

Efecto de los huecos de tensión en el motor de inducción

Por
Ing. Alejandro Jurado
Ing. Norberto A. Lemozy
Facultad de Ingeniería,
Universidad de Buenos Aires.

Presentado en CIDEL Argentina 2010

1. Introducción

Los motores eléctricos y los procesos que de ellos dependen se ven influenciados por la calidad de la energía suministrada en sus puntos de conexión con el sistema eléctrico. Armónicos, desbalances de tensión, sobretensiones y huecos de tensión son algunos de los problemas que afectan a los motores de inducción. En general, los trabajos técnicos destacan la influencia de los arranques de los motores como fuentes de huecos de tensión, pero poco dicen de los efectos que estos producen sobre la propia máquina de inducción.

Los efectos de los huecos de tensión sobre la máquina se manifiestan como picos en la corriente, modificaciones transitorias de la cupla y pérdida de velocidad; también, y dependiendo del tipo de hueco, pueden presentarse oscilaciones en la cupla y en la velocidad.

Las variaciones transitorias de la cupla producen esfuerzos dinámicos, los que a su vez pueden causar problemas mecánicos en la máquina impulsada.

2. Huecos de tensión

Según [1] los huecos de tensión son disminuciones transitorias del valor eficaz de la tensión, a un valor comprendido entre el 90 y el 10% del valor de la tensión de referencia y de una duración comprendida entre 0,5 ciclos y 1 minuto.

En general, los huecos de tensión se deben a cortocircuitos, sobrecargas, arranques de motores de gran potencia y conexión de transformadores.

La importancia de su estudio radica en la sensibilidad que presentan determinados dispositivos a la reducción transitoria de tensión. Por ejemplo, variadores de velocidad, computadoras o sistemas de proceso de control son algunos de los equipamientos más sensi-

bles de la industria.

También es de destacar que, en general, las interrupciones, ya sean de corta o larga duración, se produzcan en las redes de suministro locales. En cambio los huecos de tensión pueden originarse por un cortocircuito en una red a varios kilómetros de distancia, lo cual lo convierte en un fenómeno más global que la interrupción, y por ende más difícil de prevenir.

3. Caracterización

Los huecos de tensión pueden caracterizarse por su magnitud, duración, tipología y fase inicial. De acuerdo a esto, el hueco podrá expresarse como:

$$v(h, \Delta t, \psi, q) \quad (1)$$

donde

h : magnitud del hueco

Δt : duración del hueco

ψ : fase inicial

q : tipología

3.1 Tipología:

Si la caída de tensión es la misma para las tres fases y además los ángulos entre ellas permanecen constantes y de 120° , se dice que el hueco es simétrico. En general, las fallas en los sistemas eléctricos tienen características asimétricas, dando origen a huecos de tensión también asimétricos, donde la tensión remanente durante la falla no es igual en las tres fases.

Los huecos asimétricos son estudiados con ayuda de la teoría de los componentes simétricos, obteniéndose para distintos tipos de falla y distintas configuraciones de carga una clasificación [2] y [3] que se resume en la tabla 1:

Falla	Tipo de carga	
	Estrella c/n	s/n
Trifásica	Tipo A	Tipo A
Monofásica	Tipo B	Tipo C*
Bifásica	Tipo C	Tipo D
Bifásica a tierra	Tipo E	Tipo F

Tabla 1. Tipos de huecos.

3.2 Magnitud del hueco

Una práctica común, usada en varias normas del IEEE, es definir la magnitud del hueco como el valor eficaz de la tensión remanente durante la falla, el que se expresa como un porcentaje de la tensión nominal. Por ejemplo con una tensión nominal de 220 V, en un hueco del 60% la tensión durante la falla es de 132 V, que es el 60% de 220 V.

En el caso de una falla asimétrica, la magnitud del hueco de tensión resulta ser el valor de tensión remanente más bajo registrado en todas las fases. Otra alternativa es utilizar el promedio de los valores remanentes de las tres fases.

3.3 Fase inicial

Considerando la perturbación perfectamente rectangular, todo hueco de tensión posee un instante inicial t_i , donde se produce la caída de tensión, y un instante final t_f , donde se restituye la tensión. El punto inicial se corresponde con un punto de la onda de tensión de fase (ψ).

$$v_a = V_{max} \text{sen}(\omega t + a) \quad (2)$$

Para el instante inicial del hueco

$$\psi_i = \omega t_i + a \quad (3)$$

Si se considera que el hueco de tensión comienza en $t_i = 0$, la fase inicial del hueco coincide con la fase inicial de la tensión. En este trabajo, y en general, para los huecos trifásicos, se toma como referencia de ángulo a la tensión de la fase A.

3.4 Duración

La duración de los huecos de tensión está comprendida entre 10 ms y 1 minuto; este valor depende del tiempo que tarda la protección en despejar la falla.

Comúnmente, la definición utilizada para la duración del hueco específica que es el número de ciclos durante el cual el valor eficaz de la tensión está por debajo de un nivel de referencia. Un valor típico para la referencia es el 90% del valor nominal de la tensión.

4. Efectos

Los efectos que los huecos de tensión producen en los motores eléctricos están relacionados con transitorios de corriente, de cupla y de velocidad. La magnitud y forma de esos efectos depende no solo de los parámetros del hueco de tensión, sino también de la potencia de cortocircuito de la red, de la carga mecánica acoplada al eje del motor y de los parámetros del propio motor.

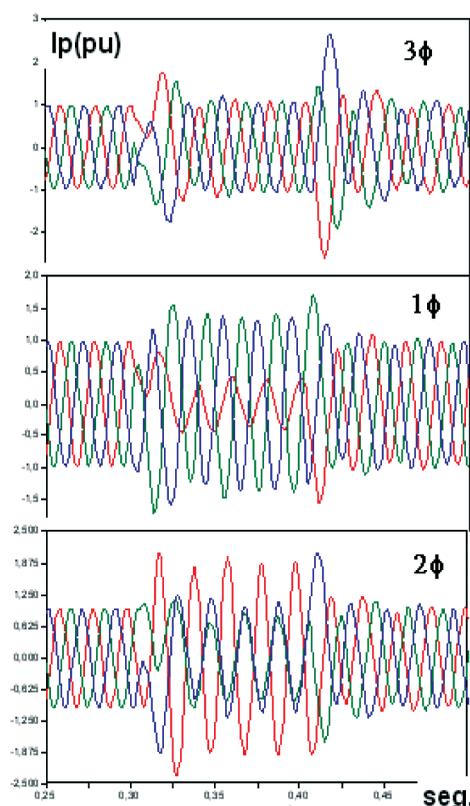


Figura 1: corriente del motor durante las fallas.

En la figura 1, se muestran las corrientes absorbidas por un motor de inducción de 5 kW; la figura 1a corresponde a una falla trifásica simétrica; la 1b, a una falla monofásica, y la 1c, a una bifásica. En los tres casos se observan picos de corriente tanto en el origen del hueco como en el punto de restitución de la tensión.

El incremento de la corriente en el inicio del hueco es producto de la energía aportada por la máquina a la red, debido a la disminución de la tensión en bornes respecto a la fuerza electromotriz interna del motor, y su duración depende de las constantes de tiempo del sistema.

El máximo de la corriente en el momento de la restitución de la tensión nominal se debe a la energía que el sistema eléctrico debe entregar para acelerar la máquina hasta la velocidad nominal. Como se verá posteriormente, este valor depende de varios factores entre los que se pueden destacar la profundidad y la duración del hueco.

En la figura 2, se muestra la cupla en el motor para distintas fallas: 2a falla trifásica simétrica, 2b monofásica y 2c bifásica.

En todos los casos, se observa un pico al iniciarse el hueco y otro al restituirse la tensión nominal. En los casos de huecos asimétricos, aparece una oscilación de la cupla debido al componente de secuencia inversa de la tensión.

En la figura 3 a, b y c se muestra la velocidad para tres tipos de fallas. Para las asimétricas puede verse una gran oscilación durante el hueco debido a las pulsaciones de la cupla durante la falla.

La oscilación luego de la restitución de la tensión se debe a la baja inercia de la máquina modelada.

5. Desarrollo

Para el desarrollo del trabajo, se han modelado motores eléctricos de distintas potencias: 0,55, 5, 15, 110, 330 kW, utilizando el modelo UM3 del programa ATP/EMTP. Los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas se obtuvieron de fabricantes y de datos

experimentales del grupo de investigación, la carga mecánica aplicada se considera la nominal y con dependencia lineal con la velocidad, estando el estator conectado en estrella sin neutro. Los huecos de tensión utilizados son de característica rectangular.

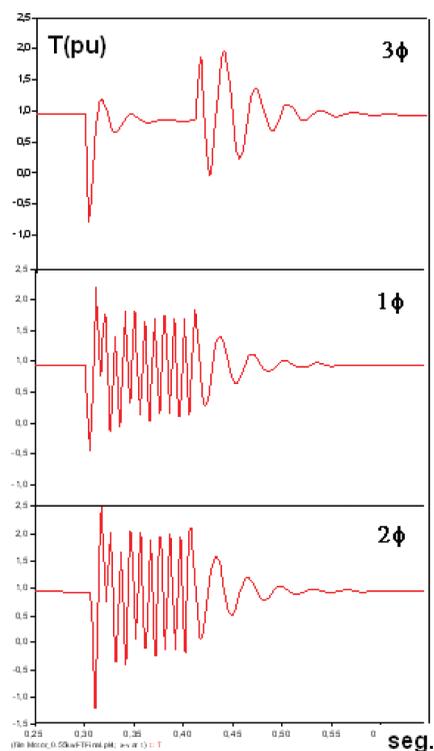


Figura 2: cupla en el motor para distintas fallas.

5.1 Dependencia de los picos de corriente con la fase inicial del hueco

En este caso, se ha realizado una serie de simulaciones para cada máquina, con una profundidad y duración de hueco fija y para distintos ángulos de inicio.

En la figura 4, se muestran los máximos de corriente durante un hueco de 10% de magnitud y 5,5 ciclos de duración; los valores máximos de la corriente al momento de la restitución de la tensión siguen la misma forma que los anteriores pero con valores porcentuales un poco mayores.

Del estudio anterior se puede concluir que en el hueco simétrico los máximos de corriente, tanto dentro como fuera del hueco, son poco dependientes del

ángulo de inicio. Algo distinto ocurre con los huecos asimétricos, donde se observan valores mayores para 90° en el caso de la falla bifásica y de 0° para la falla monofásica.

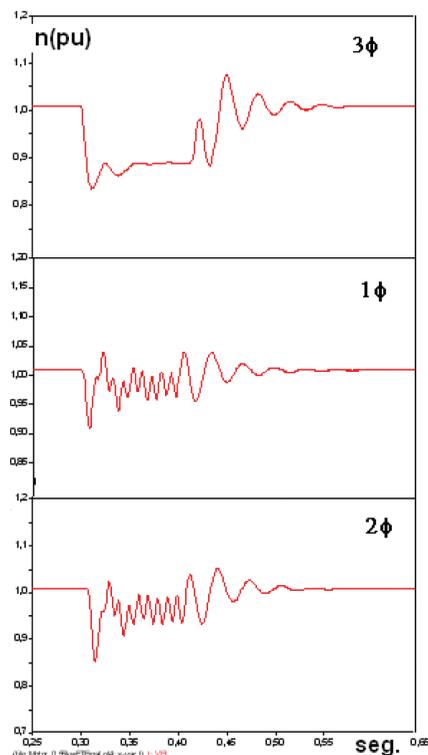


Figura 3: velocidad del motor para distintas fallas.

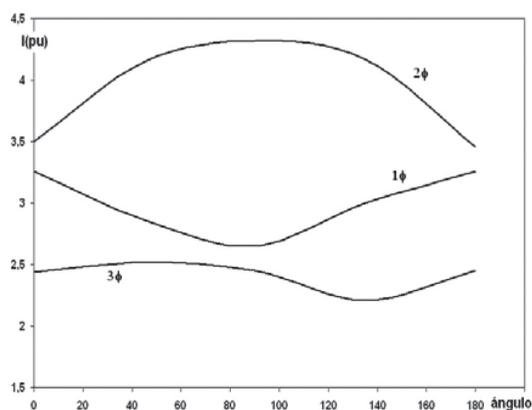


Figura 4: máximos de corriente en el hueco de tensión, en función al ángulo inicial.

El análisis se repitió para otros modelos de huecos, y se obtuvieron en todos los casos resultados similares.

La figura 5 muestra los máximos de cupla obteni-

dos dentro del hueco, resultando dependientes del ángulo de inicio. Los máximos valores de cupla producidos en la restitución resultan, para el caso de estudio, independientes del ángulo de inicio del hueco.

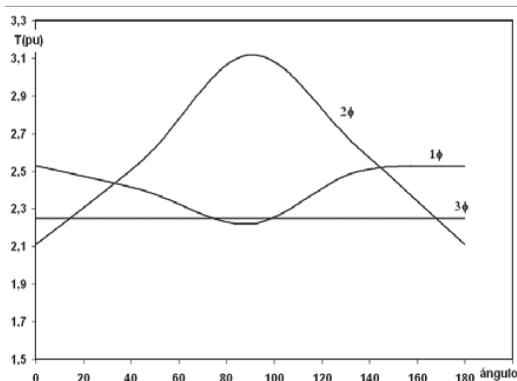


Figura 5: máximos de cupla durante el hueco de tensión.

Los datos obtenidos en este apartado se usan para establecer el ángulo inicial de los huecos para los estudios posteriores, y así obtener los valores máximos de corriente y cupla para cada caso.

5.2 Variación de los máximos valores de corriente y cupla con la profundidad del hueco.

La figura 6 muestra la variación de los máximos de corriente dentro (línea continua) y fuera del hueco (línea de puntos) en función de la profundidad del hueco, para una duración constante y para distintos tipos de falla.

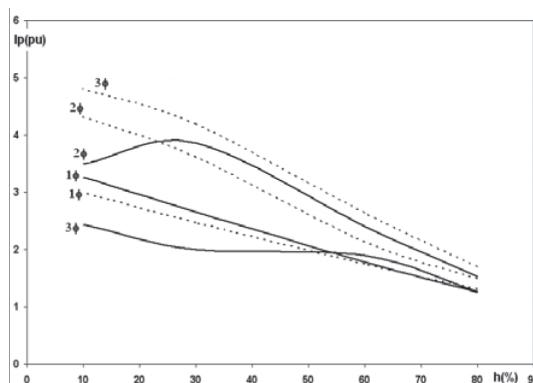


Figura 6: corriente máxima en función de la profundidad del hueco.

Los valores máximos de corriente aumentan con la

profundidad del hueco, por lo que el pico de corriente en el momento de la restitución de la tensión para fallas trifásicas es el más severo. Se comprobó que en ocasiones resulta mayor el valor de la corriente dentro del hueco y otras veces en el momento de la restitución de la tensión, dependiendo de los parámetros del sistema. En el caso de la falla monofásica, en general el valor máximo de corriente aparece al comienzo del hueco. La figura 7 muestra la variación de los valores máximos de cupla en función de la profundidad del hueco para distintos tipos de falla. Se ve una gran variación de valores para las fallas trifásicas y bifásicas, aumentando estos máximos con la profundidad del hueco.

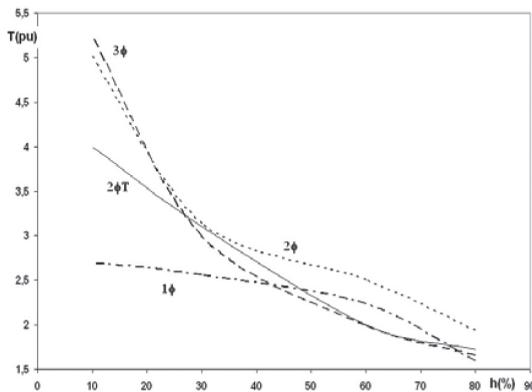


Figura 7: máximos de cupla durante el hueco en función de la profundidad

5.3 Variación de los máximos de corriente con la duración del hueco

En la figura 8, se observa la variación de los máximos valores de corriente con la duración y para una determinada magnitud del hueco en una falla del tipo trifásica. El pico de corriente correspondiente al inicio del hueco (línea continua) permanece constante para cualquier duración del hueco y se presentan en el primer semiciclo luego de la depresión de la tensión.

Los máximos de corriente, correspondientes al momento de restitución de la tensión (línea de puntos), son dependientes de la duración del hueco. La

pequeña variación registrada en la figura para estos máximos se debe a que la máquina, antes de la falla, se encuentra trabajando a carga nominal ya que en el momento de la restitución de la tensión, el motor está con un resbalamiento relativamente grande y en una parte de poca pendiente de la curva corriente (resbalamiento); en esas condiciones, la corriente de restitución es prácticamente igual a la de arranque directo del motor, salvo para huecos de corta duración.

También en el gráfico de la figura 8 se muestra en línea de trazos la curva correspondiente a una falla monofásica con $h = 10\%$. Esta falla resulta menos severa que una trifásica de la misma profundidad, ya que provoca una menor variación en la velocidad y por lo tanto una menor corriente cuando se restituye la tensión.

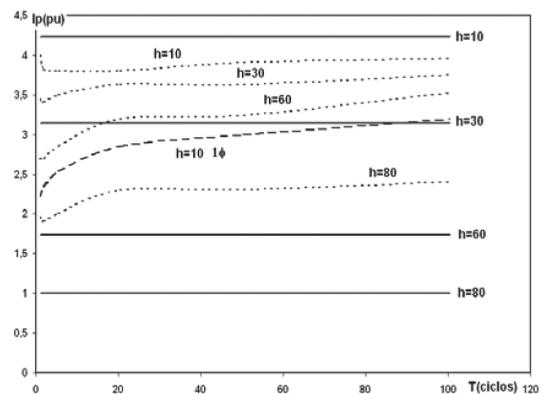


Figura 8: máximo de corriente en función de la duración del hueco

5.4 Variación de la velocidad con la duración del hueco

En la figura 9, se muestra la variación de la velocidad de la máquina dependiendo de la duración del hueco y para una profundidad determinada. Como era de esperar, se observa que para huecos profundos la velocidad es muy dependiente de la duración de estos.

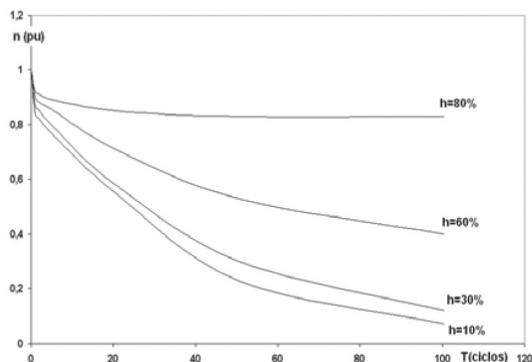


Figura 9: velocidad en función de la duración y profundidad del hueco.

6. Conclusiones

A través del modelado, se pudo analizar la dependencia de la corriente, la cupla y la velocidad con la magnitud, duración y ángulo de inicio del hueco de tensión para distintos tipos de fallas.

A través de las formas de onda, se observó que al producirse el hueco de tensión sobre la máquina aparecen dos picos en las corrientes de línea, uno al iniciarse el hueco y otro al restituirse la tensión.

En general, y para una falla simétrica, los valores máximos de corriente se obtienen en el momento e que las corrientes de restitución son más pequeñas, y la más severa es la bifásica.

Se ve que los picos de corriente al comienzo y luego del hueco dependen del ángulo de inicio de este, dato importante a la hora de hacer los modelos para la realización de un estudio.

Los valores máximos de corriente dentro y fuera del hueco dependen de la profundidad, y se destacan la independencia del pico inicial con la duración del hueco.

Para alguno de los casos analizados en este trabajo, los valores máximos de corriente se encuentran próximos a la corriente de arranque. En un estudio más profundo, considerando el cambio de fase de la tensión durante la falla, pueden obtenerse picos de corriente al momento de la restitución de la tensión superiores a los obtenidos durante el arranque.

Respecto a la cupla, se puede observar que en algunos casos se supera transitoriamente el valor máximo que le corresponde a la máquina estudiada cuando se encuentra en condiciones normales de funcionamiento, que es de alrededor de 3 pu. Para el caso de las fallas asimétricas, además se observa una oscilación en la cupla, lo que traería un aumento de las sollicitaciones mecánicas del eje. ■

Bibliografía:

- [1] IEEE: *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Std, 1159-1995.
- [2] Bollen M. H. J.: *Understanding power quality problems. voltage sags and interruptions*, Wiley, 2000.
- [3] Guasch Pesquer Luis: *Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y en los transformadores trifásicos*, Barcelona, 2006.
- [4] Gómez Juan Carlos: *Calidad de potencia*, Universidad Nacional de Río Cuarto, Edigar, 2005.
- [5] Dugan R. C. : *Electric power system quality*, Mc Graw Hill, 1996.
- [6] Gómez J. C., Morcos M., Reinieri C., Campetelli C.: *Behaviour of induction motor due to voltage sags and short interruptions*, IEEE, 2002.
- [7] Bollen M.: *The influence of motor reacceleration on voltage sags*, IEEE, 1995.