

Efectos de los Cortocircuitos entre Espiras de la Máquina de Inducción en la Potencia Instantánea

Guillermo D. Yuchechen¹, Manuel A. Mazzoletti
Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Energía
Eléctrica (LIDEE)
Facultad de Ingeniería, UNaM
Juan. M. de Rosas #325, Oberá, Misiones - Argentina
¹guillermoyuchechen@fio.unam.edu.ar

Guillermo R. Bossio²
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA)
Facultad de Ingeniería, UNRC
Ruta Nacional #36, km #601, Río Cuarto, Córdoba -
Argentina.
²gbossio@ing.unrc.edu.ar

Resumen— En este trabajo se propone una metodología para detectar un cortocircuito entre espiras en los bobinados de estator de la Máquina de Inducción (MI) trifásica utilizando la Teoría de Potencia instantánea. Para analizar los efectos de esta avería, se utiliza un modelo dinámico de la MI con falla que incluye un cortocircuito entre espiras en cualquiera de los bobinados de fase. A partir de las tensiones y las corrientes registradas a bornes de la máquina se usa la Teoría de la Potencia Instantánea con el fin de calcular la componente de corriente de potencia activa y reactiva en un marco de referencia α - β . Finalmente, se realiza la descomposición en redes de secuencia de las corrientes activa y reactiva para determinar los efectos de un cortocircuito entre espiras, particularmente, cuando la tensión de alimentación presenta el 5to armónico. Se presentan resultados de simulación con diferentes severidades de falla con tensiones de alimentación distorsionadas y, además, se analiza los efectos que producen los desequilibrios de tensión.

Abstract— In this paper, an interturn short-circuit fault detection strategy for Induction Machines (IM) by using the Instantaneous Power Theory is proposed. In order to analyze the effects of stator fault, a dynamic IM model including short-circuit fault in any of the phase-windings is used. Based on the voltages and currents measured on the IM terminals IM, the Instantaneous Power Theory is used for calculate the active and reactive power current component in the α - β reference frame. Finally, the sequence decomposition of the active and reactive currents is performed to determine the effects of the stator fault, particularly when the power supply voltage is distorted with the 5th harmonic. Simulation results are presented with different fault severities for distorted power supply voltages and, in addition, the effects produced by the voltage imbalances are analyzed.

Keywords— Interturn short-circuit, Induction Machine, Fault Detection, Instantaneous Power.

I. INTRODUCCIÓN

Las Máquinas de Inducción (MI) trifásicas son utilizadas en la mayoría de los procesos productivos en las industrias. Los diferentes esfuerzos eléctricos y mecánicos a los que se encuentran sometidas pueden ocasionar fallas en sus partes constitutivas provocando paradas imprevistas del proceso e, inevitablemente, pérdidas económicas.

Los cortocircuitos entre espiras del bobinado son las averías de mayor relevancia que ocurren en el estator de las MIs. Este tipo de avería se produce debido a la degradación progresiva del aislamiento entre los conductores que conforman las espiras del

bobinado. Un bobinado dañado ocasiona una corriente de falla cuya magnitud puede superar varias veces la corriente nominal de operación [1][2] lo cual puede ocasionar cortocircuitos entre fases o entre fase y tierra. Por esto, es importante detectar este tipo de fallas en su estado incipiente con el fin de ejecutar medidas preventivas y así evitar la destrucción total de la máquina.

Para la detección de averías existen varios métodos, algunos de ellos basados en la medición de la tensión y corriente de fase. Estos analizan el comportamiento dinámico de las corrientes en componentes de secuencia con el objeto de detectar asimetrías tanto en el estator como el rotor [3][4]. En trabajos recientes, la avería se estudia mediante un modelo con falla en los bobinados de estator considerando los armónicos de la red [5]. El modelo está desarrollado en componentes de secuencias para el estado estacionario derivado del modelo dinámico con falla en un marco de referencia qd . Una característica interesante del trabajo propuesto es la posibilidad de detectar un cortocircuito entre espiras del bobinado a partir del seguimiento de los armónicos de la red, particularmente el 5to armónico de secuencia positiva. Entre otras estrategias usadas para la detección y el diagnóstico de fallas en las MI se encuentra el uso de la teoría de la potencia instantánea o comúnmente denominada teoría de potencia p - q . Esta teoría permite separar las corrientes de estator en componentes que dependen de la potencia activa y reactiva. La teoría es aplicada principalmente para resolver problemas en la calidad de la energía y en desarrollos de filtros activos [6]. Sin embargo, en [7] y [8] se propone una técnica para el diagnóstico de barras rotas en el rotor y las oscilaciones de carga en MI empleando las componentes de corrientes activa y reactiva en marco de referencia α - β . Los resultados presentados demostraron que es posible diagnosticar una falla en el rotor dado que las firmas de las componentes de corrientes presentan efectos bien diferenciados entre la falla y las oscilaciones de carga en el eje.

Con el objetivo de desarrollar nuevos métodos de diagnóstico de averías en el estator del MI, en este trabajo se propone una metodología para detectar cortocircuito entre espiras en los bobinados utilizando la Teoría de Potencia instantánea. Para este propósito, se utiliza el modelo dinámico de la MI con falla propuesto en [5] mediante el cual se obtienen las corrientes y las tensiones incluyendo los efectos de la avería en los bobinados del estator. Utilizando las señales de corrientes y de tensión, se obtienen dos componentes de corriente en α - β a través de la transformada de Clarke, una de ellas que depende

de la potencia activa y la otra de la potencia reactiva. Con las corrientes activa y reactiva se analiza la traza en el plano α - β y se obtienen las componentes en redes de secuencia con el fin de evaluar los efectos de la avería considerando el 5to armónico en la tensión de alimentación. Se presentan resultados de simulación para la MI con distintas severidades de falla con tensiones de red distorsionadas y desequilibradas.

II. MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CON FALLA

Para analizar los efectos de una avería en los bobinados de estátor se utiliza un modelo de la MI con falla propuesto en [5]. El modelo analítico de la MI permite incluir un cortocircuito entre espiras considerando armónicos en las tensiones de alimentación. En la Fig. 1 se presenta un esquema del bobinado de estátor con una fracción de μ espiras en falla en la fase a .

El modelo de la MI con falla en bobinados en marco de referencia qd estacionario se presenta a continuación [5]:

$$\mathbf{v}_{qds} = r_s \cdot \mathbf{i}_{qds} + p \cdot \lambda_{qds} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot r_s \cdot \mathbf{i}_f \quad (1)$$

$$0 = r_r \cdot \mathbf{i}_{qdr} + p \cdot \lambda_{qdr} - \omega_r \cdot \mathbf{j} \cdot \lambda_{qdr} \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_{qd}^T \cdot \mu_{qd} = \left[\left(1 - \frac{2}{3} \|\mu_{qd}\| \right) \|\mu_{qd}\| \right] (r_s + L_{ls} \cdot p) \mathbf{i}_f + r_f \cdot \mathbf{i}_f \quad (3)$$

Y los flujos de estator y rotor vienen dados por:

$$\lambda_{qds} = L_s \cdot \mathbf{i}_{qds} + L_m \cdot \mathbf{i}_{qdr} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot L_s \cdot \mathbf{i}_f \quad (4)$$

$$\lambda_{qdr} = L_r \cdot \mathbf{i}_{qdr} + L_m \cdot \mathbf{i}_{qds} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot L_m \cdot \mathbf{i}_f \quad (5)$$

donde los subíndices s y r , indican las magnitudes referidas al estator y rotor respectivamente. \mathbf{V} , \mathbf{i} y λ son vectores de tensión, corriente y flujo, respectivamente. El vector μ_{qd} indica la ubicación y la magnitud de una falla en cualquiera de las fases. La dirección 0 , $-2\pi/3$ o $2\pi/3$ se define según la fase dañada a , b o c respectivamente. El módulo representa el porcentaje de las espiras en cortocircuito del total que conforma una fase N_s . r_f e \mathbf{i}_f es la resistencia y la corriente de falla, respectivamente.

III. MÉTODO DE DETECCIÓN DE AVERÍA PROPUESTO

La metodología propuesta se muestra en un esquemático detallado en la Fig. 2. Para esta aplicación se considera que las tensiones de alimentación de la red presentan distorsión con el fin de analizar los efectos de la avería sobre el 5to armónico.

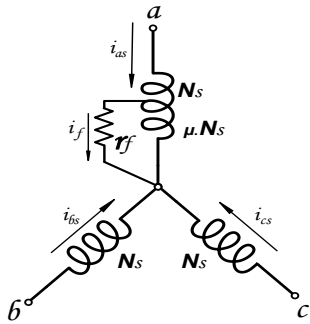


Fig. 1- Modelo de la Máquina de Inducción con falla en la fase a .

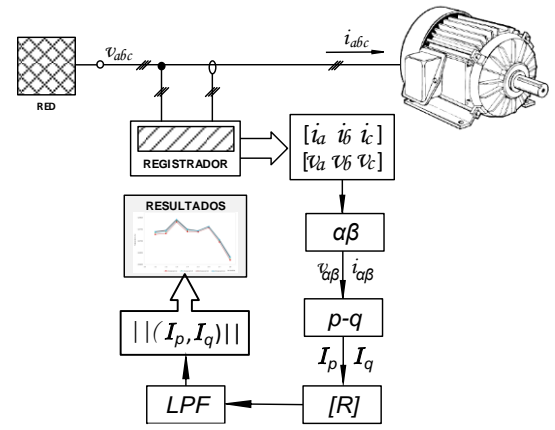


Fig. 2- Diagrama secuencial de la metodología propuesta.

En primer lugar, las corrientes y tensiones se registran sobre los bornes del estátor de la MI para su posterior procesamiento. Luego, a través de la trasformada de Clarke se obtienen las corrientes y tensiones en el marco de referencia α - β . En este referencial se obtiene las componentes de corrientes activas (I_p) y reactivas (I_q) utilizando la Teoría de la Potencia Instantánea. Con el fin de separar el 5to armónico de corriente para su posterior análisis se procede a descomponer la corriente en un marco referencial arbitrario y rotatorio a la frecuencia que se desea separar de la señal completa, esta transformación se realiza utilizando una matriz de transformación R . Los ejes del marco de referencia arbitrario se definen como directo (d) y de cuadratura (q). Las corrientes oscilatorias de frecuencia igual a la del marco de referencia rotatorio se reflejan sobre dicho marco como una señal de continua. Una componente de señal con diferente velocidad angular a la del marco se verá reflejada sobre este como una señal oscilante montada sobre la componente de continua. Debido a la presencia señales de frecuencias diferentes sobre las componentes de continua, un filtro pasabajos (LPF) se implementa para separar cada componente armónica, en este caso el 5to armónico. Por último, se obtiene la norma euclidiana de los vectores corriente $\|I_p, I_q\|$.

A. Componentes de Corrientes Activas y Reactivas

La Teoría de la Potencia Instantánea (Teoría p - q) se basa en un conjunto de potencias definidas en el dominio del tiempo; por lo que es válida tanto en estado estacionario como para transitorios. La teoría considera al sistema trifásico como una unidad, transformando las tensiones y corrientes en marco de referencia abc a un marco de referencia estacionario en variables α - β utilizando la Transformación de Clarke [9].

Para obtener las potencias real p e imaginaria q se utilizan las tensiones y corrientes instantáneas en marco de referencia α y β de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las corrientes activas y reactivas se obtienen aplicando las siguientes ecuaciones [9].

Corriente activa instantánea α

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (7)$$

Corriente activa instantánea β

$$i_{\beta p} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (8)$$

Corriente reactiva instantánea α

$$i_{\alpha q} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (9)$$

Corriente reactiva instantánea β

$$i_{\beta q} = \frac{-v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (10)$$

Las componentes de corrientes obtenidas en (7)-(10) serán utilizadas para analizar los efectos de la avería en el estátor.

B. Traza de las componentes de corriente

A partir de las corrientes activas y reactivas presentadas en las ecuaciones (7)-(10), es posible generar dos vectores corrientes, uno constituido por la parte activa y otro con la parte reactiva. Analíticamente este concepto se puede expresar como se muestra en las ecuaciones (11) y (12), conocido como el vector de Park.

$$\mathbf{I}_p = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = \frac{p}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{I}_q = \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \frac{q}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\beta} \\ -v_{\alpha} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Es sabido que, para una MI balanceada y alimentada con tensiones sinusoidales equilibradas, la traza del vector Park en el plano α - β será una circunferencia [10][11]. Por el contrario, bajo condiciones de funcionamiento anormales esta traza en el plano α - β se verá alterada. El análisis de las trazas de los vectores corriente permite visualizar condiciones de operación que se apartan de estado normal. Continuando con el método, las componentes de corrientes \mathbf{I}_p e \mathbf{I}_q se transforman hacia un marco de referencia arbitrario utilizando la siguiente matriz \mathbf{R} :

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \cos(2\pi f kt) & -\sin(2\pi f kt) \\ \sin(2\pi f kt) & \cos(2\pi f kt) \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde:

- \mathbf{R} = Matriz de Transformación.
- k = Múltiplo de la componente de red.
- f = frecuencia de la red.
- t = tiempo.

La componente armónica de frecuencia igual a la del marco de referencia se reflejará como una señal de corriente continua. Sin embargo, las componentes con diferente velocidad angular se reflejan como señales oscilantes montadas sobre dicha componente. Luego, para separar la magnitud de corriente constante se utiliza un filtro pasabajos. De esta forma, la matriz \mathbf{R} se utiliza de manera iterativa para obtener cada una de las componentes de corriente en redes de secuencia que resultan de interés para el análisis.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El comportamiento de la MI con un cortocircuito entre espiras en bobinados se evaluó mediante resultados de simulación empleando el modelo dinámico presentado en la Sección II. Las simulaciones fueron realizadas para diferentes estados de operación y distintas severidades de falla con tensiones de alimentación distorsionadas y desequilibradas. Los datos requeridos para la implementación digital del modelo tales como los parámetros característicos, la velocidad nominal, el total de espiras que conforman el bobinado, entre otros, se muestran en la Tabla 1. Las particularidades de la MI simulada guardan relación con el prototipo de MI que será utilizado en el laboratorio para validar de manera experimental el método de detección propuesto.

A continuación, se analizan los efectos cuando se origina un cortocircuito entre espiras en los bobinados de una fase sobre las componentes de corrientes activa y reactivas instantáneas para el régimen estacionario. La avería se provoca sobre la MI a plena carga para diferentes condiciones de operación: A) Estado de funcionamiento normal; B) MI con avería en bobinados; C) MI con avería en bobinados con desequilibrio. Los ensayos se realizaron considerando tensiones de red trifásica distorsionadas, alcanzando un $THD_v = 15\%$ debido a la inclusión del 5^o armónico. Esta condición de distorsión en la tensión aplicada puede considerarse similar a la distorsión de tensión que experimenta la MI durante el transitorio de arranque cuando la partida es controlada mediante un Arrancador Suave. Además, se realizaron ensayos con diferentes VUF (Factor de desbalance de tensión). Para los estados de falla se evaluó una severidad de avería del 14%, que corresponden a 20 espiras en cortocircuito del total que conforma el bobinado de una fase. Para todos los casos analizados fue considerado una resistencia de falla, $r_f = 0$.

A. Estado de funcionamiento normal

En este caso de análisis la MI funciona en condiciones normales de operación, sin avería en bobinados de estátor.

En la Fig. 3 se muestra los resultados de simulación obtenidos para tensiones de red sin desequilibrios y con desequilibrio, $VUF = 0,5\%$. En la Fig. 3(a) se muestra la traza del vector de corriente activo (11) y en la Fig. 3(b) la traza del vector de corriente reactivo (12). Puede observarse que las trazas en el plano α - β se diferencian entre sí, sin presentar alteraciones significativas al considerar tensiones de red con desequilibrios usuales en el ámbito industrial.

TABLA 1 - CARACTERÍSTICAS DE LA MI SIMULADA.

11,8 A	380 V	1450 rpm	50 Hz
r_s	0,9 Ω	r_r	0,4 Ω
L_{ls}	4 mH	L_m	125 mH
Conexión Bobinas	Serie	Bobinas/Fase	8
Espiras/Bobina	18	Espiras/Fase	144

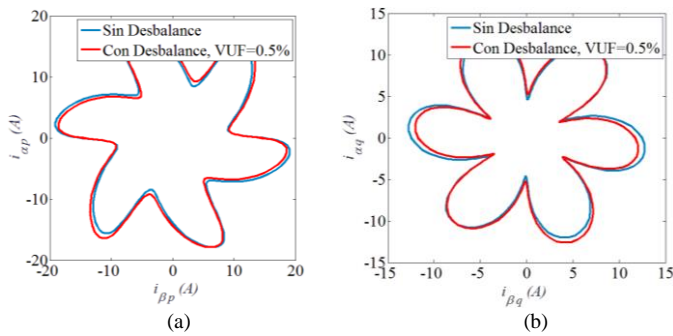


Fig. 3 – MI sin avería con desequilibrio y distorsión de tensión. (a) Vector de corriente activo. (b) Vector de corriente reactivo.

En la Fig. 4 se muestran las componentes en redes de secuencia de I_p y I_q para el 5^{to} armónico (+5, -5). Dado que el 5^{to} armónico se define de secuencia negativa (-5), luego del transitorio, la magnitud de cada componente se estabiliza en valor constante. En condiciones normales, la magnitud de las componentes de secuencia positiva (+5) son idealmente nulas.

B. MI con avería en bobinados

En esta sección se analizan los resultados para la MI con un cortocircuito entre espiras en bobinados del 14% (20 espiras). Las condiciones de la red de alimentación son iguales a las mencionadas en la Sección IV.A. En la Fig. 5 se muestran las componentes de secuencia positiva y negativa del 5^{to} armónico (+5, -5) para las componentes I_p y I_q .

Comparando las componentes de secuencia negativa de la Fig. 4(b) y 4(d) con las Fig. 5(b) y 5(d), puede apreciarse que no existen diferencias significativas en las magnitudes de las corrientes al producirse la avería en bobinados de la MI. Sin embargo, comparando la Fig. 4(a) y 4(c) para el estado de operación normal con la Fig. 5(a) y 5(c), las componentes de secuencia positiva presentan un comportamiento diferente puesto que los efectos de la avería pueden visualizarse en las magnitudes no nulas que presentan ambas componentes de corriente activa y reactiva.

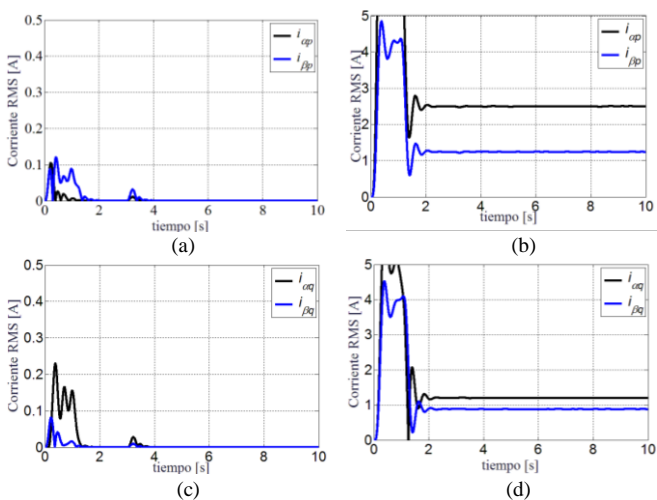


Fig. 4- Componentes del 5^{to} armónico de I_p y I_q MI sin avería en bobinados. (a) Activa de secuencia positiva. (b) Activa de secuencia negativa. (c) Reactiva de secuencia positiva. (d) Reactiva de secuencia negativa.

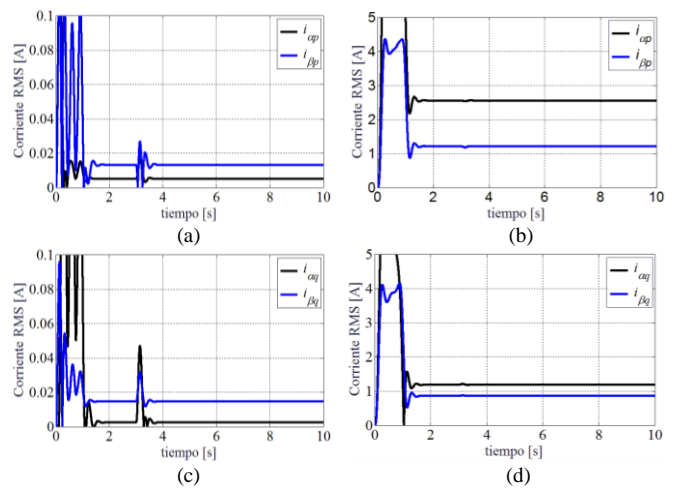


Fig. 5- Componentes del 5^{to} armónico de I_p y I_q MI con avería en bobinados (14%). (a) Activa de secuencia positiva. (b) Activa de secuencia negativa. (c) Reactiva secuencia positiva. (d) Reactiva de secuencia negativa.

C. MI con avería en bobinados y desequilibrio de tensión

En general, la red de alimentación convencional presenta ligeros desequilibrios de tensión que pueden dificultar la detección de la avería dado que producen similares efectos sobre la traza en el plano $\alpha\beta$ y sobre las componentes de secuencias. En este caso, se presentan los resultados para la MI con avería y con distintos grados de desequilibrio de red, $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$. Los desequilibrios fueron generados para todas las componentes armónicas de la tensión.

En la Fig. 6 se muestran las trazas en el plano $\alpha\beta$ del vector de corriente activo y reactivo para la tensión de alimentación sin desequilibrio (condición ideal) y con desequilibrios. La severidad de la avería se mantiene de 14% en el bobinado de estátor. Comparando la Fig. 3 con las Fig. 6 (a) y 6(b) se observa que la avería provoca una deformación de las trazas de corriente, bien diferenciadas entre cada una de las componentes de corriente activa y reactiva. También es importante mencionar que al introducir diferentes grados de desequilibrio de la tensión de red no se producen cambios significativos sobre la traza de un mismo vector, manteniendo la traza patrón obtenida para la condición ideal. De esta forma, es posible obtener las trazas para distintas cantidades de espiras en cortocircuito de forma tal que los patrones en el plano $\alpha\beta$ puedan ser útiles como indicadores de severidad.

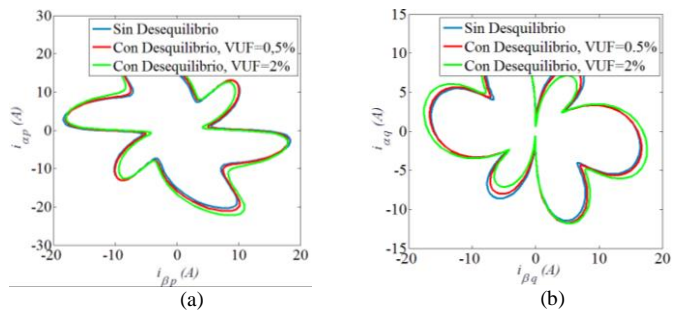


Fig. 6- MI con avería en bobinados (14%) y con desequilibrio y distorsión de tensión. (a) Vector de corriente activo. (b) Vector de corriente reactivo.

Por otro lado, comparando la Fig. 3 con la Fig. 6 se observa que a medida que la severidad de la avería se incrementa, las trazas sobre el plano α - β tienden a rotar en un sentido.

Los efectos sobre las componentes de secuencias (+5, -5) para el 5^{to} armónico para grados de $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$ se presentan en la Fig. 7 y la Fig. 8, respectivamente. Con el fin de evaluar la evolución de las componentes ante diferentes condiciones se superponen los resultados de la MI con avería presentados en la Fig. 5. En la Fig. 7 se observa que un desequilibrio de tensión prácticamente no modifica las magnitudes de las componentes de secuencia negativa. En el caso de las componentes de secuencia negativa un $VUF = 0,5\%$ modifica ligeramente las magnitudes de las componentes de corriente. En la Fig. 8 se observa los resultados obtenidos para un desequilibrio de tensión mayor, $VUF = 2\%$. De manera similar para el caso de análisis anterior, la magnitud de la componente de secuencia negativa, prácticamente, no modifica su magnitud. Sin embargo, un mayor desequilibrio de tensión provoca el incremento de las magnitudes de las componentes de secuencia positiva.

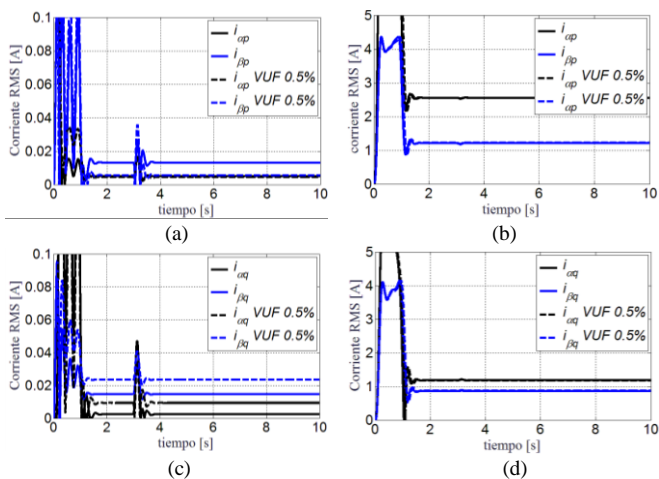


Fig. 7- Componentes del 5^{to} armónico con avería (14%), $VUF = 0.5\%$. (a) Activa de secuencia positiva. (b) Activa de secuencia negativa. (c) Reactiva de secuencia positiva. (d) Reactiva de secuencia negativa.

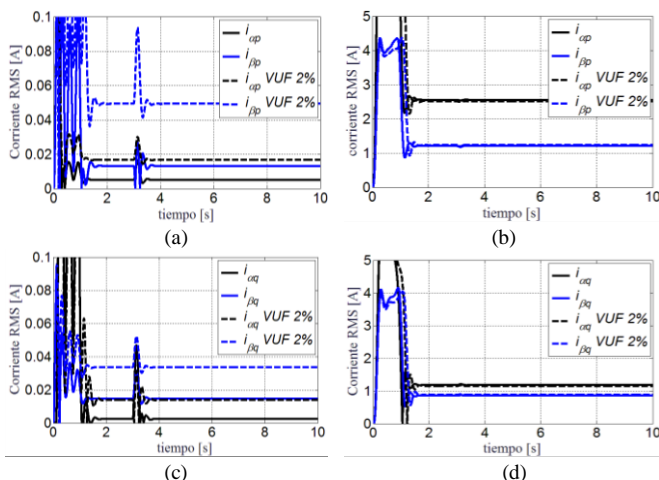


Fig. 8- Componentes del 5^{to} armónico con avería (14%), $VUF = 2\%$. (a) Activa de secuencia positiva. (b) Activa de secuencia negativa. (c) Reactiva de secuencia positiva. (d) Reactiva de secuencia negativa.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para detectar un cortocircuito entre espiras en bobinados de una Máquina de Inducción (MI) trifásica utilizando la Teoría de la Potencia Instantánea. La estrategia de detección se basa en la medición de las tensiones y corrientes de fase sobre los bornes. Para el análisis de los efectos de la avería se utilizó un modelo dinámico de la MI que permite incluir una falla en cualquiera de los bobinados de fases. A partir de las señales de corrientes y de tensión se usa la transformada de Clarke para calcular dos componentes de corriente en marco de referencia α - β , una de ellas que depende de la potencia activa y la otra de la potencia reactiva. En análisis de las trazas de las componentes de corrientes en el plano α - β permitió evaluar los efectos de una avería considerando las tensiones de red desequilibradas y distorsionadas con la inclusión del 5^{to} armónico en la tensión de alimentación. Para el caso de la MI con falla se consiguen trazas que tienden a rotar y deformarse comparando con el estado de operación normal. Sin embargo, los efectos de la avería pueden detectarse, inclusive para los grados de desequilibrios de tensión considerados, $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$.

Por último, a partir de los resultados obtenidos para la corriente activa y reactiva en redes de secuencia, el cambio de la magnitud del 5^{to} armónico de secuencia positiva permitió detectar la presencia de la avería en bobinados. Entonces, tanto el análisis de las componentes de corriente activa y reactiva en componentes de secuencia como la traza en el plano α - β puede ser de utilidad para el desarrollo de estrategias de detección y diagnóstico capaces de separar la avería de otras perturbaciones comunes en el ámbito industrial, tales como el desequilibrio de las tensiones de alimentación o los contactos de alta resistencia, entre otras. Cabe mencionar que el grado de distorsión armónica considerado para el estudio es poco usual en las tensiones de red convencional. Sin embargo, la metodología puede aplicarse durante el transitorio de arranque cuando la partida de la MI es controlada mediante un Arrancador Suave.

Como trabajo a futuro se pretende incluir otras perturbaciones y analizar la respuesta en frecuencia de las componentes de corrientes activa y reactiva instantánea.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo gracias al financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Secretaria General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) y la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

REFERENCIAS

- [1] M. A. Mazzaletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, and D. R. Espinoza-Trejo, "Efectos del cortocircuito entre espiras en Máquinas Síncronas de Imanes Permanentes"; en 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), June 2014, pp. 531–536.
- [2] P. Krause, O. Wasynczuk, s. Sudhoff, and S. Pekarek, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed. New Jersey, USA: IEEE Press, 2013.
- [3] F. Briz, M. W. Degner, J. M. Guerrero, and P. Garcia, "Stator windings fault diagnostics of induction machines operated from inverters and soft-starters using high-frequency negative-sequence currents"; IEEE

Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 5, pp. 1637–1646, 2009.

- [4] J. Burriel-Valencia, R. Puche-Panadero, M. Riera-Guasp, A. Sapena Bano, M. Pineda-Sanchez, and J. Martinez-Roman, "Low computational cost algorithm for detecting rotor asymmetries in im based on the negative sequence component of the startup currents"; in 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Aug 2017, pp. 628–634.
- [5] Manuel A. Mazzoletti, Luis A. Barruffaldi, Julio A. Potschka, Mario O. Oliveira, Guillermo R. Bossio; "Un Modelo de la Maquina de Inducción con Falla en los Bobinados de Estator considerando los armónicos de la red"; en 2018 IEEE Congress of Argentina (ARGENCON), June 2018.
- [6] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", Wiley-IEEE Press, 2007.
- [7] C. Pezzani, P. Donolo, A. Castellino, G. Bossio and C. De Angelo, "Nuevo enfoque del vector corriente para el diagnóstico de barras rotas y oscilaciones de carga en motores de inducción"; XIII Reunión en Procesamiento de la Información y Control (RPIC'09), 16 al 18 de Setiembre de 2009. Rosario, Argentina. ISBN: 950-665-340-2.
- [8] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani and G. O. Garcia, "Separating Broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous Active and Reactive Currents," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4571-4580, Nov. 2009.
- [9] H Akagi, EH Watanabe, M Aredes - 2017 Instanteous Power Theory And Applications To Power Conditioning. Chapter 3 – The instaneous power theory.
- [10] A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz, J. F. S. Carvalho, and E. S. Saraiva, "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach"; in Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE, 1995, pp. 642-646 vol.1.
- [11] N. Benouzza, A. Benyettou, and A. Bendiabdellah, "An advanced Park's vectors approach for rotor cage diagnosis"; First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, pp. 461-464, 2004