

Análisis del Cortocircuito entre Espiras en Bobinados de la Máquina de Inducción utilizando la Teoría de Potencia Instantánea

Yuchechech Guillermo. D. ^{a*}, Mazzoletti Manuel. A. ^b

^a Becario Proyecto de Investigación 16/I162 - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM).

^b Becario CONICET; Departamento de Electromecánica -LIDEE, Facultad de Ingeniería, UNaM,

Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: guillermoyuchechech@fio.unam.edu.ar, mazzoletti@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este trabajo se propone una metodología para detectar un cortocircuito entre espiras en los bobinados del estator de la máquina de inducción (MI) trifásica. La estrategia se base en la teoría de la potencia instantánea (TPI). Para este propósito, se utiliza un modelo dinámico de la MI con falla que permite analizar los efectos de una avería en bobinados de estator. Las tensiones y las corrientes a bornes de la máquina se procesan a través de un algoritmo para generar dos componentes de corriente en marco de referencia $\alpha\text{-}\beta$, una de ellas dependiente de la potencia activa instantánea y la otra de la reactiva instantánea. En base al análisis de la traza de las componentes de corriente en el plano $\alpha\text{-}\beta$ se determina los efectos de un cortocircuito entre espiras, particularmente cuando la tensión de red presenta el 5to armónico. Se presentan resultados de simulación con diferentes severidades de falla con tensiones de alimentación con distorsión y ante la presencia de desequilibrios de tensión, usuales en los procesos industriales.

Palabras Clave - Cortocircuito entre espiras, Detección de averías, Máquina de inducción, Potencia instantánea

Abstract

In this paper, an interturn short-circuit fault detection strategy for Induction Machines (IM) is proposed. The strategy is based on the instantaneous power theory (IPT). In order to analyze the effects of stator fault, a dynamic IM model including interturn short-circuit fault for any of the phase-windings is used. Based on the voltages and currents measurement on IM terminals, the IPT is used for calculate the active and reactive power current component in the $\alpha\text{-}\beta$ reference frame. Finally, the 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 for IM under different fault severities under unbalanced supply voltages, usual in industrial processes.

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

SÍMBOLOS

p	Potencia activa instantánea
q	Potencia reactiva instantánea
$\alpha\text{-}\beta$	Componente en marco de referencia estacionario
abc	Componentes del marco de referencia de la máquina
qd	Componentes en marco de referencia arbitrario
v	Componentes de tensión
i	Componentes de corriente
λ	Componentes del flujo magnético
μ	Factor de severidad de falla
N_s	Total de espiras del bobinado de una fase
r_s	Resistencia de estator
r_r	Resistencia de rotor
L_{ls}	Inductancia de dispersión
L_m	Inductancia de dispersión

r_f	Resistencia de falla
i_f	Corriente de falla.
\mathbf{R}	Matriz de transformación
k	Componente de frecuencia.
f	Frecuencia de la red.
t	tiempo.
LPF	Filtro pasabajos
VUF	Factor de desbalance de tensión
THD_v	Factor de distorsión de tensión

1. Introducción

Las Máquinas de Inducción (MI) trifásicas son utilizadas en la mayoría de los procesos de 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 estátor 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 estátor como el rotor [3-5]. En trabajos recientes, la avería se estudia mediante un modelo con falla en los bobinados de estátor considerando los armónicos en la tensión de alimentación [6]. 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. 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 (TPI) [7]. Esta teoría permite separar las corrientes de estátor en componentes que depende de la potencia activa y reactiva instantánea. La teoría es aplicada principalmente para resolver problemas en la calidad de la energía y en desarrollos de filtros activos. Sin embargo, en [8] y [9] 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 $\alpha\text{-}\beta$. 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 estátor del MI, en este trabajo se propone una metodología para detectar cortocircuito entre espiras en los bobinados de estátor una MI utilizando la TPI. Para este propósito, se utiliza el modelo dinámico de la MI con falla propuesto en [6] mediante el cual se obtienen las corrientes y las tensiones incluyendo los efectos de la avería en los bobinados del estátor. 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 componentes de corriente, se analiza la traza en el plano α - β para evaluar los efectos de la avería considerando el 5to armónico en la tensión de alimentación. Se presentan resultados para la máquina en condiciones normales de funcionamiento, para distintas severidades de falla con tensiones de alimentación distorsionadas que incluyen el 5to armónico y para tensiones desequilibradas.

2. Modelo del motor a inducción con falla

Para analizar los efectos de la falla en el estátor se utiliza un modelo dinámico de la MI con falla propuesto en [6]. Este modelo permite incluir un cortocircuito entre espiras en bobinados de la MI considerando armónicos en las tensiones de alimentación. En la Fig. 1 se presenta un esquema del bobinado con falla en la fase a .

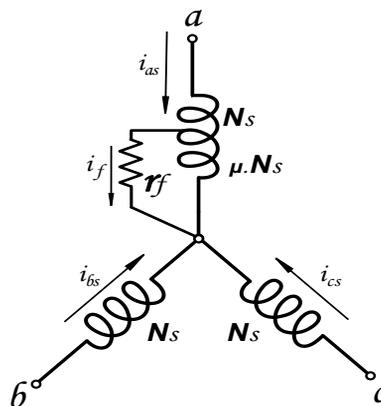


Fig. 1 - Modelo de la MI con avería en bobinados.

El modelo de la MI con falla en marco de referencia qd se presenta a continuación:

$$V_{qds} = r_s \cdot i_{qds} + p \cdot \lambda_{qds} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot r_s \cdot i_f \tag{1}$$

$$0 = r_r \cdot i_{qdr} + p \cdot \lambda_{qdr} - \omega_r \cdot J \cdot \lambda_{qdr} \tag{2}$$

$$v_{qd}^T \cdot \mu_{qd} = \left[\left(1 - \frac{2}{3} \|\mu_{qd}\| \right) \|\mu_{qd}\| \right] (r_s + L_{ls} \cdot p) i_f + r_f \cdot i_f \tag{3}$$

Y los flujos de estátor y rotor vienen dados por:

$$\lambda_{qds} = L_s \cdot i_{qds} + L_m \cdot i_{qdr} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot L_s \cdot i_f \tag{4}$$

$$\lambda_{qdr} = L_r \cdot i_{qdr} + L_m \cdot i_{qds} - \frac{2}{3} \mu_{qd} \cdot L_m \cdot i_f \tag{5}$$

donde los subíndices s y r , indican las magnitudes referidas al estátor y rotor respectivamente. \mathbf{V} , \mathbf{i} y λ son vectores de tensión, corriente y flujo, respectivamente. En la Fig. 1 se representa gráficamente el modelo de la máquina descrita en las ecuaciones (1) y (5) donde μ representa el porcentaje de espiras afectadas en el cortocircuito respecto del total de espiras del bobinado \mathbf{N}_s , r_f y i_f es la resistencia y la corriente de falla respectivamente.

3. Método de Detección de Avería Propuesto

El método de detección propuesto se basa en el procesamiento de variables eléctricas medidas sobre bornes del estátor de la máquina. La metodología propuesta se muestra en un esquemático detallado en Fig. 2. Las tensiones de alimentación de la RED se distorsionan incluyendo el 5^{to} armónico para analizar los efectos de la avería a esta frecuencia.

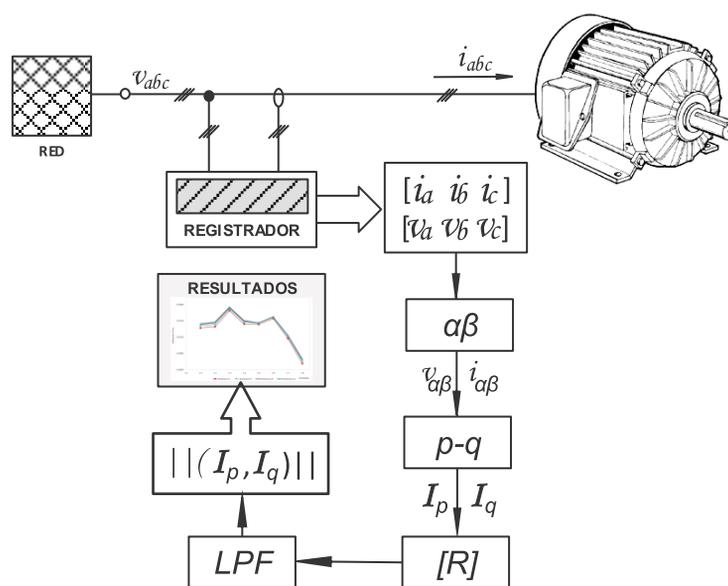


Fig. 2 - Diagrama secuencial de la metodología aplicada.

Las corrientes y tensiones en marco de referencia abc se registran para su posterior procesamiento. Luego, a través de la transformada de Clarke se obtienen las corrientes $ia\beta$ en el marco de referencia estacionario $\alpha-\beta$. En este referencial se obtiene las componentes de corrientes utilizando la teoría de potencia instantánea. Con el fin de separar las componentes armónicas para su posterior análisis se procede a descomponer las corrientes 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 refleja 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 frecuencias diferentes sobre las componentes de continua, un filtro pasabajos (LPF) se implementó para separar la componente fundamental. Este filtrado se implementó con un tipo Butterworth de primer orden con frecuencia de corte de 60Hz.

3.1. Componentes de Corrientes Activas y Reactivas

La teoría $p-q$ se basa en un conjunto de potencias instantáneas definidas en el dominio del tiempo; por lo que es válida tanto en estados 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 $\alpha-\beta$ utilizando la transformación de Clarke. En la Fig. 3 se muestra una representación gráfica de esta transformación que permite interpretar el cambio de coordenadas que se realizará con las señales eléctricas.

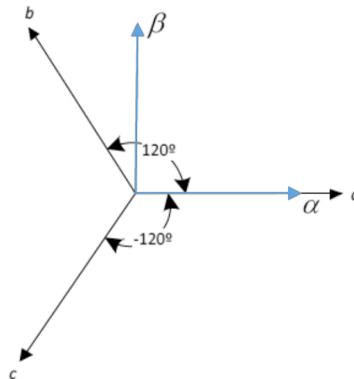


Fig. 3 - Representación gráfica de la transformada de Clarke.

Para obtener las potencias real p e imaginaria q se utilizan las tensiones y corrientes instantáneas en marco de referencia α y β mediante (6):

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

Las corrientes activas y reactivas se obtienen aplicando las ecuaciones (7) a (10)

Corriente activa instantánea α :

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \tag{7}$$

Corriente activa instantánea β :

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \tag{8}$$

Corriente reactiva instantánea α :

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \tag{9}$$

Corriente reactiva instantánea β :

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

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

3.2. Traza de las componentes de corriente

A partir de las corrientes activas y reactivas presentadas en las ecuaciones (7) a (10), es posible generar dos vectores corrientes. Uno constituido por la parte activa de la corriente de ambos ejes 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.

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

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

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]. Haciendo una analogía bajo las mismas condiciones de operación, los vectores de las ecuaciones (11) y (12) describan igualmente una traza circular. Por el contrario, bajo condiciones anormales de funcionamiento esta traza se verá alterada. El análisis de la traza de estos vectores corriente permite visualizar la presencia o no de condiciones anormales de funcionamiento.

Las componentes de corrientes (11) y (12) se descomponen sobre un marco referencial arbitrario y rotatorio a la frecuencia que se desea analizar, esta transformación se realiza utilizando la siguiente matriz \mathbf{R} :

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

La señal oscilatoria de frecuencia igual a la del marco de referencia \mathbf{R} se refleja sobre dicho marco como una señal de componente continua. Sin embargo, las componentes con diferente velocidad angular se reflejan como señales oscilantes montadas sobre la componente de continua. Luego se utiliza un filtro pasabajos para separar la magnitud de la componente armónica en cuestión.

4. 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 2*. 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 y el total de espiras que conforman el bobinado, se muestran en la Tabla 1.

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

Cabe mencionar que las características de la MI simulada corresponden a un prototipo de MI que será utilizado en trabajos futuros para la validación experimental el método de detección propuesto.

Por lo tanto, para analizar los efectos en la MI cuando se produce un cortocircuito entre espiras en los bobinados de una fase a partir de las componentes de corrientes activa y reactivas instantáneas, a continuación, se mencionan las diferentes condiciones de funcionamiento:

- 1) Estado sin avería (Normal) y con desequilibrio de las tensiones de alimentación;
- 2) Estado sin avería con distorsión y desequilibrio de las tensiones de alimentación;
- 3) Estado de avería (Falla) y con desequilibrio de las tensiones de alimentación y;
- 4) Estado de avería con distorsión y desequilibrio de las tensiones de alimentación.

Los ensayos se realizaron considerando diferentes VUF (Factor de desbalance de tensión) y con una distorsión de tensión de $THD_v = 15\%$. Para los estados de falla se consideraron severidades de avería del 3,5% y 14% que corresponden a cortocircuitar entre 5 y 20 espiras del total que conforma el bobinado de una fase.

4.1. Estado sin avería con tensiones de alimentación desequilibradas

En este caso la MI funciona en condiciones normales de operación alimentada mediante un sistema polifásico perfectamente balanceado y sin averías en sus bobinados. Los resultados obtenidos de este caso de análisis son fundamentales dado que indican el comportamiento de la máquina en condiciones de funcionamiento ideales para su posterior comparación con estados de fallas. En las Fig. 4 y Fig. 5 se observa la traza en plano α - β de las componentes de corrientes para diferentes condiciones de operación. Para el caso de la MI sin averías con tensiones de alimentación equilibradas, la traza en el plano describe una circunferencia ideal (traza de color azul). La Fig. 4 corresponde a un caso para la MI sana y ante un desequilibrio de las tensiones de alimentación medido a través del indicador de $VUF = 0,5\%$; un valor típico de desequilibrio que podemos encontrar en una red (traza de color rojo). Con el fin de contrastar el efecto del desequilibrio de tensiones con una avería de baja severidad (pocas espiras dañadas, 3,5%), la Fig. 5 muestra los resultados para el estado de la MI sin averías y con un cortocircuito entre espiras. Comparando ambas figuras se observa que los desequilibrios de tensión producen similares efectos sobre la traza de corrientes, dificultando la tarea de distinguir de manera precisa los efectos de una avería con tan sólo visualizar la traza en el plano α y β .

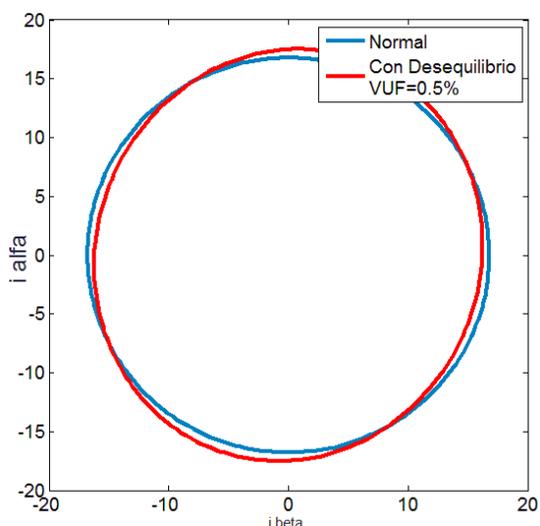


Fig. 4 - MI en estado de operación sin avería y con desequilibrio de tensiones de alimentación.

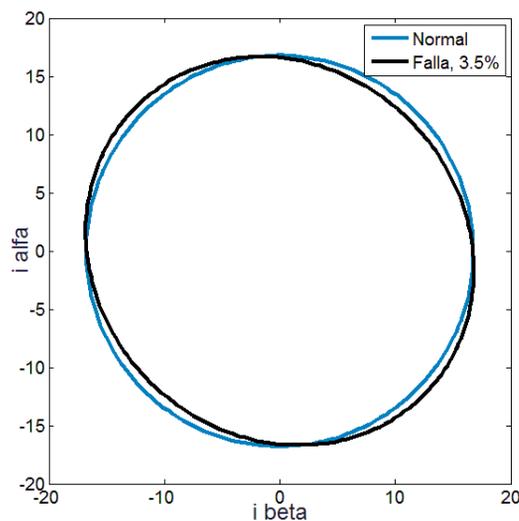


Fig. 5 - MI en estado de operación sin avería y con avería en bobinado de la fase a.

4.2. Estado normal con tensiones de alimentación distorsionadas y desequilibradas

En este caso de análisis la MI funciona en condiciones normales de operación alimentada mediante un sistema polifásico, pero con $THD_v = 15\%$ debido a la inclusión del 5^{to} armónico. En la Fig. 6 se muestra los resultados de simulación cuando se introduce un 5^{to} armónico a una red de alimentación sin desbalance de tensiones, y a una red con un desbalance de 0,5%. En la Fig. 6(a) se muestra la traza del vector de Park, en la Fig. 6(b) la traza del vector de corriente activo y en la Fig. 6(c) la traza del vector de corriente reactivo. Comparando la Fig. 4 con la Fig. 6 (a), se observa la deformación de la traza por la distorsión de tensión al introducir el 5^{to} armónico a la red. En la Fig. 6, las trazas que dependen de las componentes de corrientes activas y reactiva se diferencian entre sí, sin presentar una significativa alteración al introducir un desequilibrio de las tensiones de red.

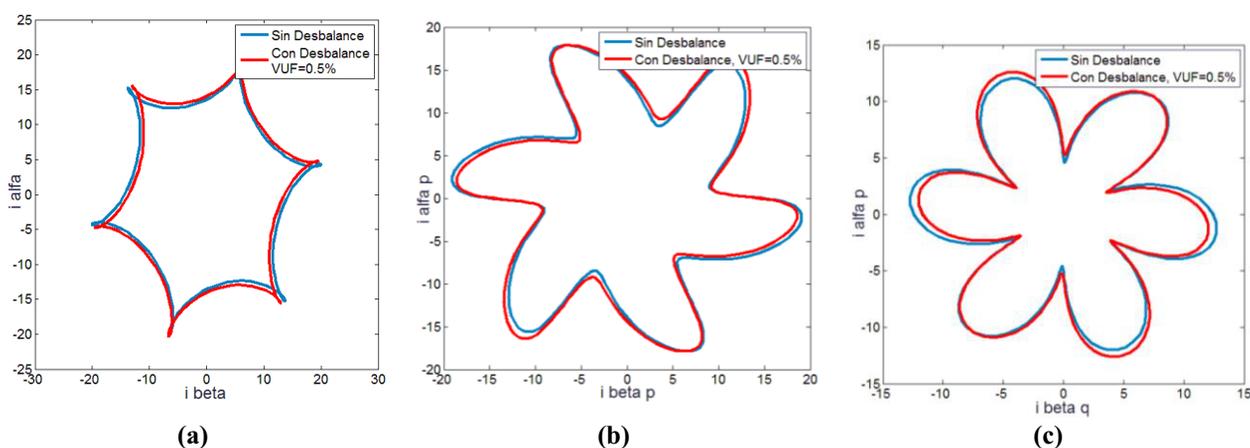


Fig. 6 - MI sin avería con desequilibrio y distorsión de tensión. (a) Vector de Park. (b) Vector de corriente activo. (c) Vector de corriente reactivo.

4.3. Estado de avería con tensiones de alimentación desequilibradas

En este caso la MI presenta un cortocircuito entre espiras del bobinado, alimentada mediante un sistema de tensión polifásico. En la Fig. 7 se muestra los resultados de simulación correspondiente al caso en que se produce un cortocircuito de severidad 14% en bobinados de la fase *a* (20 espiras en cortocircuito) y con tensiones de alimentación desequilibrada con $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$. En la Fig. 7 (a) se muestra la traza del vector de Park, en la parte Fig. 7 (b) y (c) la traza del vector de corriente activo y reactivo, respectivamente, Comparando las Fig. 5 con la Fig. 7(a), se observa que a medida que aumentamos la cantidad de espiras en cortocircuito, la traza del vector de Park tiende a ser más elíptica y experimenta una rotación en el plano. Cada vector de la Fig. 7 produce una traza característica y diferente al resto. La traza de un mismo vector presenta alteraciones perceptibles al introducir desbalances de la red mayores en el orden de $VUF = 2\%$.

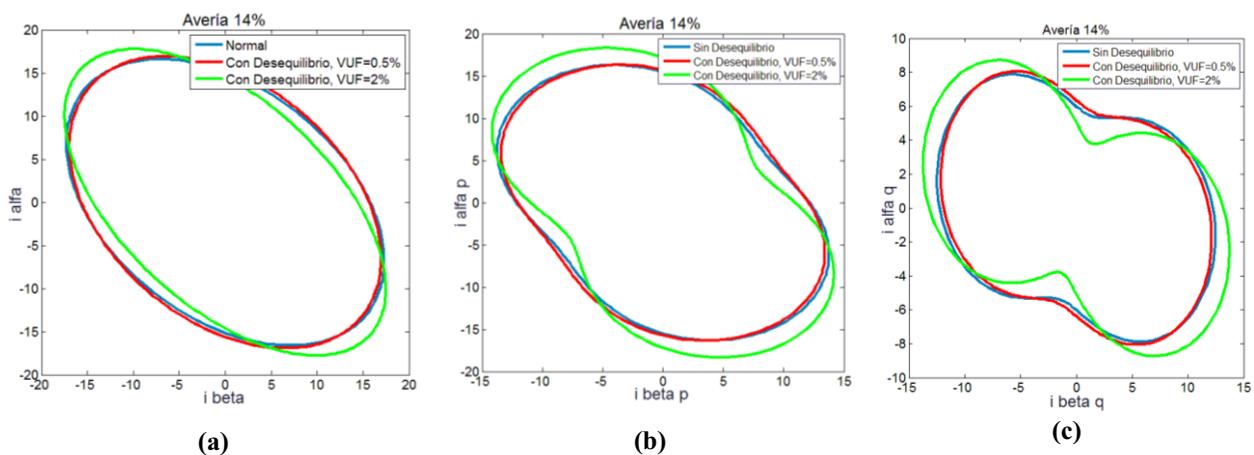


Fig. 7 - MI con avería en bobinados (14%) y con desequilibrio de tensión (a) Vector de Park. (b) Vector de corriente activo (c) Vector de corriente reactivo.

4.4. Estado de avería con tensiones de alimentación desequilibradas y distorsionadas

En este caso la MI presenta un cortocircuito entre espiras del bobinado y es alimentada mediante un sistema de tensión polifásico con una distorsión de $THD_v = 15\%$ debido a la inclusión del 5^{to} armónico. La Fig. 8 muestra los resultados de simulación de la combinación de los efectos vistos en las secciones anteriores, es decir, cuando se introduce un 5^{to} armónico a una red de alimentación sin desequilibrio de tensión y con desequilibrio para $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$. La severidad de la avería se mantiene de 14% en el bobinado de la fase *a* de la MI. En la Fig. 8(a) se presentan la traza del vector de Park, en la Fig. 8(b) y (c) la traza del vector corriente activo y reactivo, respectivamente. Comparando la Fig. 8(a) con la Fig. 6(a), se observa que la traza presenta similares características pero rotada hacia la izquierda. Esto se debe al cortocircuito entre espiras originado en bobinados de la fase *a* de la MI, produciendo efectos similares al presentado en la Sección 0. Se observa que las señales mostradas en la Fig. 8 producen traza bien diferente entre cada una de ellas en el plano $\alpha-\beta$. También es importante mencionar que al introducir diferentes grados de desequilibrio de la tensión de red no se producen cambios significativos en la traza de un mismo vector, manteniendo la misma traza patrón. Sin embargo, a medida que la severidad de la avería en bobinados se incrementa puede observarse que las trazas rotan sobre el plano $\alpha-\beta$ y al mismo tiempo tienden a deformarse comparando con el estado sin avería.

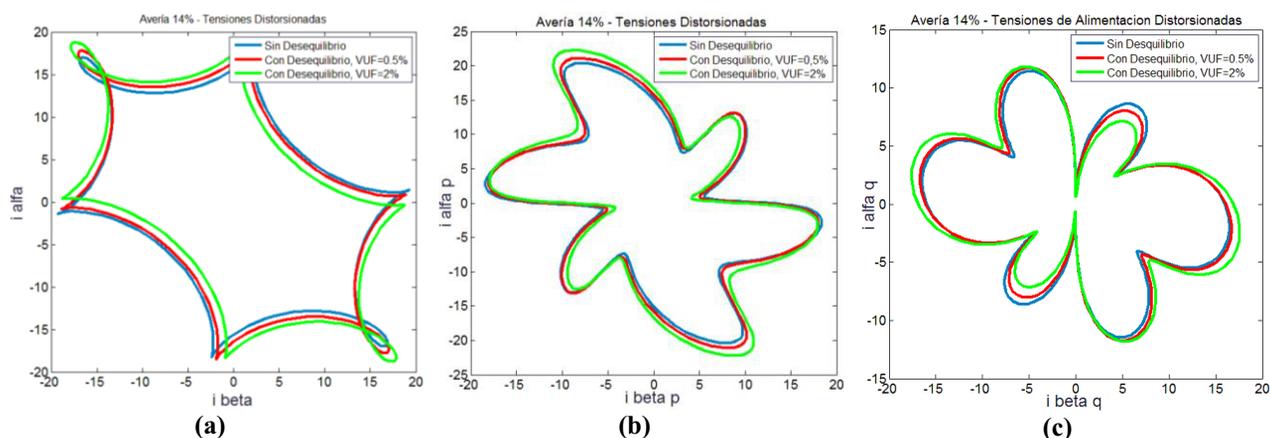


Fig. 8 - MI con avería en bobinados (14%) y con desequilibrio y distorsión de tensión (a) Vector de Park. (b) Vector de corriente activo (c) Vector de corriente reactivo.

Por último, en la Fig. 9 y la Fig. 10 se muestra las trazas de las corrientes activa y reactiva instantánea para cada componente de frecuencia contenida en la señal corriente total. Esta descomposición se realiza utilizando la matriz transformación R de la ecuación (13). Comparando la Fig. 9 con la Fig. 7(a) presentan iguales características ante los efectos de la avería y los desequilibrios de tensión. Sin embargo, analizando las trazas de la Fig. 10 que corresponden a las componentes de corrientes para el 5^{to} armónico se puede visualizar que los desequilibrios de tensión no producen cambios significativos sobre la traza del vector de Park. Esto último indica que el 5^{to} armónico es menos sensible a los desequilibrios en la tensión de red, evitando posibles errores en la detección de la avería.

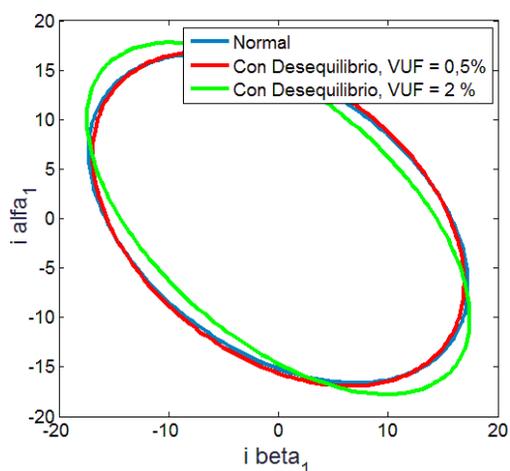


Fig. 9 – Trazas del vector de Park de la componente de corriente fundamental para la MI con avería en bobinados (14%) con desequilibrio de tensión.

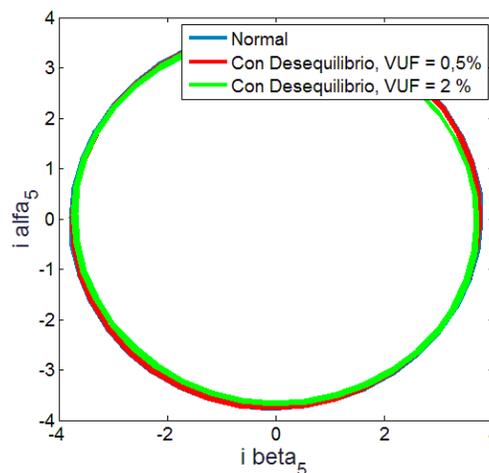


Fig. 10 – Trazas del vector de Park de la 5ta componente de corriente para la MI con avería en bobinados (14%) con desequilibrio de tensión.

5. 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 en bobinados se utilizó un modelo dinámico que permite incluir la falla en cada una de las 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 sin averías con tensiones de alimentación equilibradas, las trazas en el plano describen una circunferencia ideal. Sin embargo, ante un desequilibrio en la tensión de alimentación y/o producto de una avería en bobinados las trazas tienden a una forma de elipse con rotaciones en el plano α - β . Para bajas severidades de falla (5 espiras en cortocircuito) las trazas analizadas son similares a los efectos producidos por los desequilibrios en la red de alimentación que podemos encontrar en la industria, pudiendo llegar a confundir los efectos de una avería de baja severidad. Sin embargo, cuando la severidad aumenta (20 espiras en cortocircuito) las trazas analizadas pueden diferenciarse de manera clara, inclusive para los grados de desequilibrios de tensión considerados, $VUF = 0,5\%$ y $VUF = 2\%$. Por último, los resultados obtenidos para cada componente de frecuencia que contiene la corriente de estátor (componente fundamental y el 5^{to} armónico) demostraron que los efectos de los desequilibrios de tensión sobre el armónico quinto no modifican la traza en el plano α - β . Por lo tanto, la traza del 5^{to} armónico puede ser de mucha utilidad para el desarrollo de estrategias de diagnóstico capaces de aislar las averías de otras perturbaciones comunes en el ámbito industrial como el desequilibrio o distorsión de las tensiones de alimentación o los contactos de alta resistencia, entre otras. Como trabajo a futuro se pretende incluir otras perturbaciones y analizar la respuesta en frecuencia de las componentes de corrientes activa y reactiva instantánea.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] Manuel. A. Mazzoletti, 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] A. Berzoy, H. H. Eldeeb, and O. A. Mohammed, "On-line detection of stator faults in DTC-driven IM using SC impedance matrix off-diagonal term," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 5906–5915, Nov 2019.
- [6] Manuel. A. Mazzoletti, L. A. Barruffaldi, J. A. Potschka, M. O. Oliveira and G. R. Bossio, "Steady-State Induction Machine Model with Turn Faults and Voltage Harmonics," *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, San Miguel de Tucumán, Argentina, 2018, pp. 1-6.
- [7] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", Wiley-IEEE Press, 2007.
- [8] 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.
- [9] 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.]
- [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.