

# Detection of High-Resistance Connections in Industrial Power Systems during Induction Motor Start-up

Pablo M. de la Barrera, *Senior Member, IEEE*, José M. Bossio, *Member, IEEE*, and Guillermo R. Bossio, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—We propose a methodology for detecting and isolating high-resistance connections (HRC) in industrial power systems during induction motor (IM) start-up. Negative sequence components are analyzed during the IM start-up transient in different points of the electric system of an industrial plant. The effects of HRC are evaluated using an analytical model of an industrial power system in steady state and validated with numerical simulations obtained of a transient model. These results show not only the possibility to detect HRC but also its isolation from unbalance voltage conditions of the grid. In addition, an approximation of the total power of motors affected by the HRC is calculated with our proposal. This power and the electric one-line diagram of the industrial plant allow us to determine the location of HRC. Finally, the proposal is validated by using experimental results obtained in a meat processing industry.

**Index Terms**—High-resistance connection, induction motor, fault diagnosis, negative sequence current, start-up transient.

## I. INTRODUCCIÓN

Los contactos de alta resistencia (CAR) son uno de los problemas más importantes en los sistemas eléctricos industriales, pudiendo representar el 80 % de las fallas en los circuitos eléctricos de potencia [1]. Éstos se generan en borneras o empalmes y tiene un carácter progresivo.

Como se mostró en [2], existe un mecanismo de degradación progresivo que puede iniciarse por muchos factores, tales como altas corrientes o tensiones, vibraciones, atmósferas industriales sucias o corrosivas, fatiga o envejecimiento en los metales o alta temperatura ambiente. Este mecanismo se puede esquematizar como dos ciclos de realimentación positivos en los que el aumento de la resistencia de contacto produce un aumento en la temperatura. El aumento de temperatura produce dilatación en los materiales y acelera la oxidación y la corrosión, ambos efectos producen un aumento en la resistencia de contacto, cerrando de esta forma los ciclos de realimentación positiva.

Si estos ciclos no se detienen, el CAR puede terminar en un incremento descontrolado de la temperatura. A modo de ejemplo, la Fig. 1 se muestra una imagen termográfica de una bornera donde se puede observar el efecto de un CAR. Estos aumentos descontrolados de temperatura pueden

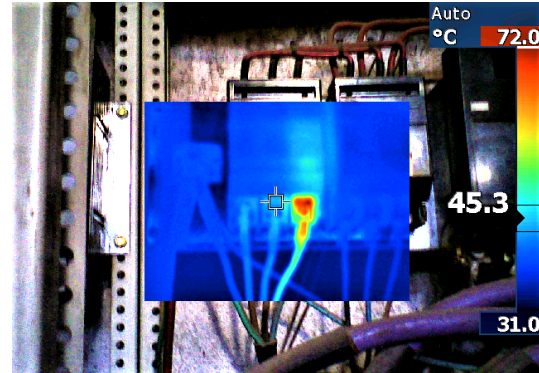


Fig. 1. Imagen termográfica de una bornera con CAR.

ser iniciadores de arcos eléctricos, derretimientos de bornes y cables e incluso fuego; y que no solo pueden afectar a los equipos y/o edificaciones, sino también, producir daños personales [3].

Los motores eléctricos son uno de los dispositivos más frecuentemente afectados por los CAR ya que son la principal carga y consumen alrededor del 70 % de la energía suministrada a la industria [4]. Los motores eléctricos cada vez son más grandes y muchos de ellos tienen una potencia considerable con respecto a la capacidad del sistema eléctrico de la planta. Si bien los CAR no causan una inminente salida de servicio del motor, su evolución puede ocasionar fallas de mayor consideración si no se los detecta en un estado incipiente.

De los distintos tipos de motores, el más difundido a nivel industrial es el motor de inducción (MI) [5] [6]. Los MI son muy sensibles a los desequilibrios de tensión que se pueden producir por CAR o por la red eléctrica. Un bajo desequilibrio de tensión puede generar un desequilibrio significativo de las corrientes del MI. Esto provoca un incremento de las pérdidas y las vibraciones, como así también, oscilaciones en la potencia y el par [7]. Esta situación se ve agravada aún más en los nuevos MI de alta eficiencia que son más sensibles a los desequilibrios de tensión que los MI estándar [8]. Por tales motivos, se han propuesto estrategias para la detección y diagnóstico de CAR tanto en máquinas conectadas directamente a la red como así también máquinas alimentadas por variadores de velocidad [1], [9], [10], [11]-[13]. Para los accionamientos con inversores se encuentran en la bibliografía tanto estrategias pasivas, que emplean la información de las componentes fundamentales [14], como así también activas,

P. M. de la Barrera, J. M. Bossio y G. R. Bossio pertenecen al Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA), UNRC, CONICET, Córdoba, Argentina. (e-mail:pbarrera@ing.unrc.edu.ar, jbossio@ing.unrc.edu.ar, gbossio@ing.unrc.edu.ar).



$$\tilde{\alpha}_k = e^{j\frac{2\pi}{3}(k-1)} \quad (5)$$

con  $k = 1, 2, 3$  si el CAR se encuentra en las fases  $a, b$  o  $c$  respectivamente y el  $*$  indica el complejo conjugado.

De las ecuaciones anteriores es posible observar que un CAR se puede modelar tanto en la secuencia positiva como negativa mediante una caída resistiva más una fuente de tensión. Estas fuentes representan el acoplamiento entre los circuitos de secuencia positiva y negativa en presencia de un CAR. El acoplamiento es directamente proporcional a la corriente y al valor del CAR y su fase depende de la fase en la que se encuentra la falla, tal como se observa en (3) y (4).

Si las tensiones de alimentación están equilibradas no existe tensión de secuencia negativa, es decir  $\tilde{V}_n = 0$ , y el circuito de secuencia negativa queda alimentado solo por la fuente  $\tilde{V}_{\Delta r sn}$ . De esta manera, la corriente  $\tilde{I}_{sn}$  depende directamente de la  $\tilde{I}_{sp}$  y por este motivo variará significativamente durante el arranque del motor. Además, es posible observar en los MI elevadas corrientes  $\tilde{I}_{sn}$  incluso para valores bajos de  $\tilde{V}_{\Delta r sn}$ . Esto se debe a que la impedancia de secuencia negativa  $Z_n$ , dada por,

$$Z_n = \frac{\tilde{V}_{sn}}{\tilde{I}_{sn}} \approx r_s + \frac{r_r}{2-s} + j\omega_e(L_{ls} + L_{lr}) \quad (6)$$

es muy baja y varía muy poco con el deslizamiento ( $s$ ), por lo que, prácticamente, puede considerarse constante. Además, esta impedancia es muy similar a la de secuencia positiva cuando el rotor se encuentra a velocidad nula ( $Z_p|_{s=1}$ ), la que, a su vez, limita la corriente de arranque del MI. En forma práctica, puede considerarse, además, que tanto la  $Z_p|_{s=1}$  como  $Z_n$  serán aproximadamente entre 1/8 y 1/6 de la impedancia de secuencia positiva a velocidad nominal  $Z_p|_{s_{nominal}}$ . Esto se debe a que generalmente las corrientes de arranque del motor, si bien pueden variar con la potencia y el nivel de eficiencia, son de entre 6 y 8 veces la corriente nominal [8].

Para analizar los efectos de los CAR durante el arranque de los MI se realizaron simulaciones numéricas utilizando un modelo transitorio del motor en un marco de referencia arbitrario “ $qd$ ” [26]. El modelo utilizado es de parámetros concentrados, de sexto orden y se considera que los bobinados del estator son idénticos entre sí, distribuidos sinusoidalmente y desplazados 120 grados. Además, la jaula de ardilla se modela como un bobinado trifásico equivalente, con distribución sinusoidal, al igual que el estator. En este modelo, el circuito magnético del MI es lineal (no se considera la saturación) y se desprecian las variaciones del entrehierro. Para obtener los resultados de simulación mostrados en esta sección se programó el modelo del MI en Simulink de Matlab y se utilizó un método numérico de paso variable tipo ODE45. Las características y los parámetros del MI se muestran en la Tabla I. En primer lugar se simuló solo el MI conectado en el punto 4 de la red mostrada en la Fig. 4.

A partir de los resultados de simulación se extrajeron las componentes de secuencia de las corrientes y tensiones de fase del MI. Existen numerosas propuestas para realizar la extracción de las componentes de secuencia y se pueden

TABLA I  
PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DEL MI

Variable	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
Potencia ( $P_0$ )	160.0	kW	Polos	2	-
Tensión de línea	380	V rms	$r_s$	0.0139	$\Omega$
Corriente	292.0	A rms	$r_r$	0.0173	$\Omega$
Frecuencia	50	Hz	$L_{ls} = L_{lr}$	0.152	mH
Velocidad	2933	rpm	$L_m$	7.69	mH

Conexión de los bobinados en estrella.

agrupar en métodos paramétricos y no paramétricos [27]. En el presente trabajo se utilizaron analizadores de secuencia del tipo no paramétricos basados en DFT (del inglés, *discrete Fourier transform*). Estos realizan un análisis de Fourier de cada señal sobre una ventana deslizante de un ciclo de la componente fundamental para obtener los fasores. Luego se aplica una transformación para pasar de los fasores de fase a las componentes de secuencia positiva y negativa en cada ciclo. En este caso la frecuencia de la componente fundamental y sus armónicos se consideraron fijas. Es importante destacar que si las señales contienen alta distorsión o son de frecuencia variable se pueden utilizar otros métodos para mejorar la extracción de las componentes, tales como los lazos enganchados en fase trifásicos (*Three-phase phase-locked loop*) [28] o las técnicas de muestreo variable [27] [29].

Con la configuración mostrada en la Fig. 4 se realizó un ensayo numérico que consistió en el arranque directo de uno de los motores en dos condiciones diferentes, una considerando CAR a sus bornes y la otra sin CAR (MI sin falla). Además, en la figura, se indican los valores de la impedancia del transformador ( $Z_{12}$ ) y de la línea ( $Z_{23}$ ), utilizadas para la simulación. La velocidad del rotor ( $\omega$ ) y las corrientes y tensiones de secuencia positiva y negativa a bornes del motor para ambas condiciones se muestran en la Fig. 5(a). Luego del arranque directo, a los 8.0 s se aplica el par de carga nominal con el objetivo de mostrar el efecto de los cambios de carga sobre las variables de interés. El CAR se simuló en la fase  $a$  del motor con un valor de  $\Delta r = 0.01 \Omega$ . Tanto en las figuras como en el texto, cuando se utilizan las variables sin la virgulilla ( $\sim$ ) se hace referencia a su módulo.

Se puede observar que la corriente  $I_{sp}$  durante el arranque es aproximadamente 5.4 veces la corriente nominal del motor para ambas condiciones. En la Fig. 5(a) se muestran en línea continua la condición del MI con CAR y en línea de trazos el MI sin CAR. Esta corriente produce una caída de tensión de secuencia positiva en el circuito equivalente del CAR que reduce la  $V_{sp}$  a bornes del MI. Por otra parte, el CAR produce una tensión de secuencia negativa ( $V_{sn}$ ) sobre el motor que

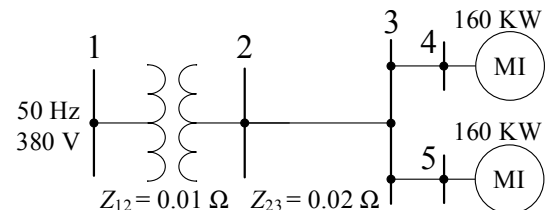


Fig. 4. Diagrama unifilar de la red eléctrica utilizada para la simulación.

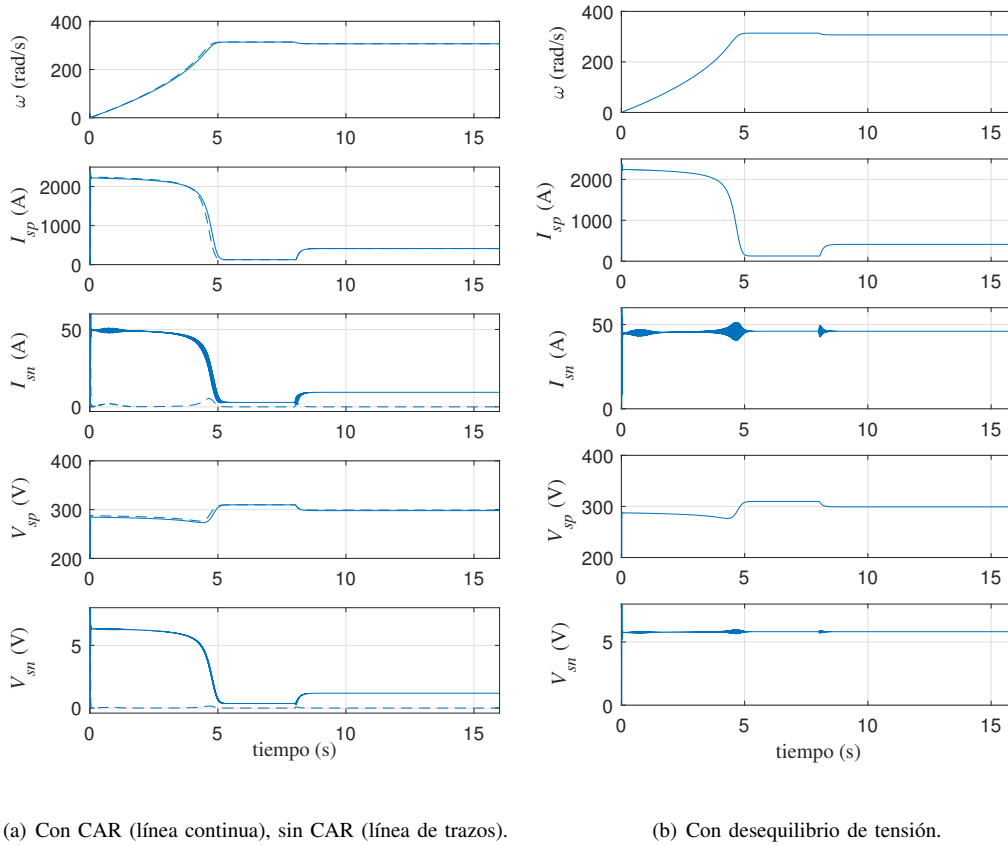


Fig. 5. Resultados de simulación del arranque del MI. Medición realizada a bornes del MI.

es proporcional a  $I_{sp}$ . Tal como se mencionó anteriormente, aunque la  $V_{sn}$  sea baja, produce una elevada corriente de secuencia negativa ( $I_{sn}$ ) en el MI. Para el caso del MI sin CAR, tanto la tensión  $V_{sn}$  como la corriente  $I_{sn}$  tienen un valor nulo.

En la Fig. 5(b) se muestra el comportamiento de las variables analizadas anteriormente ante el desequilibrio de la tensión a bornes del MI, con el objetivo de compararlos con los efectos producidos por un CAR. En esta figura se muestra el arranque de un MI con un desequilibrio de tensión del 2%, similar al producido por el CAR durante el arranque analizado en la Fig. 5(a). Al igual que en el caso con CAR, a los 8.0 s se aplica el par de carga nominal. Se puede observar que la corriente de secuencia negativa prácticamente no cambia ni en el arranque ni ante un cambio de carga.

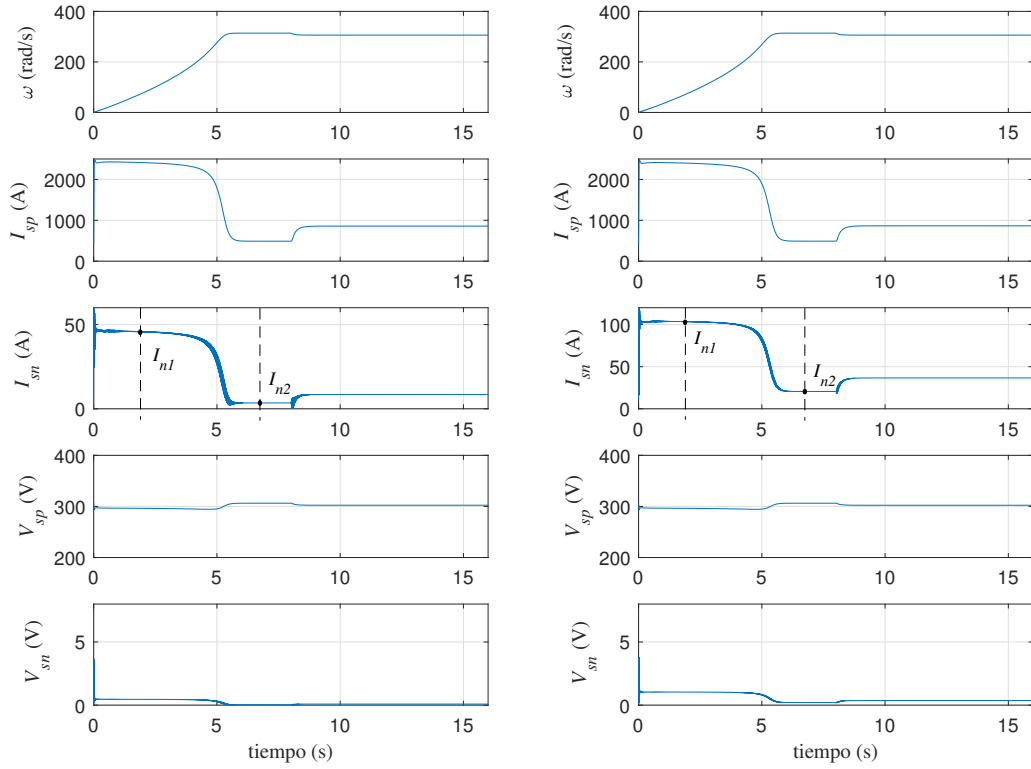
El comportamiento observado en las variables de la Fig. 5(b) se puede explicar a partir del circuito equivalente de la Fig. 3. Dado que para la simulación no se consideró CAR, es decir  $\Delta r = 0$  y  $V_{sn} \neq 0$ , los circuitos de secuencia no se encuentran acoplados y por lo tanto no hay influencia de  $I_{sp}$  sobre las componentes de secuencia negativa. Es por esto que no se observan variaciones importantes en la corriente  $I_{sn}$  durante el arranque o el cambio de carga. Esta es la principal diferencia respecto al comportamiento de  $I_{sn}$  como consecuencia de un CAR; lo que permite la separación de los dos efectos (CAR y desequilibrio de tensiones) sólo analizando la corriente  $I_{sn}$ .

### B. Efectos de los CAR a Bornes del Transformador

Tal como se mencionó anteriormente, la ubicación del CAR en el sistema eléctrico determinará qué elementos serán afectados. Por ejemplo, si se considera un segundo MI conectado al sistema, como se muestra en la Fig. 4 y un CAR entre las barras 3 y 4, este segundo motor conectado en 5 no se verá prácticamente afectado ya que quedará conectado aguas arriba del CAR. Sin embargo, si el CAR se encuentra aguas arriba de la barra 3, ambos motores serán afectados. En este caso, la corriente  $I_{sn}$  por el punto 2 prácticamente se duplicará respecto al caso de la sección anterior. Esto se puede explicar si nuevamente se analiza el circuito equivalente del sistema que en este caso tendrá dos circuitos equivalentes del MI en paralelo, como el mostrado en la Fig. 3.

Los resultados de simulación mostrados a continuación se obtuvieron para el sistema de la Fig. 4 con los dos MI, uno en régimen permanente a carga nominal mientras que se produce el arranque del segundo MI. Durante el arranque se analizaron las corrientes y tensiones de secuencia a bornes del secundario del transformador considerando CAR en distintos puntos del sistema. Al igual que en el caso de la sección anterior, el CAR simulado es de  $\Delta r = 0.01 \Omega$  sobre la fase  $a$ .

En la Fig. 6(a) se muestran la velocidad del MI durante el arranque y las corrientes y tensiones a bornes del secundario del transformador (punto 2) para un CAR entre los puntos 3 y 4. Mientras que en la Fig. 6(b) se observan las mismas



(a) Con un CAR entre los puntos 3 y 4.

(b) Con un CAR entre los puntos 2 y 3.

Fig. 6. Resultados de simulación del arranque del MI. Medición realizada a bornes del transformador.

variables pero para un CAR entre los puntos 2 y 3. Se puede observar que la principal diferencia entre estos dos casos es el incremento significativo de la corriente  $I_{sn}$  cuando el CAR afecta a ambos MI. En este último caso, la corriente de secuencia negativa sobre el motor que se encuentra en régimen permanente será prácticamente independiente de su estado de carga. Si bien los CAR pueden afectar a otras cargas, los MI se encuentran entre los equipos más sensibles al desequilibrio de tensión y, por tal motivo, son las cargas que más influyen sobre la corriente de secuencia negativa de los sistemas eléctricos industriales.

A partir del valor de las corrientes de secuencia negativa durante ( $I_{n1}$ ) y después ( $I_{n2}$ ) del arranque del MI, ver Fig. 6(a) y 6(b), medidas en el motor ( $s$ ) y a bornes del transformador ( $t$ ) es posible calcular la potencia nominal total ( $P_{0T}$ ) aproximada, del conjunto de motores afectados por el CAR. Considerando que la impedancia de secuencia negativa del MI analizado ( $Z_n$ ) y del conjunto de MI afectados por el CAR ( $Z_{nT}$ ) no varían durante el arranque, se tiene,

$$I_{n1-s} - I_{n2-s} = \frac{V_{n1} - V_{n2}}{|Z_n|} \quad (7)$$

$$I_{n1-t} - I_{n2-t} = \frac{V_{n1} - V_{n2}}{|Z_{nT}|} \quad (8)$$

luego haciendo el cociente entre (8) y (7),

$$\frac{I_{n1-t} - I_{n2-t}}{I_{n1-s} - I_{n2-s}} = \frac{|Z_n|}{|Z_{nT}|} \approx \frac{|Z_p|_{s_{nominal}}}{|Z_{pT}|_{s_{nominal}}} \approx \frac{P_{0T}}{P_0} \quad (9)$$

donde  $P_0$  es la potencia nominal del MI sobre el que se midió el arranque. Entonces  $P_{0T}$  puede aproximarse por,

$$P_{0T} \approx P_0 \frac{I_{n1-t} - I_{n2-t}}{I_{n1-s} - I_{n2-s}} \quad (10)$$

En caso que el arranque del MI no sea directo, como los mostrados anteriormente, sino utilizando el método estrella-triángulo, es necesario modificar (10) si las mediciones se realizan durante la conexión en estrella. Esto se debe a que la impedancia de secuencia negativa del MI es tres veces mayor en estrella que en triángulo. Esta modificación hace que (10) tenga la siguiente forma:

$$P_{0T-\Delta} \approx P_0 \frac{(I_{n1-t} - I_{n2-t}) + 2(I_{n1-s} - I_{n2-s})}{3(I_{n1-s} - I_{n2-s})} \quad (11)$$

En base a (10) se puede calcular la potencia  $P_{0T}$  del conjunto de motores afectados por el CAR para los casos analizados en esta sección. Para el CAR entre los puntos 3 y 4 se obtuvo que  $P_{0T} \approx 148$  kW mientras que para el CAR entre los puntos 2 y 3,  $P_{0T} \approx 311$  kW. Con la ayuda de estos resultados más el diagrama unifilar de la planta industrial

analizada es posible determinar la ubicación del CAR. Por ejemplo, para el caso del CAR entre los puntos 3 y 4 la  $P_{0T}$  calculada indica que solo es afectado uno de los motores de la Fig. 4; para el segundo caso, considerando que  $P_{0T} \approx 311$  kW y analizando el diagrama unifilar, solo es posible obtener este valor de potencia si se considera que el CAR afecta a los dos MI, es decir que el CAR se encuentra entre los puntos 3 y 4.

De los resultados mostrados en las dos secciones anteriores se puede concluir que con medir la corriente de secuencia negativa es posible identificar y separar CARs y desequilibrios de tensión de alimentación. También, se requiere de la medición de las corrientes y tensiones en al menos dos puntos del sistema y no solo a bornes del MI o del transformador. Con esta información es posible además determinar aproximadamente la ubicación de los CAR.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos durante las mediciones realizadas en una planta industrial. Se registraron tensiones y corrientes a bornes de un MI y del secundario del transformador de ingreso a la planta. El diagrama unifilar de la instalación eléctrica de la planta es similar al mostrado en la Fig. 4, más el agregado de una serie de cargas monofásicas conectadas en el punto 3.

Las mediciones se realizaron en un MI de 185 kW, 2 polos, 380 V, 50 Hz con arranque estrella-triángulo que acciona un compresor, ver parte izquierda de la Fig. 7. En la parte derecha de esta figura se observa el arreglo experimental realizado para medir las tensiones y corrientes del MI. En la Tabla II se listan las principales características de los instrumentos utilizados para obtener los resultados experimentales.

La Fig. 8(a) muestra los resultados de la medición realizada a bornes del motor mientras que la Fig. 8(b) muestra las mediciones a bornes del secundario del transformador durante el arranque del mismo MI. El intervalo de tiempo mostrado corresponde solo a la conexión en estrella del MI. Si bien las mediciones no son del mismo arranque, fueron realizadas en arranques consecutivos del mismo MI.

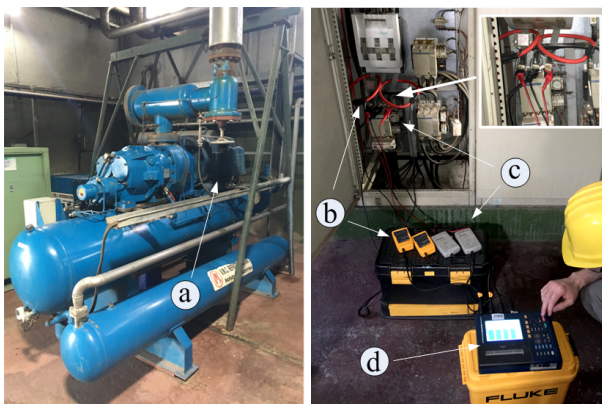


Fig. 7. Arreglo experimental en una planta industrial frigorífica. a) Motor de inducción, b) Sondas de corriente tipo Rogowski, c) Puntas diferenciales de tensión, d) Registrador oscilográfico.

TABLA II  
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS.

Sensores de corriente Fluke i3000s Flex		
Variable/Parámetro	Valor	Unidad
Rangos de corriente (AC rms)	30, 300, 3000	A
Precisión	$\pm 1$	%
Frecuencia de ancho de banda (BW)	50	kHz
Sensores de tensión Agilent N2772A		
Tensión dif. ent. max. (DC + pico de AC)	1200	V
Precisión	$\pm 2.5$	%
Frecuencia de ancho de banda (BW)	20	MHz
Registrador Oscilográfico Yokogawa OR300E		
Tensión ent. max. rms	500	V
Resolución max. A/D	12	bit
Max. frecuencia de muestro	400	kS/s

Durante el arranque, la tensión de secuencia negativa sobre el motor llega a un valor de 10 V. De acuerdo a lo observado y analizado en las secciones anteriores, esto indica que el CAR se encuentra aguas arriba del punto de medición. Se puede ver que la corriente de secuencia negativa se incrementa significativamente durante el arranque como producto del desequilibrio de tensión producido por el CAR.

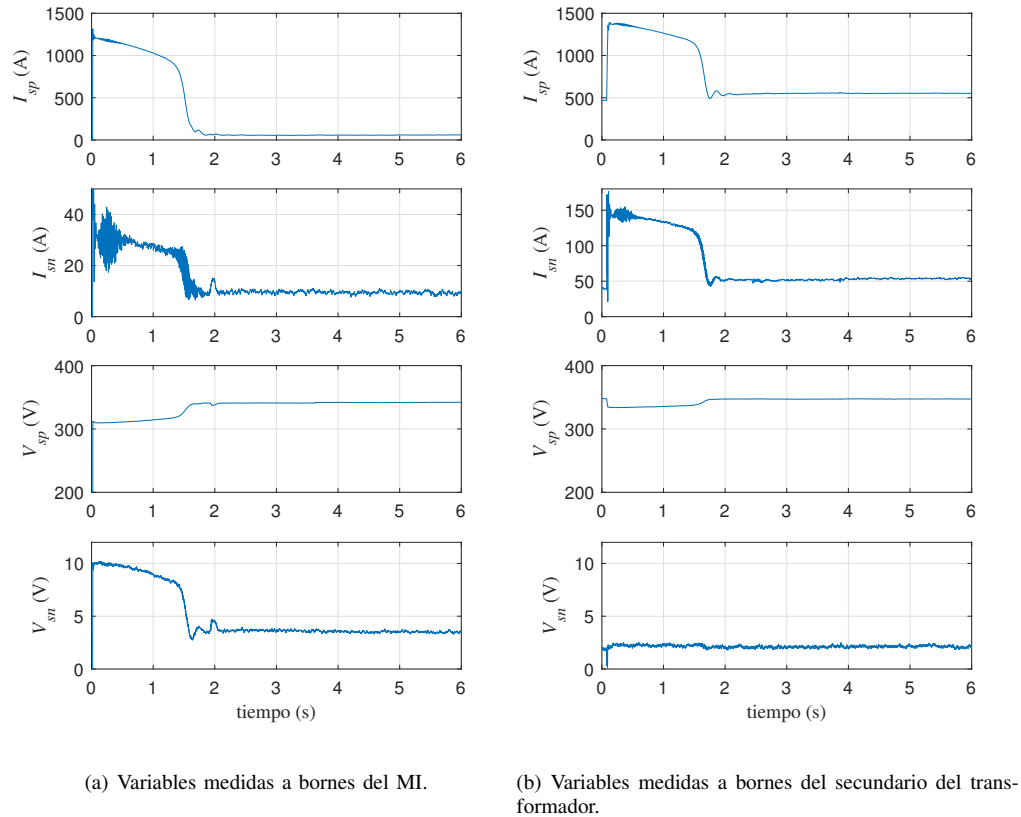
Por otra parte, para evaluar si el CAR se encuentra dentro del MI, se calculó la impedancia de secuencia negativa usando (6). Como se puede ver en la Fig. 9 el módulo de la impedancia de secuencia negativa no varía durante el arranque. Esto indica que el CAR no se encuentra en el interior del MI. La impedancia de secuencia positiva se calcula de manera similar y solo se muestra en la figura con el fin de verificar su importante variación durante el arranque.

En las citadas figuras, también se puede apreciar una diferencia significativa entre la corriente de secuencia negativa del MI y la registrada en el transformador, aproximadamente 5 veces más grande para la del transformador durante el arranque. Esto además indica que el CAR no se encuentra en la alimentación del motor sino en un punto más cercano al transformador de donde se alimentan otros MI. Es posible entonces, a partir de esta información, calcular aproximadamente la cantidad de motores afectados por el CAR.

En este caso, como el arranque se hace en estrella-triángulo, se utiliza la (11) para calcular la potencia nominal total aproximada del conjunto de motores afectados por el CAR,  $P_{0T-\lambda\Delta} \approx 382$  kW. Es decir que la suma de la potencia nominal de los motores afectados es prácticamente del doble de la del motor medido. Luego, a partir del diagrama unifilar de la planta industrial y los MI conectados se verifica que el CAR está ubicado en un punto cercano al transformador de donde se alimentan otros MI.

### CONCLUSIONES

El análisis de las componentes de secuencia negativa de tensión y corriente, durante el arranque de los MI de potencia significativa respecto al sistema eléctrico industrial donde se encuentran instalados, permite detectar y aislar problemas de



(a) Variables medidas a bornes del MI.

(b) Variables medidas a bornes del secundario del transformador.

Fig. 8. Resultados experimentales del arranque del MI.

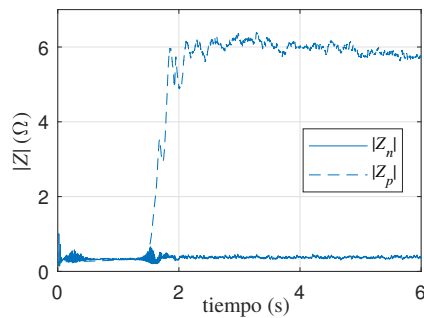


Fig. 9. Resultados experimentales del módulo de las impedancias de secuencia a bornes del MI durante su arranque.

contactos de alta resistencia (CAR). Mediante la propuesta presentada es posible aislar los CAR de los desequilibrios de tensión producidos por la red de alimentación. Al mismo tiempo, a partir de las mediciones a bornes del motor y en el ingreso a la planta, se estimó la potencia del conjunto de motores afectados por el CAR. Con esta información, más la distribución de cargas dentro de la planta, fue posible estimar la ubicación del CAR. Se utilizó un modelo de régimen permanente en redes de secuencia para estudiar la propuesta y se evaluó la misma mediante resultados de simulación empleando un modelo transitorio en variables “ $qd$ ”.

La presente propuesta se validó experimentalmente mediante resultados obtenidos en una industria frigorífica. Allí se diagnosticó un CAR en proximidades del transformador de

entrada a la planta que afectaba a varios motores del sistema eléctrico industrial analizado.

Se debe tener en cuenta que, para MI de baja potencia o accionados mediante arrancadores suaves o autotransformadores, la detección de CAR mediante la estrategia propuesta resulta menos sensible. Esto se debe a que las corrientes de arranque son relativamente bajas y no solicitan significativamente al sistema eléctrico industrial. Por otra parte, los MI de baja potencia pueden tener tiempos de arranque muy cortos lo que dificulta la medición de las corrientes. En los MI accionados por variadores de velocidad, existe un control a lazo cerrado de las corrientes, por lo que difícilmente estas exceden su valor nominal. Al mismo tiempo, la etapa de rectificación del variador produce un desacoplamiento de las fases del motor con las de la red que modifica el comportamiento frente a los desbalances de tensión o los CAR lo que requiere desarrollar nuevas estrategias de diagnóstico para estos variadores.

Si bien nuestra propuesta requiere de la medición de las tensiones y corrientes en al menos dos puntos de la planta industrial, en base a las nuevas tendencias vinculadas a Industria 4.0, en la que se utilizan sensores inteligentes distribuidos en la planta y tecnologías relacionadas al internet de las cosas (*internet of things*, IoT), sería posible realizar una implementación sin costos adicionales.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y

Técnicas (CONICET), por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

## REFERENCIAS

- [1] J. Yun, J. Cho, S. B. Lee, and J. Yoo, "Online detection of high-resistance connections in the incoming electrical circuit for induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 2, pp. 694–702, March 2009.
- [2] P. M. de la Barrera, G. R. Bossio, and J. A. Solsona, "High-resistance connection detection in induction motor drives using signal injection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3563–3573, July 2014.
- [3] V. Babrauskas, "How do electrical wiring faults lead to structure ignitions," in *Proc. Fire and Materials 2001 Conf*, 2001, pp. 39–51.
- [4] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and G. Baoming, "Beyond induction motors: Technology trends to move up efficiency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 2103–2114, 2014.
- [5] Z. Maljkovic, M. Cettolo, and M. Pavlica, "The impact of the induction motor on short-circuit current," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 11–17, July 2001.
- [6] "Accelerating the global adoption of energy - efficient electric motors and motor systems," UN Environment Program Global Environment Facility - United for Efficiency (U4E), Paris, FRANCE, Report U4E POLICY GUIDE SERIES, 2017.
- [7] P. Donolo, G. Bossio, C. D. Angelo, G. García, and M. Donolo, "Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations," *Elect. Pow. Syst. Res.*, vol. 140, pp. 866 – 873, 2016.
- [8] P. Donolo, C. Pezzani, G. Bossio, C. De Angelo, and M. Donolo, "Derating of induction motors due to power quality issues considering the motor efficiency class," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 1–1, 2020.
- [9] J. Yun, K. Lee, K. Lee, S. B. Lee, and J. Yoo, "Detection and classification of stator turn faults and high-resistance electrical connections for induction machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 2, pp. 666–675, March 2009.
- [10] R. S. Colby, "Detection of high-resistance motor connections using symmetrical component analysis and neural network models," in *4th IEEE Inter. Symp. on Diag. for Elect. Machines, Pow. Electr. and Drives, 2003. SDEMPED 2003.*, Aug 2003, pp. 2–6.
- [11] J. Bockstette, E. Stolz, and E. Wiedenbrug, "Upstream impedance diagnostic for three-phase induction motors," in *2007 IEEE Inter. Symp. on Diag. for Elect. Machines, Pow. Electr. and Drives*, Sep. 2007, pp. 411–414.
- [12] M. Mengoni, L. Zarri, Y. Gritli, A. Tani, F. Filippetti, and S. B. Lee, "Online detection of high-resistance connections with negative-sequence regulators in three-phase induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1579–1586, March 2015.
- [13] P. M. de la Barrera, G. R. Bossio, and R. Leidhold, "Online voltage sensorless high-resistance connection diagnosis in induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4374–4384, July 2015.
- [14] H. Wang, S. Lu, G. Qian, J. Ding, Y. Liu, and Q. Wang, "A two-step strategy for online fault detection of high-resistance connection in BLDC motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 3, pp. 3043–3053, 2020.
- [15] J. Hang, H. Wu, S. Ding, W. Hua, and Q. Wang, "A DC-flux-injection method for fault diagnosis of high-resistance connection in direct-torque-controlled PMSM drive system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 3, pp. 3029–3042, 2020.
- [16] J. Sun, C. Li, Z. Zheng, K. Wang, and Y. Li, "Online estimation of per-phase stator resistance based on DC-signal injection for condition monitoring in multiphase drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 3, pp. 2227–2239, 2022.
- [17] H. Chen, J. He, X. Guan, N. A. O. Demerdash, A. M. EL-Refai, and C. H. T. Lee, "High-resistance connection diagnosis in five-phase PMSMs based on the method of magnetic field pendulous oscillation and symmetrical components," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 3, pp. 2288–2299, 2022.
- [18] P. F. C. Gonçalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, "Online diagnostic method for the detection of high-resistance connections and open-phase faults in six-phase PMSM drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 58, no. 1, pp. 345–355, 2022.
- [19] "IEEE recommended practice for conducting motor-starting studies and analysis of industrial and commercial power systems," *IEEE Std 3002.7-2018*, pp. 1–107, April 2019.
- [20] N. Matanov, "Study of the impact of induction motors starting on the supply voltage," in *2019 16th Conf. on Elect. Machines, Drives and Pow. Syst. (ELMA)*, June 2019, pp. 1–5.
- [21] J. C. Gómez, C. Reineri, G. Campetelli, and M. M. Morcos, "A study of voltage sags generated by induction motor starting," *Elect. Pow. Compo. Sys.*, vol. 32, no. 6, pp. 645–653, 2004.
- [22] J. C. Gómez and M. M. Morcos, "Estimation of voltage sag effects on sensitive equipment due to induction motor starting cycles," *Elect. Pow. Compo. Sys.*, vol. 31, no. 7, pp. 709–716, 2003.
- [23] M. Fisher, R. Downey, S. Tomlinson, and J. Babcock, "Determining available fault current based on motor starting characteristics," in *2011 58th IEEE Petrol. and Chem. Ind. Conf. (PCIC)*, Sep. 2011, pp. 1–9.
- [24] J. Yoon, J. Yun, S. B. Lee, and E. J. Wiedenbrug, "Automated monitoring of high-resistance connections in the electrical distribution system of industrial facilities," in *2008 IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Meet.*, Oct 2008, pp. 1–8.
- [25] P. Donolo, G. Bossio, and C. D. Angelo, "Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slots," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 5, pp. 2024 – 2030, 2011.
- [26] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of electric machinery and drive systems*, 3rd ed. IEEE Press, 2013.
- [27] I. Carugati, C. M. Orallo, P. G. Donato, S. Maestri, J. L. Strack, and D. Carrica, "Three-phase harmonic and sequence components measurement method based on mSDFT and variable sampling period technique," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 8, pp. 1761–1772, Aug 2016.
- [28] S. Golestan, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Three-phase PLLs: A review of recent advances," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1894–1907, March 2017.
- [29] I. Carugati, S. Maestri, P. G. Donato, D. Carrica, and M. Benedetti, "Variable sampling period filter PLL for distorted three-phase systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 321–330, Jan 2012.



**Pablo M. de la Barrera** (S'99 - GS'08 - M'09 - SM'15) nació en Río Cuarto, Argentina, en 1978. Recibió el título de Ingeniero Electricista y de maestría en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 2003 y 2006, respectivamente, y el título de Doctor en sistemas de control por la Universidad Nacional del Sur, Argentina, en 2009. En 1998, se incorporó al Grupo de Electrónica Aplicada, de la Universidad Nacional de Río Cuarto. También es Investigador Adjudicado del CONICET. Dentro del IEEE, fue Secretario (de 2012 a 2016), Vicepresidente (en 2017) y Presidente (en 2018) del Capítulo Conjunto de la Sección Argentina (IE13/CS23/RA24/IA34/PEL35/VT06).



**José M. Bossio** (S'09 - M'13) recibió el título de Ing. Electricista y Magister en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 2006 y 2010, respectivamente, y el grado de Dr. en Control de Sistemas de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, en 2012. Desde 2001 se encuentra trabajando en el Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es auxiliar Docente en la Universidad Nacional de Río Cuarto e Investigador Asistente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Sus temas de interés académico están relacionados con el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, accionamientos de velocidad variable, y generación de energía a partir de fuentes renovables.



**Guillermo R. Bossio** (S'03 - M'07 - SM'15) recibió sus títulos de Ingeniero Electricista (1999) en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, y de Doctor en Ingeniería (2004) en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Desde 1994, se encuentra trabajando en el Grupo de Electrónica Aplicada, FI-UNRC. Actualmente es Profesor Asociado en la FI-UNRC e Investigador Independiente del CONICET, Argentina. Sus temas de interés en investigación incluyen diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, accionamientos eléctricos, vehículos eléctricos y energías renovables.