden disparar ante un corto circuito o pueden bloquear las protecciones del rotor del motor, de lo que resulta en el mal funcionamiento del motor.

La mayoría de las configuraciones de las protecciones de la máquina de inducción son demasiado conservadoras, esto deja el camino despejado para SAG de voltaje que amenazan la seguridad de motor. Muchos de los incidentes que el motor sufre son innecesarios y se pueden evitar simplemente si se ajusta la configuración de las protecciones [6].

3. Sistema investigado

Los estudios de simulación fueron realizados utilizando el EMTP/ATP. El sistema simulado se muestra en la figura 1; éste está conformado por

una fuente trifásica de 220V, la línea de conexión, un motor de inducción de 7,36KW (10 HP) al que se le conecta una carga. El motor es arrancado por un arrancador estrella triángulo.

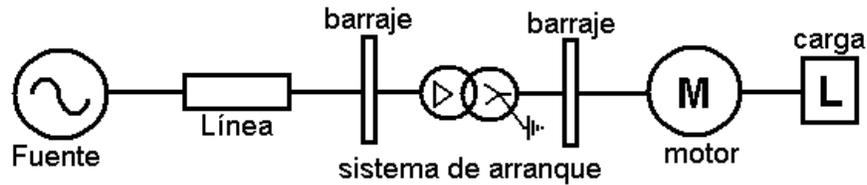


Figura 1. Sistema usado para la simulación con ATP.

Modelo utilizado

El motor de inducción fue modelado usando el modelo universal de máquina de inducción tipo UM3 [7 y 8]. La configuración de los parámetros de entrada, requiere de datos de la placa característica del motor, así como del circuito equivalente obte-

nido. El SAG de voltaje (monofásico y trifásico) fue modelado utilizando una fuente de AC trifásica tipo 14, en serie con un elemento de transporte Transp1 ABC, un splitter, tres resistencias variables con el tiempo tipo 97 y una resistencia aterrizada (figura 2).

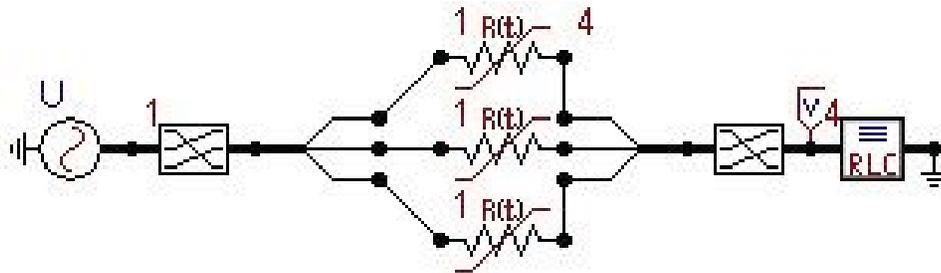
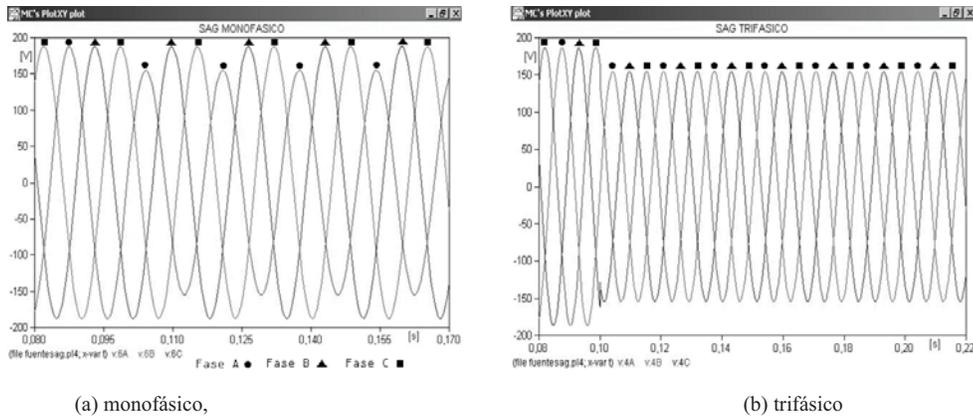


Figura 2. Modelo equivalente utilizado para producir el SAG de voltaje por fase.



Gráfica 2. SAG de voltaje obtenido.

Estudios sobre calidad de energía, elaborados por el EPRI (Electric Power Research Institute) y el NPL (National Power Laboratories) de los Estados Unidos durante cuatro años (1990 a 1994), concluyen que de 160.000 transitorios registrados, los SAG de voltaje eran el evento más registrado con un 27,95 de ocurrencia en el mes, con una amplitud media de 99,3 Vrms (0.83 pu), con respecto a un voltaje nominal de 120 Vrms y con una duración

media de 0,26 sg (15,6 ciclos) [9]. Con base en el estudio anterior, se escogió como SAG de voltaje más representativo el de 0,83 pu en magnitud y una duración de 16 ciclos (gráfica 2).

Para obtener el SAG de voltaje producido por recierre se modifica la función de la resistencia variable, para lo cual se agregan una onda de tensión a voltaje nominal con una duración de tres ciclos y otra onda a 0,83 pu de duración de dieciséis ciclos.

3.2 Características del motor

Para efectos del estudio, se seleccionó un motor de inducción trifásico con rotor en jaula de ardilla. La tabla 1 presenta la información registrada en la placa de características:

10 HP	60 Hz	220V	27A	1755 rpm
Armazón 215T	Diseño B	Código F	FS 1.15	

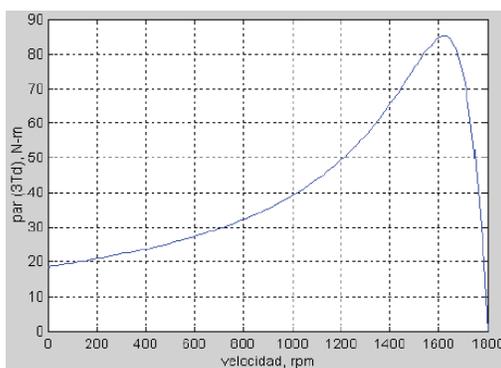
Tabla 1. Características del motor de inducción seleccionado para el estudio.

Las tensiones han sido medidas línea a línea y los valores de potencia trifásica son totales. Experimentalmente, se establecieron los parámetros del motor a partir de pruebas de rotor libre y rotor bloqueado. La tabla 2 registra los valores obtenidos.

Prueba de CD	Prueba Rotor Bloqueado	Prueba Vacío
10.8 V	22.26 V	220 V
25 A	27 A	12.9 A
	770 W	791 W
	15 Hz	1798 rpm

Tabla 2. Datos medidos en las pruebas de rotor bloqueado y rotor libre.

La gráfica 3 muestra la curva par velocidad durante el arranque del motor estudiado.



Gráfica 3. Curva de arranque del motor Obtenida en MATLAB

3.3. Protecciones del Motor

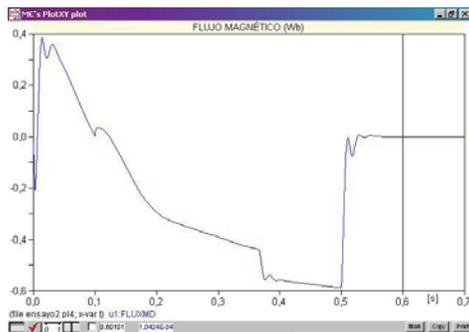
Los sistemas de protección del motor susceptibles a fallas por SAG de voltaje son de sobrecorriente de fase, de voltaje mínimo y de protección de rotor bloqueado. Las configuraciones de estos sistemas de protecciones para el motor investigado se muestran en la tabla 3.

Función	Configuración	
Sobrecorriente de fase		0,1 seg
Falla a tierra		0,15 seg
Voltaje mínimo	184V	1,5 seg
Rotor Bloqueado		1 seg

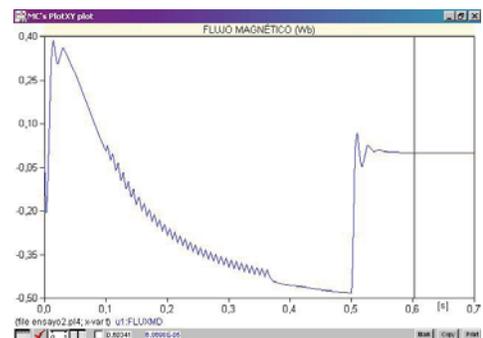
Tabla 3. Sistemas de protección del motor.

4. Resultados obtenidos

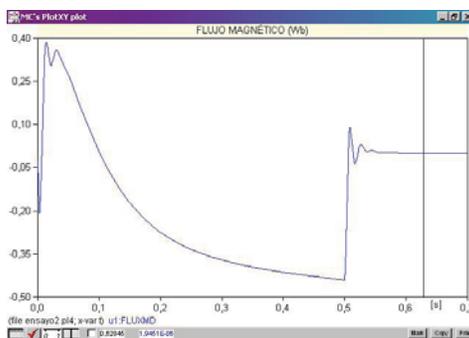
La gráfica 4 muestra los resultados obtenidos para el flujo magnético.



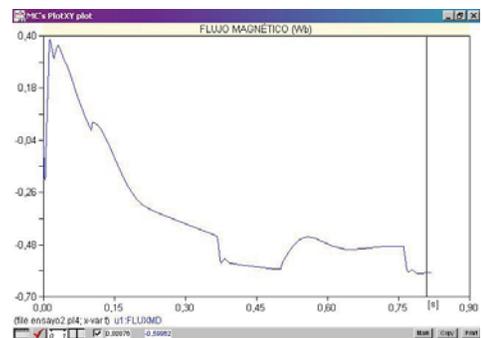
(a) Antes del SAG de voltaje



(b) SAG de voltaje monofásico



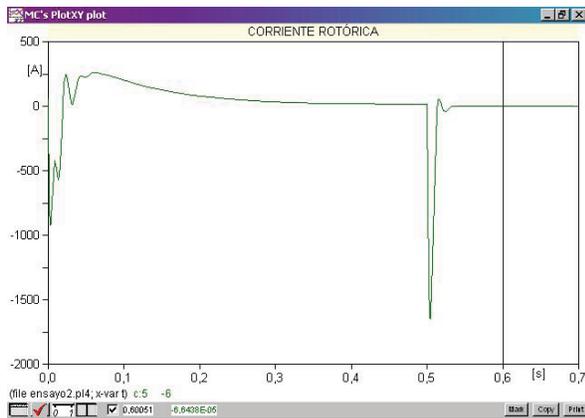
(c) SAG de voltaje trifásico



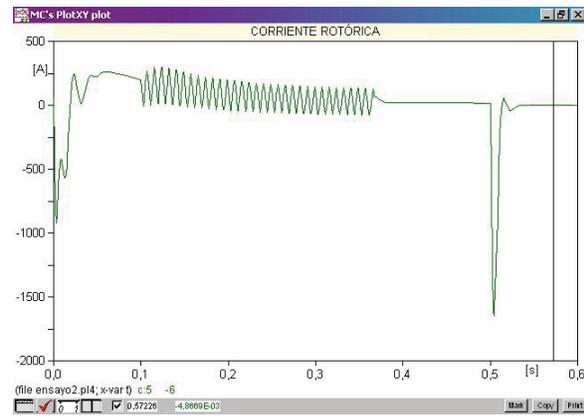
(d) SAG de voltaje sucesivo trifásico

Gráfica. Variación del flujo magnético.

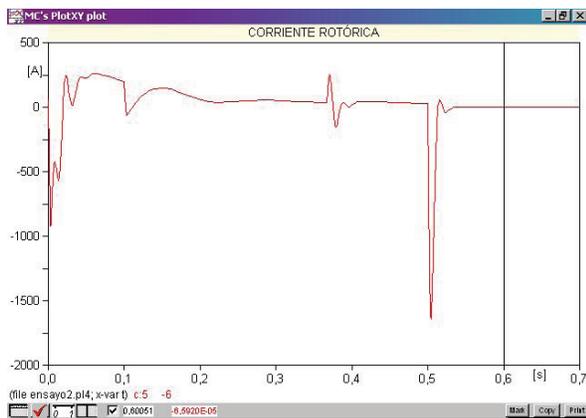
La gráfica 5 muestra los resultados obtenidos para la variación de la corriente del motor.



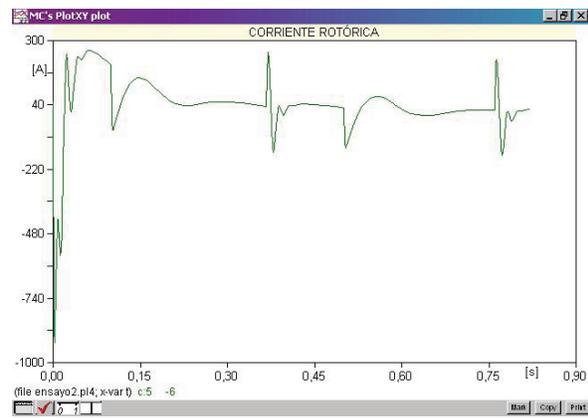
(a) Antes del SAG de voltaje



(b) SAG de voltaje monofásico



(c) SAG de voltaje trifásico

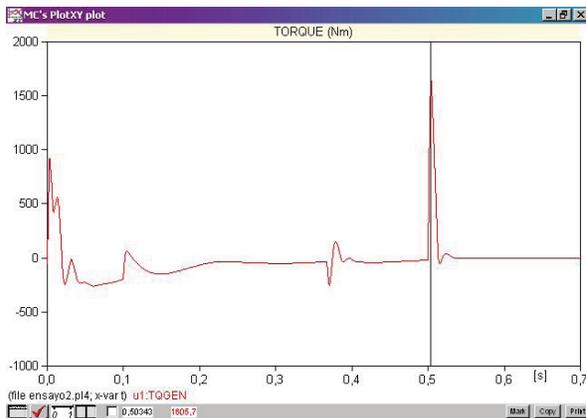


(d) SAG de voltaje sucesivo trifásico

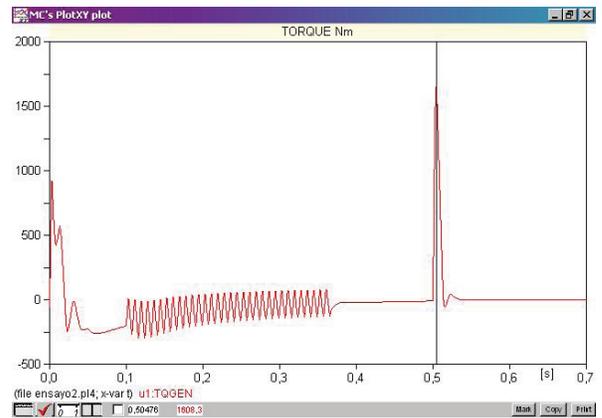
Gráfica 5. Variación de la corriente del motor.

La gráfica 6 muestra los resultados obtenidos para la variación del par desarrollado por el motor. Es de anotar que en la realidad, el par no puede variar “instantáneamente” como se observa en las gráficas anteriores; de ser así, ocasionaría la fatiga y fractura del eje. Los picos observados en la variación del par obedecen al delta de tiempo escogido para la simulación. Básicamente, el ATP utiliza el método de integración trapezoidal; esto significa que a menor delta de tiempo se requiere más recurso de memoria del computador. Para efectos del presente estudio, esta situación no constituye un factor que altere los resultados [10].

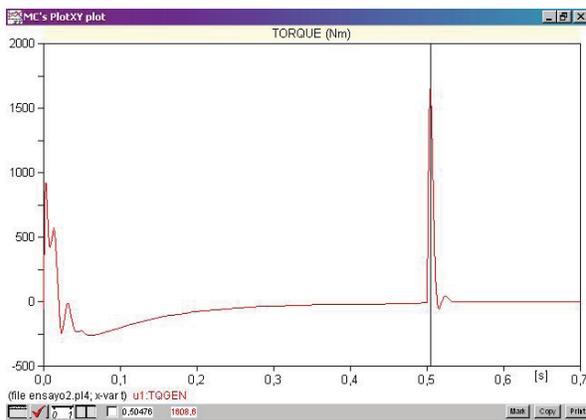
imágenes



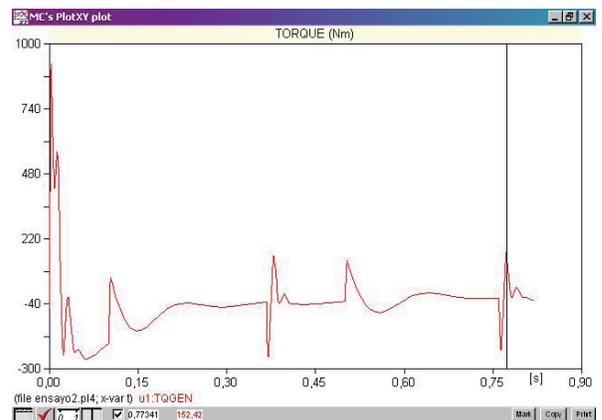
(a) Antes del SAG de voltaje



(b) SAG de voltaje monofásico



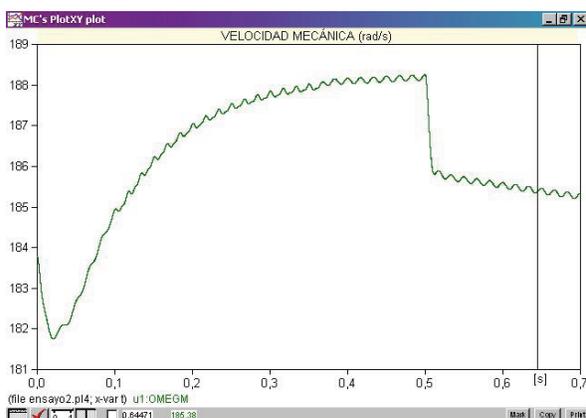
(c) SAG de voltaje trifásico



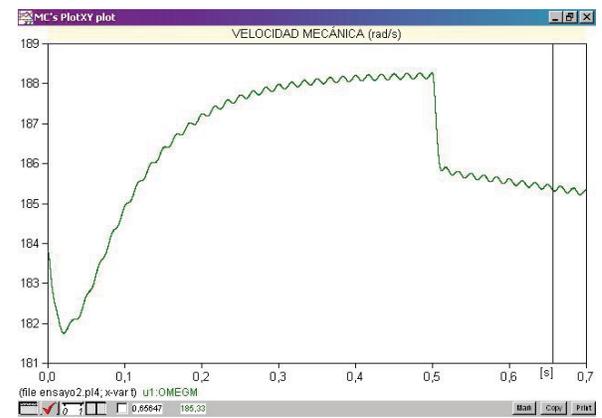
(d) SAG de voltaje sucesivo trifásico

Gráfica 6. Variación del par desarrollado por el motor (Nm).

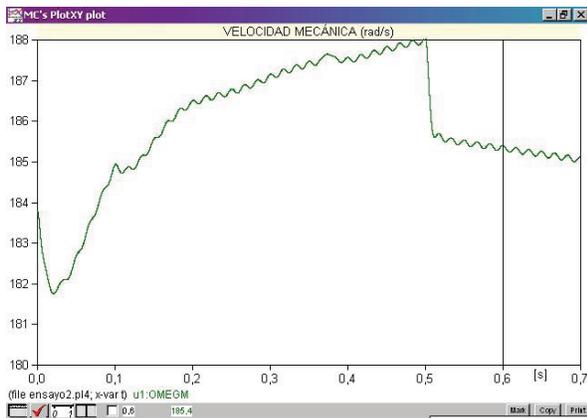
La gráfica 7 muestra los resultados obtenidos para la variación de la velocidad del motor.



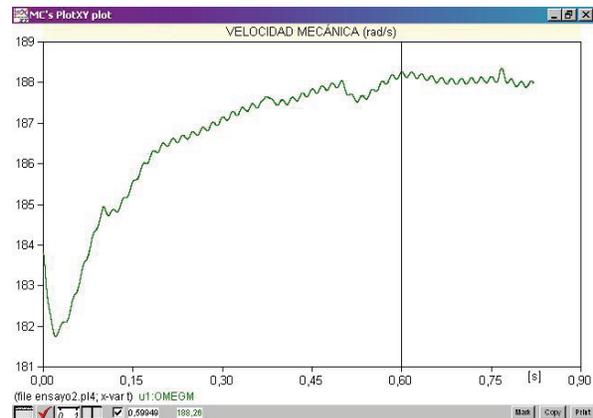
(a) Antes del SAG de voltaje



(b) SAG de voltaje monofásico



(c) SAG de voltaje trifásico



(d) SAG de voltaje sucesivo trifásico

Gráfica 7. Variación de la velocidad del motor (rad/s).

5. Análisis de resultados

Si se usa el modelo desarrollado para el motor, se orientaron las simulaciones para estudiar la respuesta del motor a los SAG de voltaje. El límite para que el funcionamiento del motor no se afecte por el SAG de voltaje se identificó y se describe como sigue:

5.1. SAG de voltaje monofásico

Un SAG de voltaje monofásico fue aplicado con 83% de magnitud y dieciséis ciclos de duración (0,27 sg). Se observa que introducir un SAG monofásico de estas características no afecta considerablemente el funcionamiento del motor. La principal alteración se da en pequeñas variaciones de flujo, por lo tanto, de forma similar varía la corriente y el par desarrollado, lo que se puede traducir en una pequeña vibración del motor durante el tiempo que dure el SAG de voltaje (gráficas 4a, 4b, 5a, 5b, 6a, 6b, 7a y 7b).

5.2 SAG de voltaje trifásico

Un SAG de voltaje trifásico fue aplicado, con 83% de magnitud y dieciséis ciclos de duración (0,27 sg). Después del SAG, el voltaje se incrementa un 10% sobre el valor del voltaje del pre-SAG; este incremento del voltaje por encima del voltaje del

pre-SAG se debe a la reducción de la carga. La variación en la velocidad del motor durante el SAG de voltaje se muestra en las gráficas 7a y 7c. Los primeros 50 m corresponden al arranque del motor. El motor se acerca a su velocidad nominal hacia el final del tiempo de simulación; durante el periodo comprendido entre 50 m y 500 m el motor está en estado estable. El SAG de voltaje se ha aplicado entre 100 m y 367 m. Se observa que disminuye la velocidad del motor en un 5% de su valor nominal durante el SAG de voltaje.

Después del SAG de voltaje, la velocidad recupera su valor nominal a los 600 m. La corriente del motor antes, durante y después del SAG, se muestra en las gráficas 5a y 5c. Durante el SAG, los incrementos son de aproximadamente 1,75 veces su valor nominal. Después del SAG, los aumentos suben rápidamente a 100 A (aproximadamente cuatro veces el valor nominal), la corriente no alcanza valores altos por largo tiempo. Teniendo en cuenta esta situación, se pueden activar cualquiera de los sistemas de protección del motor.

5.3 SAG de voltaje sucesivo

El motor de inducción podría exponerse a dos o más SAG sucesivos, debido a los esfuerzos del recierre automático o manual. La falla inicial se

despeja en un tiempo del orden de 100 m, seguido por un recierre automático después de 300 m. Si el recierre no tiene éxito, el sistema de protección despejará la falla permanentemente después de 500 m. El impacto de esta acción en el motor de inducción se examina enseguida: Para representar esta situación, un SAG de voltaje con las características mostradas en la gráfica 2 es aplicado al motor de inducción. Como se muestra en la figura mencionada, el primer SAG tiene 83% de magnitud y 267 m de duración, seguido por la recuperación de voltaje durante 50 m y por otro SAG de voltaje de 83% de magnitud y duración de 267 m para un total de aproximadamente 500 m.

Las figuras 7a y 7d muestran que con respecto al pre SAG, se disminuyó la velocidad del motor en 1% y 5% de su valor durante el primer y segundo SAG respectivamente y recuperan su valor nominal en 400 m, lo que coincide con la recuperación de voltaje (figura 4d). También se muestra que el aumento de corriente (figura 5d) durante las SAG de voltaje se está recuperando, pero no alcanza el nivel de disparo de una protección típica, lo que impide el comienzo de la acción de la protección. Se puede concluir que las escenas de las protecciones

se pueden aumentar para que el funcionamiento del motor sobreviva al SAG de voltaje sin causar el daño al motor.

6. Conclusiones

Se realizó un estudio que usó el EMTP/ATP para indagar acerca de la respuesta dinámica de motores de inducción a los SAG de voltaje. El uso del modelo de la máquina universal lo hizo posible, ya que utiliza los datos de la placa característica del motor y los parámetros del circuito equivalente. Se simuló un motor de inducción trifásico de 10 HP (7,46 Kw), 230V al que se conecta una carga. Las características técnicas proporcionadas por la placa dada por el fabricante fueron usadas para verificar la exactitud del modelo.

La respuesta del motor al SAG de voltaje aplicado muestra que, este motor normalmente puede soportar los SAG de voltaje más comunes (0,83 pu, dieciséis ciclos de duración). Sin embargo, la configuración de las protecciones normalmente demasiado sensibles, se manifiestan en la pérdida innecesaria del funcionamiento del motor que se puede evitar.

Referencias bibliográficas

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Bingham, Richard P. (February 1998). <i>Sags and swells</i>. Bingham: Manager of Technology and Products, Dranetz – BMI.</p> <p>[2] Lamoree, Jeff. (April 1992). How Utility Faults Impact Sensitive Customer Loads. <i>Electrical World</i>, 60-63.</p> <p>[3] Smith, Charles J.; Lamoree, Jeff; Vinett, Paul; Duffy, Tom & Klein, Mike. (Sin año) <i>The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads</i>.</p> <p>[4] Rogers, G.J., Shirmohammadi, D. (1987). Induction Machina Modeling for Electromagnetic Transient Program. <i>IEEE Transactions On Energy Conversion, EC-2</i> (4), 622-628.</p> | <p>originally written by John A. DeDad and editors of EC&M, Intertec Publishing Corp.</p> <p>[6] Bollen, M.H J. (2000). Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and interruptions (1st edition), <i>IEEE Press</i>.</p> <p>[7] <i>ATP User's Manual, Section 3 Induction Machine</i>. BPA Publications.</p> <p>[8] <i>ATPDRAW, Graphical User Interface for ATP-EMTP</i>. BPA.</p> <p>[9] McGrahaghian, Mark.; David R., Mueller, and Marek J., Samothj. (March-April 1993). Voltage Sags in Industrial Systems. <i>IEEE Transactions on Industry Applications</i>, 29. (2), pp. 397-403.</p> <p>[10] Douglas, John. (December 1994). Power Quality. <i>EPRI Journal, CEE News</i>, 8-15.</p> |
|--|--|
- Berutti, Al & Waggoner, R.M. (1993). *Practical Guide to Quality Power for Sensitive Electronic Equipment*. EC&M, Based on Materials