

Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción

C. J. Verucchi y G. G. Acosta, *Senior Member IEEE*

Resumen— En los últimos años se han propuesto e implementado muy variadas alternativas para la detección y diagnóstico de fallos en máquinas de inducción. Estas nuevas alternativas son atractivas debido a que se caracterizan por su carácter no invasivo y a su capacidad para detectar fallos mientras una máquina funciona en condiciones normales y a que no necesitan sensores que deban montarse sobre motor. Estas características distinguen a estas nuevas técnicas de las tradicionales, que en su mayoría requieren que la máquina analizada se encuentre fuera de servicio para poder efectuar el diagnóstico. El propósito de este artículo consiste en revisar las principales alternativas en el campo del diagnóstico de fallos en máquinas de inducción y en efectuar una comparación de las prestaciones de cada una de ellas en función de la información que requieren para el diagnóstico, el número e importancia de los fallos que pueden detectar, la rapidez con la que son capaces de anticipar un fallo y el grado de certeza en el diagnóstico final.

Palabras clave: Motores de inducción. Detección y diagnóstico de fallos.

I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas de inducción con jaula de ardilla son las más empleadas en la industria moderna en virtud de su bajo costo, robustez y economía de mantenimiento. Este tipo de máquinas es susceptible a distintos fallos de carácter eléctrico y mecánico [1-3]. Entre las más importantes pueden distinguirse los fallos en rodamientos o en el eje del rotor, en los devanados de estator y en las barras o anillos de cortocircuito del rotor. Las primeras de ellas pueden derivar en muchos casos en excentricidades del rotor y tienen la particularidad que su evolución es relativamente lenta, lo que permite, mediante una detección anticipada, evitar daños irreversibles tanto en las máquinas en sí como en el proceso de producción del que forman parte. En cuanto a los fallos en devanados de estator, es necesario hacer una distinción entre contactos entre conductores y la carcasa del motor, fallos entre espiras de una misma bobina, entre bobinas de una misma fase o bien entre bobinas de diferentes fases. Estos fallos generalmente presentan una evolución rápida y por consiguiente su detección suele ser más dificultosa. Por último, los fallos en las barras o anillos de cortocircuito del rotor generalmente consisten en fracturas o fisuras que pueden propagarse a barras vecinas o dañar los devanados

de estator cuando se producen deformaciones o el fallo afecta a las láminas de material ferromagnético que conforman el núcleo. Estos fallos son de evolución lenta y pueden ser detectadas tempranamente.

En líneas generales, puede afirmarse que aproximadamente un 40 % de los fallos en este tipo de máquinas corresponde a anomalías en los rodamientos, entre un 30 y un 40 % a fallos en el estator y un 10 % aproximadamente corresponden a fallos en el rotor (el resto de los casos se distribuyen en una gran variedad de fallos) [4]. Estos datos fueron tomados a partir del análisis de máquinas de una gran variedad de potencias; puede afirmarse, asimismo, que en máquinas de potencia elevada los fallos en el rotor son las que se repiten con más frecuencia y por consiguiente se tornan las más importantes.

II. TÉCNICAS TRADICIONALES DE DETECCIÓN DE FALLOS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

Tradicionalmente se han empleado técnicas tales como la medición de la tangente del ángulo delta, la medición del índice de polarización o la medición de la resistencia de aislamiento por medio del mega-ohmetro para determinar las propiedades dieléctricas de los aislantes de los devanados de máquinas eléctricas [5].

Recientemente se ha hecho común el empleo de la prueba de impulsos [6]. Tal prueba consiste en la aplicación de pulsos de alta tensión a los devanados de una máquina y el análisis de su respuesta transitoria. De este modo un fallo en un devanado del estator puede ser descubierto cuando se observan diferencias entre las respuestas de cada bobina o fase de la máquina.

Todas estas técnicas son sumamente efectivas y capaces de determinar el estado de un aislante y de estimar su vida útil restante. Sin embargo, presentan como contrapartida, la necesidad de realizar el diagnóstico con la máquina fuera de servicio por lo que su aplicación se ve limitada.

Los fallos en rodamientos, por otra parte, se detectan generalmente por medio del estudio de vibraciones. En efecto, mediante el empleo de un acelerómetro es posible monitorizar la intensidad y frecuencia de las vibraciones del motor y a partir de ellas determinar posibles anomalías [7].

III. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FALLOS ON-LINE

A. Obtención del espectro de frecuencias de la corriente del estator

La corriente de estator en las máquinas de inducción contiene generalmente armónicos que se deben a que la disposición de los devanados en las ranuras no es perfectamente sinusoidal sino escalonada, a las imperfecciones o irregularidades originadas en la fabricación del motor y a las posibles componentes armónicas presentes en la fuente de alimentación. Ante un cortocircuito en alguna de las bobinas del estator, ya sea entre bobinas o espiras de la misma fase o entre bobinas de fases diferentes, la configuración de la fuerza magnetomotriz giratoria se ve afectada y como consecuencia, las componentes armónicas de las corrientes de estator también ven afectadas sus amplitudes. Teniendo en cuenta esto último, y realizando un seguimiento periódico del espectro de frecuencias de las corrientes de estator es posible detectar pequeños cortocircuitos y evitar consecuencias drásticas. Las frecuencias que se ven afectadas por este tipo de fallo están dadas por [8]:

$$f_1 \cdot \left[k \pm n \cdot \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (1)$$

con $k = 1, 3$ y $n = 1, 2, 3, \dots (2p-1)$ y donde f_1 es la frecuencia de la fuente de alimentación, s , el deslizamiento del motor y p el número de pares de polos.

Es importante destacar que, tal como se observa en (1), las componentes afectadas son función del deslizamiento y por ende la frecuencia a la que se manifiestan dependen del estado de carga del motor. Asimismo, la variación de la amplitud en las componentes armónicas que se ven afectadas por un fallo es variable con la carga del motor, por lo cual, es conveniente realizar las comparaciones para estados de cargas similares.

La incidencia de un fallo sobre cada componente armónica es variable de un motor a otro y depende fundamentalmente de las características del devanado. En algunos casos, inclusive, algunas componentes pueden reducir su valor ante un fallo.

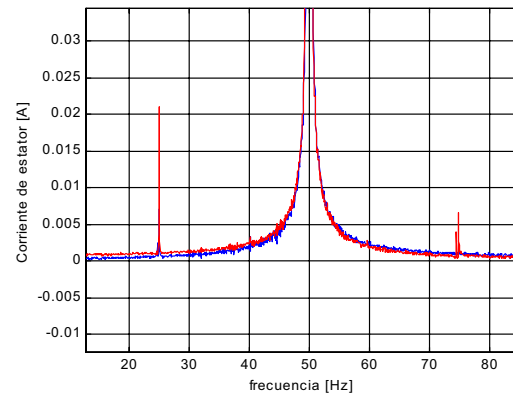


Figura 1: Comparación del espectro de frecuencia de la corriente de estator de un motor en estado normal (azul) y con un cortocircuito en una bobina (rojo).

A manera de ejemplo se presenta en la figura 1 una comparación entre el espectro de frecuencias de la corriente de estator de un motor de 3 HP, 380 V y 50 Hz y cuatro polos en condiciones normales, con el mismo motor con una de sus bobinas en cortocircuito (la corriente en el lazo en cortocircuito fue limitada a un valor igual al de la corriente nominal del motor). De acuerdo a (1), con el motor en vacío las componentes más importantes a las que se manifiesta el fallo se encuentran a 25 y 75 Hz aproximadamente, tal como se comprueba en la figura.

En lo que se refiere a fallos en el rotor, la fractura de una de sus barras o de uno de sus anillos de cortocircuito, convierte al rotor en un circuito trifásico desequilibrado [9]. Tal desequilibrio se manifiesta por medio de la circulación de corrientes de secuencia inversa. Como consecuencia de ello, se establece un campo magnético que gira en sentido contrario al sentido de rotación del rotor, con una velocidad:

$$\omega_{CGI} = -s \cdot \omega \quad (2)$$

donde ω_{CGI} indica la velocidad del campo giratorio inverso con respecto al rotor y s el deslizamiento en tanto por unidad. La velocidad del campo giratorio inverso con respecto al estator resulta:

$$\omega_{CGI}^s = -s \cdot \omega + (1-s) \cdot \omega = \omega - \omega_0 \quad (3)$$

donde:

$$\omega_0 = 2 \cdot s \cdot \omega \quad (4)$$

Este campo giratorio provoca un nuevo par sobre el rotor, a frecuencia:

$$f_0 = 2 \cdot s \cdot f \quad (5)$$

siendo f la frecuencia de la red. Este par, a su vez, ocasiona una oscilación en la velocidad del rotor, cuya amplitud depende de la inercia acoplada. Tales

oscilaciones afectan a las corrientes de estator, sobre las cuales se inducen las denominadas bandas laterales dadas a las frecuencias:

$$f_s = (1 \pm 2 \cdot s) \cdot f \quad (6)$$

Estas bandas laterales permiten identificar claramente fallos en el rotor, las frecuencias a las que se manifiestan son función del deslizamiento del motor y su amplitud es fuertemente dependiente del estado de carga. Un diagnóstico correcto exige como mínimo que el motor se encuentre por encima de la mitad de su carga nominal. Algunas cargas que presentan pares pulsantes (tales como los compresores) pueden provocar bandas laterales similares a las producidas por un fallo e interferir en el diagnóstico [10].

Las excentricidades en el rotor, por otra parte, provocan armónicos a frecuencias dadas por [11]:

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (7)$$

con $m = 1, 2, 3, \dots$ y donde f_{exc} es la frecuencia de los armónicos afectados por el fallo, s es el deslizamiento, p el número de pares de polos y f_l la frecuencia de la red de alimentación.

Finalmente, algunos trabajos demuestran la capacidad de esta técnica para la detección de fallos producidas en los rodamientos [12]. Un fallo en algún elemento rodante del rodamiento provoca vibraciones a la frecuencia dada por:

$$f_b = \left(\frac{p_d}{b_d} \right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (8)$$

Donde n es el número de elementos rodantes, f_{rm} la velocidad de rotación en vueltas por segundo, p_d es el diámetro medio del rodamiento, b_d el diámetro de cada bola y β el ángulo de contacto de las bolas con las pistas del rodamiento. Estas vibraciones en el rotor de la máquina se traducen en componentes armónicas en las corrientes del estator y, de este modo, el fallo puede ser identificado.

Del mismo modo, fisuras en la pista exterior derivan en vibraciones a la frecuencia siguiente:

$$f_o = \left(\frac{n}{2} \right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (9)$$

Y se manifiestan en la corriente del estator a través de componentes a frecuencias:

$$|f_e \pm k \cdot f_o| \quad (10)$$

Las fisuras o defectos en la pista interior de un rodamiento producen vibraciones a la frecuencia dada por:

$$f_i = \left(\frac{n}{2} \right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 + \frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (11)$$

y se traducen en componentes en las corrientes de estator a frecuencias dadas por:

$$|f_e \pm k \cdot f_i| \quad (12)$$

Es importante destacar que para este tipo de fallos, el empleo del espectro de armónicos de la corriente de estator se ha implementado en pruebas de laboratorio y con fallos provocadas intencionalmente. A diferencia de los demás fallos, en este caso aún no se ha reportado un número suficiente de aplicaciones reales que permitan ponderar la capacidad de diagnóstico de esta técnica en un entorno industrial.

B. Vector complejo de Park

La conocida transformación de Park permite referir las variables de una máquina trifásica a un sistema de dos ejes en cuadratura. El seguimiento continuo del fasor espacial que surge de la aplicación de dicha transformación se puede emplear con fines de diagnóstico [13]. Las componentes de la corriente del estator en los ejes directo y en cuadratura (D y Q), fijos al estator se obtienen por medio de las siguientes relaciones:

$$i_D = \sqrt{\frac{2}{3}} i_A - \sqrt{\frac{1}{6}} i_B - \sqrt{\frac{1}{6}} i_C \quad (13)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{1}{2}} i_B - \sqrt{\frac{1}{2}} i_C \quad (14)$$

Donde i_A , i_B e i_C son las corrientes de las fases A, B y C del estator. En condiciones ideales, cuando un motor sin fallos se alimenta a través de un sistema trifásico de corrientes sinusoidales, equilibrado y de secuencia positiva, las componentes del vector de Park determinan una circunferencia centrada en el origen del plano D-Q con radio aproximadamente constante, tal como se observa en la figura 2.

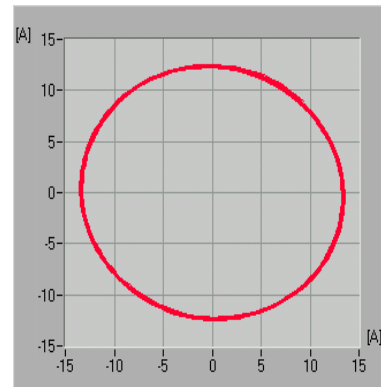


Fig. 2. Lugar geométrico del vector de Park en condiciones normales de funcionamiento.

En caso de un cortocircuito en devanados del estator, el motor se comporta como una carga desequilibrada y las corrientes del estator dejan de constituir un sistema balanceado. Tales desequilibrios provocan una oscilación en el radio del vector de Park y derivan en formas elípticas. La figura 3 muestra el resultado obtenido sobre un motor con dos bobinas de la fase α (sobre un total de 16), en cortocircuito. La inclinación del eje mayor de la elipse indica la fase sobre la cual se produjo el fallo [14].

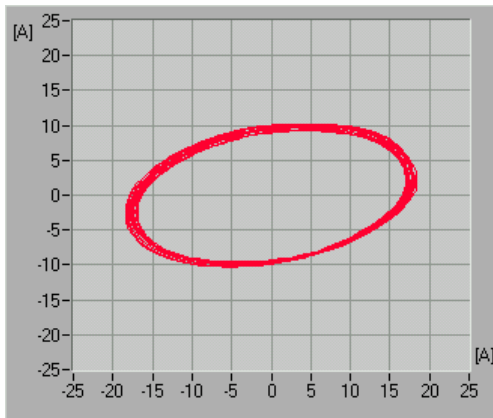


Fig. 3. Lugar geométrico del vector de Park en un motor con bobinas en cortocircuito.

La aplicación práctica de esta herramienta de diagnóstico fue realizada utilizando transformadores de corriente con sus secundarios cortocircuitados por medio de resistencias muy pequeñas. Las caídas de tensión sobre dichas resistencias fueron amplificadas y registradas por medio de un equipo de adquisición de datos de alta velocidad de muestreo. Los datos obtenidos fueron filtrados, digitalizados y transferidos a una computadora personal a través de su puerto paralelo. En la computadora se ejecutó un programa desarrollado en LabView que toma, a intervalos de un segundo, las señales de corriente durante un tiempo de aproximadamente 50 ciclos de la red de alimentación. El programa, posteriormente, obtiene el espectro de frecuencias de las corrientes y por medio de las ecuaciones (13-14) calcula las componentes del vector de Park y lo presenta en las gráficas que se observan en las figuras.

Otra forma de visualizar un fallo consiste en observar el valor que toma el radio del vector a lo largo del tiempo [15]. Dado que dicho radio oscila entre su valor máximo y mínimo dos veces por cada ciclo de la red de alimentación, su análisis en series de Fourier, arroja una componente a una frecuencia igual a dos veces la frecuencia de la red de alimentación. La amplitud de esta componente indica la gravedad del fallo. En la figura 4 se presenta, a manera de ejemplo, el caso de una máquina con una de sus bobinas del estator en cortocircuito.

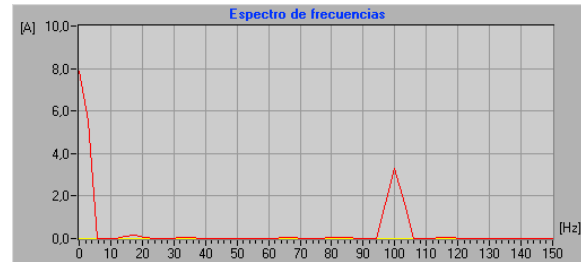


Fig. 4. Análisis armónico del módulo del vector de Park.

En cuanto a la detección de excentricidades en el rotor, algunos autores proponen el empleo del método del vector de Park [15]. En tal caso, se obtiene una doble circunferencia con sus centros desplazados, tal como se observa en la figura 5. Esto se debe a que el lugar geométrico del vector describe una circunferencia completa por cada ciclo de red.

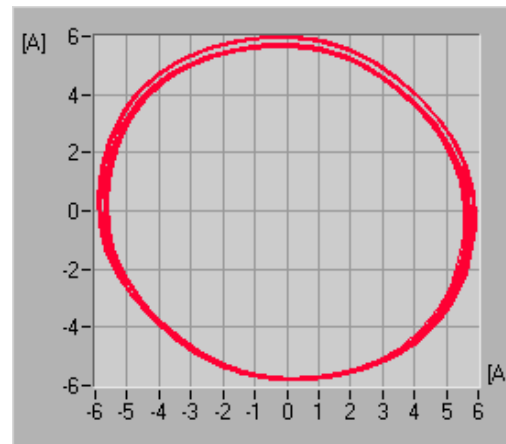


Fig. 5. Lugar geométrico del Vector corrientes de Park para excentricidades en el rotor.

En máquinas de más de un par de polos, se superponen circunferencias que corresponden a distinta posición angular del rotor. En una máquina de cuatro polos, por ejemplo, el vector describirá una circunferencia por cada medio giro del rotor. Si el entrehierro de la máquina no es uniforme debido a excentricidades, dos circunferencias consecutivas no coincidirán exactamente y la diferencia entre ambas indicará un estado de fallo. Una manera de ponderar la gravedad del fallo consiste en calcular las superficies encerradas por cada circunferencia y extraer la diferencia entre ambas.

Finalmente, los fallos en barras o anillos de cortocircuito del rotor se manifiestan por medio de una superposición de circunferencias concéntricas con radio oscilante tal como se muestra en la figura 6. En este caso se trata de un motor con 3 barras cortadas, sobre un total de 58. La muestra fue tomada con el motor funcionando a media carga. La frecuencia con la que el vector de corrientes del estator oscila entre sus radios máximos y

mínimos es igual a $2sf$ y se la puede observar en el espectro de frecuencias del radio del vector.

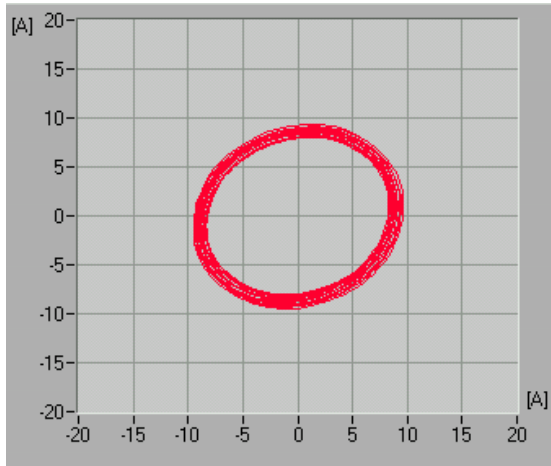


Fig. 6: Dos barras cortadas y 1/2 de la carga nominal.

C. Flujo axial

En cualquier máquina de inducción, aún en condiciones de funcionamiento habituales, existen pequeños desequilibrios en las corrientes. Estos desequilibrios surgen tanto de las imperfecciones de fabricación y como de la propia red de alimentación. Esto deriva en la presencia de corrientes de secuencia negativa en el motor y, además, el desequilibrio en las corrientes en las cabezas de las bobinas originan un flujo en el sentido axial del motor. Este flujo, dado que es el producto de las corrientes del estator, contiene los mismos armónicos y en consecuencia, permite identificar fallos. Una bobina colocada sobre el extremo de un motor en forma concéntrica a su eje, permite medir el flujo axial y a partir de él diagnosticar fallos [17,18]. De este modo, mediante el análisis del espectro de frecuencias del flujo axial del motor pueden detectarse cortocircuitos en devanados de estator, excentricidades y barras cortadas en el rotor.

D. Par y potencia

El análisis armónico de la potencia total consumida por el motor, de algunas de las potencias parciales o bien del par eléctrico, permite la detección de algunas de los fallos que se producen con mayor frecuencia en las máquinas de inducción [19,20].

Las potencias parciales presentan, ante un fallo en el rotor, componentes a la frecuencia $2sf$ y bandas laterales alrededor del doble de la frecuencia de red. Tales componentes, ausentes en condiciones normales, permiten detectar y ponderar la gravedad de un fallo. La potencia total, por su parte, se verá afectada por medio de una componente a la frecuencia $2sf$.

El par eléctrico proporcionado por el motor puede estimarse a partir de los enlaces de flujo y corrientes de estator [21]:

$$T_{est}(t) = \frac{p}{3} \cdot [\lambda_{ds}(t) \cdot i_{qs}(t) - \lambda_{qs}(t) \cdot i_{ds}(t)] \quad (15)$$

donde T_{est} es el par eléctrico estimado, p el número de polos y λ_{ds} , λ_{qs} , i_{ds} e i_{qs} los enlaces de flujo y corrientes en ejes d - q respectivamente. Los enlaces de flujo, por su parte, pueden obtenerse a partir de los voltajes y corrientes de estator:

$$\lambda_s(t) = \int_0^t [\mathbf{v}_s(t) - R_s \cdot \mathbf{i}_s] \cdot dt + \lambda_s(0) \quad (16)$$

donde R_s es la resistencia de estator y los voltajes y corrientes se indican en forma de vectores espaciales:

$$\mathbf{v}_s(t) = v_{ds}(t) + j v_{qs}(t) \quad (17)$$

$$\mathbf{i}_s(t) = i_{ds}(t) + j i_{qs}(t) \quad (18)$$

Asumiendo que la velocidad del motor es prácticamente constante, puede asegurarse que el par eléctrico del motor presenta las mismas componentes que la potencia y, por ende, puede emplearse para detectar fallos.

Cortocircuitos en el estator, por su parte, pueden detectarse tanto en la potencia como en el par a partir de componentes al doble de la frecuencia de la red [22].

E. Impedancia de secuencia inversa

De acuerdo con la teoría de las componentes simétricas [23], todo sistema trifásico desequilibrado puede descomponerse en dos sistemas trifásicos equilibrados de distinta secuencia mas un conjunto de fasores con igual fase. Los primeros constituyen los denominados sistemas de secuencia directa e inversa y los últimos el sistema de secuencia cero u homopolar. De este modo, a partir de los valores complejos de los voltajes y corrientes de un sistema trifásico pueden hallarse las componentes de los sistemas de secuencia a partir de las relaciones indicadas por las ecuaciones (19) y (20).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

Los subíndices a , b y c , hacen referencia a cada una de las componentes de fase del sistema real, mientras que 0 , 1 y 2 , indican las componentes de los sistemas de secuencia cero, directa e inversa respectivamente. La constante \mathbf{a} está dada por:

$$\mathbf{a} = e^{j.2.\pi/3} \quad (21)$$

Las relaciones entre las corrientes y los voltajes de secuencia quedan determinadas por las impedancias de secuencia directa, inversa y cero de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Tomando por separado cada uno de estos sistemas pueden definirse las impedancias de secuencia directa, inversa y cero. En el caso de los motores de inducción, teniendo en cuenta que generalmente se conectan en triángulo, o bien, en estrella con su centro desconectado, la componente de secuencia cero se anula y, por consiguiente puede ignorarse. De esta manera, el motor asíncrono quedará identificado por las impedancias de secuencia directa e inversa. Estas impedancias están dadas por:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad (23)$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (24)$$

Es importante destacar que la ecuación (22) es válida únicamente para máquinas perfectamente simétricas. Para una máquina con asimetrías se establece un acoplamiento entre las componentes de secuencia directa e inversa que introduce nuevos términos en dicha ecuación. Para pequeños desequilibrios, sin embargo, el acoplamiento resulta despreciable frente a las componentes propias y por consiguiente puede emplearse la simplificación dada por (22).

Mientras la impedancia de secuencia directa resulta muy dependiente del estado de carga del motor, la de secuencia inversa es prácticamente independiente y además es muy susceptible a cortocircuitos en devanados de estator, por ende resulta la más adecuada para fines de diagnóstico [24].

En la figura 7 se presenta un ejemplo de aplicación [25], en el cual se observan mediciones consecutivas de la impedancia de secuencia inversa del motor, inicialmente en condiciones normales y luego con un fallo de carácter leve en una de las bobinas de estator. La precisión con la que puede medirse su valor depende del nivel de desequilibrio de la red de alimentación. Las impedancias se obtuvieron tomando registros periódicos de las tensiones aplicadas al motor y de las corrientes de estator mediante un equipo de adquisición de datos. Estos datos se transfirieron a una PC y una interfase en LabView filtra las señales, calcula las componentes de secuencia directa e inversa y luego las impedancias dadas por (23-24).

Una solución más precisa, planteada en [26,27], sugiere tomar en cuenta los términos mutuos de (20). Dado que tales valores son dependientes del deslizamiento del motor, la técnica necesita contar con una librería de valores para diferentes deslizamientos. En base a dichos datos puede calcularse el valor de la corriente de secuencia inversa y compararlo con el valor medido. Una diferencia apreciable entre ambos indica un fallo en el devanado de estator.

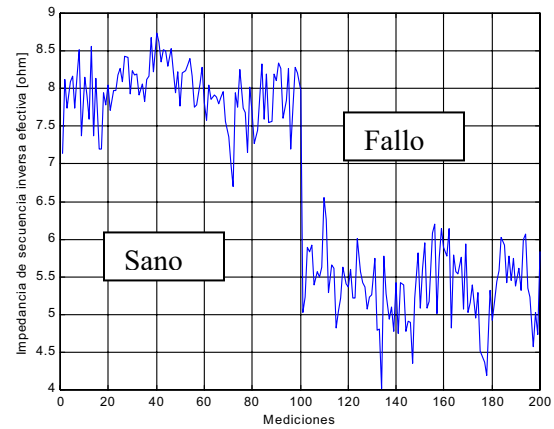


Fig. 7: Valores de impedancia calculados en condiciones normal y de fallo con 0.4 % de desequilibrio en la red de alimentación.

F. Redes neuronales

El empleo de redes neuronales para la detección de fallos en máquinas de inducción también ha sido estudiado [28]. Una red neuronal se entrena de manera tal que pueda predecir el valor de la corriente de secuencia negativa del motor a partir de la corriente de secuencia positiva y de las tensiones de ambas secuencias. Luego, el valor de la corriente de secuencia negativa estimado se compara con el medido y en base a dicha comparación se determina el estado de fallo.

G. Sistemas expertos

En base a las diferentes técnicas de detección y diagnóstico propuestas, se han desarrollado sistemas expertos que, a partir del análisis de las variables adquiridas del motor, extraen conclusiones basadas en reglas que son desarrolladas a partir de conocimientos empíricos [29-31].

IV. DISCUSIÓN

El funcionamiento de las máquinas eléctricas siempre ha sido objeto de estudios y supervisiones continuas. Tradicionalmente se han empleado técnicas que, con el correr de los años, se han vuelto sumamente confiables. Sin embargo, la mayoría de ellas exige que las máquinas se hallen fuera de servicio para poder realizar el diagnóstico o bien deben aplicarse por medio de la

colocación de sensores sobre el motor (análisis de vibraciones). Actualmente se ha vislumbrado la posibilidad de efectuar diagnósticos on-line, es decir mientras las máquinas se encuentran en servicio normal y con técnicas no invasivas, esto es, sin la colocación de sensores directamente sobre el motor. Las ventajas de estas nuevas alternativas radican, por un lado, en que la supervisión continua del motor presenta mayores posibilidades de detectar a tiempo fallos de rápida evolución. Por otra parte, es posible comprobar que el número de aplicaciones en las que se utilizan motores de inducción accionados por variadores de frecuencia se está incrementando notoriamente siendo las técnicas de diagnóstico on-line las que por sus características son las más adecuadas para incorporarlas a dichos equipos y mejorar así sus prestaciones. Actualmente, salvo en algunos casos particulares, las nuevas técnicas no ofrecen el grado de certeza que ofrecen las técnicas tradicionales. Por consiguiente, dichas técnicas tradicionales aún siguen empleándose. Sin embargo, la rápida evolución de las nuevas técnicas y el gran interés en ellas por parte de investigadores de todo el mundo y de responsables de mantenimiento de grandes industrias permiten augurarles un futuro promisorio.

Si bien aún no es posible establecer comparaciones entre los beneficios económicos de aplicar técnicas tradicionales o nuevas, es importante destacar que estas últimas involucran equipos de bajo coste y su implementación es posible sin grandes inversiones prácticamente en todos los casos.

Tal como se ha visto, existen muy diversas herramientas para detectar y diagnosticar fallos en máquinas de inducción en forma on-line. La aplicación de cada técnica en particular queda sujeta a la información que pueda adquirirse desde el motor (corrientes, tensiones, enlaces de flujo, etc.). Cada técnica presentada ofrece ventajas y desventajas en función del fallo a detectar, de la información requerida para el diagnóstico y del tipo de carga aplicada al motor.

La técnica basada en el estudio del espectro de frecuencias de las corrientes de estator presenta la ventaja de su fácil implementación en la mayoría de los casos ya que con sólo una pinza amperimétrica es posible medir la corriente de una fase cualquiera del motor y disponer de la información necesaria para el diagnóstico. Esta técnica resulta muy efectiva para la detección de barras cortadas en el rotor. En efecto, las bandas laterales que se presentan para tal fallo alrededor de la frecuencia de red, permiten identificar fácilmente una situación anormal. Es importante destacar que el diagnóstico debe realizarse con el motor funcionando al menos con la mitad de su carga nominal y resulta más efectivo cuanto mayor es la carga del motor. Un cortocircuito en el estator de una máquina de inducción puede ser detectado, asimismo, mediante la aplicación de esta técnica. En este caso, sin embargo, las

frecuencias a las cuales se manifiestan los fallos varían de un motor a otro y por ende la identificación de un fallo resulta más dificultosa. Dado que los fallos de esta naturaleza presentan por lo general una rápida evolución, la frecuencia con la que se efectúa el diagnóstico debe ser mayor a la empleada para la detección de barras defectuosas (fallo que presenta una evolución mucho más lenta). La detección de excentricidades en el eje del rotor también puede efectuarse por medio del análisis del espectro de frecuencias de la corriente de estator, las frecuencias a las que se presenta este fallo son dependientes del número de polos del motor y del deslizamiento, por consiguiente su empleo no resulta fácil de implementar y mucho menos de sistematizar.

Finalmente, en lo que respecta a la detección de anomalías en las pistas o bolas de los rodamientos, si bien se ha comenzado a estudiar la aplicación de esta técnica y se han alcanzado algunos resultados alentadores, su aplicación práctica aún no es frecuente.

Las frecuencias a las que se manifiestan los fallos son mucho mayores que en otros casos y requieren de equipos de adquisición de datos más rápidos y por ende más costosos. Para identificar dichas frecuencias, además, es preciso conocer las características constructivas de los rodamientos, el número de elementos rodantes, los ángulos de apoyo sobre las pistas, etc. Debe tenerse en cuenta que para este tipo de fallo, la técnica basada en el análisis de vibraciones del motor ha sido ampliamente empleada durante décadas con resultados sumamente fiables.

La técnica basada en el seguimiento del Vector de Park por su parte, requiere del sensado simultáneo de las tres corrientes de estator. En el caso de fallos en barras del rotor, el módulo del Vector de Park presenta una componente a frecuencia muy baja ($2sf$), esto hace que dicha componente sea más fácil de identificar. Del mismo modo que en el caso del estudio del espectro de frecuencias de la corriente de estator, el diagnóstico se ve fuertemente condicionado por el estado de carga del motor, siendo más efectivo en la medida que el motor presenta una carga más próxima a su valor nominal. Para la detección de cortocircuitos en el estator, esta técnica presenta la ventaja de manifestarse en todos los casos a dos veces la frecuencia de red, con lo cual el diagnóstico se ve simplificado. Los desequilibrios en la red de alimentación, por otra parte, afectan al diagnóstico y si son muy importantes pueden ser interpretados como un fallo. Excentricidades en el eje del rotor pueden identificarse con esta técnica sólo en el caso de máquinas de más de dos polos.

El análisis espectral del flujo axial del motor puede aplicarse con éxito en algunos casos. En efecto, si bien el método no es del todo no-invasivo ya que requiere la colocación de un sensor sobre la parte posterior del motor y presenta ventajas comparativas en relación al estudio de

las corrientes de estator para la detección de barras cortadas en el rotor y cortocircuitos entre espiras. En motores de media tensión resulta más complejo el sensado de las corrientes de estator y en tales casos puede resultar más sencillo el empleo de una bobina de flujo axial. Esta técnica ha sido probada con éxito inclusive en motores alimentados por variadores de frecuencia [32].

El seguimiento del par o la potencia del motor, por su parte, presenta algunas ventajas en relación a las técnicas anteriores. Por un lado estas variables permiten una identificación más fácil de las componentes armónicas en las que se manifiesta un fallo y por otro lado son capaces de detectar fallos en el sistema de transmisión mecánica del motor y aún en la carga misma [33]. Estas técnicas presentan por otra parte, mayor complejidad para su implementación debido a que requieren tanto la medida de las corrientes de estator como de los voltajes aplicados en bornes del motor.

La medición de la impedancia de secuencia inversa por otro lado, resulta efectiva para la detección de cortocircuitos entre espiras en los devanados del estator. Para su implementación es necesario medir las corrientes y los voltajes aplicados al motor y es imprescindible que la red de alimentación presente cierto desequilibrio mínimo para que la impedancia de secuencia inversa pueda medirse con exactitud. Cuando se miden las impedancias directa e inversa y las impedancias mutuas, es posible establecer indicadores de fallos muy precisos y confiables. La implementación de tal técnica, sin embargo, resulta difícil dado que requiere de una librería de valores que deben estimarse para diferentes estados de carga del motor.

La aplicación de redes neuronales a la detección y diagnóstico de fallos en máquinas de inducción presenta un futuro alentador. Se han logrado buenos resultados principalmente en la detección de cortocircuitos en devanados de estator, sin embargo, la aplicación de la técnica requiere de una etapa de entrenamiento y de un monitoreo constante de las variables eléctricas del motor.

V. CONCLUSIONES

Las principales técnicas de detección de fallos en máquinas de inducción han sido presentadas resumidamente tomando como referencia trabajos de diferentes autores. La comparación de estas técnicas permite afirmar que la solución más adecuada para cada caso está dada por la importancia de la máquina a supervisar (el sensado de mayor o menor número de variables y la implementación de sistemas expertos queda sujeto a cuestiones de índole económica), por la cantidad y carácter de los fallos a detectar y por el servicio al que se ve sometido un motor (posibilidad de realizar periódicamente diagnósticos off-line, posibilidad de acceso de operarios al lugar donde está instalado el motor, etc.).

La frecuencia con la que debe efectuarse cada diagnóstico, por su parte, depende básicamente de los fallos que se pretenden detectar. En efecto, fallos tales como fisuras en barras del rotor presentan generalmente una evolución muy lenta mientras que otras como cortocircuitos en el estator pueden evolucionar muy rápidamente.

Es importante destacar que muchas de las técnicas descritas requieren que el motor funcione durante el diagnóstico con un nivel de carga determinado. Por otra parte, en muchos casos es aconsejable realizar mediciones periódicas y comparar los resultados. En efecto, el análisis del espectro de frecuencias del estator, por ejemplo, resulta efectivo si se comparan los niveles armónicos con los obtenidos con el motor funcionando libre de fallos.

Por último se destaca que los métodos no invasivos de detección de fallos han evolucionado con rapidez durante los últimos años y la tendencia indica que su aplicación práctica continuará incrementándose. En la actualidad, un importante número de investigadores se hallan abocados al desarrollo de nuevas alternativas en este campo y en muchas industrias han comenzado a implementar rutinas de diagnóstico basadas en algunas de las técnicas enumeradas.

VI. REFERENCIAS

- [1] A. H. Bonnett, and G.C. Soukup, "Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24-6, pp. 1124-1130, Nov.-Dec. 1988.
- [2] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28-4, pp. 921-937, July-Aug. 1992.
- [3] M. El Hachemi Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, vol. 47-5, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [4] Motor Reliability Working Group, "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations Part I, and II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 21-4, pp. 853-872, July-Aug. 1985.
- [5] E. Wiedenbrug, "On-line and off-line state of the art preventive maintenance of electrical motors," in *Proc. 2001 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, pp. 627-634.
- [6] E. Wiedenbrug E, G. Frey and J. Wilson, "Impulse testing as a predictive maintenance tool," in *Proc. 2003 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp. 13-19.
- [7] P. J. McCully and C. F. Landy, "Evaluation of current and vibration signals for squirrel cage induction motor condition monitoring," in *Proc. 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives*, pp. 331-335.
- [8] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, pp. 26-34, July-Aug 2001.
- [9] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, And P. Vas, "AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect," *IEEE Trans. On Ind. Applications*, vol. 34, pp. 98-108, Jan.-Feb 1998.
- [10] R. Schoen and T. Habetler, "Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines," *IEEE Transactions*

- on *Industry Applications*, vol. 31-44, pp. 900-906, July/August 1995.
- [11] W. T. Thomson, D. Rankin, D. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors-industrial case histories verify the predictions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14-4, pp. 1372-1378, Dec. 1999.
 - [12] R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Currents Monitoring," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 31-6, pp. 1274-1279, Nov.-Dec. 1995.
 - [13] D. Milanez and A. Emanuel, "The instantaneous-space-phasor a powerful diagnosis tool," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 52-1, pp. 143-148, Feb. 2003.
 - [14] G. Acosta, C. Verucchi, M. Peñalva, E. Gelso y E. Villamayor, "Sistema de Monitoreo y Diagnóstico de Fallos para Motores de Inducción," in *Proc. 2002 Latin-American Conference on Automatic Control CLCA*.
 - [15] S. Cruz, and A. J. M. Cardoso, "Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37-5, pp. 1227-1233, Sept.-Oct 2001.
 - [16] A. Cardoso and E. Sousa Saraiva, "Computer Aided Detection of Airgap Eccentricity in Operating Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29-5, pp. 897-901, Sept.-Oct 1994.
 - [17] J. Penman, H.G. Sedding, B.A. Lloyd and W.T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 9-4, pp. 652-658, Dec. 1994.
 - [18] C. Verucchi "Detección de fallos en máquinas de inducción mediante análisis del flujo axial," in *Proc. 2005 XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*.
 - [19] Trzynadlowski, A. M. and E. R. Ritchie, "Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors: A Case of Rotor Cage Faults," *IEEE Industrial Electronics*, vol. 47-5, pp. 1092-1099, Oct. 2000.
 - [20] C. Verucchi, F. Bengier y G. Acosta, "Detección de fallos en rotores de máquinas de inducción: Evaluación de distintas propuestas," in *Proc. 2003 X RPIC - Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, San Nicolás, Argentina.
 - [21] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Clarendon Press, Oxford, 1990.
 - [22] J. Hsu, "Monitoring of Defect in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation," *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 31-5, pp. 1016 - 1021, Sept.-Oct 1995.
 - [23] S. A. Nasar, *Sistemas Eléctricos de Potencia*, Ed. McGraw-Hill, 1991.
 - [24] J. Sottile and J. Kohler, "An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 8-4, pp. 762-768, Dic. 1993.
 - [25] C. Verucchi, G. Acosta, E. Gelso, "Detección en línea de fallos de aislamiento en devanados de máquinas de inducción," in *Proc. 2004 AAECA - XIXº Congreso Argentino de Control Automático*.
 - [26] J. L. Kohler, J. Sottile, F. C. Trutt, "Condition monitoring of stator windings in induction motors. I. Experimental investigation of the effective negative-sequence impedance detector," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38-5, pp. 1447-1453, Sept.-Oct 2002.
 - [27] J. Sottile, F. C. Trutt and J.L. Kohler; "Condition monitoring of stator windings in induction motors. II. Experimental investigation of voltage mismatch detectors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38-5, pp. 1454-1459, Sept.-Oct 2002.
 - [28] R. M. Tallam, T. Habetler, R. Harley, D. Gritter and B. Burton, "Neural network based on-line stator winding turn fault detection for induction motors," in *Proc. 2000 Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE*, vol 1, 8-12 Oct. 2000, pp. 375-380.
 - [29] G. Acosta, C.J. Verucchi y E.R. Gelso, "A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors", *Mechanical Systems and Signal Processing*, (En prensa, disponible on-line), (2004).
 - [30] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, R. Passaglia, M. Saottini, M. Giovannini, "Mechanical Failures Detection by Means of Induction Machine Current Analysis: A Case History", in *Proc. 2003 SDEMPED, Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta, GA. USA*, pp. 322-326.
 - [31] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, R. Passaglia, M. Saottini, G. Tontini, M. Giovannini and A. Rossi, "ENEL's Experience with On-line Diagnosis of Large Induction Motors Cage Failures," in *Proc. 2000 Industry Applications Conference. Conference Record of the 2000 IEEE*, 1, 492-498 (2000).
 - [32] H. Henao, C. Demian and G.A. Capolino, "A Frequency-Domain Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39-5, pp. 1272-1279, Sept.-Oct 2003.
 - [33] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, R. Passaglia, M. Saottini and M. Giovannini, "Mechanical Failures Detection by Means of Induction Machine Current Analysis: a Case History," in *Proc. 2003 SDEMPED Symposium for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta*, pp 322-326.

VII. BIOGRAFÍAS



Carlos Verucchi es Ingeniero Electromecánico por la Universidad Nacional del Centro de La provincia de Buenos Aires (UNICEN) graduado en 1994 y Magister en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad de Concepción, Chile (2000). Actualmente es profesor adjunto de Máquinas Eléctricas en la Facultad de Ingeniería de la UNICEN e integrante del grupo de investigación "INTELYMEC". Sus áreas de interés son el diseño de máquinas eléctricas, la detección y diagnóstico de fallos en máquinas de inducción y los accionamientos eléctricos.



Gerardo Acosta es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Nacional de La Plata, (1988), y Doctor en Informática, por la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, España (1995). Desde entonces es Profesor de Sistemas de Control (Área de Electrónica) en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires (UNCPBA). Es investigador del CONICET y Director del Grupo de I+D "INTELYMEC", en la Facultad de Ingeniería-UNCPBA. Su temática de trabajo comprende la utilización de técnicas de inteligencia artificial en control y supervisión, en la que tiene más de sesenta publicaciones internacionales y nacionales. Es Senior Member de IEEE desde el año 2001, y Vice-presidente del Capítulo Argentino de la Sociedad de Inteligencia Computacional de IEEE, desde 2002.