

Un Modelo de la Máquina de Inducción con Falla en los Bobinados de Estátor considerando los Armónicos de la Red

Manuel A. Mazzeletti^{*1}, Luis A. Barruffaldi^{*}, Julio A. Potschka^{*}, Mario O. Oliveira^{*}, Guillermo R. Bossio^{†2}

^{*} *Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Energía Eléctrica (LIDEE), Facultad de Ingeniería, UNaM
Juan. M. de Rosas #325, N3365BOG, Oberá, Misiones - Argentina*

¹mazzeletti@fio.unam.edu.ar

[†] *Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería, UNRC
Ruta Nacional #36, km #601, X5804BYA, Río Cuarto, Córdoba - Argentina.*

²gbossio@ing.unrc.edu.ar

Abstract—A model of the Induction Machine (IM) considering the harmonics of the power supply network is presented in this paper. Unlike previous models that consider the effect only on the fundamental frequency component, the proposed model allows to evaluate the effect of an interturn short-circuit faults on the harmonic components. This is very useful for the development of the fault diagnostic strategies capable of isolating the stator faults of other usual disturbances in the industrial applications, such as the unbalance or distortion of the power supply voltage or the high-resistance connection, among others. The steady-state IM equivalent circuits with stator fault derived from the dynamic model in qd reference frame are presented. Finally, the behavior of the proposed model for different fault conditions and IM operations are analyzed by simulation results.

Resumen— En este trabajo se presenta un modelo de la Máquina de Inducción (MI) considerando los armónicos de la red. A diferencia de modelos anteriores que consideran solo el efecto sobre la componente de frecuencia fundamental, el modelo propuesto permite evaluar el efecto de un cortocircuito entre espiras sobre las componentes armónicas. Esto resulta de mucha utilidad para el desarrollo de estrategias de diagnóstico capaces de aislar la falla de otras perturbaciones usuales en el ámbito industrial como el desequilibrio o distorsión de las tensiones de alimentación o los contactos de alta resistencia, entre otras. Se presentan los circuitos eléctricos equivalentes en componentes de secuencias para el estado estacionario derivados del modelo dinámico en marco de referencia qd . Mediante resultados de simulación se analiza el comportamiento del modelo para diferentes condiciones de falla y estados de operación.

I. INTRODUCCIÓN

Las Máquinas Eléctricas Rotativas (MER) se utilizan a gran escala integradas en accionamientos eléctricos ya sea como motores en una línea de producción o como generadores conectados al sistema eléctrico de potencia. No obstante, sin importar el tipo o la función desempeñada, supervisar el estado de operación de las MER es fundamental con el objetivo de identificar condiciones anormales de funcionamiento a fin de evitar interrupciones no programadas del proceso.

Una de las averías de mayor relevancia se debe a los cortocircuitos entre espiras. Este tipo de avería se produce debido a la degradación progresiva del aislamiento entre los

conductores que conforman las espiras del bobinado. A raíz de ello, una corriente de falla circula por las espiras dañadas cuya magnitud puede superar varias veces la corriente nominal de operación [1]. Por lo tanto, detectar este tipo de avería en su estado incipiente es fundamental para evitar la sobreelevación de temperatura de la zona afectada que rápidamente pueden conducir a fallas catastróficas como los cortocircuitos entre fase y tierra o entre fases [2].

Cuando un sistema polifásico de tensiones aplicado sobre los terminales de las MER es perfectamente balanceado, las corrientes que circulan por los bobinados del estátor presentan únicamente componentes de secuencia positiva o negativa [3]. En el caso de producirse una avería, las impedancias asimétricas originan corrientes de fase desequilibradas en los bobinados del estátor. En efecto, cualquiera sea el origen de la perturbación que modifique un sistema polifásico de corrientes o tensiones equilibradas, ya sea por averías internas a la máquina o por perturbaciones externas, las señales eléctricas contendrán componentes de secuencia tanto positivas como negativas. Por este motivo, un cortocircuito entre espiras en los bobinados puede detectarse mediante el seguimiento de la componente fundamental de secuencia negativa [4]. Sin embargo, la dificultad se presenta cuando existen varias perturbaciones al mismo tiempo que producen similares efectos sobre las corrientes de estátor, como por ejemplo el desbalance o distorsión de la tensión de la red [5] y los contactos de alta resistencia [6], [7].

Para minimizar estos problemas, algunos métodos basados en las mediciones de tensiones y corrientes analizan el comportamiento dinámico de las componentes de secuencias de diferentes frecuencias con el objetivo de detectar asimetrías tanto en el estátor como en el rotor [8]–[12]. En procesos que utilizan arrancadores suaves para controlar la partida de la máquina, los armónicos de tensión se generan de forma natural sobre el estátor de la MI. En este sentido, en [13] y en [14] se presenta un análisis que permite visualizar el patrón característico que provocan distintas perturbaciones sobre las corrientes durante el transitorio de arranque. Teniendo en cuenta los efectos sobre las señales eléctricas, un modelo analítico que reproduzca el funcionamiento de las MER con falla de manera precisa es fundamental para el análisis y la validación de los métodos de detección y

diagnóstico de averías. En general, los modelos se expresan en forma de ecuaciones diferenciales en diferentes marcos de referencias [15]. En [16] y en [17] se propusieron modelos para la MI trifásica que consideran un cortocircuito entre espiras en los bobinados de estátor. Estos modelos con falla se formulan incluyendo solo las componentes de secuencias positiva y negativa para la frecuencia fundamental.

En este trabajo se presenta un modelo de la Máquina de Inducción (MI) considerando los armónicos de la red. Con el objetivo de validar los efectos que producen las averías sobre las corrientes de estátor, el modelo propuesto permite incluir un cortocircuito entre espiras considerando el i -ésimo armónico en las tensiones de alimentación. Esto resulta de mucha utilidad para el desarrollo de estrategias de diagnóstico robustas que puedan aplicarse en el ámbito industrial. Se presentan los circuitos eléctricos equivalentes en componentes de secuencias para el estado estacionario derivados del modelo dinámico en marco de referencia qd . Los resultados de simulación presentados muestran el comportamiento del modelo dinámico para diferentes condiciones de falla y estados de operación.

II. MODELO DE LA MI CON FALLA DE ESTÁTOR

Para obtener el modelo dinámico de la MI con avería en los bobinados del estátor se utilizan como referencia los modelos trifásicos bien conocidos en la literatura [16], [17].

Las siguientes hipótesis simplificadoras fueron consideradas en la formulación del modelo:

- tanto la configuración del sistema electromagnético como la geometría física de la máquina son simétricamente distribuidas,
- los efectos de una posible saturación magnética del núcleo son despreciables,
- la permeabilidad del hierro se considera infinita,
- se desprecian las pérdidas debido a las corrientes parásitas,
- no se incluyen las componentes de secuencia cero dado que el punto central de los bobinados no se conecta al neutro del sistema de alimentación,
- los parámetros del modelo analítico son del tipo concentrados e invariantes en el tiempo.

Bajo estas consideraciones, el modelo dinámico en marco de referencia estacionario qd viene dado por [16], [17]:

$$\mathbf{v}_{qds} = r_s \mathbf{i}_{qds} + p \boldsymbol{\lambda}_{qds} - \frac{2}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd} r_s i_f \quad (1)$$

$$0 = r_r \mathbf{i}_{qdr} + p \boldsymbol{\lambda}_{qdr} - \omega_r \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}_{qdr} \quad (2)$$

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

y los flujos de estátor y rotor vienen dados por:

$$\boldsymbol{\lambda}_{qds} = L_s \mathbf{i}_{qds} + L_m \mathbf{i}_{qdr} - \frac{2}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd} L_s i_f \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{qdr} = L_r \mathbf{i}_{qdr} + L_m \mathbf{i}_{qds} - \frac{2}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd} L_m i_f \quad (5)$$

donde, los subíndices s y r , identifican las magnitudes referidas al estátor y al rotor, respectivamente. $\mathbf{v}_{qd} = [v_q \ v_d]^T$, $\mathbf{i}_{qd} = [i_q \ i_d]^T$ y $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_q \ \lambda_d]^T$ son los vectores de tensión, corriente y flujo, respectivamente. r_f y i_f es la resistencia

y la corriente de falla, respectivamente. $L_m = \frac{3}{2} L_{ms}$, $L_s = L_{ls} + L_m$ y $L_r = L_{lr} + L_m$, corresponden a la inductancia magnetizante, y las propias del estátor y rotor, respectivamente. ω_r es la velocidad angular. p representa al operador derivada y $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

El Factor de Falla Vectorial (**FFV**) se define de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\mu}_{qd} = \mu \begin{bmatrix} n_q \\ n_d \end{bmatrix}, \quad (6)$$

donde, $\|\boldsymbol{\mu}_{qd}\|$ representa el porcentaje de espiras afectadas respecto del total del bobinado de fase.

Los parámetros n_q y n_d pueden definirse como $[1 \ 0]^T$, $[-\frac{1}{2} \ -\frac{\sqrt{3}}{2}]^T$ o $[-\frac{1}{2} \ \frac{\sqrt{3}}{2}]^T$, según el bobinado de fase con la avería, fase a , b o c , respectivamente.

Finalmente, el modelo se completa definiendo el par electromagnético:

$$T_e = L_m P \left(\frac{3}{2} \mathbf{i}_{qds} \times \mathbf{i}_{qdr} + i_f \boldsymbol{\mu}_{qd} \times \mathbf{i}_{qdr} \right) \vec{k} \quad (7)$$

donde, P es el número de pares de polos y $\vec{k} = [0 \ 0 \ 1]^T$.

La fase dañada se determina a partir de la magnitud y la dirección de $\boldsymbol{\mu}_{qd}$. El módulo del vector representa el porcentaje de las espiras en cortocircuito del total que conforma una fase. Su dirección indica la localización de la fase dañada y se identifica según los valores 0 , $-\frac{2\pi}{3}$ ó $\frac{2\pi}{3}$. Para la fase a será igual $[1 \ 0]$, y para la b o c será $[-\frac{1}{2} \ -\frac{\sqrt{3}}{2}]$ o $[-\frac{1}{2} \ \frac{\sqrt{3}}{2}]$, respectivamente.

A. Modelo propuesto de la MI en régimen estacionario

El modelo propuesto para la MI en régimen estacionario se obtiene aplicando una tensión trifásica de amplitud y frecuencia arbitraria al modelo dinámico con falla presentado en la sección anterior, de la siguiente manera:

$$v_{qdh} = \tilde{V}_{sph} e^{jh\omega_e t} + \tilde{V}_{snh} e^{-jh\omega_e t} \quad (8)$$

donde \tilde{V}_{sph} y \tilde{V}_{snh} son los fasores de tensión de secuencia positiva y negativa, respectivamente, para el h -ésimo armónico, siendo de orden $h = 1, 2, 3, \dots, n$.

Teniendo en cuenta que para el régimen estacionario la velocidad angular eléctrica, ω_e alcanza el equilibrio estable, las soluciones analíticas para las corrientes vienen dadas por:

$$i_{qdh} = \tilde{I}_{ph} e^{jh\omega_e t} + \tilde{I}_{nh} e^{-jh\omega_e t} \quad (9)$$

Considerando (8) y (9), además, sabiendo que el deslizamiento de la máquina se define según $s = (\omega_e - \omega_r)/\omega_e$, el modelo de la MI para el estado estacionario con un cortocircuito entre espiras en los bobinados de estátor considerando el h -ésimo armónico puede expresarse como:

$$\tilde{V}_{sph} = (r_s + jh\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{sph} - \frac{1}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd} \tilde{I}_f \right) + jh\omega_e L_m \tilde{I}_{rph} \quad (10)$$

$$\tilde{V}_{snh} = (r_s + jh\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{snh} - \frac{1}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd}^* \tilde{I}_f \right) + jh\omega_e L_m \tilde{I}_{rnh} \quad (11)$$

$$0 = (r_r A + jh\omega_e L_r) \tilde{I}_{rph} + jh\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{sph} - \frac{1}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd} \tilde{I}_f \right) \quad (12)$$

$$0 = (r_r B + jh\omega_e L_r) \tilde{I}_{rnh} + jh\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{snh} - \frac{1}{3} \boldsymbol{\mu}_{qd}^* \tilde{I}_f \right) \quad (13)$$

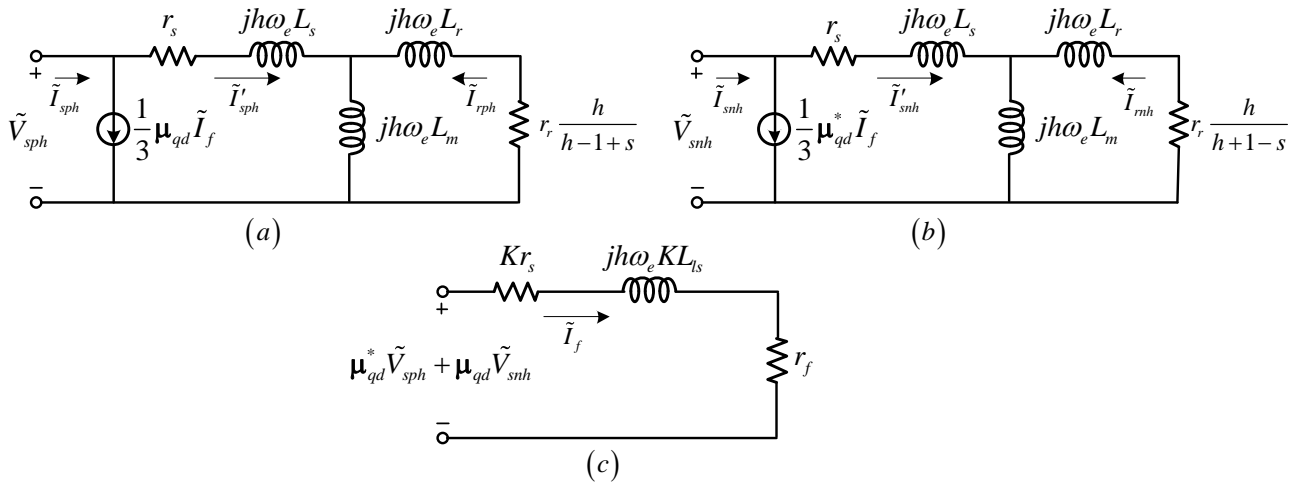


Fig. 1: Circuitos equivalentes de la MI con avería en el estátor para régimen estacionario con desequilibrio de tensión y armónicos. (a) Componente de secuencia positiva. (b) Componente de secuencia negativa. (c) Circuito de falla.

donde,

$$A = \frac{h}{h-1+s}, \quad B = \frac{h}{h+1-s}. \quad (14)$$

Y el modelo para el circuito de falla viene dado por:

$$\mu_{qd}^*\tilde{V}_{sph} + \mu_{qd}\tilde{V}_{snh} = K(r_s + j\omega_e L_{ls})\tilde{I}_f + r_f\tilde{I}_f \quad (15)$$

donde, \tilde{I}_f es el fasor de la corriente de falla, r_f es la resistencia de falla y $K = (1 - \frac{2}{3} \|\mu_{qd}\|) \|\mu_{qd}\|$.

En la Fig. 1 (a) y Fig. 1(b) se muestran los circuitos equivalentes en componentes de secuencia considerando el h -ésimo armónico para la MI con una avería en bobinados del estátor. La Fig. 1(c) muestra el circuito equivalente para la falla. Para el caso sin falla, ($\mu_{qd}\tilde{I}_f = 0$), los circuitos equivalentes resultantes representan el funcionamiento de la máquina con desequilibrio de la tensión de alimentación.

B. El modelo equivalente para el 5^{to} armónico

Los circuitos equivalentes presentados en la sección II-A permiten evaluar los efectos de una avería en bobinados de estátor para cualquier armónico de orden h . Cuando las corrientes de fase son asimétricas, las componentes de secuencia tanto positivas como negativas pueden utilizarse para detectar averías. Por otro lado, en un sistema de tensiones distorsionadas pero perfectamente balanceado, el armónico de orden 5 posee únicamente la componente de secuencia negativa. Es decir, cuando las tensiones aplicadas a la MI son equilibradas, el modelo de la MI para el estado estacionario cuando $h = 5$ puede expresarse como:

$$\tilde{V}_{sn5} = (r_s + j5\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{sn5} - \frac{1}{3}\mu_{qd}^*\tilde{I}_f \right) + j5\omega_e L_m \tilde{I}_{rn5} \quad (16)$$

$$0 = \left(r_r \frac{5}{6-s} + j5\omega_e L_r \right) \tilde{I}_{rn5} + j5\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{sn5} - \frac{1}{3}\mu_{qd}^*\tilde{I}_f \right) \quad (17)$$

$$\mu_{qd}\tilde{V}_{sn5} = K(r_s + j5\omega_e L_{ls})\tilde{I}_f + r_f\tilde{I}_f \quad (18)$$

En la Fig. 2(a) se presenta el circuito equivalente de secuencia negativa para el 5^{to} armónico espacial. La Fig. 2(b) muestra el circuito equivalente para la falla.

Basándose en los circuitos equivalentes obtenidos, a continuación, se expresan las siguientes particularidades:

- En un sistema balanceado con distorsión, el armónico de orden 5, ya sea de tensión o de corriente, posee solo la componente de secuencia negativa. En este caso, se cumple las siguientes condiciones:

$$\tilde{V}_{sp5} = 0 \quad \rightarrow \quad \tilde{I}_{sp5} = 0 \quad (19)$$

- En un sistema desbalanceado con distorsión, el 5^{to} armónico de corriente contendrá tanto la componente de secuencia negativa como la de secuencia positiva. En caso de producirse una avería en bobinados de estátor, la componente de secuencia positiva producto del desbalance de impedancias puede utilizarse como un indicador directo de la severidad de la falla dado que la corriente se define por:

$$\tilde{I}_{sp5} = \frac{1}{3}\mu_{qd}\tilde{I}_f \quad (20)$$

- La representación de r_r como una función del deslizamiento reproduce los diferentes posibles estados carga

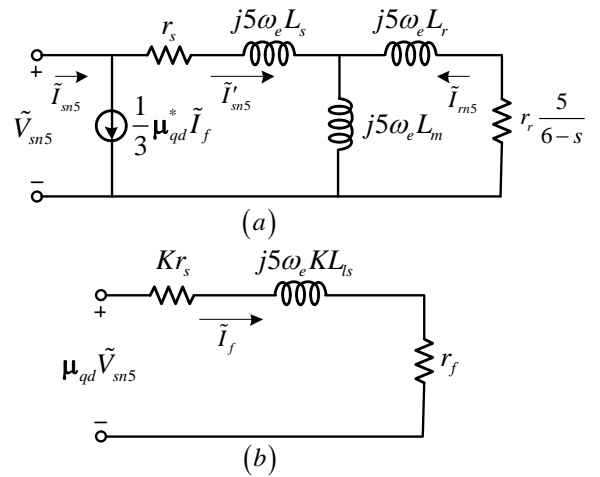


Fig. 2: Circuitos equivalentes para el 5^{to} armónico. (a) Componente de secuencia negativa. (b) Circuito de falla.

y de velocidad angular de la MI ($0 \leq s < 1$). En este caso particular, tanto para el rotor bloqueado ($s = 1$) como para el estado de plena carga ($s \rightarrow 0$), prácticamente, el modelo presenta una impedancia equivalente en estado estacionario, con las siguientes características:

$$r_{r(s=1)} = r_r \quad r_{r(s \rightarrow 0)} = \frac{5}{6}r_r \quad (21)$$

- Para el circuito equivalente de la Fig. 2(a), las resistencias del bobinado, r_s y r_r , pueden despreciarse dado que la rama central del circuito, $j5\omega_e L_m$, presentará una elevada impedancia. Además, considerando que las inductancias $j5\omega_e L_m > j5\omega_e L_s$ y $j5\omega_e L_m > j5\omega_e L_r$, entonces, la componente de secuencia negativa también podría utilizarse como un indicador indirecto de la severidad de la avería y puede aproximarse de la siguiente manera:

$$\tilde{I}_{sn5} = \frac{1}{3}\mu_{qd}\tilde{I}_f + \frac{\tilde{V}_{sn5}}{j5\omega_e(L_{ls} + L_{lr})} \quad (22)$$

- Para el circuito equivalente de la Fig. 2(b), un cortocircuito franco definido por $r_f = 0$ genera una elevada corriente de falla limitada solo por las características propias del bobinado considerados en los parámetros r_s , L_{ls} y por la gravedad de la falla, μ_{qd} .
- La tensión aplicada entre los bornes de las espiras en cortocircuito es una fracción de la tensión de secuencia negativa cuya magnitud queda definida por la severidad de la falla, $\mu_{qd}\tilde{V}_{sn5}$.
- Cuando se produce un cortocircuito entre espiras, la corriente de falla, \tilde{I}_f , produce un bajo desequilibrio en las corrientes de fase que usualmente las protecciones convencionales no lo detecta. La corriente de falla circulando por las espiras en cortocircuito del bobinado de estátor puede alcanzar magnitudes varias veces mayores a la corriente de fase nominal.

III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para evaluar el comportamiento de la MI ante un cortocircuito entre espiras en bobinados se llevaron a cabo ensayos de simulación numérica empleando el modelo dinámico presentado en la sección II con tensiones distorsionadas. Las simulaciones fueron realizadas para diferentes estados de operación y distintas severidades de falla. 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 I. Las particularidades de la MI analizada guardan relación con el prototipo de MI que será utilizado en los futuros ensayos de laboratorio para validar de manera experimental los modelos propuestos.

TABLA I: Características de la MI ensayada

11.8 A	380 V	1470 rpm	50 Hz
r_s	0.9Ω	r_r	0.4Ω
$L_{ls} = L_{lr}$	4 mH	L_m	125 mH
Conexión Bobinas	Serie	Bobinas/Fase	8
Espiras/Bobina	18	Espiras/Fase	144

A continuación, se analizan los efectos sobre las tensiones y las corrientes de fase que produce un cortocircuito entre espiras en los bobinados de la fase a .

La avería se provoca de manera intencional para diferentes condiciones de funcionamiento, considerando: (i) distintas cantidad de espiras en cortocircuito [1(0,7%) – 2(1,4%) – 5(3,5%) – 10(7%) – 20(14%)], (ii) bajo diferentes estados de carga (0% – 25% – 50% – 75% – 100%) y (iii) cambios en la resistencia de falla, r_f .

En la Fig. 3 se muestran las tensiones de alimentación equilibradas y distorsionadas aplicadas a la MI. Las tensiones presentan un factor de distorsión armónica total de $THD_v = 15\%$ debido a la presencia del 5^{to} armónico. Estas condiciones se mantienen para todos los ensayos realizados. En la Fig. 4 se muestra las corrientes de fase, i_{abc} , para la MI operando con carga nominal, $\tilde{I}_{sp1} = \tilde{I}_n$. Sobre la misma figura se muestra en detalle la forma de onda de las corrientes. Para evaluar el comportamiento de la MI con falla, un cortocircuito franco se produce a los 3 s con una resistencia de falla, $r_f = 0$. Se puede observar que las señales de corriente distorsionadas se vuelven asimétricas al momento de producirse la avería. La causa de esta asimetría se debe, principalmente, a las variaciones de las impedancias

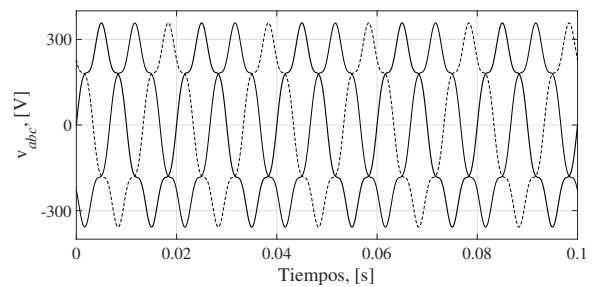


Fig. 3: Tensiones de alimentación distorsionadas.

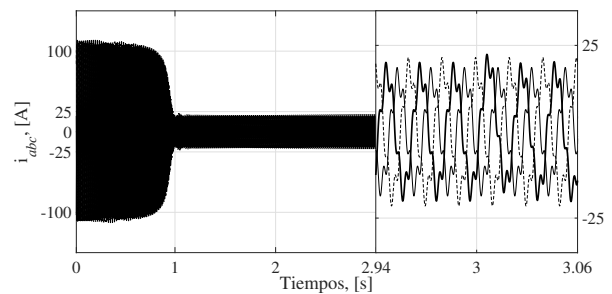


Fig. 4: Corrientes de estátor distorsionadas con un cortocircuito entre 10 espiras del bobinado de la fase a .

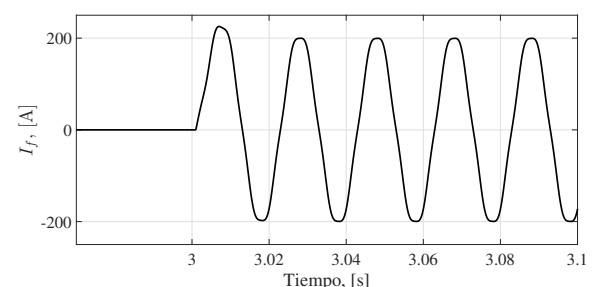


Fig. 5: Corriente de falla debido a la avería de estátor.

de fase provocadas por la corriente de falla, presentada en la Fig. 5. Notar que la magnitud de la corriente \tilde{I}_f circulando entre las 10 espiras dañadas del bobinado supera en varias veces la magnitud de la corriente nominal \tilde{I}_n .

Tal como se mencionó anteriormente, este tipo de avería en bobinados del estátor produce bajos desequilibrio de corriente. Para visualizar estos efectos, en la Fig. 6 se muestra el porcentaje de desequilibrio de corriente ($\% \tilde{I}_{sn1} / \tilde{I}_{sp1}$) para las severidades de falla y estados de carga anteriores mencionados en (i)-(ii). Como puede apreciarse, pocas espiras dañadas, entre 1 – 5 en cortocircuito, producen bajos desequilibrios de corrientes, entre 1%–10% $\tilde{I}_{sn1} / \tilde{I}_{sp1}$, generando una elevada corriente de falla dentro del bobinado. Por estas características, es fundamental detectar este tipo de avería en su estado incipiente dado que su rápida evolución deteriora las espiras contiguas favoreciendo la ocurrencia de las fallas de mayor gravedad.

En la Fig. 7 se presentan las magnitudes de la corriente de falla \tilde{I}_f para diferentes cantidades de espiras dañadas y variaciones en la resistencia de falla, r_f . Dicha resistencia representa la resistencia de contacto entre las espiras en cortocircuito. Notar que la condición más desfavorable se consigue para un cortocircuito franco, $r_f = 0$. En cambio, la magnitud de la corriente de falla será menor cuando mayor sea el valor de r_f , es decir, para mejores condiciones del aislamiento entre las espiras del bobinado.

En la Fig. 8 se presentan las magnitudes de la componente de secuencia \tilde{I}_{sp5} para diferentes cantidades de espiras en cortocircuito para la condición de $r_f = 0$. Dado que las variaciones de la velocidad del rotor, relativa a los cambios de carga como una función del deslizamiento, s , no impacta sobre la dinámica del circuito equivalente de falla [ver en la Fig. 1(c)]; y del mismo modo, es poco relevante sobre

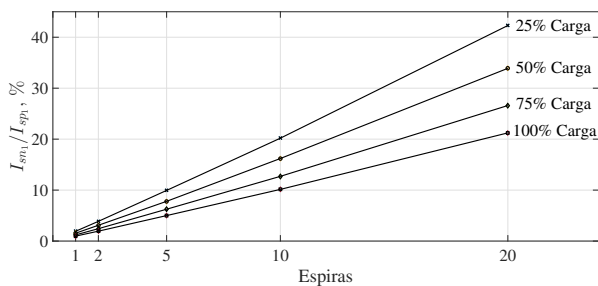


Fig. 6: Desequilibrio de corrientes para distintas severidades de falla.

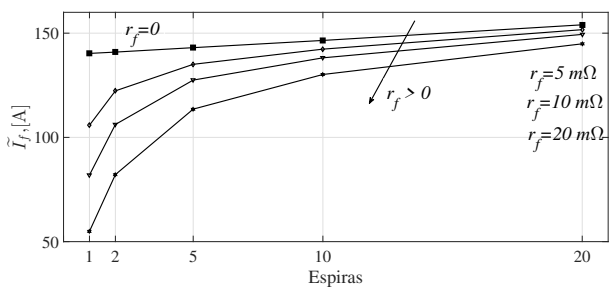


Fig. 7: Magnitud RMS de la corriente de falla para distintas resistencias de falla, r_f .

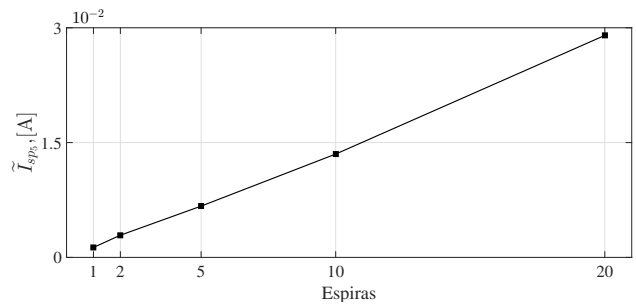


Fig. 8: Magnitud de la componente de secuencia positiva del 5^{to} armónico.

el circuito equivalente propuesto para el 5^{to} armónico (ver la descripción del modelo en la sección II-B). Por lo tanto, las magnitudes de corrientes obtenidas son, prácticamente, iguales para cualquier estado de carga.

Para la descomposición de las tensiones y las corrientes en componentes de secuencia positiva y negativa se utiliza la teoría entre marcos de referencia sincrónicos [14], [15]. Este método transforma las variables eléctricas en el marco de referencia abc hacia un nuevo marco de referencia qd girando a una velocidad angular arbitraria. Si la velocidad angular del marco de referencia es igual a la frecuencia de la componente contenida en la señal original, dicha componente puede separarse mediante un filtro pasa bajos. Una vez separada la componente para el i -ésimo armónico, se calcula la norma euclídea del vector filtrado para determinar el módulo de la señal obtenida.

Una vez aplicado el método de descomposición en secuencia, en la Fig. 9 se muestran las componentes de corriente de estátor para la frecuencia fundamental (+1, -1) y para el 5^{to} armónico (-5, +5). Con el fin de evaluar la evolución de los armónicos ante la falla, en las figuras se superponen los resultados obtenidos para la MI sin averías y con la avería. Para el caso de la MI en condiciones normales de funcionamiento, tanto la terna de tensiones de alimentación como las corrientes de estátor son equilibradas. Para esta condición, se cumple que $\tilde{I}_{sn1} = 0$ y $\tilde{I}_{sp5} = 0$. Por otra lado, para la MI con una avería, el desequilibrio de corrientes puede visualizarse en las magnitudes no nulas de las componentes (-1, +5). Bajo esta condición, debe cumplirse que $\tilde{I}_{sn1} \neq 0$ y $\tilde{I}_{sp5} \neq 0$. Notar que las componentes de secuencia \tilde{I}_{sp1} y \tilde{I}_{sn5} , prácticamente, mantienen la misma magnitud para el total del tiempo de ensayo. Sin embargo, la componente de secuencia \tilde{I}_{sp5} en la Fig. 9, luego del transitorio de corriente, incrementa su magnitud al instante de producirse la avería. Dado que esta señal es proporcional a la severidad de la falla [ver en la Ec. (20)], un cortocircuito entre espiras puede detectarse mediante el seguimiento de tal componente de secuencia positiva, \tilde{I}_{sp5} .

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un modelo de la Máquina de Inducción (MI) considerando los armónicos de la red. Dado que diferentes perturbaciones producen similares efectos sobre las corrientes de estátor, un modelo analítico preciso es fundamental para validar los métodos de detección y diagnóstico de averías. A diferencia de los modelos anteriores que consideran solo el efecto sobre la componente

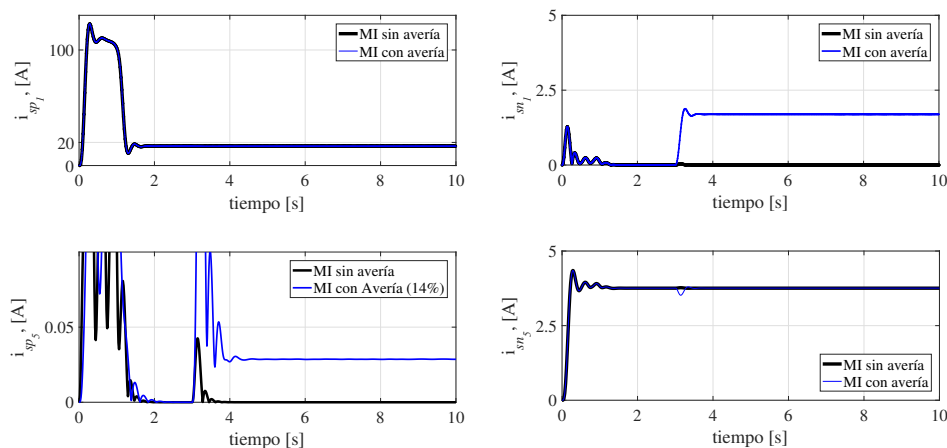


Fig. 9: Componentes de secuencia positiva y negativa de la corriente de estátor.

de frecuencia fundamental, el modelo propuesto permitió evaluar el efecto de un cortocircuito entre espiras sobre las componentes armónicas contenidas en la tensión de alimentación. Los resultados de simulación permitieron evidenciar los efectos adversos que puede ocasionar un bajo porcentaje de espiras en cortocircuito debido a la elevada corriente de falla sobre el bobinado de estátor. De esta forma se demostró que un cortocircuito franco entre pocas espiras dañadas, entre $1(0,7\%) - 5(3,5\%)$ espiras, produce una corriente de falla de elevada magnitud ($140A - 150A$) RMS. Por otro lado, se demostró que un avería en bobinados ocasiona el desequilibrio de las corrientes de estátor. En este sentido, utilizando la teoría entre marcos de referencias síncronas, la descomposición de la corriente distorsionada permitió visualizar el comportamiento de las componentes de secuencias frente a la avería. En particular, el seguimiento de la componente de secuencia positiva para el armónico de orden 5 posibilitó detectar un cortocircuito incipiente entre espiras del bobinado dado que modifica su amplitud al instante de producirse la falla. Por otra parte, si existe desbalance en los armónicos de tensión esto podría dificultar el diagnóstico y su efecto debe ser analizado. En trabajos futuros se pretende validar el modelo de manera experimental y evaluar los efectos combinados de otras perturbaciones usuales en el ámbito industrial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) y la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

REFERENCIAS

- [1] M. A. Mazzeletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, and D. R. Espinoza-Trejo, "Efectos del cortocircuito entre espiras en máquinas síncronas de imanes permanentes," in *Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE*, June 2014, pp. 531–536.
- [2] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, Dec 2008.
- [3] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*, 1st ed. Springer, Verlag, 2006.
- [4] S.-B. Lee, R. Tallam, and T. Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 865–872, May 2003.

- [5] S. S. Refaat, H. Abu-Rub, M. S. Saad, E. M. Aboul-Zahab, and A. Iqbal, "Discrimination of stator winding turn fault and unbalanced supply voltage in permanent magnet synchronous motor using ANN," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013*, May 2013, pp. 858–863.
- [6] P. M. de la Barrera, G. R. Bossio, and R. Leidhold, "Online voltage sensorless high-resistance connection diagnosis in induction motor drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4374–4384, July 2015.
- [7] J. Zhang, J. Hang, S. Ding, and M. Cheng, "Online diagnosis and localization of high-resistance connection in PMSM with improved fault indicator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3585–3594, May 2017.
- [8] 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.
- [9] Y. Duan and H. Toliyat, "A review of condition monitoring and fault diagnosis for permanent magnet machines," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–4.
- [10] R. Z. Haddad and E. G. Strangas, "On the accuracy of fault detection and separation in permanent magnet synchronous machines using MCSA/MVSA and LDA," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 3, pp. 924–934, Sept 2016.
- [11] S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta, *Induction Motor Fault Diagnosis. Approach through Current Signature Analysis*, 1st ed. Springer, 2016.
- [12] 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.
- [13] M. A. Mazzeletti, L. N. Pagano, and G. R. Bossio, "Detección de asimetrías en el estátor de los motores de inducción accionados por arrancadores suaves," in *XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPICXV)*, S.C. de Bariloche, Argentina, 2013, pp. 917–922.
- [14] L. N. Pagano, M. A. Mazzeletti, and G. R. Bossio, "Descomposición en componentes de secuencia de las corrientes de un motor de inducción accionado por un arrancador suave," in *XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPICXV)*, S.C. de Bariloche, Argentina, 2013, pp. 1023–1028.
- [15] P. Krause, O. Wasynczuk, s. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed. New Jersey, USA: IEEE Press, 2013.
- [16] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, May 2002.
- [17] C. H. De Angelo, G. R. Bossio, S. J. Giaccone, M. I. Valla, J. A. Solsona, and G. O. Garcia, "Online model-based stator-fault detection and identification in induction motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4671–4680, Nov 2009.